

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



Université Abbès Laghrour Khenchela

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie

Département d'Ecologie et Environnement

Réf : .... /....

Mémoire de fin d'étude du diplôme de

Master Académique

Domaine : Science de la Nature et de la Vie

Filière : *Ecologie et environnement*

Spécialité : Ecologie Fondamentale et Appliquée

*Thème*

**ESTIMATION ET CARTOGRAPHIE DE  
VULNÉRABILITÉ DES EAUX SOUTERRAINES ET  
RISQUE DE CONTAMINATION (CAS DU SOUS-  
BASSIN GAREAT EL TARF)**

Présenté par :

- **BELHADDAD Yassamina**
- **BAALI Ahlem**

Devant le jury :

**Président**      Mr AOUIDENE Laiche      (MCB, Université Abbès Laghrour Khenchla)  
**Encadreur**      Mr BOULABEIZ Mahrez      (MCB, Université Abbès Laghrour Khenchla)  
**Examinatrice**      Mme Dib Dounia      (MAA, Université Abbès Laghrour Khenchla)

ANNEE UNIVERSITAIRE : 2017 / 2018



# *Remerciement*

Tout d'abord, nos remerciements vont à Dieu le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la patience, la santé et la force d'accomplir notre travail.

Ensuite, nous tenons à remercier sincèrement notre encadreur **Mr. BOULABEIZ Mahrez** qui a été toujours montré à l'écoute et disponible tout au long de la réalisation de notre mémoire et sans qui, il n'aurait jamais vu le jour, il a fait preuve de gentillesse et de patience à notre égard et c'est pour cela que nous sommes très reconnaissants et ravis d'avoir eu la possibilité de travailler avec lui.

Nous tenons à remercier spécialement **Dr. LARABA Rabah** chef du département qui nous a donné les moyens nécessaires pour réaliser nos projets.

Sans oublier Melle **T. Naziha** chef service à la direction Hydraulique de khanchela et la direction Hydraulique d'Oum El Bouaghi qui nous a donné les informations et les données nécessaires pour notre travail.

Enfin, nous remercions d'avance le jury pour l'intérêt qu'ils porteront à notre mémoire en acceptant de l'examiner et de l'enrichir par leurs propositions **Mr AOUIDENE Laiche** et **Mme DIB. Dounia**.



# *Dédicace*

## *Louange à dieu*

Je tiens à dédicacer ce modeste travail à ma famille :

A Mon père et ma très chère mère,

A mes frères Walid, Sofiane et Houssem.

A ma petite sœur Chourouk.

A mes belles sœurs Wided et Catherine.

Qui ont toujours su trouver les mots justes pour m'encourager, exprimer leur soutien et leur amour profond qu'ils ont pour moi.

Je tiens également à le dédier à ma chère amie, Ahlem pour son aide précieuse et son dévouement tout au long de ce projet qui n'aurait pas vu le jour sans son aide.

A mes proches amies Meriem, Asma, Majda, Rawya, Fedwa, Nedjwa, Imen, Selwa, et Oumaima.

A mes collègues et tous mes professeurs

Et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce

Projet soit possible, je vous dis merci.



# *Dédicace*

## *Louange à dieu*

Plus que jamais Je dédie ce modeste travail à ceux qui me Sont les plus chers au monde:

A Mon père.

A ma très chère mère,

Pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse,  
Leur soutien et leurs prières tout au long de mes études.

Que dieu leur procure bonne santé et longue vie.

A mes frères Fouzi et Hamza.

A mes sœurs Amel, Ibtesssem et Soumia

Qui m'ont toujours conseillés

Puis mes beaux-frères et ma belle-sœur qui m'ont encouragée.

A celui que j'aime beaucoup et qui m'a soutenue tout au long de

Ce projet A mon binôme Yassamina

A toute ma famille et mes amies Selwa, Rayen, Rawya, Imen et Fedwa, Oumaima.

A mes collègues et tous mes professeurs

Et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce

Projet soit possible, je vous dis merci.

## Liste des Figures

<b>Fig. N°</b>		<b>Page</b>
01-	Situation géographique de bassin versant Great El Tarf.....	4
02-	Le relief du bassin de Gareat el Tarf.....	6
03-	Réseau hydrographique de Bassin versant Gareat El Tarf.....	8
04-	Carte géologique du sous-bassin versant Gareat El Tarf (Extrait de la carte géologique Nord Est de l'Algérie 1:50000).....	13
05-	Grands types de pollution et leurs effets sur l'environnement (Atteia, 2005).....	22
06-	Pollution industrielle.....	24
07-	La pollution agricole.....	25
08-	La pollution domestique et urbaine.....	26
09-	Schéma simplifié de la pollution des eaux.....	33
10-	Schéma de la contamination des eaux souterraines (Amharref et al., 2007).....	34
11-	Les critères de vulnérabilité.....	36
12-	Domaines d'utilisation des cartes de vulnérabilité.....	39
13-	La méthode DRASTIC, ses paramètres et leur poids.....	43
14-	Tache effectuée par un logiciel SIG.....	46
15-	Les différents outils de l'utilisation de l'ArcGis (Source : ESRI, Inc).....	47
16-	Élaboration des cartes de vulnérabilités par la méthode DRASTIC.....	48
17-	Localisation des forages utilisés pour la réalisation des cartes de vulnérabilité (DHOB).....	51
18-	Coupe hydrogéologique I, (NE – SW).....	52
19-	Coupe hydrogéologique II, (NW – SE).....	53
20-	Étapes d'élaboration de la carte finale de vulnérabilité.....	54
21-	La méthode DRASTIC (paramètres et poids).....	59
22-	Carte du Profondeur de la nappe de la zone d'étude.....	61
23-	Carte de Recharge de la nappe de bassin du Gareat El Taf.....	63
24-	Carte de La zone saturée.....	65
25-	Carte de texture du sol.....	66
26-	Carte des pentes du bassin versant de Gareat El Tarf.....	68
27-	Carte de la zone non saturée.....	69
28-	Carte de perméabilité du bassin versant de Gareat El Tarf.....	71

29-	Calcul de l'indice DRASTIC de vulnérabilité par Arc Gis.....	72
30-	Carte de vulnérabilité à la pollution de bassin du Gareat El Tarf.....	73
31-	Représentation l'indice de vulnérabilité DI en %.....	74

# Liste des tableaux

Numéro de tableau	Le titre de tableau	page
1.	les caractéristiques morphométriques de Bassin versant Gareat El Tarf (DFOB)	9
2.	Résumé de la colonne lithostratigraphique du sous-bassin versant de Gareat El Tarf	19
3.	Les différents types de polluant des eaux souterraines (Bordet.J, 2007).	27
4.	Critères de vulnérabilité intrinsèque relatifs au sol. (Mardhel, V., Dorfliger,N. (2002).	35
5.	Critères de vulnérabilité intrinsèque relatifs à la zone saturée saturée (Mardhel, V., Dorfliger,N. (2002).	38
6.	Type, sources des données et mode de traitement de chaque paramètre.	55
7.	Paramètres de la méthode DRASTIC (Mardhel V et al., 2005)	57
8.	Les cotes des paramètres de la méthode DRASTIC (D'après LallemandeBarrès; 1994)	58
9.	Indices de degré de vulnérabilité.	59
10.	Pois et cote du paramètre profondeur à la nappe	61
11.	Pois et cote du paramètre de Recharge de la nappe de Gareat El Tarf.	63
12.	Pois, cote et indice du paramètre Lithologie de l'aquifère de Gareat Tel Tarf.	64
13.	Pois et cote des types de sols de Gareat El Tarf	66
14.	Pois et cote du paramètre de Pente de Gareat El Tarf.	67
15.	Pois et cote du paramètre Impacte de la zone vadose de Gareat El Tarf.	69
16.	Pois et cote pour le paramètre conductivité hydrique de l'aquifère Gareat El Tarf.	70
17.	l'indice de DRASTC de Bassin versant Gareat El Tarf avec le Degré de vulnérabilité et le pourcentage des zones	73

# Liste des abréviations :

<b>DBO</b>	Demande Biologique d'Oxygène.
<b>DCO</b>	Demande Chimique d'Oxygène.
<b>DHKH</b>	la direction Hydraulique de wilaya de khanchela.
<b>DHOB</b>	la direction Hydraulique de wilaya d'Oum El Bouaghi.
<b>EPA</b>	Environnementale Protection Agency.
<b>ESRI</b>	Environmental Systems Research Institute.
<b>ETP</b>	Evapotranspiration.
<b>IDW</b>	Inverse Distance weighted.
<b>MNT</b>	Modèle Numérique de Terrain.
<b>PVC</b>	Polychlorure de Vinyle.
<b>SIG</b>	Systèmes d'Informations Géographique.
<b>USEPA</b>	United States Environmental Protection Agency.

# Table des matières

Page

Remerciement.....	I
Dédicace .....	II
Introduction générale.....	1

## CHAPITR I: *Presentation De La Zone D'étude*

1	Presentation de la zone d'etude : .....	3
1.1	Climat.....	4
1.2	Couvert végétal .....	5
1.3	Facteur orographique .....	5
1.4	Le relief du bassin de Gareat El Tarf .....	6
1.5	Réseau hydrographique.....	7
1.6	Cadre morphométrique .....	9
2	Conclusion .....	10

## CHAPITR II : *Cadre Geologique*

1	Introduction .....	11
2	Cadre général.....	11
2.1	La série stratigraphique .....	12
2.2	Lithostratigraphie du bassin de Gareat El Tarf .....	12
2.2.1	Trias.....	12
2.2.2	Crétacé.....	13
2.2.2.1	Crétacé inférieur.....	13
2.2.2.1.1	Barremien superieur : .....	14
2.2.2.1.2	Aptien .....	14
2.2.2.1.3	Albien .....	14
2.2.2.1.4	Crétacé supérieur .....	15
2.2.2.1.5	Cénomaniens inférieur .....	15
2.2.2.1.6	Turonien:.....	15
2.2.2.1.7	Turonien (moyen et supérieur) .....	15
2.2.2.1.8	Coniacien .....	15
2.2.2.1.9	Santonien .....	15
2.2.2.1.10	Campanien : .....	16
2.2.2.1.11	Maestrichtien inférieur.....	16
2.2.2.1.12	Maestrichtien supérieur. ....	16
2.2.3	Eocène.....	16
2.2.3.1	Montien .....	16
2.2.3.2	Ypresien et Thanetien.....	16
2.2.4	Miocène .....	17
2.2.4	Miocène inférieur.....	17
2.2.4.1.1	Aquitano-Burdigalien : .....	17
2.2.4.1.2	Langhien-Serravalien : .....	17
2.2.4	Miocène supérieur.....	17

2.2.4.2.1	Tortonien greseux blanc .....	17
2.2.4.2.2	Tortonien supérieur continental : .....	17
2.2.5	Le Mio-pliocène.....	17
2.2.6	Le Quaternaire .....	18
3	Conclusion : .....	20

### **CHAPITRE III : REVUE DE LITTÉRATURE**

1	Introduction .....	21
2	Concept de pollution.....	21
2.1	Pollution de l'eau .....	21
2.2	Contamination de l'eau souterraine .....	21
3	pollution de l'eau et modes de transfert des polluants : .....	22
3.1	Pollution ponctuelles .....	22
3.2	Pollution diffuse .....	23
3.3	Les principales sources de pollution des eaux souterraines.....	23
3.3.1	Pollution naturelle : .....	24
3.3.2	Pollution industrielle : .....	24
3.3.3	Pollution agricole:.....	24
3.3.4	Pollution domestique et urbaine : .....	25
3.4	Types de pollution .....	27
3.4.1	Selon la nature des polluants : .....	27
4	Méthodes D'estimation et De Cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines	30
4.1	Notion de vulnérabilité .....	30
4.2	Concept de vulnérabilité des eaux souterraines.....	30
4.2.1	Classification des méthodes existantes .....	32
4.2.2	Types de vulnérabilité.....	32
4.2.3	Indice de vulnérabilité et cartographie.....	33
4.2.4	Critères de vulnérabilité intrinsèque .....	35
4.2.4.1	Critères communs au sol, à la zone non saturée et la zone saturée .....	37
5	Cartographie De La Vulnerabilite Des Eaux Souterraines.....	38
5.1	OBJET DES CARTES DE VULNERABILITE.....	38
5.2	METHODES POUR L'ESTIMATION DE LA VULNERABILITE.....	40
5.3	Aspect théorique de la méthode DRASTIC.....	41
5.3.1	conditions d'utilisation et hypothèses simplificatrices .....	41
5.3.2	Présentation de la méthode DRASTIC .....	41
5.3.3	Description et évaluation des sept paramètres hydrogéologiques.....	43
5.3.3.1	Profondeur de la nappe (D) .....	43
5.3.3.2	La Recharge efficace (R).....	43
5.3.3.3	La lithologie de l'aquifère (A) .....	44
5.3.3.4	Le Type du sol (S).....	44
5.3.3.5	La Topographie (T) .....	44

5.3.3.6	L'impacte de la zone non saturée (I).....	45
5.3.3.7	La Conductivité hydraulique de l'aquifère (C).....	45
5.4	Utilisation des SIG dans l'évaluation de la vulnérabilité des nappes .....	46
5.4.1	Présentation du logiciel Arc GIS Desktop .....	47
6	Methodologie .....	48
7	Conclusion .....	49

### **CHAPITRE VI : cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines**

1	Introduction :.....	50
2	Methodes et outil.....	50
2.1	Choix de la méthode .....	50
2.2	Lithologie et géométrie de l'aquifère .....	50
2.2.1	Types de nappes .....	51
2.2.2	Coupes hydrogéologiques :.....	52
2.2.2.1	Coupe hydrogéologique I, (NE – SW).....	52
2.2.2.2	Coupe hydrogéologique II, (NW – SE).....	53
3	CARTOGRAPHIE DE LA VULNERABILITE .....	54
3.1	Méthodologie .....	54
3.2	Méthode DRASTIC .....	55
4	Résultats et discussion .....	60
4.1	Profondeur de la nappe (D).....	60
4.2	La Recharge efficace (R) .....	62
4.3	La Nature de la zone saturée (A) .....	64
4.4	La Texture du sol (S) .....	65
4.5	La Topographie (T).....	67
4.6	La Nature de la zone non saturée (I).....	68
4.7	La Perméabilité (C).....	70
4.8	Indice de vulnérabilité .....	72
5	Conclusion .....	75
	Conclusion générale : .....	76
	Bibliographie:.....	78
	Annexe .....	85

### **Introduction générale**

La pollution des eaux souterraines, causée ou induite par les activités humaines, est un phénomène qui produit depuis le premier Holocène, il y a environ 10 000 ans, lorsque l'humanité est devenue sédentaire et a commencé à coloniser les villages et à cultiver la terre.

Depuis la révolution industrielle, l'agriculture et l'urbanisation, ainsi que le développement économique, se sont développées et intensifiées à travers le temps en raison de la croissance démographique ont entraîné une augmentation de la consommation d'énergie et la production de déchets et avec elles la pollution des eaux souterraines associée. L'industrie est une autre activité humaine pertinente qui nuit à la qualité des eaux souterraines.

En Algérie la pollution de l'eau souterraine est causée par le secteur des industries lourdes (Annaba, Skikda et Gazaouet...), par le secteur agricole aussi (les engrais, les pesticides..) et urbaine (les eaux usées..). Notre pays et nos villes souffrent particulièrement de la pollution. Nos déchets sont collectés à 50% et stockés dans des sites incontrôlés. En somme, nous subissons le poids de la pollution qui affecte l'air que nous respirons, et la terre d'où nous tirons notre nourriture.

Le bassin versant de Gareat El Tarf situé dans une zone semi-aride où le contexte hydrologique est marqué par une variabilité spatio-temporelle, la problématique de l'eau devient de plus en plus inquiétante. Par ailleurs, les nappes souterraines sont des réservoirs qui se renouvellent très lentement et leur exploitation pour l'approvisionnement en eau potable et pour des fins d'irrigation risque d'entraîner leur épuisement. En effet, la dégradation de la qualité des ressources en eau par diverses sources de pollution constitue, dans certaines zones, une menace aussi importante que celle liée au déficit hydrique causé par les changements climatiques que connaît notre planète. C'est ainsi que la gestion des ressources en eaux, tant sur le plan quantitatif que qualitatif, est actuellement au centre d'une inquiétude universelle et attire de plus en plus l'attention des responsables des ressources hydriques et des aménageurs du territoire. Cette situation critique impose donc aux acteurs territoriaux politiques et économiques de définir des règles de gestion durable de la ressource en eau sans pour autant freiner les activités nécessaires au développement socio-économique.

La cartographie de la vulnérabilité constitue une des solutions face aux divers problèmes. 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.

### **Objectif de l'étude**

L'objectif principal de la présente mémoire est la cartographie les zones susceptibles d'être atteinte rapidement par une pollution dites vulnérables, en utilisant le modèle DRASTIC couplé avec un SIG sous ArcGis. Afin de définir des règles de gestion durable de la ressource en eau sans pour autant freiner les activités nécessaires au développement socio-économique.

Ce mémoire est organisé autour de 4 principaux chapitres, à savoir :

- Un chapitre concernant la description de bassin versant Gareat El Tarf.
- Un chapitre traite la géologie de la zone d'étude.
- Un chapitre concernant une étude bibliographique sur la vulnérabilité, la définition de concepts de pollution, de méthode DRASTIC
- Un chapitre majeur des considérations pratique, présentant la description de la méthode DRASTIC ainsi qu'une interprétation des résultats obtenus de cartes de vulnérabilité. En dernier une conclusion générale et des recommandations.

# **CHAPITRE I:**

*Présentation de la zone  
d'étude*

## 1 Présentation de la zone d'étude :

Le bassin versant de Gareat El Tarf est une entité hydrographique des bassins versants des hauts plateaux constantinois (9578 km<sup>2</sup> de superficie), (**figure 1**). Situé à l'extrême Nord-est algérien entre l'Atlas Talien et l'Atlas saharien (massif des Aurès).

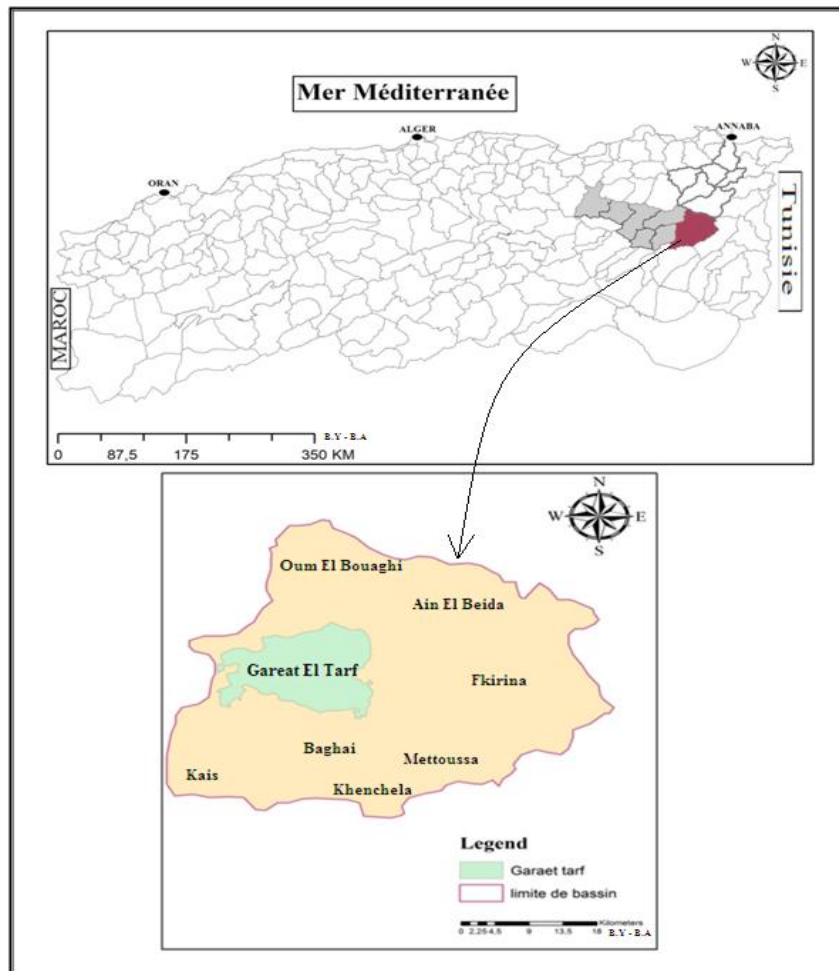
Il s'étend sur une superficie de 2432 km<sup>2</sup>, dont les coordonnées géographiques sont :

- longitudes 6°49' et 7°34' Est.
- Latitudes 35°22' et 35°56' Nord.

Il est marqué par un caractère endoréique et la présence de Gareat plus fréquent sous le nom de sebkha (lac salé), d'une superficie de 25500 hectares. Elle est située aux piedmonts du Djebel El-Tarf (1180 m), entre "Oum El-Bouaghi, Ain El-Beida et Baghaï. Limitée par la plaine de Bled El Meniri à l'est, au Sud par le douar de M" Toussa, à l'Ouest par Henchir Goraï et au Nord par Djebel El-Tarf et la plaine de Medfoune. Garaet El-Tarf est réputée pour sa fréquentation hivernale par les Grues cendrées *Grus grus* (Metzmacher, 1979, Houhamdi et al., 2008) et du point de vue végétation, la Garaet est entièrement entourée par des champs de culture céréalière et renferme une richesse floristique peu importante, dissimulée dans les touffes de *Juncus Acutus* et *Juncus Aaritimus* entourant le plan d'eau (Saheb, 2003).

Le bassin versant de Garaet Tarf est limité comme suit :

- Au nord, la ligne de crêt, de direction NW-NE des massifs de Sidi Reghis et Ammamrat El Kebir.
- A l'Est, la ligne de crêt, de direction NE-SW des massifs de Djebel Fedjidjet, Djebel Boutakhma, Tafrennt et Chettaia.
- Au Sud, la ligne de crêt de direction SE-SW, des djebels Feraoun, Aurès, el Aoud.
- A l'Ouest le talweg de Oued Gueiss, Djebel Fedjoudj et Djebel Tarf.



**Fig. (01):** Situation géographique de bassins versants Great El Tarf.

## 1.1 Climat

Le sous bassins de Gareat el Tarf, se caractérise par un climat de type semi-aride. Le sud, trop influencé par les courants d'airs froids et humides en provenance des Aurès où l'altitude dépasse les 1200 m, ou la moyenne annuelle des précipitations est supérieure à 450 mm.

Le nord, qui est une vaste plaine ou l'altitude décente jusqu'à moins de 850 m, ou les précipitations sont moins importants (400 mm).

Les températures moyennes mensuelles présentent de très importantes variations saisonnières, l'été est très chaud la température atteint sont maximum au mois de juillet, avec 25,8 °C. L'hiver est relativement doux les températures restent supérieur à 6°C et inférieur à 8 °C janvier étant le mois le plus froid la température descend jusqu'à 6,6 °C (Dali, N. 2009)

## 1.2 Couvert végétal

La végétation ne trouve pas des conditions favorables (lumière, température, humidité de l'air, composition chimique de l'eau...), pour sa croissance, la couverture végétale est xérophile (adaptée à l'aridité), l'arbre est absent, seules les plantes steppiques comme le Diss (*Ampelodesma mauritanica*). En revanche, les cultures de blé et de l'orge peuvent se faire sans irrigation sur ces vastes hauts plains.

Le sud du bassin de Garaet El Tarf dispose en altitude de belles forêts constituées essentiellement par de pin d'Alpes, genévriers, ifs, à partir de 1500 m des forêts de cèdres. Les prairies sont bien représentées ; et les périmètres irrigués sont développés surtout dans la plaine de F'kirina et Remila. Tout autour de la Sebkha subsiste une végétation herbacée composée essentiellement d'Armoise blanche et d'Atriplex.

## 1.3 Facteur orographique:

Dans la région, il existe une multitude de montagnes qui bordent la plaine à l'Est, au Nord et au Sud, leurs altitudes sont supérieures à 1000m (Dali, N. 2009), les plus importantes sont :

- Djebel Guern Ahmar (1200m).
- Djebel Fedjijet (1291m)
- Djebel Boutekhma (1349m).
- Djebel Djazia (1192m).
- Djebel Bardo (1110m).
- Djebel el Gala (1200m)
- Djebel el Zorge (1129m).

À partir de ces montagnes de nombreux cours d'eau temporaires donnent naissance; et forment le réseau hydrographique.

D'une façon générale, l'écoulement se fait de l'Est vers l'Ouest, en direction de la sebkha de Garaet Et Tarf, les trois oueds temporaires les plus importants sont:

- \_ Oued Nini.
- \_ Oued oulmene.
- \_ Oued Isfer.

#### 1.4 Le relief du bassin de Gareat el Tarf :

Le bassin de Gareat El Tarf constitue une dépression endoréique très étendue et relativement élevée, environ 960 m, qui a reçu tous les apports d'érosion des reliefs environnants.

La géomorphologie est dominée par des hautes plaines parsemées des dépressions constituant le chott (Gareat El Tarf), avec une altitude d'environ 830 m ce dernier s'étend sur 20 km de long et 15 km de large dont seulement le 1/4 est inondé, tout autour, on trouve des chotts satellites qui fusionnent avec celui d'El Tarf lors des grandes crues. Les périmètres de ce lac salé sont caractérisés par un niveau plat. Les massifs qui encadrent le bassin dépassent les 2000 m. Les bordures sud et nord du bassin sont marquées par des inclinaisons relativement importantes ; conséquence d'une activité tectonique ayant affecté ces régions, permettant un écoulement superficiel plus important (Guiraud 1973).

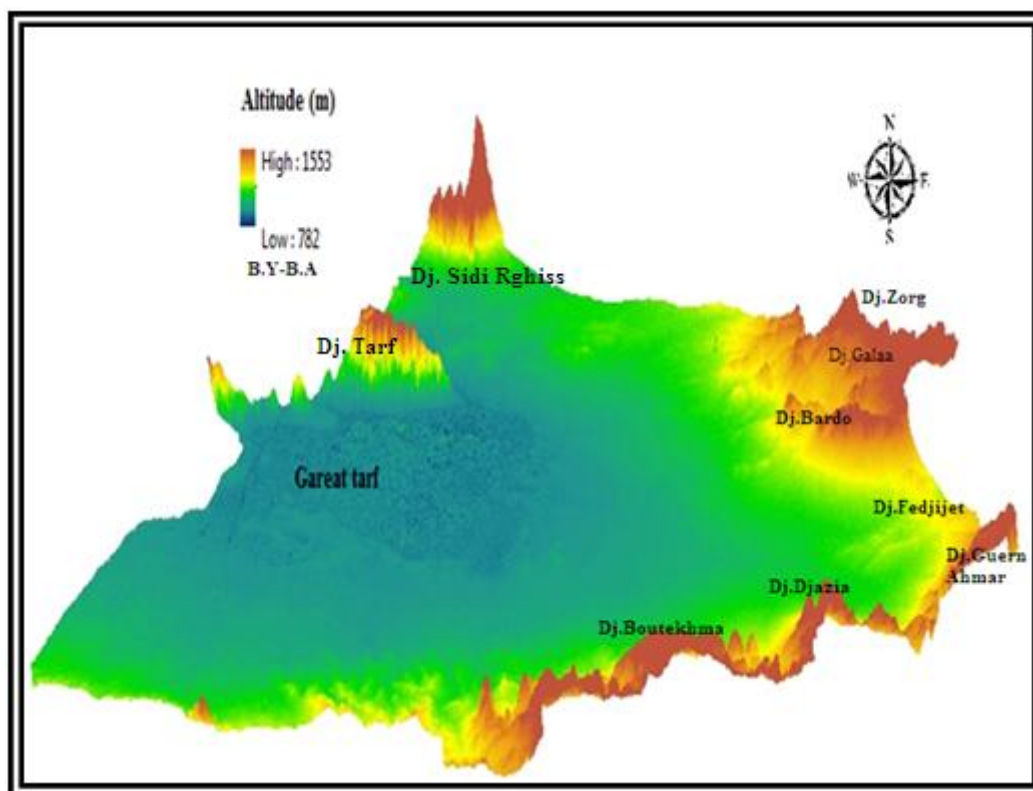


Fig. (02) : Le relief du bassin de Gareat El Tarf

## 1.5 Réseau hydrographique

La majorité des oueds sont endoréiques ; ils coulent en direction du lacs salés, ces derniers sont alimentés principalement par Oued Boulefreiss, Oued Maarouf, Oued Remila et Oued Gueiss qui prennent naissance dans les Aurès. Plusieurs petits chotts sont entourés la Gareat dont les plus importants sont : le Chott El-Melah (875 ha), le Chott El-Oussera (135 ha), le Lac de Timerganine (570 ha) et Garaet Biar Es-Sebaa (200 ha) (dans la partie sud Wst de Gareat). Durant les années de grande pluviosité, tous ces petits chotts qui 41 constituent en réalité des petites sebkhas satellites de Garaet El-Tarf se fusionnent à cette Garaet augmentant ainsi sa superficie

- Oued Gueiss

C'est un oued permanent qui ouvre un long couloir dans l'Aurès ; il sort du djebel Noughiss, il va se jeter dans la Gareat El Tarf sous le nom d'oued Marouf.

- Oued El Hammam

Oued El Hammam sort du Kef El Biod (1815 m) par une étroite vallée sous le nom de Oued El Kissane, prend le nom d'oued El Hamma et débouche dans la plaine par 1m défilé de Foum Tfist près de la route de Khenchela et termine son parcours dans les chotts.

- Oued Baghai :

Oued Baghai prend source à djebel Chellalaia, montagne isolée au sud-est de Khenchela après avoir servi travers la route Khenchela-Zoui-Tébessa, arrose la plaine de Khenchela, Ksar Baghai et va se jeter dans la Guerat El Tarf ; il reçoit à gauche de petits affluents alimentés par des sources et qui sourdent du djebel Chabor (1216 m).

Oued Aimer, Oued Aissaoui, Oued Nini et Oued El Hassi ces oueds prennent sources successivement des massifs de Djebel Chettaia (1455 m), Djebel Knif (1224 m) Djebel Fedjidjet 1291 m et Dj.Galaa (1135 m) et se déversent à Gareat El Tarf.

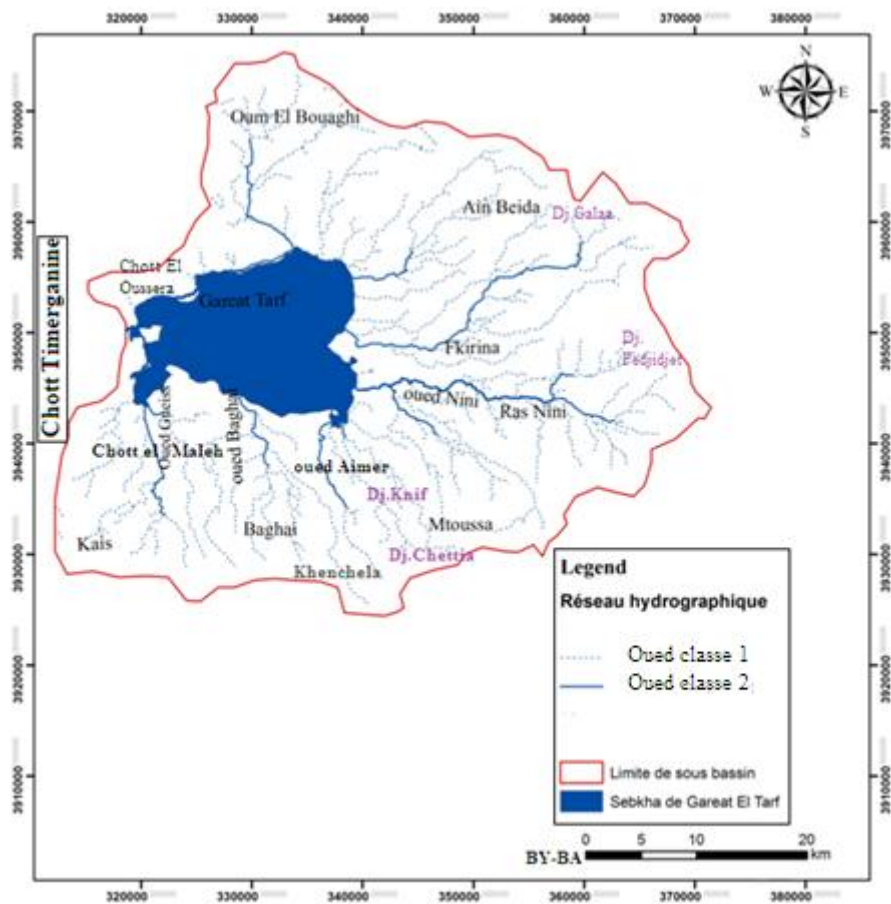


Fig. (03) : Réseau hydrographique de Bassin versant Gareat El Tarf.

### 1.6 Cadre Morphométrique :

Notre région appartient au quatre sous bassin, dont leurs caractéristiques (périmètre, la superficie, la largeur, la longueur) sont mentionnées dans le tableau si dessous

**Tableau.1** : les caractéristiques morphométriques de Bassin versant Gareat El Tarf (DFOB 2017)

Grand bassin versant	Code	bassin versant	Sous-bassin versant	Périmètre du bassin versant(km)	Surface du bassin versant(Ha)	Sup fortement sensible à l'érosion (Ha)	Longueur du bassin versant(km)	Largeur du bassin versant(km)
Hauts Plateaux Constantinois	07-07	Garaet El Tarf	OuedFaid Souar	62,38		2 138,26	22,83	8,36
			Oued Faid Medfoun	47,7	8 270		19,63	4,21
			Oued Isfer	81,74	24 193		33,69	7,18
			Oued Nini	107,78	50 275		41,89	12
Totale		65 104,00	2 138,26		165 104,00	2 138,26	4 942,00	4 060,94

Altitude moyenne (M)	Nombre de cours d'eau	Nombre des cours d'eau (M)
999,42	240	333,38
899,22	167	88,1
975,22	610	421,22
962,04	1258	1232,79
	4 942,00	4 060,94

## **2 Conclusion :**

Le bassin versant de Gareat El Tarf est une entité hydrographique des bassins versants des hauts plateaux constantinois ce caractérise par un climat de type semi-aride, situé à l'extrême Nord-est algérien d'une superficie de 2432 km<sup>2</sup>

Le bassin versant de Garaet Tarf est Comprend les viles "Oum El-Bouaghi, Ain El-Beida, Baghaï et khanchela. Au Nord par des massif de Sidi Reghis et Ammamrat El Kebir, à l'Est des massifs de Djebel Fedjidjet, Djebel Boutakhma, Tafrennt et Chettaia au sud des djebels Feraoun, Aurès, et à l'Ouest Djebel Fedjoudj et Djebel Tarf.

Les reliefs de bassin versant de Gareat El Tarf caractérisé par la variation des altitudes, les périmètres de Gareat El Tarf sont caractérisés par un niveau plat avec une altitude d'environ 782 m Les montagnes qui encadrent le bassin dépassent les 1500m.

La couverture végétale de bassin est xérophile (adaptée à l'aridité) composée essentiellement d'Armoise blanche et d'Atriplex (à la proximité de Sebkha), les plantes steppiques, les forets de pin d'Alpes, genévriers, ifs, et cèdres (dans le sud de Gareat El Tarf).

L'étude hydrogéologique de la plaine de Gareat El Tarf montre que la majorité des oueds coulent en direction du lacs salés (Sebkha). Ces derniers sont alimentés principalement par Oued Boulefreiss, Oued Remila et Oued Gueiss.

Le bassin est caractérisé par la présence de plusieurs petits chotts tels que le Chott El-Melah, le Chott El-Oussera le Lac de Timerganine

# **CHAPITRE II :**

*Cadre géologique.*

## 1 Introduction

La nature géologique des roches ou lithologie joue un rôle important sur le ruissellement, l'infiltration, l'érosion et le transport solide. Le type d'affleurement a une influence sur l'hydrologie de surface et le type du dépôt alluvionnaire. Elle permet aussi d'identifier les différents niveaux stratigraphiques susceptibles d'être aquifères.

Les caractéristiques géologiques du bassin de Gareat El Tarf conditionnent les écoulements des eaux souterraines et des eaux superficielles, ainsi que la géométrie des niveaux aquifères. Les grands traits géologiques de la région ont été tirés surtout des travaux de Laffite (1939).

## 2. Cadre général

Le bassin de Gareat El Taref appartient au domaine des hauts plateaux, et se dispose à la jonction entre celui-ci et la terminaison septentrionale du massif des Aurès.

La structure actuelle de l'Algérie du Nord résulte de l'évolution tertiaire et quaternaire du bassin Maghrébin. Les mouvements alpins ont permis l'individualisation de nombreux domaines, qui se différencient par l'ampleur de la déformation caractérisant chacun d'eux. Ces domaines dans l'Est algérien sont du nord vers le sud :

- Le domaine kabyle
- Le domaine des flyschs
- Le domaine tellien
- Le domaine atlasique
- La plate forme saharienne

Entre ces différents domaines existent des bassins de transition dont le mieux représenté est le bassin des sellaouas qui par la nature de ses formations géologiques fait la transition entre les bassins paléogéographiques du tell et de l'atlas saharien.

## 2.1 La série stratigraphique

D'après les études antérieurement réalisées par plusieurs géologues dans la région (Laffitte, (1939) ; Herkat, (1982), Marmi, (1995) et Guiraud, (1997), l'inventaire stratigraphique dressé a révélé que les séries les plus anciennes affleurant dans le secteur sont attribuées au Trias. Les dépôts les plus récents sont d'âge Quaternaire.

## 2.2 Lithostratigraphie du bassin de Garaet El Tarf :

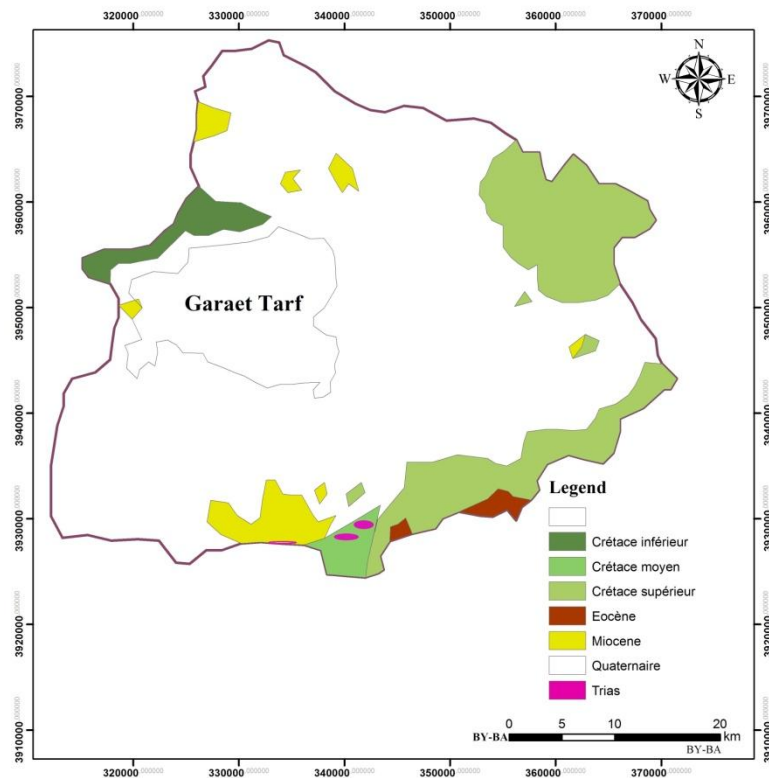
La lithostratigraphie a été tirée pour l'essentiel, des notices explicatives des cartes géologiques au 1/ 500 000 ; Garaet El Tarf, (Figure 4)

### 2.2.1 Trias

Une masse chaotique qui affleure toujours en position anormale, on le trouve sous forme de pointements ou de dômes très localisés dans les flancs des grands plis (Ghandriche, 1991). Les affleurements triasiques sont assez nombreux et très localisés à proximité de Khenchela, où il isole le Miocène du Crétacé, suivant une bande de 4 à 5 km de long et de 300 à 400 m de large et, sur Djebels El Krouma et Knif en contact anormal avec l'albien, le Cénomaniens et le Sénonien. La série triasique comportait probablement à l'origine, de la base vers le sommet: une formation évaporitique épaisse, en particulier sous forme d'amalgame intensément replissé, représente les indices les plus sûrs de la présence du trias. Le gypse est le plus fréquent, en amas saccharoïdes blanc grisâtre, durs, ou sous forme de grands cristaux (Laffitte, 1939 et Vila, 1977).

L'abondance du sel caractérise cet affleurement, visible dans les diapirs de Khenchela et Krouma, mais cela tient, non pas un caractère original particulier au Trias de cette région, mais au fait que ce pointement étant récent (post-miocène), le sel n'a pas eu le temps d'être dissous, tandis que dans les autres pointements, qui sont anté-miocène, il a disparu depuis longtemps (R.Laffite 1939).

Des argilites bariolées de teintes vives (violette et rouges, rarement jaunâtres à verdâtres ; associées à du gypse fibreux et du sel. Constituent les roches les plus abondantes à l'affleurement, des passées calcaires dolomitiques, de couleur grise bleutée à noirâtre, généralement bien stratifiés et présentant parfois quelques passées marneuses, sont fréquemment emballés dans les complexes triasiques. (Marmi, 1995)



**Fig. (04) :** Carte géologique du sous-bassin versant Garaet El Tarf. (Extrait de la carte géologique Nord-est de l'Algérie 1:500000)

### 2.2.2 Crétacé

Les formations crétacées affleurent largement dans la région d'étude et ses environs (**Fig.5**) Formant l'ossature de la région. Il correspond à une bande grossièrement orientée SW-NE, formée essentiellement de calcaire et de marnes.

Laffitte a subdivisé le Crétacé en deux ensembles distincts, sur la base de critères faciologiques :

- **Crétacé inférieur** : (Barrémien, Aptien et Albien), correspond à une unité lithologique d'importance régionale. Il affleure au sud du sous-bassin à l'anticlinal de Khenchela, On le rencontre sur l'axe de Dj .Bouarif, Fedjoudj et Tarf au nord.

- **Le Crétacé supérieur** : (Cénomaniens, Turonien, Coniacien, Santonien, Campanien et Maestrichtien).

### **2.2.2.1 Crétacé inférieur**

#### **2.2.2.1.1 Barremien supérieur :**

A dominante gréseuse c'est une série essentiellement composée de grès blancs fins, à ciment argilo carbonaté, à tendance quartziteuse. Leur base n'est visible qu'au sud du Djebel Touzzeline.

#### **2.2.2.1.2 Aptien**

Il est caractérisé par deux ensembles lithologiques distincts (Marmi, 1995) :

- Ensemble inférieur marneux, il est à noter que les affleurements marneux de l'Aptien inférieur au Sidi Reghiss sont caractérisés par la présence des Ammonites. L'Aptien marneux est représenté par environ 100 m de marnes gris noir à débris schisteux et à minces intercalations de marnocalcaire gris à cassure noire.

- Ensemble supérieur calcaireux à Céphalopodes, à Orbitolines

Ces couches forment l'essentiel de la masse calcaire du Djebel Sidi Reghiss et du Djebel Tarf. Au Djebel Sidi Reghiss la série est épaisse d'environ 250 à 300 m. Au niveau de la coupe géologique prise à Djebel El-Krouma, nous avons la succession suivante de bas en haut :

- Marnes gypseuses
- Calcaires sombres en bancs métriques, alternant avec des marnes beiges

Son épaisseur dépasse les cinquantaines de mètres.

Sur le versant nord-ouest du Djebel Sidi Reghiss, seuls quelques bancs gréseux quartzitiques sont visibles.

#### **2.2.2.1.3 Albien**

L'Albien de l'Aurès, et de Djebel el Krouma est caractérisé par une alternance marnogréseuse à la base et au sommet associée à des calcaires à Ammonite, des dolomies et des biosparites.

L'Albien entoure régulièrement l'anticlinal de Khenchela en formant une ceinture plus ou moins continue au-dessous de l'Aptien

Ces caractères impliquent des mouvements d'affaissement du fait du dépôt d'une sédimentation épaisse (300m) dans un fond ne dépassant pas 200m.

Sur le versant nord-ouest du Djebel Sidi Reghiss, seuls quelques bancs gréseux quartzitiques sont visibles.

**2.2.2.1.4 Crétacé supérieur**

Au point de vue répartition géographique, le Crétacé supérieur affleure sur une grande aire dans le massif Aurèsien (Marmi, 1995).

**2.2.2.1.5 Cénomaniens inférieurs**

Il est essentiellement calcaire marneux. La partie supérieure est constituée de bancs calcaires massifs mais peu épais, qui s'intercalent dans des marnes gris-bleu ou beiges, avec une épaisseur variable peut atteindre 500 à 600 m.

**2.2.2.1.6 Turonien:**

Le Turonien occupe de grandes surfaces dans les Aurès. Il est à noter que les faciès du Cénomaniens et du Turonien sont très comparables (Marmi, 1995). Il est à dominante marneuse avec des niveaux de calcaires marneux en plaquettes bitumineuses. La base de cet ensemble est constituée par quelques mètres de marno-calcaire blanchâtres en plaquettes fines à cassure noirâtre. Au-dessus 200 m de marnes grises ou noires montrant des intercalations de marno-calcaire blanchâtres.

**2.2.2.1.7 Turonien (moyen et supérieur)**

Ce sont des alternances de marnes grises à beiges et de calcaire en bancs métriques. La prédominance des intercalations calcaires crée une barre bien visible dans la morphologie.

**2.2.2.1.8 Coniacien**

Au Djebel Knif, sous la discordance des formations brèchiques Santoniennes le coniacien est formé à la base par 90 m d'alternances de marnes beiges ou grises et de calcaire gris au-dessus au Djebel Bardo (Ain Beida) des talwegs isolés montrent sur une centaine de mètres, des formations composées essentiellement de marnes grises alternant avec des calcaires noduleux beiges.

**2.2.2.1.9 Santonien**

Visible aux alentours du Djebel Knif. Il correspond à 250 m de marnes gris bleutées avec à la base et au sommet des marno-calcaires en bancs décimétriques riches en débris d'inocérames, il repose en discordance sur les argiles varicolores du trias et sur le Coniacien.

Ces formations santoniennes contiennent des algues et des débris de rudistes ainsi que des fragments d'hippuritides, à la base des formations récifales contiennent une microfaune pélagique.

**2.2.2.1.10 Campanien :**

Le Campanien est très bien visible aux environs des Djebels Chettaia et Knif et dans le synclinal du Djebel Aurès.

Au Djebel Aurès le Campanien formé de marnes gypseuses à intercalations de calcaires légèrement phosphatés. L'épaisseur de cet étage est de 170m

Au djebel Knif, on retrouve à la base du Campanien une séquence calcaire de 12 m d'épaisseur. Ce sont des calcaires crayeux en bancs décimétriques à élément triasique remaniés (argilesva ricolores). Au-dessus, des marnes noires ne dépassent pas 80 m d'épaisseur.

**2.2.2.1.11 Maestrichtien inférieur à dominante marneuse**

Ce sont des formations atteignant une épaisseur estimable à 40 m. Représenté par des alternances de marnes de teint gris-beige à débris de mollusque et de calcaires massifs, beige en bancs décimétriques à débris de lamellibranches, d'échinides et de brachiopodes, inocérames régularis.

**2.2.2.1.12 Maestrichtien supérieur : calcaire a Inocerames.**

Ce sont des formations calcaireuse, massives blanchâtres, granuleuses, en bancs décimétriques à centimétriques avec une stratification oblique auprès du Djebel Knif, la cassure des calcaires est un peu plus sombre de teinte grise, bleue, au contraire au Djebel Bardo et Djebel Boutoukhma, les formations d'une centaine de mètres, ce sont des bancs de calcaires marneux métriques à plurimétriques avec une cassure blanchâtre passé noduleuses et à rognons de silex.

Ces formations contiennent des fragments d'Inocérames L'épaisseur de ces formations ne dépasse pas les 95 m.

**2.2.3 Éocène****2.2.3.1 Montien**

Formation d'une épaisseur de 70 m, présentant des marnes gris verdâtre en concordance sur le maestrichtien.

**2.2.3.2 Yprésien et Thanetien**

Ces formations sont d'une épaisseur approximative à 85 m, présentent une séquence marneuse gris beige à la base et une séquence carbonatée au sommet. Les roches sont bitumineuses, elles contiennent des silex, des petits nodules phosphatés.

## 2.2.4 Miocène

Du point de vue lithologique, la série miocène est composée :

### 2.2.4.1 Miocène inférieur

#### 2.2.4.1.1 Aquitano-Burdigalien :

C'est le terme basal correspond à une formation continentale rouge, formée de conglomérats, d'argiles rouges, de poudingues à gros éléments arrondis de calcaires, d'argiles silteuses rouges et de rares marnes. Épais de 60m à 80m environ. Cette série se développe surtout au sud d'Ain Hammam. Quelques minuscules affleurements de cette formation ont été repérés sur le versant sud du Djebel Guellif.

#### 2.2.4.1.2 Langhien-Serravalien :

C'est le terme moyen, correspond à une formation marine à niveaux biomicritiques et gréseux. Cet ensemble complexe et discordant est visible au sud de djebel Knif et à l'Est de Djebel Chettaâ ou il repose directement en transgression sur le Trias et surtout au Nord du Kef Tifkressa et du Ras Serdoun. Ce paquet est de 36m d'épaisseur en moyenne.

### 2.2.4.2 Miocène supérieur

#### 2.2.4.2.1 Tortonien gréseux blanc

Cette formation est composée de grés blancs grossiers en bancs plurimétriques, à abondance de dragée de quartz (diamètre allant jusqu'à 2cm).

#### 2.2.4.2.2 Tortonien supérieur continental :

Argiles silteuses beiges et rouges, grés, cette formation affleure aux alentours de Baghai (August compte) 150 m sont ici visible.

## 2.2.5 Le Mio-pliocène

Il s'agit d'un remplissage des paléo-reliefs. Au sud de djebel sidi Rhélis se rencontre l'une des rares formations moi-pliocène connu dans la région. Elle est connue au niveau de Argoub Kemellal et elle est représentée de bas en haut par :

- des argiles varie colorent de plus de 10 m d'épaisseur
- des sables jaunes avec des passées argileuses
- des calcaires lacustres en barres métriques qui se suivent jusqu'à Ain Beida.

### 2.2.6 Le Quaternaire

Les dépôts quaternaires sont la couverture blanche dans la région d'étude (**Fig. 6**). Ces formations sont d'origine continentale et occupent d'importantes surfaces. Ils se sont développés essentiellement dans les parties bordant les massifs montagneux. On y rencontre des éboulis à blocs, éboulements et glacis polygéniques. Dans les zones basses telles les vallées et les sebkhas. Si l'épaisseur générale ne dépasse pas la moyenne des quelques mètres, le quaternaire est connu sous différents aspects en fonction du lieu de gisement de la formation. (Villa J.M., 1977)

- Formations dunaires : elles sont localisées à la périphérie des chotts. Elles correspondent à l'agrégation de poussières, de sables fins et de petits débris. Elles sont généralement ravinées ou fixées par une maigre végétation herbacée.
- Sols salés : se rencontrent aux alentours des chotts sous forme de vastes espaces plats surélevés exceptionnellement inondés. S'y développent des croûtes de sels épisodiques. Ce sont d'anciens sols hydro morphes salés.
- Alluvions récentes ce sont des limons, des graviers et des galets roulés constituant les alluvions actuelles (lits majeurs des oueds) ou récentes.
- Sebkha de Gareat El Tarf

La lithologie est singulièrement marquée par d'importants affleurements triasiques, des formations calcaires résultant du Quaternaire et du Mæstrichtien supérieur et de conglomérat du Miocène. Le sol, constitué par des limons et des argiles, est déstabilisé par la présence de sel qui disperse ses éléments de sorte qu'il perd totalement sa structure initiale pour donner des structures à faible perméabilité.

La sebkha n'est recouverte qu'épisodiquement, après des périodes pluvieuses, par une faible tranche d'eau (quelques mètres au maximum dans les secteurs les plus déprimés) qui subsiste quelques semaines ou quelques mois. Dès l'assèchement de la cuvette, les sédiments fraîchement déposés sont emportés par le vent (phénomène de déflation) ou recouverts par une mince pellicule saline résultant de l'évaporation des eaux superficielles ou souterraines.

Tableau 2. Résumé de la colonne lithostratigraphique du sous-bassin versant de Gareat El Tarf

Système	Série	Description
Trias		Le gypse, sel, les argiles et marnes, de couleur verdâtre, rougeâtre à violacée, calcaro dolomitiques de couleur gris bleuté à noirâtre
Crétacé	Crétacé inférieur	Marnes grés blanc fin, à ciment argilo-carbonaté.
		Marnes gris noir à débris schisteux, intercalations de marnocalcaire, Ammonites
		Alternance marnogréseuse associée à des calcaires à Ammonite, des dolomies et des biosparites.
	Crétacé supérieur	Calcaire-marneux
		Marne avec des niveaux de calcaires marneux en plaquettes bitumineuses, marno-calcaire.
		Alternances de marnes grises à beiges, de calcaire en bancs métrique.
		Marnes grises alternant avec des calcaires beiges.
		Marno-calcaires riche en débris d'inocérames, des algues et des débris de rudistes ainsi que des fragments d'hippuritides
		De marnes gypseuses à intercalations de calcaires légèrement phosphatés, calcaires crayeux, marnes noires.
alternances de marnes de teint gris-beige à débris de mollusque , calcaires massifs beiges à débris de lamellibranches, d'échinides et de brachiopodes		
Calcaire, blanchâtre, calcaire marneux métrique à plurimétrique.		
Éocène	Montien	Marnes gris verdâtre.
	Yprésien et Thanetien	Marne gris beige. Les roches sont bitumineuses, elles contiennent des silex, des petits nodules phosphatés.
Miocène	Miocène inférieur	conglomérats d'argiles rouges, de poudingues à gros éléments arrondis de calcaires, d'argiles silteuses rouges et de rares marnes
		Une formation marine à niveaux biomicritiques et gréseux.
	Miocène supérieur	grés blancs grossiers
		Argiles silteuses beiges et rouges, grés.
Moi-pliocène		Argiles, sables jaunes avec des passées argileuses, calcaires
Le Quaternaire		Agrégats, poussières, sables fins et de petits débris, limons, des graviers et des galets, argiles, sels

### 3 Conclusion :

En définitive, ce chapitre nous a permis d'obtenir des résultats sur la diverse formation géologique du bassin versant de Gareat El Tarf.

À partir des données géologiques, on peut dire que la région d'étude est constituée essentiellement par les formations :

- **Quaternaire** : Agrégats, poussières, sables fins et de petits débris, limons, des graviers et des galets, constituent l'essentiel de ces formations. Ces horizons perméables. Le quaternaire est connu sous différents aspects en fonction du lieu de gisement de la formation (les zones basses telles les vallées et les sebkhas). Ces formations occupent d'importantes surfaces de la plaine.
- **Le crétacé inférieur** : à dominante gréseuse. C'est une série essentiellement composée de grès blancs fins, à ciment argilo carbonaté, à tendance quartziteuse. Leur base n'est visible qu'au sud du Djebel Touzzeline (Nord de la plaine)
- **Le Miocène** : (Tortonien supérieur continental) argiles silteuses beiges et rouges, grès, cette formation affleure aux alentours de Baghai 150 m sont ici visible.
- **Crétacé supérieur** : (Maestrichtien supérieur) le calcaire du Maestrichtien supérieur constitue l'élément essentiel de la partie sud et ouest de la région : calcaire, massifs blanchâtres, granuleux, en bancs décimétriques à centimétriques avec une stratification oblique auprès du Djebel Knif, la cassure des calcaires est un peu plus sombre de teinte grise, bleue, au contraire au Djebel Bardo et Djebel Boutoukhma, ce niveau assez épais (d'une centaine de mètres), ce sont des bancs de calcaires marneux métriques à plurimétriques avec une cassure blanchâtre passée noduleuses et à rognons de silex.

Ces formations contiennent des fragments d'Inocérames L'épaisseur de ces formations ne dépasse pas les 95 m.



# **CHAPITRE III :**

*Revue de littérature*

## 1 Introduction

Dans ce chapitre en expose un examen complet de la littérature avec les antécédents théoriques des concepts principaux qui apparaissent dans cette mémoire

## 2 Concept de Pollution :

Le terme pollution peut être défini comme suit : c'est une dégradation d'un milieu naturel suite à une contamination par des agents toxiques constitués de l'ensemble des rejets de substances que 'l'homme rejette dans le milieu. Ces substances peuvent affectent les organismes vivants directement ou indirectement à travers des ressources telles que l'agricole, l'eau et autres produits biologiques, etc. La pollution c'est aussi toute modification défavorable du milieu ou de l'écosystème. (Gustave., M 2014, Bliefert et al 2011)

### 2.1 Pollution de l'eau

On appelle pollution de l'eau toute modification chimique, physique ou biologique de la qualité de l'eau qui a un effet nocif sur les êtres vivants.

La pollution de l'eau est toute modification des caractéristiques de l'eau ayant un caractère gênant ou nuisible pour les usages humains, la faune ou la flore. Au cours de son, l'utilisation, l'eau s'appauvrit ou s'enrichit de substances de toutes sortes, ou change de température. Les pollutions qui en résultent se retrouvent dans le milieu naturel (cours d'eau, mer). Pour cela en peut classer la contamination de l'eau en huit catégories : les eaux d'égout, les agents vecteurs de maladies, les matières en suspension, les nutriments minéraux des algues et des plantes, les matières organiques, les produits chimiques non organiques, les substances radioactives et la pollution thermique (Berg, Raven, Hassenzah 2009).

### 2.2 Contamination de l'eau souterraine :

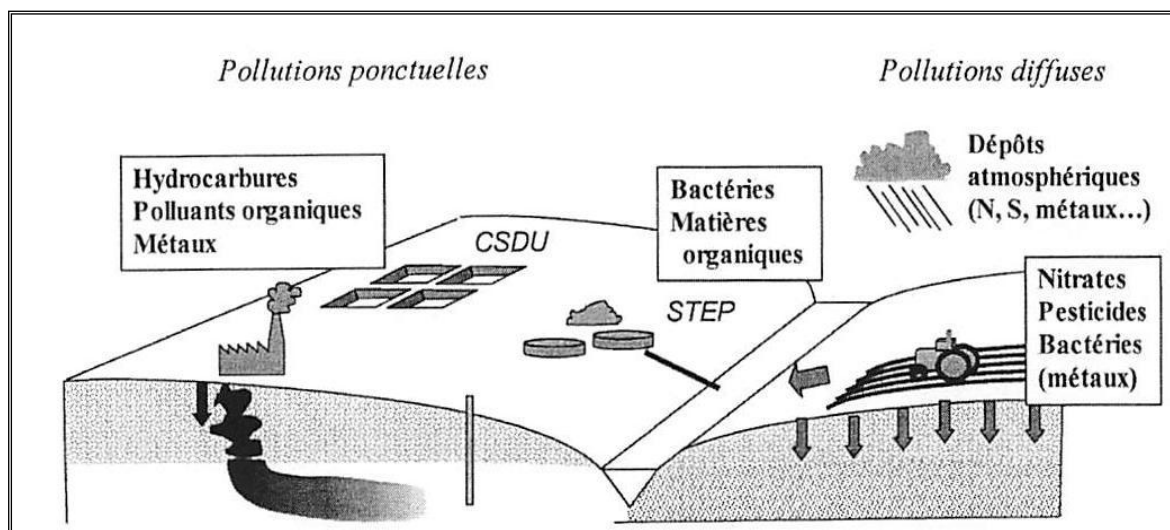
Les eaux souterraines, dans la plupart des conditions, sont plus sûres et plus fiables que l'eau de surface. Une des raisons est que l'eau de surface est plus facilement exposée aux polluants (des usines par exemple) que les eaux souterraines. Ceci ne veut pas dire que les eaux souterraines sont invulnérables à la contamination. Elles sont soumises, de plus en plus intensivement, aux rejets volontaires d'effluents polluants, eaux usées ou eau de ruissellement pluvial en milieu urbanisé ou industriel (Pitt et al. 1999; Bower, 2002). Les sources de contamination des eaux souterraines sont multiples et sont liées à l'activité humaine (Bouguetit, K., Benhamida, N., (2015), elles se dégradent lorsqu'elle reçoit de l'eau contaminée qui s'infiltré dans le sol et qui n'est pas suffisamment filtrée ou qui n'a subi aucune épuration naturelle, cette situation peut avoir des effets

destructeurs : une fois que des eaux souterraines sont polluées, il devient extrêmement coûteux d'enlever la contamination.

### 3 Pollution de l'eau et modes de transfert des polluants :

La pollution est la dégradation d'un écosystème par diffusion directe ou indirecte de substances chimiques, physiques ou biologiques susceptibles de porter atteinte à la santé humaine ou perturber de manière plus ou moins importante le fonctionnement naturel des écosystèmes. Cette pollution due, essentiellement, à l'activité humaine, à de nombreuses formes et peut être ponctuelle, diffuse, temporaire ou chronique (**Figure 08**). (E.Koller,2004)

Les modalités et le temps de transfert des polluants varient selon les types de polluants et selon le milieu traversé. En effet, le déplacement de l'eau dans les sols est bien plus complexe que dans les nappes souterraines. Ceci parce que le milieu est variablement saturé au cours du temps et qu'il est très hétérogène dans l'espace (Atteia, 2005).



**Fig. (05):** les grands types de pollution et leurs effets sur l'environnement (Atteia, 2005)

#### 3.1 Pollution ponctuelle

Constituée d'une source de taille restreinte et concentrée résultant d'un apport massif de produit dans l'eau à la suite d'un déversement accidentel (Atteia, 2005). Elle est accidentelle ou chronique, plus ou moins abondants relativement facilement identifiable; les pollutions localisées peuvent résulter d'évènements accidentels engendrant le déversement de produits toxiques, liés à des conséquences cumulées de diverses activités humaines, tant industrielles qu'agricoles, urbaines, militaires ou de transport, etc. (François Colin, 2000). De telles pollutions sont visibles et peuvent

avoir des conséquences graves en termes de vulnérabilité des populations, des infrastructures et de l'environnement proche. Une autre source marquée correspond aux fuites de produits toxiques provenant de cuves de stockage ou de conduits défectueux. Rencontrées parfois à proximité de centres de déchets toxiques dont le confinement est défaillant, ces fuites engendrent une pollution chronique qui peut prendre une grande ampleur du fait du transfert des polluants dans le sous-sol sur de longues périodes. La pollution localisée se manifeste aussi dans les parcs à résidus des concentrateurs (Gustave Mukoko Kalenda 2014).

### 3.2 Pollution diffuse

Les pollutions diffuses concernent de grandes surfaces de terrain avec des concentrations beaucoup plus faibles à la source (Atteia, 2005), et sont le plus souvent la conséquence de l'utilisation de produits (engrais et pesticides) lors de l'exploitation agricole ; elles peuvent également avoir une origine industrielle dans le cas de retombées atmosphériques suite à des activités industrielles (conséquences de pluies acides), à des accidents (retombées radioactives de la catastrophe de Tchernobyl), Bouazza A., Delage P., Wojnarowicz M., (2005), et aux retombées de fumées d'usines (Vranken, 2010).

D'autant plus qu'elles sont régies par des phénomènes complexes de transferts de produits présents dans le sol vers la ressource en eau (le ruissellement, le drainage et le lessivage). Toutefois, les mécanismes de transfert dépendent, fortement, non seulement des caractéristiques du produit (doses, paramètres physico-chimiques...) et du milieu (type de sol, activité microbienne...) mais aussi du climat et de la période d'application

### 3.3 Les principales sources de pollution des eaux souterraines :

Les eaux de surface sont de plus en plus polluées par des produits toxiques; métaux lourds, engrais et pesticides charriés par les fleuves... sans compter les dizaines de millions de sacs plastiques qui flottent dans les eaux. Ils deviennent plus contaminés par polluants formés des rejets chimiques de nos industries, de notre agriculture et de nos activités quotidiennes.

Généralement ce type de pollution d'origine humaine due à l'activité de l'homme peut causer l'émission de substances susceptibles de contaminer les sols et de s'infiltrer jusqu'aux eaux souterraines.

Les eaux souterraines contaminées contiennent des substances nuisibles en solution ou en suspension avec des concentrations élevées dépassent parfois celles fixées par les normes nationales ou internationales (Matthess et al., 1985). Ces produits polluants peuvent venir aussi bien de source naturelle que de l'activité anthropique.

### 3.3.1 Pollution naturelle :

L'atténuation naturelle peut être définie comme l'ensemble des processus biologiques (dégradation, consommation de la matière organique, photosynthèse, respiration animale et végétale...), chimiques (oxydoréduction...) et physiques (dilution, dispersion, adsorption...). L'eau s'infiltré à travers les sols et les roches peuvent absorber un éventail de composés qui dépendent de la nature du matériel géologique traversé tels que le magnésium, le calcium, les chlorures, l'arsenic, le bore, le sélénium, etc. Ces processus peuvent également conduire souvent le contaminant à modifier son état physique ou chimique d'origine naturelle (Vrba et Zaporozec, 1994).

### 3.3.2 Pollution industrielle :

Les installations industrielles génèrent des pollutions des eaux et du sol dont l'ampleur est difficilement connue a priori. Les polluants d'origine industrielle sont très variés selon le type d'activité : elle peut se composer principalement de déchets organiques (industrie agro-alimentaire, papeterie, produits organiques de synthèse, hydrocarbures, sels minéraux, métaux lourds (pétrochimie, métallurgie...). Les plus courants sont les dérivés pétroliers contenus dans les carburants et les dérivés industriels présents dans les plastiques ou les revêtements (PVC, polystyrène. (Atteia, 2005). Cette pollution se produit quand l'eau utilisée par les activités économiques modernes est rejetée dans le milieu naturel sans traitement ou dans le cas de débordement, fuite ou de mauvaises manipulations quand le transport et le stockage de la matière employée dans la fabrication est perdue.

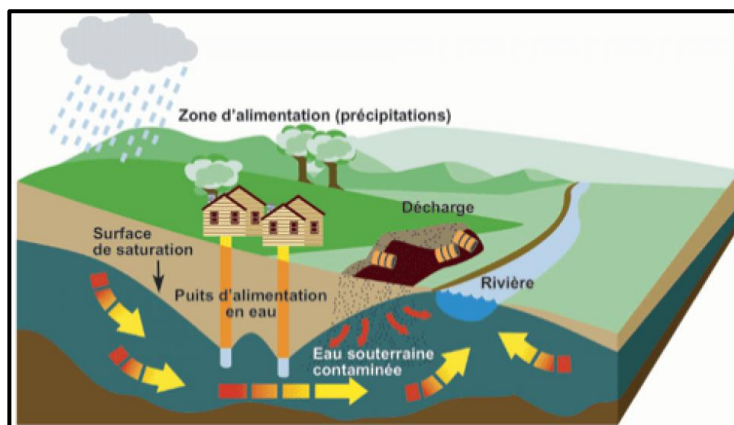


**Fig. (06) :** Pollution industrielle.

### 3.3.3 Pollution agricole:

Les pratiques actuelles des cultures et de l'élevage influencent fortement le régime et la qualité des eaux. La pollution est étendue dans l'espace et dans le temps. L'utilisation massive des engrais et des produits phytosanitaires de traitement des plantes détruit la vie dans les rivières et rend impropres à la consommation humaine, et parfois animale, les eaux superficielles et souterraines'

(conférence de presse 2002). L'accélération du transfert des résidus de ces produits utilisés en agriculture vers la nappe due a les pratiques de l'irrigation intensive influence fortement sur la qualité des eaux. Ce transfert se fait soit par infiltration sur l'ensemble de la surface cultivée ou par rejet dans des puits perdus, des gouffres et/ou bétoires. L'utilisation de pesticides, du stockage de produits chimiques agricoles près des conduits d'eau souterraine et dans des secteurs découverts, non protégés, du vent et/ou de la pluie peut résulter du débordement pendant la manipulation. D'autre part l'épandage des boues de stations d'épuration pose problème par leur charge possible en métaux lourds et germes, en plus de leur richesse en azote résiduelle après culture, ensuit ; l'utilisation de déjections azotées comme engrais ou aliments produits par l'élevage intensif affecte aussi la qualité des eaux souterraines (ES Saouini. H).



**Fig. (07) :** La pollution agricole.

### 3.3.4 Pollution domestique et urbaine :

Résulte des usages de l'eau par les ménages. Elle comprend les eaux-vannes (toilettes) et les eaux ménagères, aussi les ordures ménagères accumulées dans des décharges sauvages ou non aux normes (centre d'enfouissement technique) libèrent des lixiviats riches en polluants. Il se compose aussi de pollution organique (matières fécales, urines, graisses, déchets organiques, papier...),

microbiologique ('microbes' dans les eaux-vannes principalement) et chimique (détergents, produits domestiques divers...); l'eau chargée par ces polluants peut être transférée à la nappe. D'autre part, la contamination des nappes peut être induite par les fuites de cuves de carburants, les routes et par les cimetières, les stations d'épuration urbaines surchargées...



Fig. (08) : La pollution domestique et urbaine.

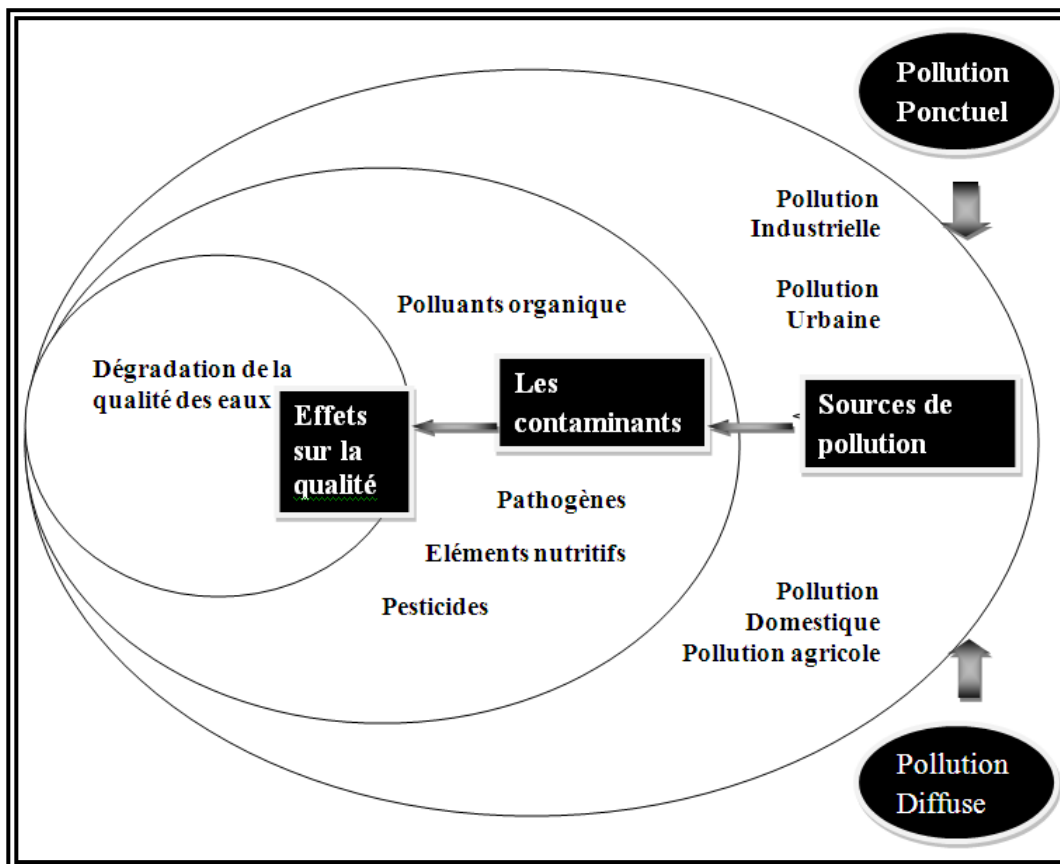


Fig. (09): Schéma simplifié de la pollution des eaux.

### 3.4 Types de polluants :

Les polluants peuvent être classés différemment selon leur nature, de milieu qu'ils affectent (polluants de l'eau, de l'air, des sols), leur mode d'action (direct, indirect, synergique, etc.).

De leurs effets (bioaccumulation, biodégradabilité, dégradabilité, etc.).

#### 3.4.1 Selon la nature des polluants :

Les différents types de polluants (**tableau 3**) ont été classés en quatre grandes catégories selon leur nature: physiques, chimiques, organiques et bactériologiques (Castany, 1980).

- a- **Physiques** : (chaleur, matières en suspension, radioactivité) ;
- b- **Chimiques** : (sels minéraux, métaux lourds, pesticides, détergents, hydrocarbures, solvants).
- c- **Organique** : Carbone (C), oxygène (O), azote (N), phosphore (P),
- d- **Microbiologiques** : (micro-organismes, virus, bactéries) (Lallemand Barres A. et Roux J.C., 1999).

**Tableau 3** : les différents types de polluant des eaux souterraines (Bordet.J, 2007)

Type de polluants	Description	La source des polluants	Indicateur
<b>Physiques :</b>	Les trois principaux agents physiques de la pollution sont : la chaleur, les substances radioactives et les matières solides en suspension.		
La chaleur	la chaleur peut être une source de pollution de l'eau. Quand la température de l'eau monte, le taux d'oxygène dissous diminue.	Les centrales thermiques et nucléaires.	Manque d'oxygène dissous.
Les substances radioactives	Les substances radioactives, les plus dangereuses des polluants physiques, sont très toxiques du fait qu'ils se désintègrent au cours du temps en rendant leur entourage radioactif (Atteia, 2005).	Centrales nucléaires, Hôpitaux.	Becquerels
Les matières solides en suspension	les matières solides en suspension présente dans les eaux diminuent la photosynthèse qui contribue à l'aération de l'eau. Les	Ruissellement de la pluie sur les toitures et chaussées, mines,	La turbidité.

	organismes vivants peuvent alors manquer d'oxygène. Par ailleurs, les matières en suspension donnent aux rivières un aspect sale et trouble et peuvent gêner les poissons ou entraîner leur mortalité par bouchage des branchies.	carrières, extractions de graviers, industries.	
<b>Chimiques :</b>	Substances minérales ou organiques extraites, synthétisées et rejetées par ou pour les activités humaines : produits chimiques de synthèse (des sels minéraux, pesticides...)		
Sels minéraux dissous	Présents naturellement dans l'eau en faible quantité, les sels minéraux (chlorures ou sulfates de calcium, de magnésium, de sodium ou de potassium) peuvent voir leur concentration s'élever à la suite de rejets industriels. Cela peut nuire à la biologie aquatique.	Rejets industriels.	Elévation de la conductivité
Métaux lourds	Les éléments les plus courants dans l'environnement sont le plomb (Pb), le zinc (Zn), le cuivre (Cu), le cadmium (Cd), le chrome (Cr), et le mercure (Hg) certains de ces métaux lourds sont associés aux processus naturels (l'altération de la roche mère), ces produits sont utilisés comme matières premières pour de nombreux produits industriels (Jackson, 1980).	Mégisseries, agriculture, mines, traitements des métaux, combustion, agriculture	Éléments métalliques Pb, Cu, Zn, Cr, Cd.
pesticides	Groupe tous les produits de lutte contre les parasites des cultures et des animaux. Leur évolution dans le sol, aboutissant à des dérivés toxiques, est encore mal connue. Par suite du pouvoir auto épurateur du sol. Plupart d'entre eux est rapidement éliminé, et les eaux souterraines en sont pratiquement dépourvues (Castany G.,	se trouve dans les activités agricoles, mais aussi non agricoles comme le désherbage des espaces verts et des jardins ou des réseaux routiers et ferrés.	Nitrates, phosphates.

	1980).		
<b>Matière organique</b>	Le carbone (C) et l'oxygène (O) constituent 95% de la matière organique; azote (N), phosphore (P), soufre (S) et hydrogène (H) environ 5%; les autres éléments sont en quantités infimes	Effluent domestiques, élevages, agro-alimentaire, Pâte à papier.	Oxygène dissous, DBO, DCO, glucides, lipides, protides
<b>Les polluants organiques, Microorganismes</b>	Les bactéries, les virus, les champignons et les algues rencontrés dans les eaux souterraines, elles correspondent à la présence dans l'eau de germes pathogènes pour l'homme ou pour la faune aquatique.	Provient de l'agriculture, les hôpitaux et même de la vie domestique. Elle peut introduite dans l'eau des micro-organismes dont certains sont pathogènes (Bordet.J, 2007).	Germes fécaux

## 4 MÉTHODES D'ESTIMATION ET DE CARTOGRAPHIE DE LA VULNÉRABILITÉ DES EAUX SOUTERRAINES

### 4.1 Notion de vulnérabilité

Une eau est polluée lorsque sous l'effet de l'activité humaine, elle perd au moins une de ses fonctions (ou un de ses usages). Elle devient alors impropre à la demande d'utilisation et peut présenter un danger pour l'environnement. Les eaux souterraines se caractérisent par leur teneur en substances minérales dissoutes d'origine naturelle (géologique) ; c'est le « bruit de fond ». Leur degré de pollution est apprécié par la mesure de l'écart entre le « bruit de fond » et leurs caractéristiques physico-chimiques (Mardhel,2001).

La contamination et la pollution sont liées à la présence d'un altéragène dans le milieu, provoquant une altération de la qualité de l'eau souterraine. La contamination ne devient pollution que lorsque cette altération présente des effets de nuisance ou de gêne envers l'utilisateur, et a fortiori un risque pour sa santé, et compromet ainsi l'utilisation de cette eau (Simard et al., 1977). La vulnérabilité de l'eau souterraine à la contamination est un concept complexe, mal défini et qui peut représenter autant la sensibilité et la susceptibilité à la contamination, que les conditions naturelles qui influencent la pénétration, la propagation des contaminants et même leur purification dans le milieu. La vulnérabilité peut être définie à trois niveaux distincts.

### 4.2 Concept de vulnérabilité des eaux souterraines

Le concept de vulnérabilité des eaux souterraines a été introduit par Margat à la fin des années 60 (Margat, 1968). Il se base sur le fait que les écosystèmes compris entre la surface terrestre et les aquifères protègent naturellement les eaux souterraines contre les pollutions d'origine humaine, animale ou naturelle. Partant de ce postulat, le terme de « vulnérabilité des eaux souterraines » est défini comme «la capacité d'un système hydrogéologique à transmettre un contaminant potentiel depuis la surface du sol jusqu'à atteindre la zone saturée».

Véhiculé depuis l'eau des précipitations qui s'infiltre à la surface du sol, le contaminant percole ainsi à travers la zone non saturée (vadose) jusqu'à atteindre la zone saturée. Certains auteurs l'ont défini comme une propriété intrinsèque des aquifères ; d'autres estiment que la vulnérabilité est liée aux propriétés spécifiques du contaminant. Cependant, d'autres auteurs l'associent aux activités humaines et à la qualité agro-pédologique des terrains de surface.

La vulnérabilité d'une nappe traduit la facilité avec laquelle elle peut être atteinte par une pollution provenant de la surface du sol. Selon une approche déterministe «Source-Transfert-Récepteur», la vulnérabilité correspondrait au module «Transfert » en représentant le transport d'un contaminant depuis la source jusqu'au milieu récepteur. Le module «Source» représente la répartition spatiale de la charge de contaminant à la surface du sol et le module «Récepteur» est l'eau souterraine.

Certaines spécifications sont apportées au terme de vulnérabilité des eaux souterraines. L'expression « vulnérabilité intrinsèque » est utilisée dans les cas où seules les caractéristiques naturelles des écosystèmes sont appréhendées, alors que le terme de « vulnérabilité spécifique » est utilisé lorsque la nature du polluant et son scénario d'entrée dans le système sont considérés. De même, le terme de « vulnérabilité de la ressource » caractérise la sensibilité aux pollutions d'un aquifère dans sa globalité, alors que celui de « vulnérabilité de la source » se focalise sur un captage en particulier (Zwahlen, 2003; Ravbar, 2007).

La première carte de vulnérabilité a été publiée en 1970 par Albinet pour le territoire français (Albinet, 1970). Dès lors, de nombreuses méthodes pour l'estimation et la cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines ont été développées. Ces publications se sont généralisées au monde entier dès la fin des années 80. Les plus répandues sont DRASTIC (Aller *et al.*, 1987), SINTACS (Citivà and M., 1997), EPIK (Doerfliger and Zwahlen, 1998), PaPRIKa (Doerfliger *et al.*, 2009), l'Approche européenne (Daly *et al.*, 2002) et ses méthodes dérivées COP (Vías *et al.*, 2006), PI (Goldscheider *et al.*, 2000). Mentionnons aussi quelques-unes des méthodes propres à un pays par exemple les méthodes suisses (Doerfliger and Zwahlen, 1998; Pochon and Zwahlen, 2003; Biaggi *et al.*, 2012), la méthode slovène (Ravbar, 2007), ou encore la méthode irlandaise (Shemes, 1999).

La vulnérabilité des eaux souterraines est un domaine particulièrement vaste et il est impossible de dresser un état des connaissances exhaustif sur cette thématique. De plus, de nombreuses revues détaillées existent sur ce sujet (Vrba and Zaporozec, 1994; Zwahlen, 2004; Ravbar, 2007. Ducommun, 2010)

#### 4.2.1 Classification des méthodes existantes

La classification des méthodes d'estimation et de cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines peut se faire de multiples façons en fonction:

- du type de vulnérabilité étudiée : intrinsèque ou spécifique ;
- de l'objet étudié : source ou ressource ;
- du contexte géologique : poreux, karstique, fissuré ou autre ;
- du contexte géographique : pays, environnement naturel, climat ;
- du résultat souhaité : carte de vulnérabilité générale, zones de protection d'une source ou estimation de la vulnérabilité en un point donné ;
- du type de concept et des techniques utilisées : méthodes empiriques utilisant des paramètres et indices superposables, méthodes mathématiques – numériques par modélisation ou méthodes prévisionnelles par analyse statistique.

#### 4.2.2 Types de vulnérabilité:

Comme spécifié par (Goldscheider et al. (2004), l'estimation de la vulnérabilité peut être classée en deux catégories : vulnérabilité *intrinsèque* et vulnérabilité *spécifique*.

- **La vulnérabilité intrinsèque**

est liée aux attributs hydrologiques, géologiques et hydrogéologiques d'une unité spatiale, utilisée pour représenter les caractéristiques du milieu naturel qui déterminent la sensibilité des eaux souterraines à la pollution par les activités humaines. Elle est indépendante du type et de la durée de la contamination potentielle (indépendante du scénario de contamination). Le résultat est une *carte de vulnérabilité intrinsèque*, basée uniquement sur les propriétés du sol et du sous-sol de l'unité spatiale.

- **La vulnérabilité spécifique**

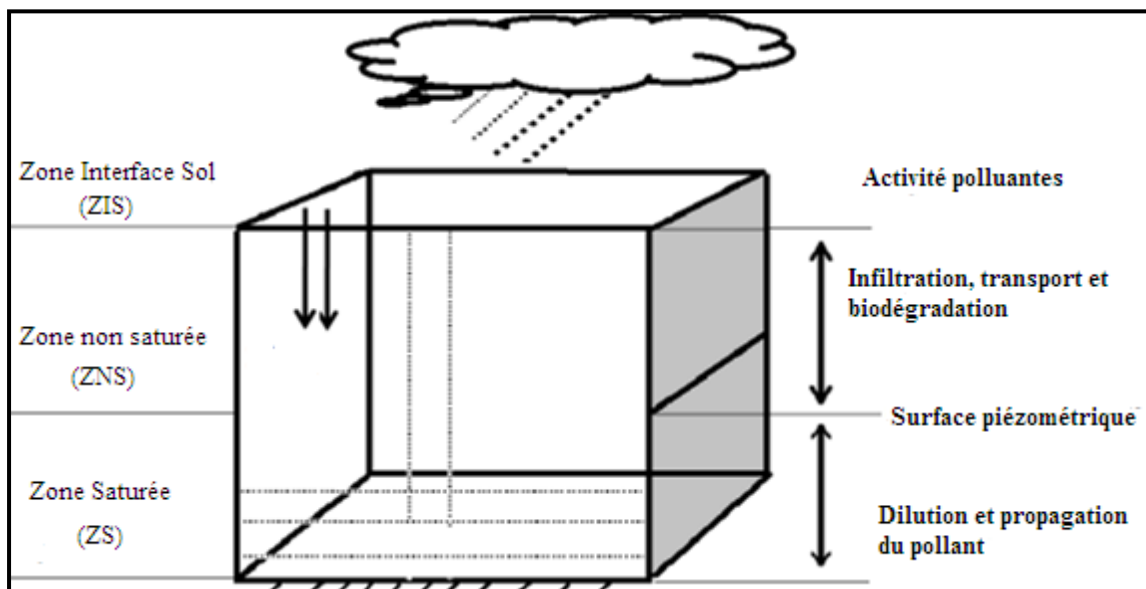
(zone à risque) est le terme utilisé pour définir la vulnérabilité d'une eau souterraine à un polluant particulier ou à un groupe de polluants. Elle prend en compte les propriétés des polluants et leurs relations avec les divers composants de la vulnérabilité intrinsèque. La « vulnérabilité spécifique » comme décrivant les impacts potentiels dus à l'utilisation du sol et des contaminants présents. Parfois la charge de contaminant au sol est considérée comme un paramètre dans l'évaluation de la vulnérabilité. Elle peut en être également distincte quand l'approche de type « étude de risque » est utilisée.

### 4.2.3 Indice de vulnérabilité et cartographie

- Principe et méthodologie:

La vulnérabilité des eaux souterraines est définie en partant d'une évaluation qualitative des mécanismes de transfert d'un polluant qui repose sur une conceptualisation multicouche du milieu traverse. Ce milieu est subdivisé en couches horizontales dans lesquelles des processus physiques, chimiques et biologiques ont lieu simultanément. La migration d'une substance polluante emprunte naturellement les zones suivantes (**Figure 10**) :

- la Zone de l'Interface Sol (ZIS), qui constitue le domaine des activités polluantes;
- la Zone Non saturée (ZNS), qui est le domaine du transfert vertical;
- la Zone saturée (ZS), qui est le lieu de la propagation et de la dilution de la pollution.



**Fig. (10):** Schéma de la contamination des eaux souterraines (Amharref et al., 2007).

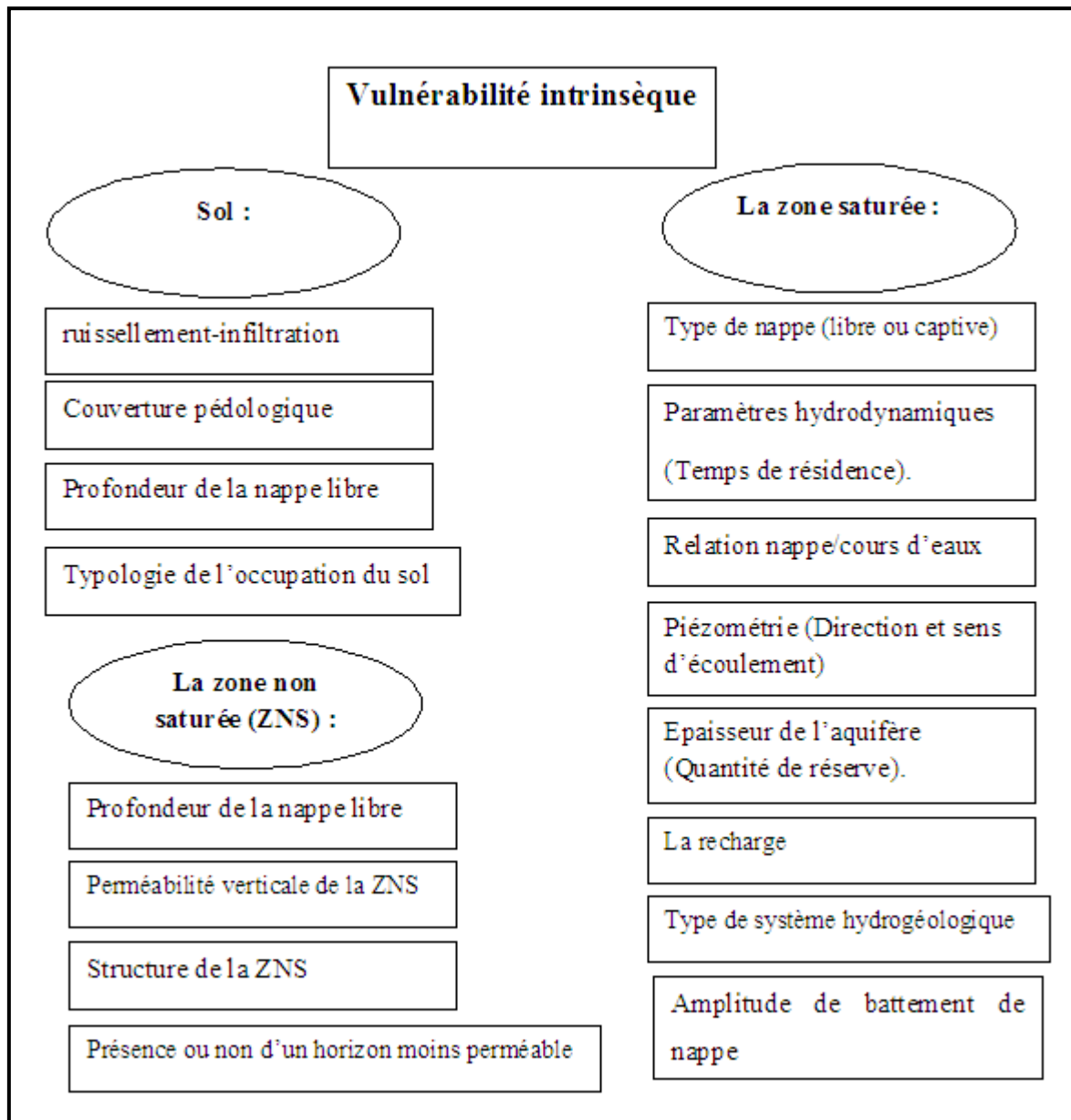


Fig. (11): Les critères de vulnérabilité.

#### 4.2.4 Critères de vulnérabilité intrinsèque

La vulnérabilité intrinsèque d'une nappe dépend de multiples facteurs intervenant soit sur la nature et/ou la concentration de la contamination, soit sur son temps de transfert. Elle est évaluée en prenant en compte les caractéristiques du sol, de la zone non saturée et de la zone saturée qui contrôlent le comportement des polluants (**figure 11**). L'ensemble des critères de vulnérabilité rencontrés dans la littérature sont exposés dans les tableaux ci-dessous.

**Tableau.4** : Critères de vulnérabilité intrinsèque relatifs au sol (Mardhel,V., Dorfliger,N. (2002).

Critères relatifs à la zone non saturée	Description
Ruissellement-infiltration	le ruissellement et l'infiltration efficace (quantité d'eau s'infiltration jusqu'à la nappe) sont représentatifs de la recharge de la nappe.
Profondeur de la nappe libre (ou épaisseur de la zone non saturée)	L'épaisseur de la ZNS conditionne de temps de transfert d'un polluant jusqu'à la nappe (rétention, stockage, interactions physico-chimiques avec l'encaissant) et donc sa possible dégradation en cours de transfert.
Amplitude de battement de la nappe	Dans la mesure où elle est significative, conditionne l'épaisseur du recouvrement de la nappe (sol + ZNS). de ce fait elle peut devenir un critère de vulnérabilité.
Perméabilité verticale de la ZNS	Elle dicte le temps de transfert vertical d'un polluant vers la nappe.
Structure de la ZNS	Les variations de faciès, l'épaisseur des discontinuités de faciès et leur position dans le profil vertical, la texture, la teneur en M.O (matière organique) et en argile des formations, sont autant de facteurs qui conditionnent la migration de fluide vers la nappe.

**Tableau.5** : Critères de vulnérabilité intrinsèque relatifs à la zone saturée (Mardhel, V., Dorfliger, N. (2002).

<b>Critères relatifs à la zone saturée</b>	<b>Description</b>
Type de nappe (libre ou captive)	l'absence d'horizon imperméable entre la surface et le toit d'une nappe libre lui confère un caractère plus vulnérable qu'une nappe captive protégée par des formations imperméables. des formations aquifères (transmissivité (t), perméabilité(k), coefficient d'emménagement(s), gradient hydraulique(i))
Paramètres hydrodynamiques	Ou Le Temps de résidence ils déterminent la vitesse de migration des polluants dans la nappe et les temps de résidence de ceux-ci dans la zone saturée.
Piézométrie	elle rend compte de la géométrie de la nappe et de son fonctionnement hydrodynamique qui peuvent évoluer au cours d'un cycle hydrologique complet. Entre les périodes de hautes eaux et de basses eaux, les relations eaux superficielles/eaux souterraines peuvent s'inverser.
Direction et sens d'écoulement	ils déterminent les espaces susceptibles d'être atteints par un polluant une fois que celui-ci a atteint la nappe.
Type de système hydrogéologique	Un système au caractère transmissif fort se caractérise par des temps de transfert des eaux depuis la surface vers la zone saturée et temps de séjour.
Relation nappe/cours d'eaux	les relations entre les eaux superficielles et les eaux souterraines peuvent être de deux types, drainage ou alimentation, et conditionnent la possibilité de contamination des eaux souterraines à partir des eaux superficielles.
Épaisseur de l'aquifère (quantité de réserve)	la quantité d'eau stockée dans l'aquifère détermine les conditions de dilution d'un polluant ayant atteint la nappe.
La recharge	c'est-à-dire la quantité d'eau atteignant la Zone saturée sur une période donnée (recharge annuelle nette) constitue aussi un facteur de transfert des polluants vers les eaux souterraines.

**4.2.4.1 Critères communs au sol, à la zone non saturée et la zone saturée**

Fracturation (directions et densité). Des discontinuités verticales telles que les failles peuvent, dans certaines conditions, jouer le rôle de drain et augmenter très sensiblement les vitesses d'infiltration depuis la surface vers la nappe.

**Recharge** : il s'agit de la quantité d'eau atteignant la zone saturée sur une période donnée (recharge annuelle nette). Elle dépend de l'infiltration efficace et de sa répartition dans l'espace et dans le temps, donc du climat (ETP évapotranspiration, précipitation), mais également de la topographie et de la nature des formations. Elle peut être appréhendée à partir de la représentation de ces différents éléments constitutifs. Elle constitue un facteur des polluants vers les eaux souterraines.

## 5 Cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines

### 5.1 Objet des cartes de vulnérabilité

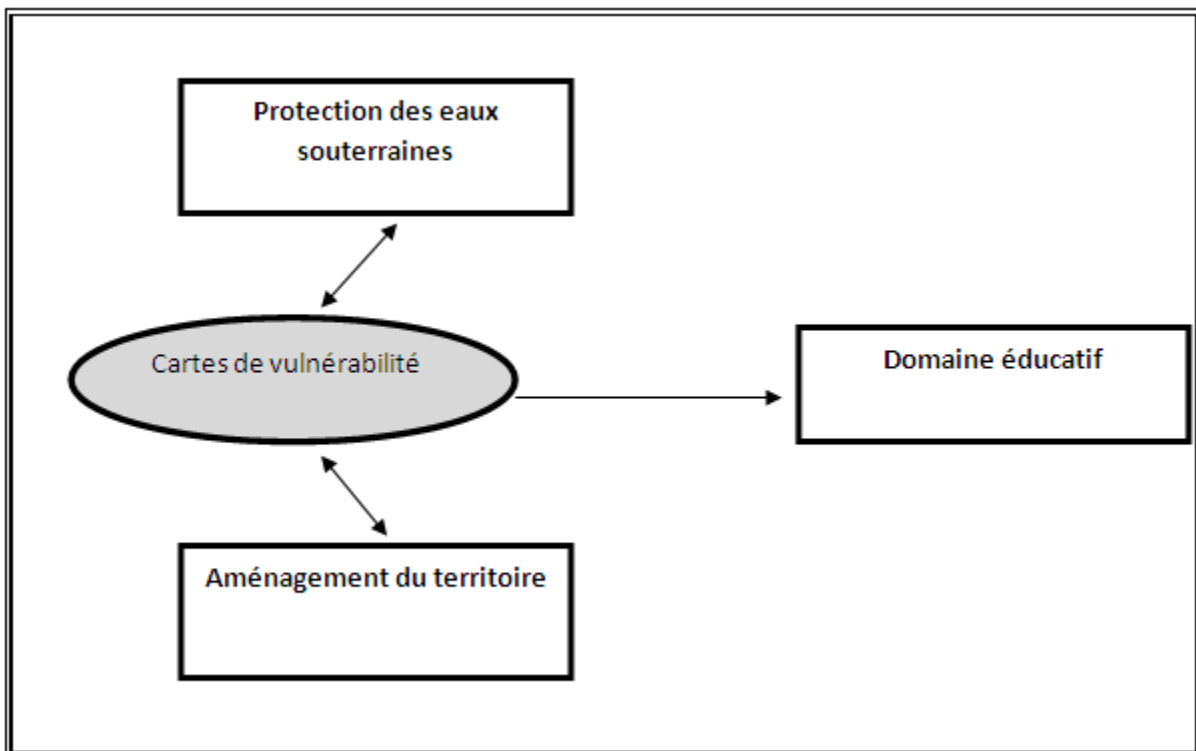
L'évaluation de la vulnérabilité permet de délimiter les zones qui sont plus susceptibles que d'autres à être contaminés par les activités, à/ou près de, la surface de la terre (Babiker et al. 2007). La cartographie de la vulnérabilité consiste généralement à présenter les résultats des diverses méthodes d'évaluation utilisées en classes (fourchettes de valeurs). Ceci, afin de délimiter les zones les plus affectées en les comparant avec les différentes autres zones (Duchaine, 1995). En conséquence, certaines zones terrestres sont plus vulnérables à la contamination des eaux souterraines que d'autres (Napolitano, 1995). L'échelle des cartes de vulnérabilité contrôle le contenu de la carte et peut être choisie en fonction de l'objectif de la carte, les caractéristiques et la complexité des conditions hydrogéologiques et la précision requise pour résoudre les problèmes environnementaux posés. L'échelle joue un rôle important, car il influe sur la précision et le niveau de généralisation des données ainsi que les valeurs des paramètres tracés. La première carte conçue a été réalisée en France par Albinet (1970) à l'échelle 1/1 000 000. Elle était à faible échelle, assez simple et non précise. La phase ultérieure dans l'élaboration de cartes de vulnérabilité a été caractérisée par la transition vers des cartes de vulnérabilité à plus grande échelle, couvrant des unités territoriales plus petites. Depuis le début des années 1980, un nombre considérable de cartes de vulnérabilité des eaux souterraines ont été publiées dans le monde entier, exprimant surtout la vulnérabilité des eaux souterraines à la contamination (Vrba et Zaporozec, 1994).

L'utilisation des cartes de vulnérabilité peut être divisée en trois domaines principaux (Vrba et al. (1994) ; **Figure 15**):

- Aménagement du territoire (planification d'activités territoriales) : les cartes de vulnérabilité peuvent être utilisées par différents responsables politiques, agences gouvernementales ou entreprises privées comme outils préliminaires lors de la planification de projets sur le territoire, ou pour définir des priorités temporelles pour la gestion des ressources en eau. En cas de planification obligatoire d'activités polluantes, la localisation de zones à faible vulnérabilité peut ainsi être déterminée pour ces activités.
- Protection des eaux souterraines (estimation des contaminations potentielles): les cartes de vulnérabilité peuvent être utilisées par les experts hydrogéologues et agences environnementales

pour déterminer l'urgence et la localisation d'éventuelles mesures destinées à protéger les eaux souterraines. Elles permettent par exemple de déterminer quels sites nécessitent une étude hydrogéologique détaillée (pour une étude d'impact, par exemple).

- Domaine éducatif/pédagogique (matériel pédagogique) : les cartes de vulnérabilité peuvent enfin être utilisées en tant qu'outil explicatif pour les responsables politiques, l'enseignement et le grand public, de par la manière synthétique dont ces cartes présentent une somme de données complexes.



**Fig. (12):** Domaines d'utilisation des cartes de vulnérabilité

## 5.2 Méthodes pour l'estimation de la vulnérabilité

L'étude de vulnérabilité de l'eau souterraine à la pollution est un outil qui permet d'identifier les régions les plus susceptibles à la contamination dans un aquifère donné. Il existe plusieurs méthodes pour évaluer la vulnérabilité des aquifères :

- **DRASTIC** a été mise au point par l'EPA (Environnementale Protection Agency) aux États-Unis en 1985, afin d'estimer le potentiel de pollution des eaux souterraines (Schnebelen et Al, 2002). Elle permet d'évaluer la vulnérabilité verticale en se basant sur sept critères.

- **GOD** Ce système a été développé par Foster en 1987. Il présente la vulnérabilité de l'aquifère face à la percolation verticale de polluants à travers la zone non saturée et ne traite pas la migration latérale des polluants dans la zone saturée. Cette méthode est basée sur l'identification du type de nappe, type d'aquifère en termes de facteurs lithologiques et la profondeur de la nappe. Le but de cette méthode est de réaliser une estimation rapide de la vulnérabilité d'un aquifère.

- **DRASTIC modifiée** proposée par Sinan pour École Hassania des Travaux Publics, se base sur les paramètres DRASTIC, relatifs à la zone non saturée de la nappe et le type de sol. En effet, seuls ces paramètres interviennent dans le transfert vertical de la pollution à partir de la surface du sol. Les autres paramètres de la méthode DRASTIC (perméabilité et nature lithologique) n'interviennent pas dans le transfert.

- **AVI.** Cette méthode cherche à évaluer le temps de transport d'éventuels contaminants en fonction de l'épaisseur de la Z.N.S. Elle a été appliquée en 2005 en étant comparée à l'application de la méthode GOD. D'après (Ake et al. 2009), l'importance de GOD réside dans le fait qu'il tient seulement compte des facteurs les plus significatifs pour évaluer la vulnérabilité.

La base de données relative à ces paramètres est facilement accessible contrairement à la méthode DRASTIC où les paramètres tels que la recharge, la zone non saturée qui jouent un rôle prépondérant dans la migration d'un polluant sont évalués avec beaucoup d'approximations.

### 5.3 Aspect théorique de la méthode DRASTIC

La méthode DRASTIC développée par Aller et al. (1987), sous l'égide de l'Agence Américaine de Protection de l'Environnement USEPA, est une méthode d'évaluation de la vulnérabilité verticale intrinsèque à la pollution des aquifères, par systèmes paramétriques.

#### 5.3.1 CONDITIONS D'UTILISATION ET HYPOTHÈSES SIMPLIFICATRICES

La méthode DRASTIC repose sur quatre hypothèses fondamentales (Osborn *et al.*, 1998) :

- 1- les sources de contamination potentielles se trouvent à la surface du sol
- 2- de la surface du sol, les contaminants potentiels atteignent l'aquifère par le mécanisme de l'infiltration efficace;
- 3- La nature du contaminant n'est pas considérée, mais il est mobile dans le sol en phase dissoute;
- 4- le contaminant présente la même mobilité que les eaux souterraines.

#### 5.3.2 Présentation de la méthode DRASTIC

La méthode DRASTIC a été mise au point par l'EPA (Environmentale Protection Agency) en 1985 et Aller et al. en 1987, afin d'estimer le potentiel de pollution des eaux souterraines (Schneblen et al. 2002). Pour la cartographie de la vulnérabilité intrinsèque des eaux souterraines aux États-Unis. Elle est applicable dans la majeure partie des situations géologiques et climatiques qui peuvent y être rencontrées. Cette méthode propose une adaptation du système de pondération des critères pour les pesticides ce qui permet une appréhension de la vulnérabilité spécifique à ce type de contamination uniquement.

Étant l'une des premières méthodes à avoir été mondialement utilisée, DRASTIC a fait l'objet de nombreuses adaptations en fonction de l'évolution des connaissances informatiques d'une part, et des particularités géographiques des régions étudiées, d'autre part. Ici seule la méthodologie de base est exposée.

La méthode DRASTIC considère sept paramètres pour l'estimation de la vulnérabilité des eaux souterraines :

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

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

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

**S** : le type de sol (**S**oil media)

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

**I** : l'impact de la zone vadose ou zone non saturée (**I**mpact of the vadose zone)

**C** : la perméabilité ou la conductivité hydraulique de l'aquifère (hydraulic **C**onductivity of the aquifer).

Chaque critère est cartographié avec un index, appelé aussi cote (C), allant typiquement de 1 à 10. Un facteur de pondération (p) est ensuite appliqué aux différents critères afin de relativiser leur importance respective en termes de vulnérabilité.

La méthode détermine l'indice DRASTIC (Id) qui permet de caractériser le degré de vulnérabilité d'un secteur donné de la nappe. La vulnérabilité est d'autant plus importante que l'indice (Id) calculé est élevé. Cet indice est défini de la manière suivante:

$$Id=(Dc \times Dp)+(Rc \times Rp)+(Ac \times Ap)+(Sc \times Sp)+(Tc \times Tp)+(Ic \times Ip)+(Cc \times Cp)$$

Où D, R, A, S, T, I, C, sont les paramètres cités plus haut :

**c** : cotation accordée à chaque paramètre

**p** : facteur de pondération accordé à chaque paramètre.

Les cotes des paramètres de la méthode DRASTIC. (D'après Lallemande-Barrès ; 1994)

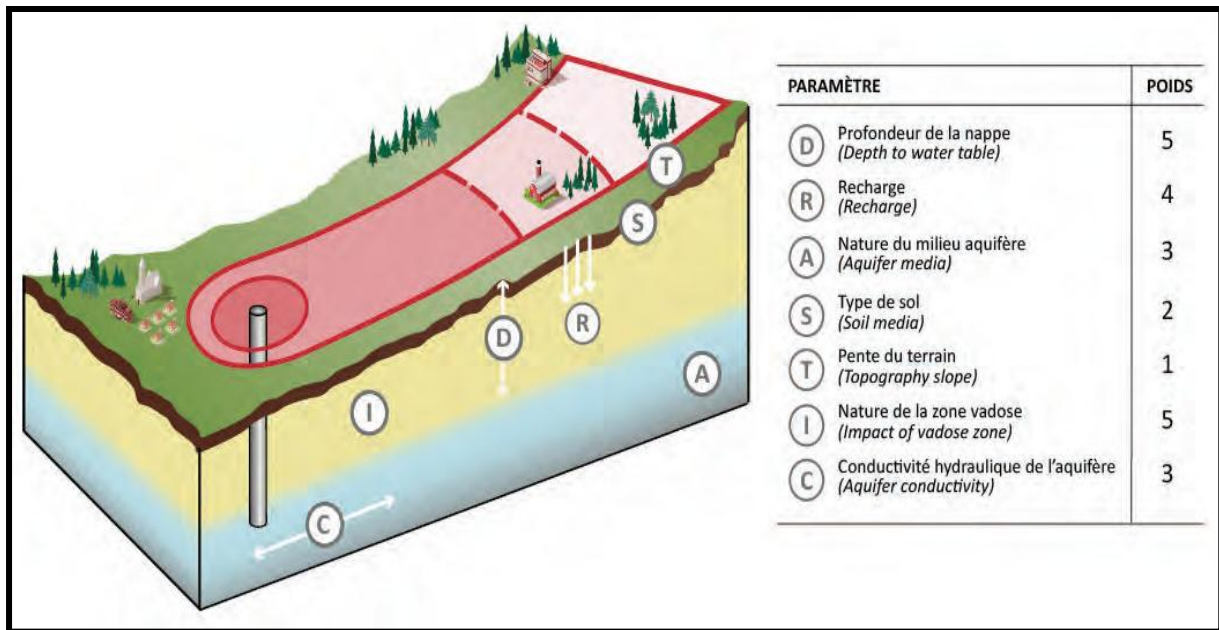


Fig. (13): la méthode DRASTIC, ses paramètres et leur poids.

### 5.3.3 Description et évaluation des sept paramètres hydrogéologiques

#### 5.3.3.1 Profondeur de la nappe (D) :

Le paramètre profondeur de la nappe d'eau souterraine est un paramètre très important dans l'évaluation de la vulnérabilité de l'aquifère (Jourda et al., 2007), correspond au niveau de l'eau en dessous de la zone non saturée. Ainsi les nappes moins profondes sont facilement accessibles par les polluants infiltrés. ( Plus la profondeur au toit de la nappe est importante, moins la zone est vulnérable)

#### 5.3.3.2 La recharge nette ou infiltration efficace (R)

La recharge de l'aquifère est le principal vecteur des contaminants vers les eaux souterraines. Elle est exprimée en hauteur d'eau infiltrée dans la nappe sur une année. Elle est divisée en 5 classes. Plus la recharge est élevée, plus la vulnérabilité l'est aussi. Le postulat fait ici est que l'importance de la recharge est un facteur aggravant la pollution, car elle la pousse dans le système. Ce postulat ne prend pas en compte le fait que plus la recharge est importante plus les pollutions sont diluées ;

Pour le calculer la recharge de l'aquifère, nous avons utilisé la méthode suivante selon Piscopo et al. (2001).

$$RV = RF + S\% + SP$$

RV : La valeur de la recharge ; S% : pourcentage de pente ; SP : Perméabilité du sol

RF : facteur de précipitations (quantité de pluie)

Pour chacun de ces paramètres (RF + S% + SP) nous avons affecté une notation basée sur la capacité d'augmenter le potentiel de la recharge. Puis, cette valeur de recharge est classée par des intervalles de valeurs qui sont donnés avec des cotes déterminées pour en fin contribuer à l'élaboration de la vulnérabilité DRASTIC (Al-Hanbali et Kondoh, 2008).

### 5.3.3.3 La lithologie de l'aquifère (A) (Aquifer media)

Désigne la formation superficielle au-dessus de la zone non saturée, résultant de l'altération sur place de la formation rocheuse grâce à l'action conjuguée de l'eau, l'air et les êtres vivants et de son mélange à une proportion variable de matière organique (Avenard *et al.* 1973). La nature du sol a un impact considérable sur la contamination des nappes phréatiques par les polluants provenant de la surface. Elle peut réduire, retarder ou accélérer le processus de propagation de polluant vers l'aquifère. Plus le sol est riche en argile, plus l'absorption des polluants est importante, et plus la protection des eaux souterraines est grande.

### 5.3.3.4 Le type de sol (S) (Soil media)

Une nappe aquifère est une formation géologique, ou groupe de formations, contenant de l'eau libre. La circulation et la propagation d'un contaminant dans la zone saturée dépendent de la texture et la distribution lithologique des couches de l'aquifère. Cela est toujours contrôlé par la granulométrie, la porosité, et la lithologie des formations géologiques (Smida *et al.*, 2004). Dans la présente étude, la lithologie de l'aquifère est tirée des coupes lithologiques et de carte géologique de la région (Jourda *et al.* 2007). Pour chaque type géologique, nous avons affecté un poids selon la même procédure utilisée pour la zone non saturée. Elle est déterminée à partir de la carte géologique.

### 5.3.3.5 Topographie : (Topography), (T)

Le paramètre topographie est représenté dans la méthode DRASTIC par les valeurs de la pente en pourcentage. Ce paramètre traduit l'aptitude au ruissellement et à l'infiltration des eaux superficielles vers la nappe et reflète donc la capacité de ces eaux à introduire des agents polluants

vers la nappe. L'hypothèse faite ici est que plus la pente est faible, plus il y a d'infiltration et plus la zone est vulnérable.

#### **5.3.3.6 L'impact de la zone non saturée (I) (Impact of the vadose zone media)**

Représente la zone non saturée au-dessus du toit de la nappe. Nous avons déterminé ce paramètre à partir de la texture des terrains qui constituent la zone non saturée (Jourda et al., 2007). Elle correspond à la portion souterraine du terrain comprise entre le sol (premier mètre à partir de la surface) et le niveau supérieur de la nappe souterraine. La texture de cette zone détermine le temps de transfert du polluant vers l'aquifère. Les différentes coupes géologiques des forages ont permis de mettre en évidence les matériaux constitués de granites, de schistes et de roches vertes.

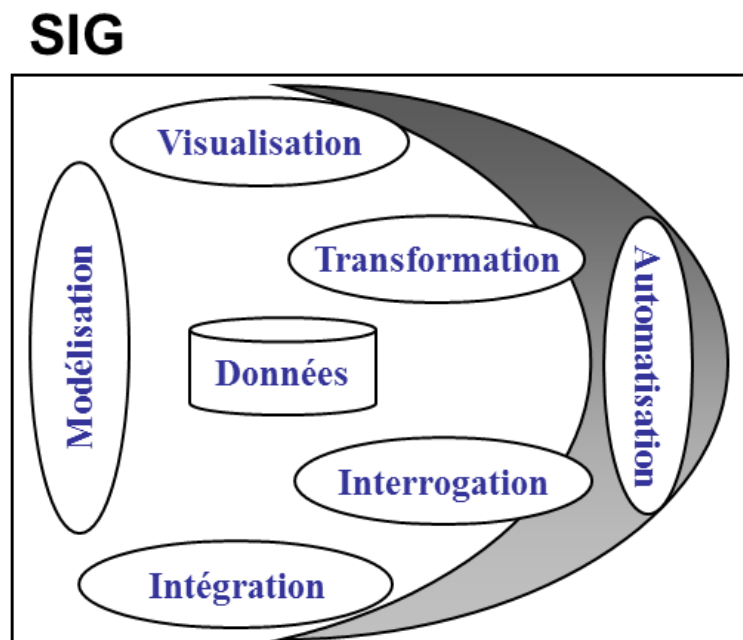
#### **5.3.3.7 La perméabilité ou la Conductivité hydraulique de l'aquifère (Conductivity of the aquifer)**

Reflète la vitesse à laquelle l'eau s'écoule horizontalement à travers un aquifère. Ainsi, les vitesses d'écoulement souterrain fortes sont caractérisées par une grande vulnérabilité ; plus elle est élevée, plus le milieu est considéré comme vulnérable, car les mécanismes d'atténuation des pollutions ont moins de temps pour se produire. Une méthodologie propre aux milieux fissurés pour la détermination des perméabilités induites par les fractures a été proposée par Franciss (1970), puis utilisée et améliorée par Savadogo (1984), Biémi (1992), Savané (1997), Kouamé (1999), Koussoubé (1996) et Jourda (2005).

#### 5.4 Utilisation des SIG dans l'évaluation de la vulnérabilité des nappes:

Les systèmes d'informations géographiques (SIG) apportent des informations géolocalisées et objectifs précis, ils permettent de gérer une multitude d'informations de tous types, et de les mettre à jour en temps réel. Le SIG compte parmi les nouvelles techniques informatiques destinées au domaine de prévision et d'intervention puisqu'il répond à une problématique de gestion, de planification et d'aménagement. Il offre les possibilités de croisement au sein d'une base de données spatialement référencée de façon à extraire commodément des résultats utiles à la décision (Eastman, 1995; Duchaine, 1998; Hentati et al. ,2005).

La cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines est basée sur une analyse multicritère intégrant des données d'origine diverse. Pour cela on a fait appel à l'usage des Systèmes d'informations, car ils permettent, par ailleurs, de gérer une multitude d'informations et de générer de nouvelles couches d'informations par le biais de leurs croisements. Ils facilitent également l'analyse et la mise à jour des différentes cartes thématiques. La vulnérabilité des eaux souterraines est utilisée pour traduire la facilité d'accès d'une pollution depuis la surface sol vers les eaux de la nappe (Margat, 1968 ; Albinet et Moniton, 1970 ; Foster, 1987; Robins et al, 1994 ; Civita, 1994 ; Vrba et Zaporozec, 1994 ; Gogu et Dassargues, 1998, et Schnebelen, 2002).



**Fig. (14) :** Tache effectuée par un logiciel SIG.

Dans la présente travaille le logiciel ArcGis 10.3 (ESRI, Inc) a été utilisé pour réaliser les différentes cartes thématiques a fin de générer la carte de vulnérabilité des eaux souterraines a la pollution par la méthode DRASTIC.

### 5.4.1 Présentation du logiciel Arc GIS Desktop

ArcGIS for Desktop offre des applications SIG professionnelles complètes qui prennent en charge diverses tâches SIG, notamment la cartographie, la compilation de données, l'analyse, la gestion des géodonnées et des images et le partage d'informations géographiques.

ArcGIS for Desktop est la plate-forme que les professionnels des SIG utilisent pour gérer leurs workflows et leurs projets SIG et pour développer des données, des cartes, des modèles et des applications. Il est également le point de départ et la fondation du déploiement du SIG dans les organisations et sur le web. Il est utilisé pour publier et partager des informations géographiques avec d'autres. Les utilisateurs peuvent :

- Partager avec d'autres utilisateurs professionnels des paquetages de cartes et d'autres paquetages SIG
- Partager avec tout le monde via des appareils mobiles, le Web et des systèmes personnalisés en publiant des cartes et des services d'informations géographiques connexes au moyen de ArcGIS for Server et ArcGIS Online.



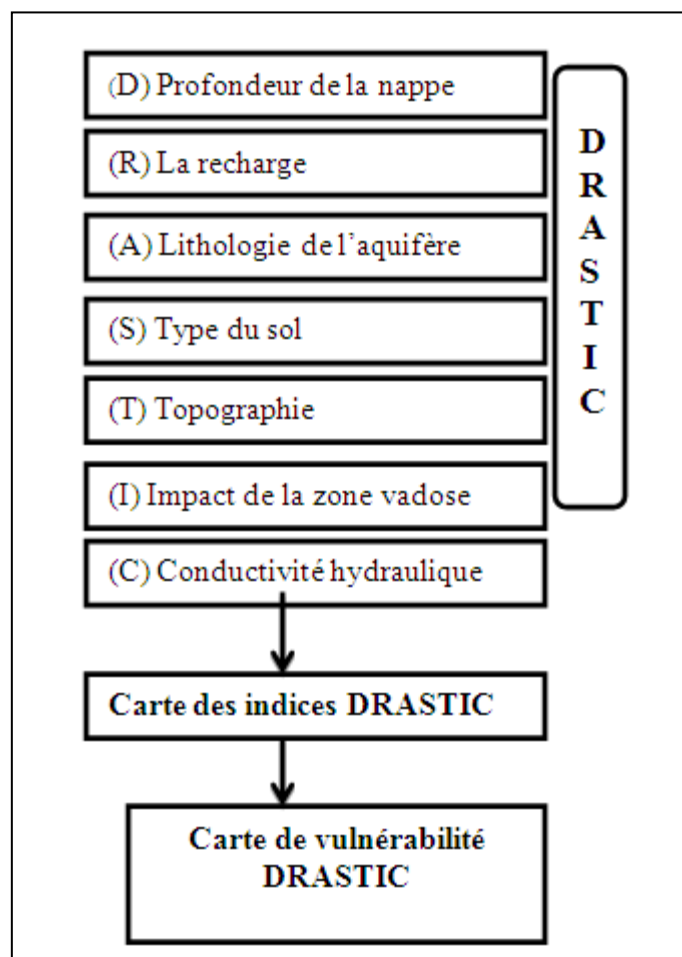
**Fig. (15)** : les différents outils de l'utilisation de l'ArcGis (Source : ESRI, Inc)

ArcGIS Desktop comprend une suite d'applications intégrées : ArcMap, ArcCatalog et ArcToolbox. A l'aide de ces trois applications, vous pouvez effectuer toutes les tâches SIG, de la plus simple à la plus avancée, y compris la cartographie, la gestion des données, et l'analyse éographique.

## 6 Méthodologie

Dans cette étude la cartographie et le calcul de la vulnérabilité à la pollution ont été réalisés par la méthode DRASTIC à l'aide du logiciel ArcGIS version 10.3. Ce dernier a permis l'intégration et la répartition spatiale des scores pondérés (cote x poids), attribués aux sept paramètres de la méthode DRASTIC et leur représentation sous le format shapefile (Jourda et al. 2007). Avec l'extension « Spatial Analyst » les shapefiles ont été convertis en mode Raster. Chaque Raster d représente la variation spatiale des scores pondérés (Chandoul et al. 2008). Le calcul des indices de vulnérabilité selon la méthode DRASTIC se fait directement par un calcul d'addition appliqué sur les sept Raster. Le résultat de ce calcul est l'élaboration d'une nouvelle couche d'information qui représente la variation de l'indice de vulnérabilité dans la zone d'étude.

En résumé la méthodologie utilisée dans le cadre de ce travail est représentée dans l'organigramme suivant:



**Fig. 16 :** Élaboration des cartes de vulnérabilités par la méthode DRASTIC.

## 7 Conclusion

Il existe plusieurs méthodes d'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque à la pollution des aquifères (HAM 07). Toutes ces méthodes sont basées sur des systèmes paramétriques : le principe commun de ces systèmes consiste à sélectionner préalablement les paramètres sur lesquels se base l'évaluation de la vulnérabilité. Chaque paramètre est subdivisé en intervalles de valeurs significatives et est affecté d'une note croissante, en fonction de son importance dans la vulnérabilité. L'indice de vulnérabilité est alors obtenu par agrégation des paramètres en utilisant des méthodes de type Analytic Hierarchy Process (SAA 84). Ces méthodes multicritères sont très souvent intégrées dans les systèmes d'information géographique (ROY 85).

La méthode DRASTIC permet de déterminer le degré de vulnérabilité et le potentiel polluant des eaux souterraines. C'est une méthode paramétrique qui utilise la somme des produits des sept paramètres : profondeur de la nappe, recharge nette, lithologie de la zone saturée, type du sol, topographie (pente), lithologie de la zone non saturée et conductivité hydraulique de l'aquifère.

Dans les SIG, chaque paramètre est noté sur une couche en lui affectant une valeur numérique correspondant à son poids, c'est-à-dire son influence sur la vulnérabilité de la nappe. Ensuite, ces couches sont superposées sur une couche résultante où sera calculé l'indice DRASTIC, qui est égal à la somme des produits (coefficient \* poids) des sept paramètres DRASTIC. La cartographie de l'indice de vulnérabilité repose sur la superposition de ces paramètres.

# **CHAPITRE VI :**

*Cartographie de la vulnérabilité  
des eaux souterraines*

## **1 Introduction :**

L'évaluation de la vulnérabilité permet de délimiter les zones qui sont plus susceptibles que d'autres à être contaminés par les activités, à/ou près de, la surface de la terre (Babiker et al. 2007). La cartographie de la vulnérabilité consiste généralement à présenter les résultats des diverses méthodes d'évaluation utilisées en classes (fourchettes de valeurs). Ceci, afin de délimiter les zones les plus affectées en les comparant avec les différentes autres zones (Duchaine, 1998). En conséquence, certaines zones terrestres sont plus vulnérables à la contamination des eaux souterraines que d'autres (Napolitano, 1995). L'échelle des cartes de vulnérabilité contrôle le contenu de la carte et peut être choisie en fonction de l'objectif de la carte, les caractéristiques et la complexité des conditions hydrogéologiques et la précision requise pour résoudre les problèmes environnementaux posés. L'échelle joue un rôle important, car il influe sur la précision et le niveau de généralisation des données ainsi que les valeurs des paramètres tracés.

## **2 Méthodes et outil**

### **2.1 Choix de la méthode**

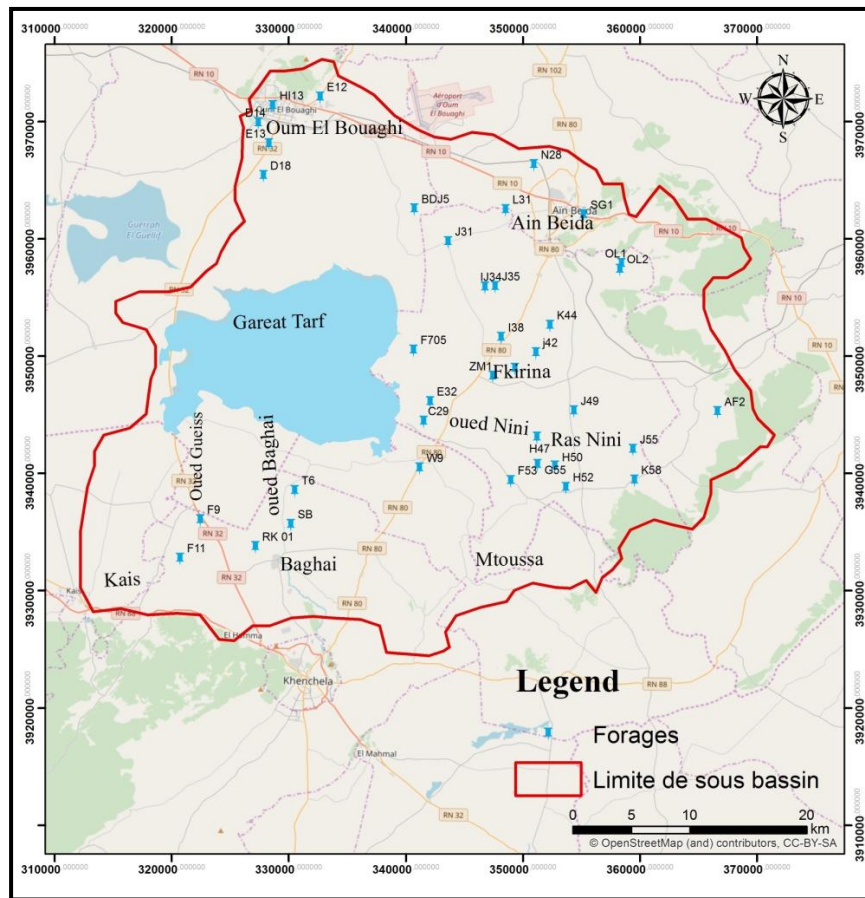
Pour la présente étude, vu que la densité de points de données est moyenne, il s'avère plus judicieux d'appliquer une méthode à notation numérique. La méthode choisie pour cette étude est DRASTIC (Aller et al., 1987).

La méthode DRASTIC est caractérisée par sept paramètres : Profondeur de la nappe, la recharge nette, nature de la zone saturée, Nature de sol, la pente, la lithologie de l'aquifère, la perméabilité.

### **2.2 Lithologie et géométrie de l'aquifère :**

Les logs stratigraphiques des 38 forages (fournies par la direction Hydraulique de wilaya d'Oum El Bouaghi et de khanchela (**Figure 19**)). Exécutés dans le bassin de Garaet El Tarf et de profondeurs variant de 80 à 270 m ont permis d'identifier l'extension, les profondeurs et la lithologie de l'aquifère.

L'aquifère utile de bassin de Garaet El Tarf est constitué de superposition de plusieurs nappes profondes, formées essentiellement par des conglomérats de marne, calcaire et de graviers...etc. Nous donnerons dans ce qui suit les différentes formations lithologiques qui caractérisent le bassin de Garaet El Tarf.



**Fig. (17) :** Localisation des forages utilisés pour la réalisation des cartes de vulnérabilité (DHOB et DHKH).

### 2.2.1 Types de nappes :

#### **La nappe du plio-quadernaire :**

Caractérisé par les formations lithologiques : graviers et argile, graviers calcaires, galets. La puissance de cette nappe est variée entre 10 à 100 m.

#### **La nappe de calcaire du maestrichtien supérieur :**

Se rencontre dans les calcaires du maestrichtien supérieur, son épaisseur ne dépasse pas les 150 m.

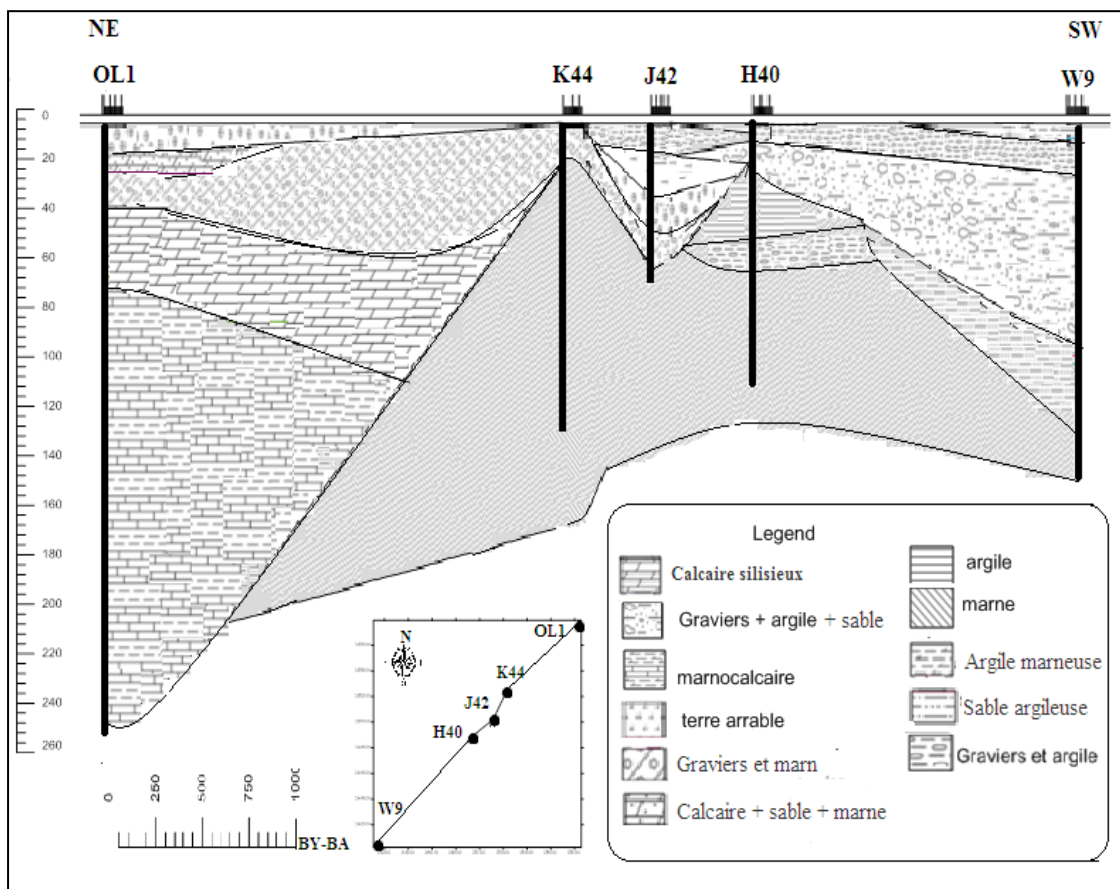
Les aquifères alluviaux sont deux types ; alluvions anciennes et récentes,

- **alluvions anciennes** ; sont constituées de galets, graviers et sable bien roulés ou tés émoussés.
- **Alluvions récentes** ; sont composé toujours de dépôts fins.

### 2.2.2 Coupes hydrogéologiques :

#### 2.2.2.1 Coupe hydrogéologique I, NE – SW (Figure 20)

La première coupe est de direction NE-SW et qui coupe les forages OL1, K44, J42, H40 et W9. Cette coupe montre l'existence d'une seule nappe du plio-quadernaire avec substratum marneux vers le sud-ouest. Vers le nord-est la coupe montre 2 types de nappes (la nappe du plio-quadernaire et la nappe des calcaires du maestrichtien supérieur), séparés par une couche des marnes.



**Fig. (18):** coupe hydrogéologique I, (NE – SW)

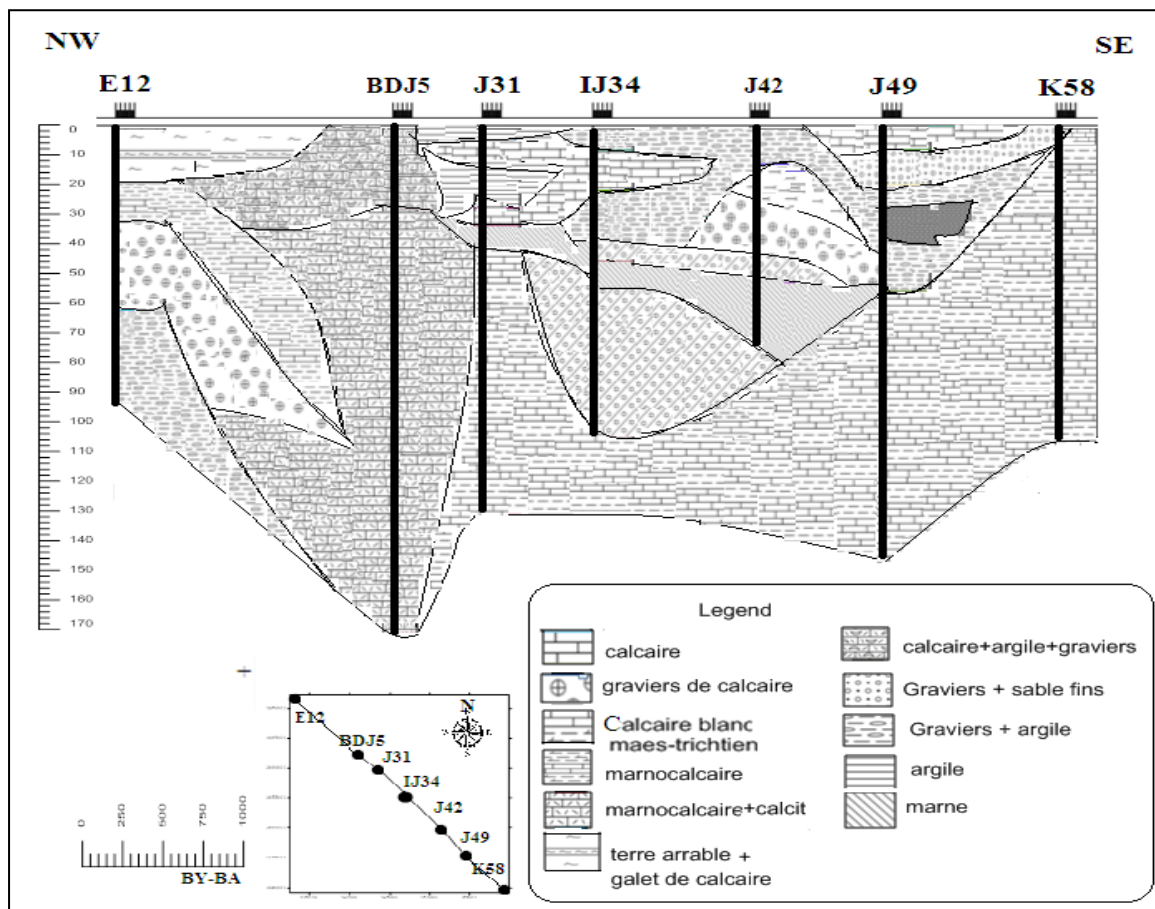
**2.2.2.2 Coupe hydrogéologique II, (NW – SE), (Figure 21) :**

Cette coupe est de direction nord-ouest, sud-est. Il coupe les forages E12, BDJ5, J31, IJ34, J42, J49 et K58. Cette coupe montre l'existence d'une nappe artésienne (J31), et un aquifère caractérisé par la présence du galet au niveau de forage J49, sous le nom « alluvions anciennes ». L'épaisseur des niveaux aquifère varie entre 80 et 170 m (au niveau du forage BDJ5).

On remarque que le forage le plus profond est le BDJ5 avec une épaisseur de 170 m, et le forage j42 à la plus faible profondeur (80 m).

En récapitule, les logs stratigraphiques exécutés dans la zone d'étude montre l'existence de deux aquifères utiles reposent sur un substratum marneuse :

- Plio-quaternaire superficiel composé essentiellement par des graviers et argile avec passage des fragments de calcaires, d'une épaisseur varie entre 10 et 100 m.
- Nappe profonde de calcaire du maestrichtien supérieur, ou l'épaisseur dépassent les 150 m.

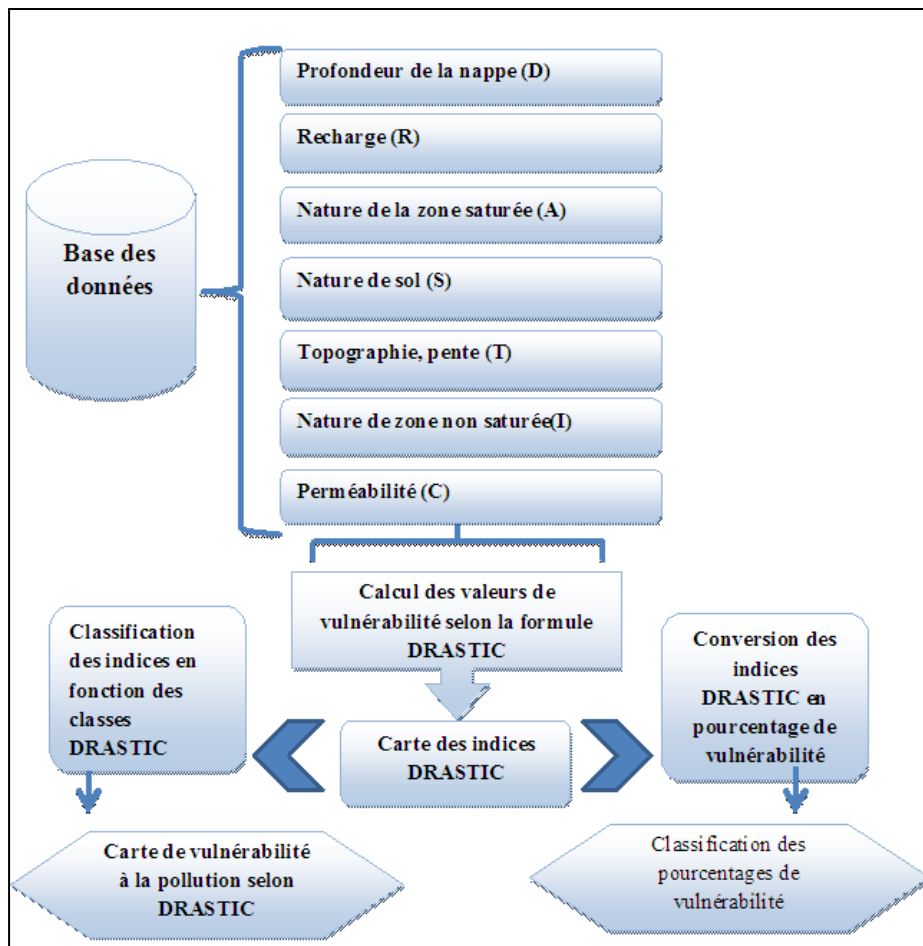


**Fig. (19):** coupe hydrogéologique II, (NW – SE)

### 3 Cartographie de la vulnérabilité

#### 3.1 Méthodologie :

Dans cette étude la cartographie de la vulnérabilité intrinsèque des eaux souterraines de la plaine de Gareat El Tarf à la pollution été réalisés par la méthode DRASTIC couplée dans un environnement SIG. Il s'agit du logiciel ArcGIS version 10.3. Ce dernier a permis l'intégration et la répartition spatiale des scores pondérés (cote x poids), attribués aux sept paramètres de la méthode DRASTIC et leur représentation sous le format shapefile (Jourda et al. 2007). Avec l'extension « Spatial Analyst » les shapefiles ont été convertis en mode Raster. Chaque Raster d représente la variation spatiale des scores pondérés (Chandoul et al. 2008). Le calcul de l'indice de vulnérabilité DRASTIC se fait directement par un calcul d'addition appliqué sur les sept Raster (superposition).



**Figure (20) :** Étapes d'élaboration de la carte finale de vulnérabilité.

**Tableau 6** : Type, sources des données et mode de traitement de chaque paramètre.

Paramètre	Type de données	Mode de traitement	Sources des données
Profondeur de la nappe (D)	Point	Interpolation	Niveaux statiques sur 38 forages (DHOB et DHKH)
La recharge net (R)	Point	Interpolation	Étude climatique et carte des sols de l'Algérie 1 :500000
La nature de Zone saturée (lithologie de l'aquifère) (A)	Polygone	Interpolation	Fiches techniques sur 38 forages (DHOB et DHKH)
Texture de Sol (S)	Polygone	Digitalisation	Carte des sols d'Algérie Tébessa 1 :500.000 de 1938 (R.J Bellon),
Topographie (T)	polyline	Digitalisation	Modèle numérique de terrain télécharger MNT ( <a href="https://earthexplorer.usgs.gov/">https://earthexplorer.usgs.gov/</a> )
La zone non saturée(I)	Polygone	Interpolation	Fiches techniques sur 38 forages (DHOB et DHKH)
Perméabilité (C)	Point	Interpolation	Essais de pompage.

### 3.2 Méthode DRASTIC

La méthode DRASTIC développée par Aller et al. (1987), sous l'égide de l'Agence Américaine de Protection de l'Environnement USEPA, est une méthode d'évaluation de la Vulnérabilité verticale intrinsèque à la pollution des aquifères, par systèmes paramétriques.

La méthode DRASTIC se base sur sept paramètres relatifs à la recharge, au sol, à la zone non saturée et à la zone saturée de l'aquifère contrôle la vulnérabilité verticale de l'eau souterraine :

**D** : profondeur d'eau, **R** : la recharge nette, **A** : les matériaux de l'aquifère, **S** : le type de sol (granulométrie et faciès), **T** : la topographie ou la pente, **I** : l'impact de la zone vadose ou zone non saturée (lithologie et épaisseur), **C**: ou la conductivité hydraulique de l'aquifère (la perméabilité) de la zone saturée. (SinanM. Et al, 2003)

Après l'indexation et la pondération de chaque facteur, le résultat final, appelé indice DRASTIC permet d'identifier des zones plus susceptibles d'être contaminés par rapport à d'autre plus l'indice DRASTIC est élevé, plus le potentiel de pollution de l'eau souterraine est grand (Anonyme (b), 2010).

Pour chacun des paramètres DRASTIC, les notes (cotation), allant de 1 (le moins important) à 10 (le plus important). Les basses notes impliquent que la nappe concernée n'est pas vulnérable à la pollution alors que le paramètre à une haute note implique qu'il existe un risque de contamination de la nappe (vulnérable).

A chacun de ces paramètres correspond un poids (valeur prédéterminée) compris entre 1 et 5, qui traduisent l'importance des paramètres dans les processus de transport et l'atténuation des contaminants (**tableau 7**). Les poids les plus élevés (5) sont attribués à la nature lithologique et à l'épaisseur de la zone non saturée, les poids les plus faibles (1 et 2) sont attribués respectivement à la pente et à la nature lithologique du sol. (Sinan M. et al, 2003)

Un indice DRASTIC est alors calculé en chaque zone hydro-géologiquement identique d'un aquifère selon la moyenne pondérée suivante :

$$Id=(Dc \times Dp)+(Rc \times Rp)+(Ac \times Ap)+(Sc \times Sp)+(Tc \times Tp)+(Ic \times Ip)+(Cc \times Cp)$$

où D,R,A,S,T,I,C, sont les paramètres cités plus haut :

**c** : cotation accordée à chaque paramètre

**p** : poids accordé à chaque paramètre

**Tableau 7** : Paramètres de la méthode DRASTIC (Mardhel Vet al., 2005)

Symboles	Paramètres	Propriétés	Poids du paramètre
			<b>DRASTIC</b>
<b>D</b>	Profondeur de la nappe	Plus cette profondeur est élevée, plus le contaminant met du temps pour atteindre la surface piézométrique	<b>5</b>
<b>R</b>	Recharge Nette	Véhicule principal pour le transport du contaminant. Plus cette recharge est grande, plus le risque de contamination est élevé.	<b>4</b>
<b>A</b>	Lithologie de l'aquifère	Caractérisée par la granulométrie des terrains saturés. Plus la granulométrie est fine, plus le piégeage du polluant est grand.	<b>3</b>
<b>S</b>	Sol	Plus le sol est riche en argile, plus l'absorption des métaux lourds est importante, et plus la protection des eaux souterraines est grande	<b>2</b>
<b>T</b>	Topographie	Plus la pente des terrains est grande, plus le ruissellement des eaux est important et par conséquent la contamination des eaux souterraines est faible	<b>1</b>
<b>I</b>	Zone non saturée	Son impact est déterminé à partir de la texture des terrains. la percolation du polluant jusqu'à la surface piézométrique est d'autant plus grande que cette texture est favorable (gravie, sable grossier)	<b>5</b>
<b>C</b>	Perméabilité	Plus ce paramètre est grand, plus le transfert du polluant est rapide	<b>3</b>

Les cartes DRASTIC permettent de visualiser le degré relatif de vulnérabilité d'un secteur de la zone étudiée. Le potentiel de pollution augmente dans le même sens que l'index. Les notations généralement accordées aux sept paramètres de la méthode DRASTIC sont présentées dans le tableau 1 ci-dessous. La notation 10 correspond au degré de vulnérabilité le plus élevé.

**Tableau8** : Les cotes des paramètres de la méthode DRASTIC. (D'après Lallemande, al 1994)

<b>D : Profondeur de la nappe (m)</b>		<b>R : Recharge (pluie efficace)</b>	
Valeur en mètre	Cotation	Valeur en mm	Cotation
0-1,5	10	25,5	9
1,5-4,5	9	17,5-25,5	8
4,5-9	7	10-17,5	6
9-15	5	5-10	3
15-22	3	0-5	1
22,5-30	2		
30	1		

<b>T : Topographie, pente</b>		<b>I : Nature de la zone non saturée</b>	
Valeurs en %de la pente	Cotation		
0-2	10	Calcaire karstique	10
2-6	9	Sable et gravier	9
6-12	5	Sable et gravier avec silt et argile	8
12-18	3	Grès	6
18	1	Calcaire	6
		Silt /argile	1

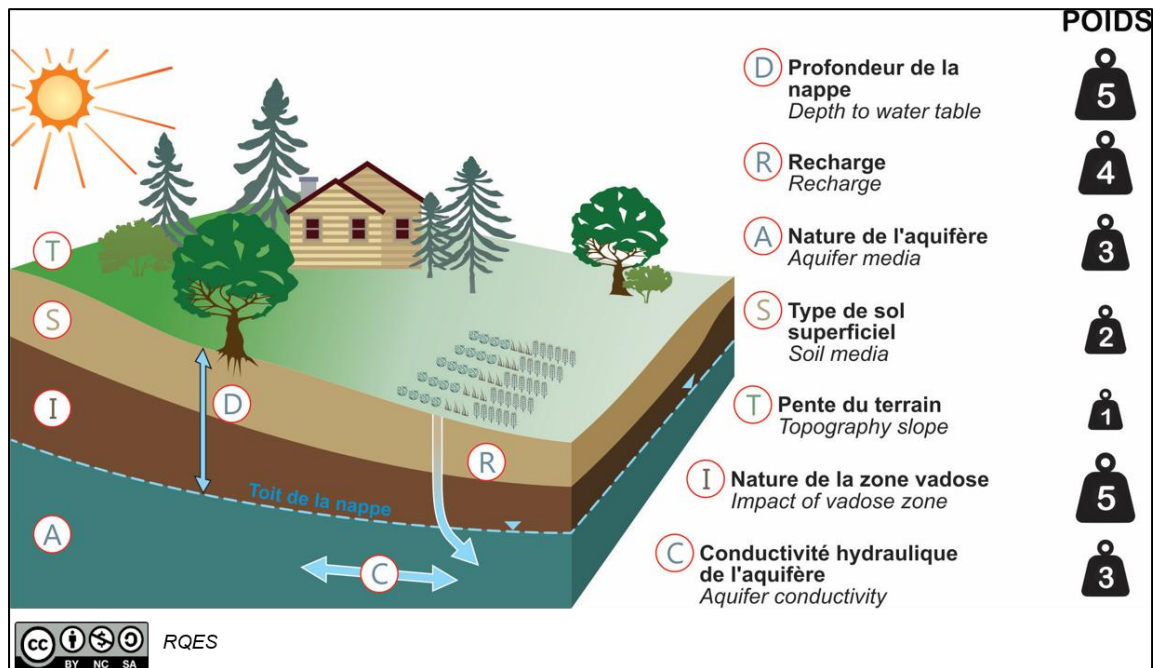
L'indice ainsi calculé représente une indexation du niveau de risque de contamination de l'unité hydrogéologique à laquelle il se rattache. Ce risque augmente avec la valeur de l'indice. Il peut prendre une valeur maximale de 226 et une valeur minimale de 23.

Le degré de vulnérabilité se définit de la façon suivante :

Critères d'évaluation de la vulnérabilité dans la méthode DRASTIC (Engel et al. 1996).

**Tableau .9 :** Indices de degré de vulnérabilité.

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



**Fig. (21) :** la méthode DRASTIC (paramètres et poids).

## 4 Résultats et discussion

### 4.1 Profondeur de la nappe (D):

La profondeur de la nappe est un paramètre important pour la détermination de vulnérabilité, il détermine l'épaisseur de la partie du sous-sol qui située entre la surface du sol et le toit de la nappe.

La carte de profondeur du la nappe d'eau à été établie par la méthode d'interpolation des niveaux piézométriques relevés sur 38 puits, par la méthode des inverses des distances (IDW).

Six classes ont été déduites pour ce paramètre D et les notes attribuées varient de 1 à 9, **(Figure22)** :

Classe 1 : 1,5 – 4,5 m ; cette classe représente les valeurs de la profondeur la plus faible localisées aux bordures Nord-ouest et Sud-ouest et le Centre de la zone d'étude.une note de 9 a été attribué.

Classe 2 : 4,5 – 9 m ; cette classe de profondeurs occupe la partie centrale de la zone d'étude. Une note de 7 est attribuée.

Classe 3 : 9 – 15 m ; cette classe de profondeurs est localisée aux alentours de la classe précédente (classe 2), avec une note de 5.

Classe 4 : 15 – 22 m ; cette classe de profondeurs est localisée a l'est du bassin avec une note de 3.

Classe 5 et 6 : >22,5 m ; c'est la classe des eaux les plus profondes et doc les mieux protégés situé à l'extrême est de la zone d'étude. Avec une note de 2 et 1.

Tableau 10. Poids et cote du paramètre profondeur à la nappe.

Gammes	Cotes	Poids
1,5 – 4,5	9	5
4,5 – 9	7	
9 – 15	5	
15 - 22	3	
22,5 - 30	2	
>30	1	

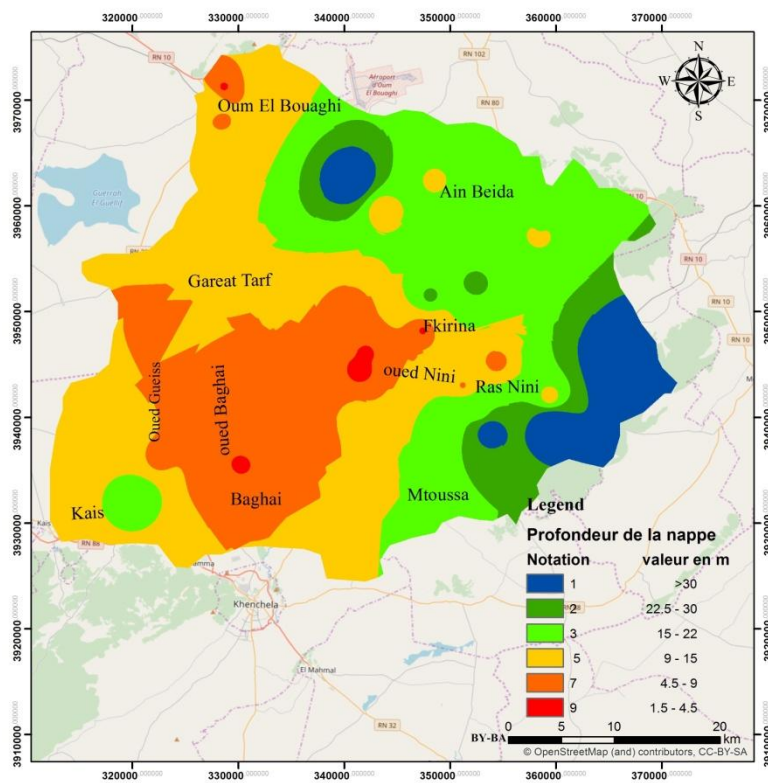


Fig. (22): Carte du Profondeur de la nappe de la zone d'étude.

## 4.2 La recharge efficace (R) :

C'est un paramètre qui est difficile à déterminer à cause de la multiplicité des facteurs qui l'affectent (la profondeur initiale de la nappe, la précipitation, types de sol...). La recharge définit la quantité de l'eau par unité de surface qui s'infiltré et atteint l'aquifère, soit à partir des eaux des précipitations, soit par l'alimentation des oueds (relation oueds-nappe), qui permet de transporter les polluants de sol jusqu'à la zone saturée.

La méthode utilisée pour élaborer la carte de la recharge nette de la nappe de Gareat El Tarf est celle de Williams and Kissel (1991). La recharge est obtenue selon ce procédé avec les équations suivantes correspondant à différents groupes hydrologiques de sols :

$$R = (P - 10.28)^2 / (P + 15.43) \rightarrow \text{groupe hydrologique A.}$$

$$R = (P - 15.05)^2 / (P + 22.57) \rightarrow \text{groupe hydrologique B.}$$

$$R = (P - 19.53)^2 / (P + 29.29) \rightarrow \text{groupe hydrologique C.}$$

$$R = (P - 22.67)^2 / (P + 34.00) \rightarrow \text{groupe hydrologique D.}$$

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

- Groupe A: les sols qui ont un taux d'infiltration très élevé même si elles sont complètement mouillées
- Groupe B: Les sols avec une vitesse d'infiltration modérée lorsqu'il est complètement mouillé.
- Groupe C: les sols caractérisés par une vitesse d'infiltration lente lorsqu'il est complètement mouillé
- Groupe D: les sols caractérisés par une vitesse d'infiltration très lente lorsqu'il est complètement mouillé

La **Figure. (25)** montre que la recharge diminue en allant vers El Garaet (de 0 à 5 mm) en relation avec les types hydrologiques des sols (sur la base de la carte des sols de Tebessa). La recharge maximum est observée aux limites du bassin avec une note de 9. (>25 mm).

Tableau 11. Poids et cote du paramètre de Recharge de la nappe de Gareat El Tarf.

Gammes	codes	poids
>25	9	4
10-17.5	6	
3-10	3	
0-5	1	

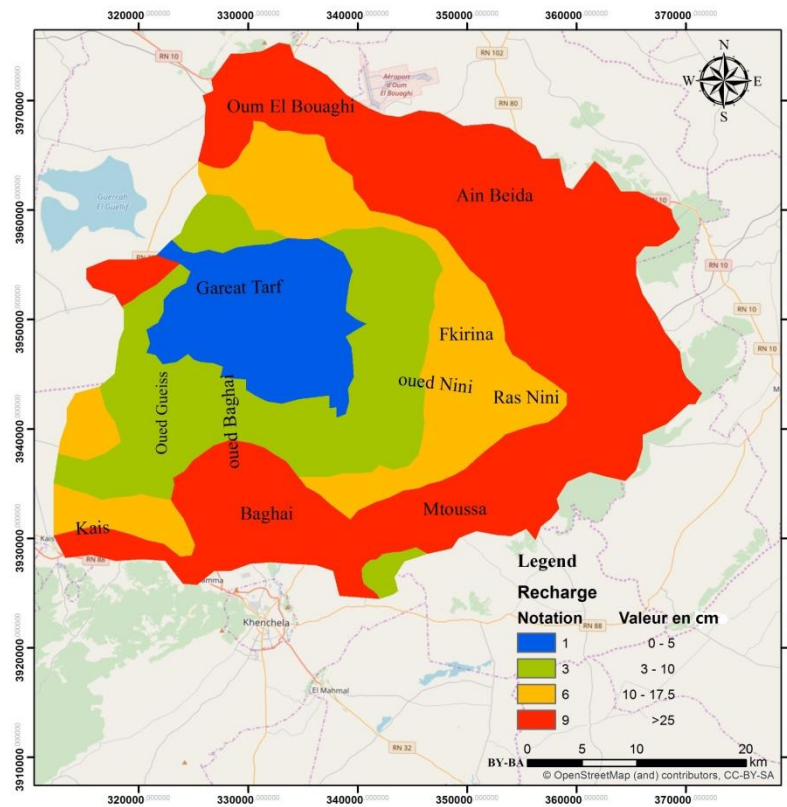


Fig. (23) : Recharge nett de la nappe de bassin du Gareat El Taf.

### 4.3 La Nature de la zone saturée A (Lithologie de l'aquifère) :

Les milieux aquifères et les constituants sont le chemin par lequel l'eau est transportée dans l'aquifère. La circulation et la propagation d'un contaminant dans la zone saturée dépendent de la texture et de la lithologie des couches de l'aquifère. Ces contaminants atteignent les eaux souterraines à travers des couches de sol faibles dans les milieux aquifères. La propagation des polluants contrôlés par la granulométrie, la porosité, la perméabilité et la lithologie des formations géologiques. Les couches de sol dans la région aquifère ont une faible porosité en raison de sa forte teneur en argile.

Ce paramètre est déterminé par la corrélation des coupes lithostratigraphiques (données des forages). La répartition spatiale des niveaux réservoir de la nappe de Garaet El Tarf montre quatre classes lithologiques :

- Argile sableuse et gravier : couvrant la partie du nord-ouest vers le sud-est (en rouge) (Note de 5)
- Argile et gravier calcaire : couvrant la partie de Ain el Beida et la limite de Garaet El Tarf (Orange) (Note de 4).
- Des formations marneuses calcaires (en vert) (Note de 3)
- Et les argiles avec passage de sable au sud de la plaine (en bleu) (Note de 2)

Les milieux aquifères ont une composition hétérogène d'Argile, Marno-Calcaire, Argile-Graviers de calcaire et Argile sableux et Gravier.

**Tableau12.** Poids, cote et indice du paramètre Lithologie de l'aquifère de Garaet Tel Tarf.

Zone	Cotes	Poids
Argile sableuse - Gravier	5	3
Argile - Gravier de calcaire	4	
Marno-calcaire	3	
Argile	2	

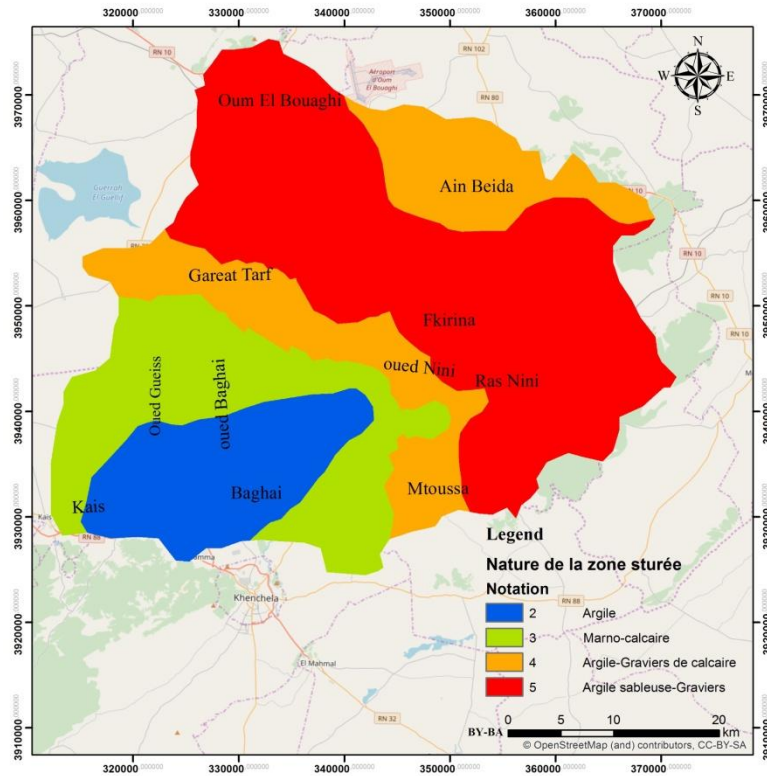


Fig. (24) : Carte de La zone saturée.

**4.4 La Texture de Sol (S) :**

La nature de la surface du sol est un facteur important pour la protection de l'aquifère contre la contamination. Pendant la recharge, cette couche peut réduire, retarder ou accélérer le processus de propagation du polluant vers l'aquifère et influence l'infiltration vers les eaux souterraines. Ce ci dépend de plusieurs facteurs :

- 1) la perméabilité du sol,
- 2) le type d'argile constituant le sol et
- 3) la présence de matière organique, d'acides humiques et de minéraux argileux.

Ce paramètre est extrait à partir de la carte des sols d'Algérie (Tébessa) de 1938 (R.J Bellon), 1 : 500000. En se basant sur la classification pédologique de la méthode DRASTIC, cinq classes ont été extraites :

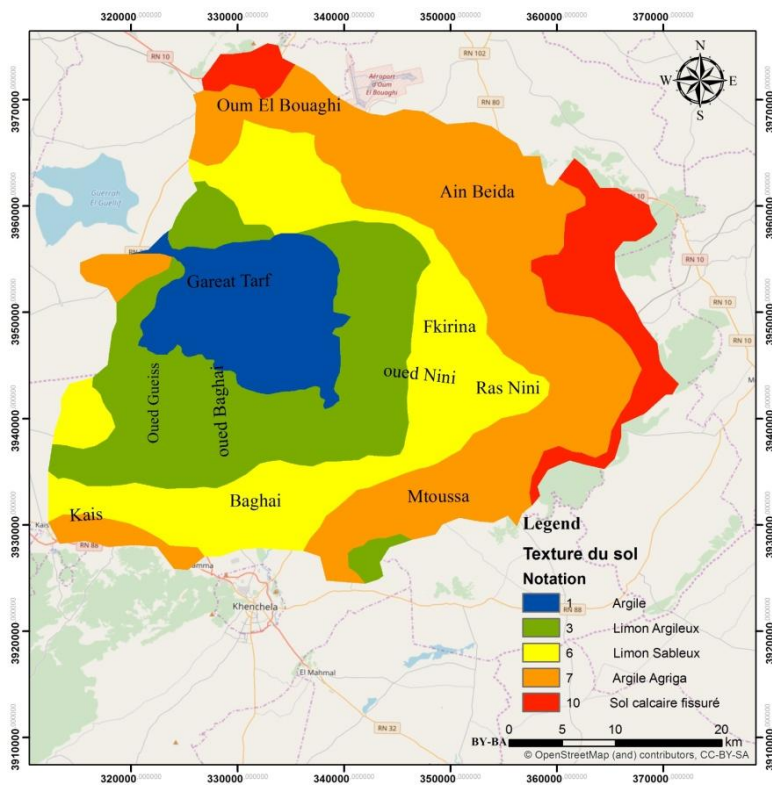
- Sols calcaires fissurés avec une note de 10 correspond aux calcaires de maestrichien.

- Sols argileux calcaires avec une note de 7 couvrant le demi-cercle Oum El Bouaghi, Ain El Beida et M'Toussa.
- Sols limoneux sableux avec une note de 6 couvrant la partie qui entourent Garaet El Tarf
- Sols limoneux argileux et argileux avec une note de 3 et 1 correspondent aux Garaet el Tarf proprement dit.

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

**Tableau13.** Poids et cote des types de sols de Garaet El Tarf.

Zone	Cotes	Poids
Sol calcaire fissuré	10	2
Argile Agrigats	7	
Limon sableux	6	
Limon argileux	3	
Argile	1	



**Fig. (25) :** Carte de texture du sol.

#### 4.5 La topographie, Pente (T) :

Le paramètre topographie est représenté dans la méthode DRASTIC par les valeurs de la pente en pourcentage. Il traduit la capacité à l'infiltration et au ruissellement des eaux de surface à introduire des agents polluants vers la nappe, reflétant son effet faible à modérer sur la vulnérabilité des eaux souterraines. Lorsque la pente est inférieure à 2% le ruissèlement est faible ce qui favorise l'infiltration. Par contre lorsque la pente est supérieure à 18 % les eaux de précipitation se ruissèlent facilement et transférés les polluants. La pente a été calculée dans l'environnement SIG à l'aide du modèle numérique de terrain MNT de 30 m x 30 m. (<http://earthexplorer.usgs.gov/>). Les valeurs de la pente (en %) sont recalculées selon la classification originale DRASTIC.

La carte matricielle obtenue (**Figure. 26**) montre la prédominance des terrains inférieurs à 6%.

**Tableau14.** Poids et cote du paramètre de Pente de Gareat El Tarf.

Gammes	Cotes	Poids
0-2	10	1
2-6	9	
6-12	5	
12-18	3	
>18	1	

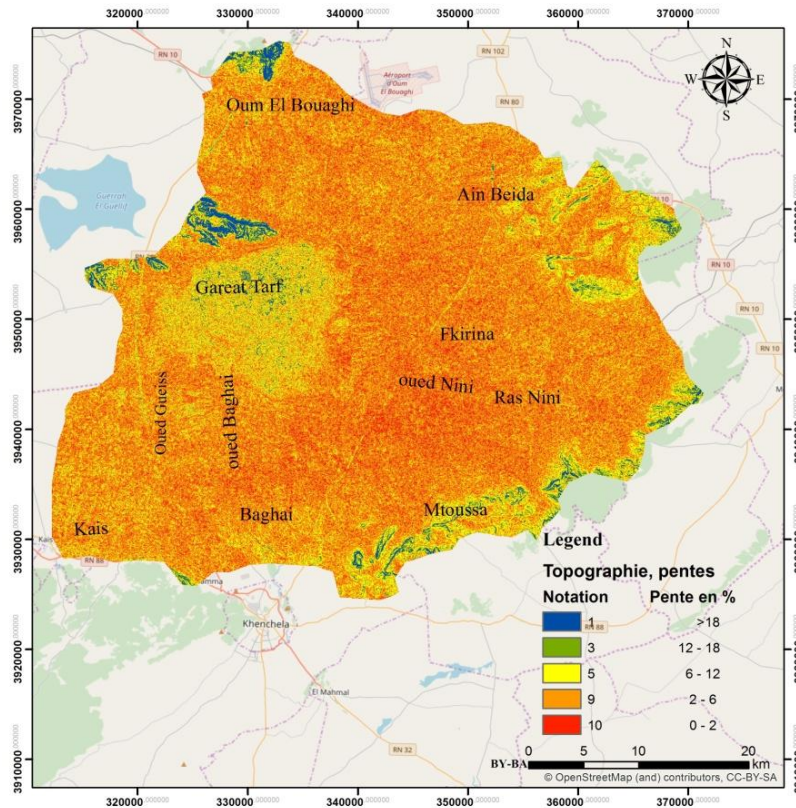


Fig. (26) : Carte des pentes du bassin versant de Gareat El Tarf.

**4.6 Impacte de zone non saturée (I):**

Zone non saturée ou la zone vadose correspond aux couches de terrain entre l'aquifère et le sol. L'influence de cette zone dans la contamination potentielle de l'aquifère dépend essentiellement de sa perméabilité et de sa capacité d'atténuation. Le principal outil qui a été utilisé pour l'évaluation de la zone vadose est les logs stratigraphiques des forages et quelques coupes géologiques dans la région comme document supplémentaire.

La cote la plus élevée pour toutes les unités a été attribuée aux Gravieres et sables (7) suivis par les calcaires (6). De par leur granulométrie grossière et détritique, ces dépôts sont très perméables. On a attribué aux secteurs Oum el bouaghi, F'kirina, Ain El beida jusqu'aux M'toussa. Une cote de (5) et (4), Il s'agit des calcaires argileux et graviers. Alors que les régions où elle est recouverte par des dépôts argileux et fragments de calcaire ont eu des cotes variant de 2 à 3.

Le modèle DRASTIC attribue un poids 5 à la zone vadose comme indication de son importance pour la percolation et donc la contamination des aquifères (vulnérabilité). Cependant, les régions centrales et est-sud de Bassin ont des matériaux de catégorie secondaire.

Tableau 15 : Poids et cote du paramètre Impacte de la zone vadose de Gareat El Tarf.

Zone	Cote	Poids
Graviers – Sable	7	5
Calcaire	6	
Terre arable	5	
Argile – Calcaire - Graviers	4	
Argile – Graviers de calcaire	3	
Argile	2	

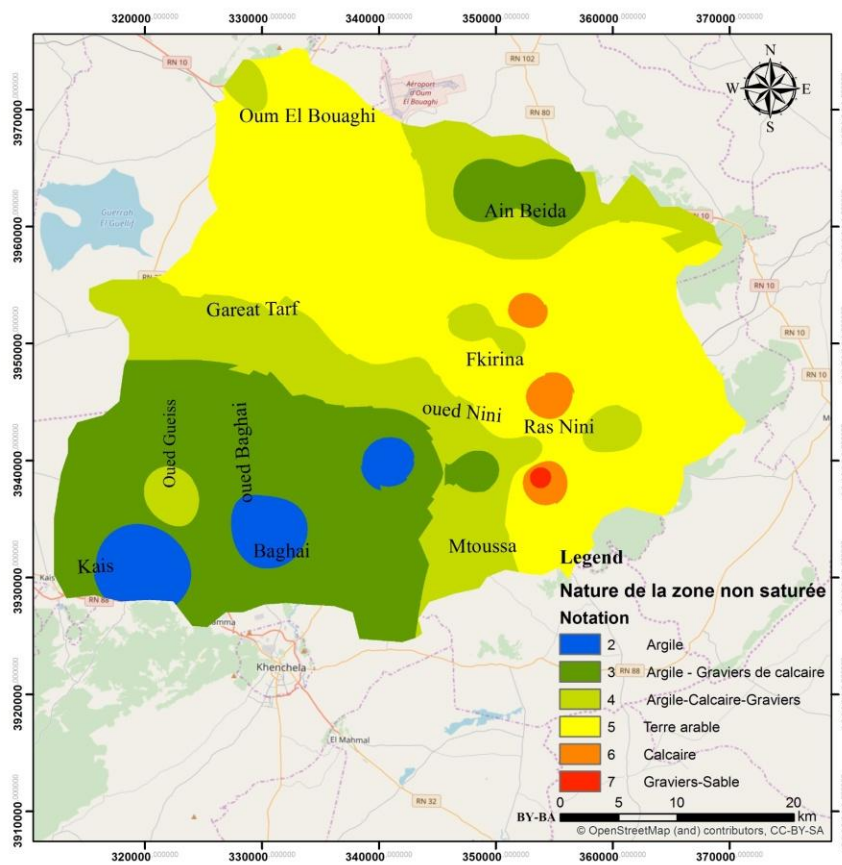


Figure. (27): Carte de la zone non saturée.

#### 4.7 La Perméabilité (C):

La perméabilité ou la conductivité hydraulique corrélée avec la capacité de l'aquifère à transmettre l'eau, elle contrôle la vitesse de propagation de polluant dans la zone saturée. L'estimation de la perméabilité dépend de la nature lithologique des aquifères (Abaque de Freeze Cherry, 1979). Les valeurs de la conductivité hydraulique sont celles mesurées lors des essais de pompage. Un nombre restreint de données sur les valeurs de conductivité hydraulique sont disponibles, données. La source principale de ces données est représentée par l'ensemble des documents qui ont été compilés dans le cadre de cette mémoire.

La zone aquifère de Bassin Gareat El Tarf est divisée en trois catégories (**figure 30**), relatives à la conductivité hydraulique les cotes assignées variant de 9 à 2 et. Les valeurs calculées pour la conductivité hydraulique étaient :  $4,7 \cdot 10^{-5} - 14,7 \cdot 10^{-5}$  m/s.....Cote de (2),  $32,9 \cdot 10^{-5} - 4,7 \cdot 10^{-5}$  m/s.... Cote de (6) et  $4,7 \cdot 10^{-4} - 9,4 \cdot 10^{-4}$  m/s.... Cote de (9)

**Tableau 16.** Poids et cote pour le paramètre conductivité hydrique de l'aquifère Gareat El Tarf.

Zone	Cote	Poids
$4,7 * 10^{-4} - 9,4 * 10^{-4}$	9	3
$32,9 * 10^{-5} - 4,7 * 10^{-5}$	6	
$4,7 * 10^{-5} - 14,7 * 10^{-5}$	2	

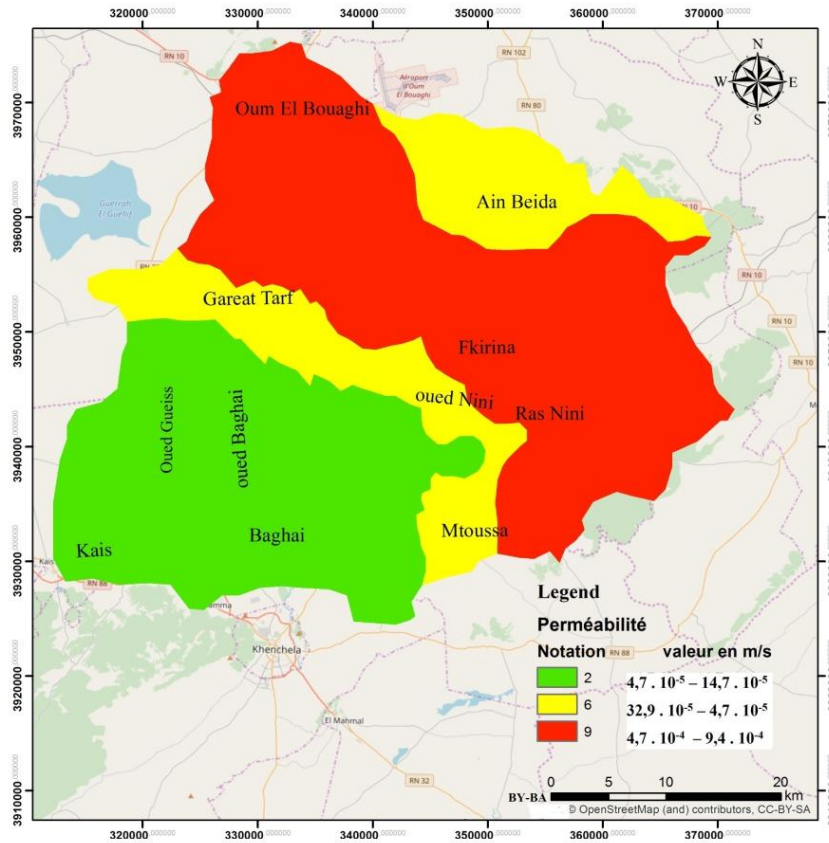


Fig. (28): Carte de perméabilité du bassin versant de Gareat El Tarf.

**4.8 Indice de Vulnérabilité :**

L'élaboration de la carte de vulnérabilité, est effectuée par le calcul de l'indice de vulnérabilité Di qui intègre les sept paramètres selon la formule suivante :

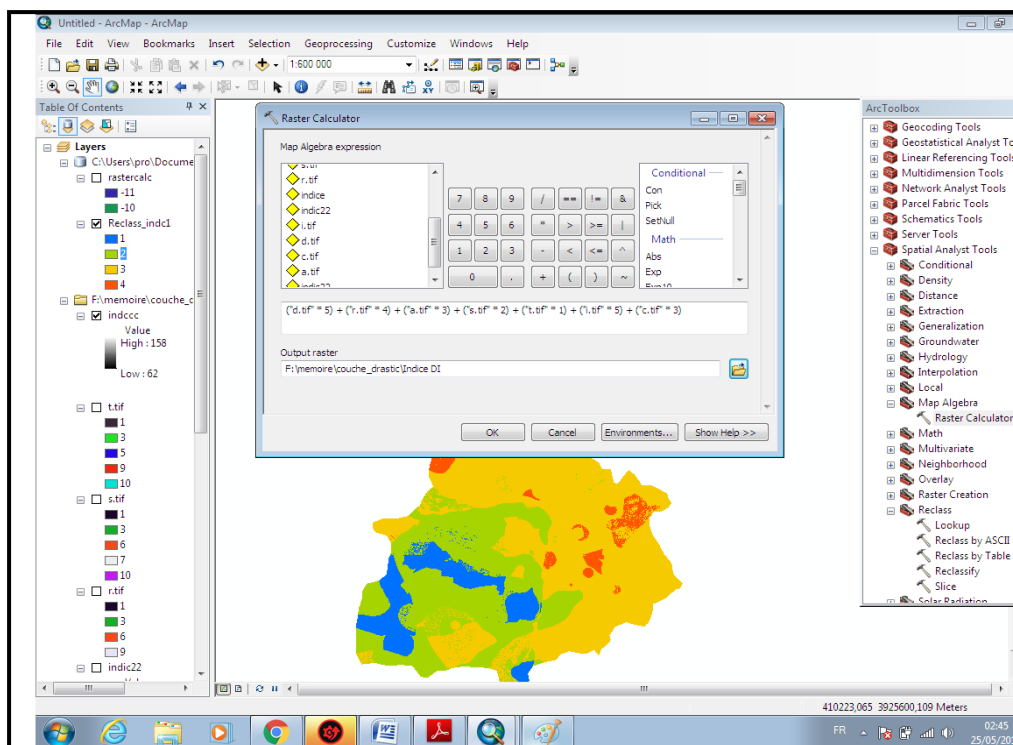
$$D_i = (D_c \times D_p) + (R_c \times R_p) + (A_c \times A_p) + (S_c \times S_p) + (T_c \times T_p) + (I_c \times I_p) + (C_c \times C_p)$$

où D,R,A,S,T,I,C, sont les paramètres cités plus haut :

**c** : cotation accordée à chaque paramètre

**p** : poids à chaque paramètre

La carte de de l'indice de vulnérabilité à été établie sous l'extension « Spaciale Analyst Tools » permet de calculer cet indice en tout point de la zone d'étude, par l'addition de sept paramètres présentés sous le format GRID. L'outil « map Algebra → Raster calculator » de menu Analyst offre plusieurs types d'opérations mathématiques. Le résultat de calcul est représenté dans la (figure31).



**Fig. (29):** Calcul de l'indice DRASTIC de vulnérabilité.

Pour le Bassin Gareat El Tarf, l'indice de vulnérabilité est divisé en quatre intervalles d'indice de 56 à 174; chaque indice représente une évaluation du niveau de risque de contamination de la nappe, ce risque augmente avec le valeur de l'indice (Aller et al., 1987):

Tableau 17 : l'indice de DRASTC de Bassin versant Gareat El Tarf

Indice DRASTIC	Degré de vulnérabilité
(56-83)	Très faible
(83-113)	Faible
(113-144)	Moyen
(144-174)	Élevé

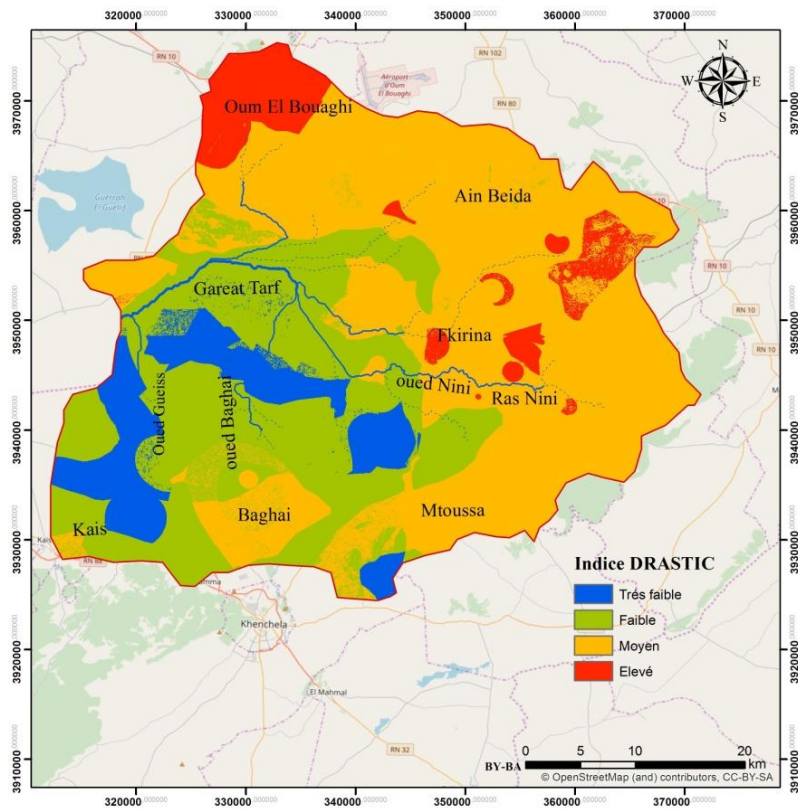
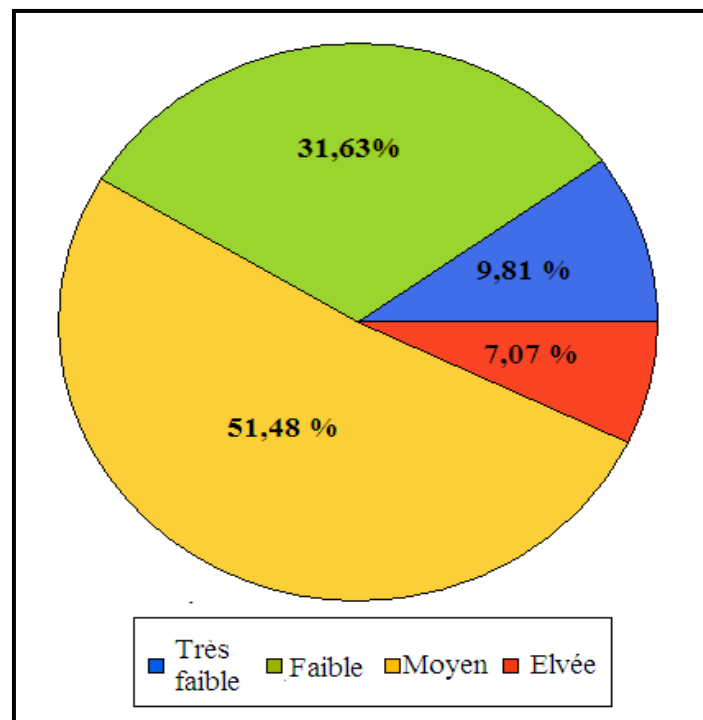


Fig. (30): Carte de vulnérabilité à la pollution de bassin du Gareat El Tarf.

La carte (**Figure30**) de vulnérabilité obtenue montre quatre classes de vulnérabilité :

- Vulnérabilité forte : dans la partie nord et nord-est (F'Kirina) de la plaine (en rouge) couvrant **7,07%** de la surface totale de la zone d'étude. Cette vulnérabilité peut être justifiée par un taux de recharge élevé de la nappe avec une pente égale ou inférieure à 2% et l'impact de la zone vadose. Ces conditions favorisent l'infiltration des contaminants présente au niveau de surface.
- Vulnérabilité moyenne couvrant plus de la moitié de la zone d'étude **51,48%**. localisé surtout au nord et à l'est du bassin.
- Vulnérabilité faible : occupe **31,63%** de la zone d'étude. Localisé au centre et au sud du bassin n'est pas loin du Garaet.
- Vulnérabilité très faible ; représente **9,81%** de la surface totale du bassin. Cette classe de vulnérabilité occupe el Garaet et sa partie ouest en relation avec les sols imperméables de cette zone.



**Fig. (31):** Représentation l'indice de vulnérabilité DI en %

## 5 Conclusion :

Les eaux de la nappe de Gareat El Tarf sont utilisées principalement pour l'alimentation en eau potable et l'irrigation. La cartographie de la vulnérabilité de l'aquifère de Gareat El Tarf par le modèle DRASTIC dans un environnement SIG montre quatre degrés de vulnérabilité allant de forte à très faible. Globalement, on constate qu'environ la moitié des unités fonctionnelles présente une vulnérabilité moyenne, un quart une vulnérabilité faible et le reste entre forte et très faible vulnérabilité.

Les secteurs où la vulnérabilité est forte se répartissent au sud de Oum El Bouaghi et la partie centrale de F'Kirina en relation avec la texture du sol argileux sableuse et la lithologie de la zone non saturée perméable et qui favorise la recharge nette.

Cette carte constitue la synthèse des informations touchant les aspects de la vulnérabilité des eaux souterraines à la contamination. Elle vise à rendre accessibles les informations spécialisées en les présentant dans un format avec lequel les aménagistes et les gestionnaires du territoire sont habitués de travailler. Cette carte constitue donc un outil précieux pour la gestion de la ressource.

### **Conclusion générale :**

Le bassin versant de Garaet El Tarf est une entité hydrographique des bassins versants des hauts plateaux constantinois située au nord-est de l'Algérie. Caractérisé par un climat tempéré au sud et semi aride au nord, situé à l'extrême Nord-est algérien et d'une superficie 9578 km<sup>2</sup>.

La géologie de la zone étudiée constituée essentiellement par une succession des formations sédimentaires. Dont la superposition du haute en bas

- Des couches à dominance marno-calcaire, des argiles, et limono argileuse, graviers du Plio-quadernaire, et sable, graviers de l'alluvion, qui représente la plus grande formation de la zone d'étude.
- Au-dessous, un substratum rencontre des couches à dominance de marne et calcaire du crétacé inférieur et argiles, marne calcaire du trias
- des couches marneuses, donnant un caractère imperméable du Miocène.

La méthode DRASTIC couplée avec un SIG sous ArGis, a été utilisée pour estimer le degré de vulnérabilité. En effet, Le SIG a fourni un environnement efficace pour les analyses et une forte capacité de manipulation de grandes quantités de données spatiales. Les sept paramètres du modèle ont été construits, classés et codés en utilisant l'outil SIG et ses fonctionnalités. L'indice de vulnérabilité, qui est défini comme étant une combinaison linéaire des facteurs, a été facilement calculé.

La répartition spatiale des classes de vulnérabilité de la nappe de Garaet El Tarf est globalement de faible à moyenne vulnérabilité. Les indices DRASTIC les plus élevés sont localisés essentiellement dans la région d'Oum El Bouaghi et F'Kirina. Ceci est expliqué par la nature des formations lithologiques perméables relatives dans cette zone. Les zones à vulnérabilité très faible et faible occupent El Garaet et ces alentours jusqu'au le sud-ouest du bassin, ceci due à la couverture argileuse formant une protection naturelle et à la faible perméabilité de l'aquifère.

**Recommandation:** Étant donné que le bassin de Garaet El Tarf connaît aussi une forte activité agricole et est considérée la seule source d'eau pérenne de la région, pour cela une série de mesures doit être prise afin de protégé cette ressource précieuse :

- des études hydrogéologiques-hydrodynamiques pourraient venir compléter le champ de connaissances nécessaires à ces études de vulnérabilité.

- La délimitation des périmètres de protection des captages d'eaux souterraines destinés à l'alimentation en eau potable pour la sauvegarde de la qualité naturelle des eaux souterraines.
- Utilisent cette approche de la vulnérabilité comme outil d'aide à la décision, et réfléchissent sur des solutions et des aménagements favorisant une protection durable de cette ressource.

# Bibliographie

- Aké G.E., Dongo K., Boyossoro H.K., Dibi B., Sale M.B., Biemi J.,** (2009). Contribution des méthodes de vulnérabilité intrinsèque DRASTIC et GOD à l'étude de la pollution par les nitrates dans la région de Bonoua (Sud-Est de la côte d'Ivoire). *European Journal of scientific Research*. Vol.31 N°1 PP157-171.
- Albinet M.,** (1970), Carte de vulnérabilité à la pollution des nappes d'eau souterraine, *Bulletin BRGM 2ème série, section III, 4,3-22, Orléans.*
- Al-Hanbali A., Kondoh, A.,** (2008). Groundwater vulnerability assessment and evaluation of human activity impact (HAI) within the Dead Sea groundwater basin, Jordan. *Hydrogeology Journal*, 16, 499-510.
- Aller, L. et al.,** (1987). DRASTIC. A standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic settings. U.S. Environmental Protection Agency, Ada, Okla., EPA/600/2-87/035. 455 p.
- Aller, L., Bennett, T., Lehr, J.H., Petty, R.J. et Hackett, G.,** (1987) - DRASTIC: a standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic settings. US-EPA Report 600/2-87-035, XVIII + 622 p.
- Amharref M., Assine, S., Bernoussi, A. et Haddouchi B.** (2007). Cartographie de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines: application à la plaine du Gharb (Maroc). *Revue science de l'eau* 20 (2): 185-199.
- Anonyme (b),** (2010) . État des lieux des eaux souterraines Guide explicatif des fiches par masses d'eau souterraine, Version 1.20, Mise en uvre de la Directive-cadre sur l'Eau (2000/60/CE), "Agriculture, Ressources naturelles & Environnement", Service public de Wallonie.
- Atteia O.,** (2005). Chimie et pollutions des eaux souterraines. Lavoisier. 397pp.
- Avenard J.-M., Bonvallot J., Latham M. et al.,** (1973). Le contact forêt-savane en moyenne Côte d'Ivoire. *Annales de géographie*, 453, 513-544.
- Babiker I.S., Mohamed A.A.M. & Hiyama T.,** (2007). Assessing groundwater quality using GIS. *Water Resources Management*. Vol. 21. Issue 4. Pp 699-715.
- Berg, Raven, Hassenzah.,** (2009). Environnement de Boeck Université de Toulouse *Biologie* Vol.700p.de 551p.
- Bézèlgues, S. Desgarets, E.,** (2002). Cartographie de la vulnérabilité des nappes de grande-terre et de Marie-Galante (Guadeloupe), Rapport BRGM, RP-51783-Fr . p 9-12
- Biaggi, D., Schwienbacher, S., Guldenfels, L.,** (2012). Zones de protection des eaux souterraines en roches meubles. Guide Pratique. L'environnement pratique. Office Fédéral de l'Environnement (OFEV). Berne, Suisse. 58p.

- Biémi J.**, (1992). Contribution à l'étude géologique, hydrogéologique et par télédétection des bassins versants subsahariens du socle précambrien d'Afrique de l'Ouest: hydrostructurale, hydrodynamique, hydrochimie et isotopie des aquifères discontinus de sillons et aires granitiques de la haute Marahoué (Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat ès Sciences Naturelles, Faculté des Sciences et Techniques, Université Nationale de Côte d'Ivoire, 493 p.
- Bliefert C., Perraud R.**, (2011). Chimie de l'environnement. Air, eau, sol, déchets, 2<sup>e</sup> édition De Boeck Université. Bruxelles. ISBN 978-2-8041-5945-0. 478p
- Bordet J.**, (2007). L'eau dans son environnement rural ; édition Johanet
- Bouazza A., Delage P., Wojnarowicz M.**, (2005), - Nature et reconnaissance de la pollution des sols. Dans Géomécanique environnementale sols pollués et déchets. Chap. 1, p 17-45. Sous la direction de Delage P., Schrefler B., Ed. Hermès-Science Publication, Lavoisier, Paris.
- Bouguett, K., Benhamida, N.**, (2015). Étude de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines de la cuvette d'Ouargla (cas de la nappe continentale intercalaire). Université Kasdi Merbeh Ouargla. Science et technique.14p.
- Bower, H.**, (2002) Artificial recharge of groundwater: Hydrogeology and engineering. Hydrogeology Journal, vol. 10, pp. 121-142.
- Castany, G.** (1980). Faire connaissance avec l'eau propre. Hachette.Paris.
- Castany, G.** (1982). Principes et méthodes de l'hydrogéologie. Dunod Université, Paris, 236p.
- Chandoul E.R., Trabelsi, N., Bouaziz, S., Ben Dhia, H.**, (2008). Spatial Analyst" pour le calcul et la cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution selon la méthode DRASTIC. Application sur la nappe phréatique de Gabès Nord. La conférence francophone ESRI ,1et 2 octobre 2008, Versailles. [www.esrifrance.fr/sig2008/DRASTIC.htm](http://www.esrifrance.fr/sig2008/DRASTIC.htm). 12p
- Citivà, M., M., D.M.**, (1997). SINTACS. Un sistema parametrico per la valutazione e la cartografia della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento. Metodologia & Automatizzazione, Bologna, Italia.
- Civita M.**, (1994). Aquifer vulnerability maps to pollution. Pitagora, Bologna.
- Dali N.**, (2009). Ressources et gestion intégrée des eaux du bassin de Gareat El Tarf (W. Khenchela). Mémoire de Magister. Université Badji Moukhtar. Annaba, 5p, 15p, 19p, 45p.
- Daly D., Dassargues A., Drew D., Dunne S., Goldscheider N., Neale S., Popescu I. C. et Zwahlen F.**, (2002). Main concepts of the "European approach" to karst-groundwater vulnerability assessment and mapping. Hydrogeology Journal 10(2): 340-345.
- Doerfliger, N., Plagnes, V., Kavouri, K., Gouin, J.**, (2009). Cartographie de la vulnérabilité intrinsèque des aquifères karstiques. Guide méthodologique de la méthode PaPRIKa. Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM). Orléans, France. 105p

- Doerfliger N. et Zwahlen F.**, (1998). Groundwater vulnerability mapping in karstic regions (EPIK). Application to groundwater protection zones: practical guide. Office Fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEFP), Berne, Switzerland
- Duchaine D.**, (1995). Cartographie de la Vulnérabilité Des Eaux Souterraines À La Pollution (par l'intégration d'un SIG, de la télédétection et d'un modèle mathématique). Mémoire de recherche, département de géographie, Université du Québec INRS-Eau, 95 p.
- Duchaine D.**, (1998). Cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution (par l'intégration d'un SIG, de la télédétection et d'un modèle mathématique). I.N.R.S-Eau. Université du Québec. 83 p.
- Ducommun, R.**, (2010). Estimation et cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines en milieu urbain. UNINE, Neuchâtel, Suisse. 310.
- E.Koller.**, (2004), traitement des pollutions industrielles, Dunod, Paris, ppp 4-6-7 p.
- Eastman, J. R.**, (1995). Idrisi, un SIG en mode image. Clark labs for cartographic technology and geographic analysis. Publication du CRIF, 500 p.
- Engel B.A., Navulur K.C.S., Cooper B.S et Hahn L.** (1996) - Estimating groundwater vulnerability to non point source pollution from nitrates and pesticides on a regional scale. IAHS Publications, vol. 235, p. 521-526 p.
- Es Saouini H.**, (2015),. These de Doctorat Universite Abdelmalek Essaadi Tanger Sciences et Techniques de L'ingénieur Vol.20-21p
- Foster S.S.D.**, (1987). Fundamental Concepts in Aquifer Vulnerability, Pollution Risk and Protection Strategy – In: Van Duijvenboden, W. & VAN WAEGENING, H.G. (eds) Vulnerability of Soil and Groundwater to Pollutants, TNO Committee on Hydrogeological Research, Proceedings and Information, 38: 69-86 ; The Hague
- Franciss F.O.**, (1970). Contribution à l'étude du mouvement d'eau à travers les milieux fissurés. Thèse de Doctorat, Université de Grenoble I, 108p.
- François Colin.**, (2000), Rapport de l'Académie des sciences n°44
- Freeze, R. A. and J. A. Cherry.**, (1979). Groundwater. Englewood Cliffs, N.J., Prentice-Hall. London, 604 p
- Ghandriche H.**, (1991) - Modalités de la superposition de structures de plissement chevauchement d'âge alpin dans les Aurès (Algérie). Thèse de l'Univ. de Paris-Sud, centre d'Orsay, 189 p., 68 fig., 6 pl. h. -t.
- Gogu R. C. & Dassargues A.**, (1998). A short overview on groundwater vulnerability assesment (basic statements for use in the framework of the COST 620 Action) ; Workshop: Vulnérabilité et protection des eaux karstiques, Neufchâtel(Suisse).
- Goldscheider N, Popescu C.**, (2004) The European Approach. In: Zwahlen F (ed) Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers. European Commission, Brussels, 17–21p.

- Goldscheider, N., Klute, M., S., S., H., H.,** (2000). The PI Method - a GIS-based approach to mapping groundwater vulnerability with special consideration of karst aquifers. *Zeitschrift für angewandte Geologie* 46,3, 157 – 166p.
- Guiraud, R.,** (1973). Evolution post-Triasique de l'Avant pays de la chaîne alpine en Algérie d'après l'étude du bassin du Hodna et des régions voisines. Thèse Sci. Univ. Nice, 270 p, 114 fig., 12 pl. h.t.
- Gustave Mukoko Kalenda.,** (Aout 2014). Livre Comportement des sols latéritiques compactés dans les remblais et digues de retenue des rejets miniers du Katanga (RDC). Université catholique de Louvain, Vol.497, 85p.
- HAM, M. Hafedh Hamza, A. Added, A. Frances, R. Rodriguez.,** (2007) – Validité de l'application des méthodes de vulnérabilité DRASTIC, SINTACS et SI à l'étude de la pollution par les nitrates dans la nappe phréatique de Metline-Ras Jebel-Raf Raf (Nord-Est tunisien) in *Geosciences de surface (Hydrologie-Hydrogéologie)* 339 (2007).439-505p.
- Hentati I., Zairi M. et Ben Dhia H.,** (Oct 2005). Utilisation des SIG pour l'évaluation de la vulnérabilité environnementale des aquifères phréatiques : Cas de la nappe de Sfax-Agareb (Sud-Est tunisien). Laboratoire Eau, Energie et Environnement (LR3E).Ecole Nationale d'Ingénieurs de Sfax. Conférence francophone ESRI. 5- 6. Issy- les- Moulinaux. Environnement/ Eau.
- Herkat M.,** (1982).- lithostratigraphie et sédimentologie des formations carbonatées du jurassique supérieur des monts Oulad Nail et la terminaison orientale du Djbel Amour (Atlas Saharien). Thèse 3ème cycle, Univ.pau
- Houhamdi, M., Hafid, H., Seddik S., Bouzegag A., Nouidjem Y., Bensaci T., Maazi M-C.& Saheb, M.** (2008). Hivernage des Grues cendrées *Grus grus* dans le complexe de zones humides des hautes plaines de l'Est de l'Algérie. *Aves* 45/2: 93-103p.
- Jackson R.E.** (ed). (1980). Aquifer contamination and protection. UNESCO, Paris, *Studies and Reports in Hydrology* 30, 439p.
- Jourda J.P.R.,** (2005). Méthodologie d'application des techniques de télédétection et des systèmes d'information géographique à l'étude des aquifères fissurés d'Afrique de l'Ouest. Concept de l'hydrotechnique spatiale : cas des zones tests de la Côte d'Ivoire. Thèse de Doctorat d'État, Université de Cocody Abidjan, 430p.
- 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* 2007.21p
- Kouamé K.F.,** (1999). Hydrogéologie des aquifères discontinus de la région semi-montagneuse de Man- Danané (Ouest de la Côte d'Ivoire). Apport des données des images satellitales et des méthodes statistique et fractale à l'élaboration d'un système

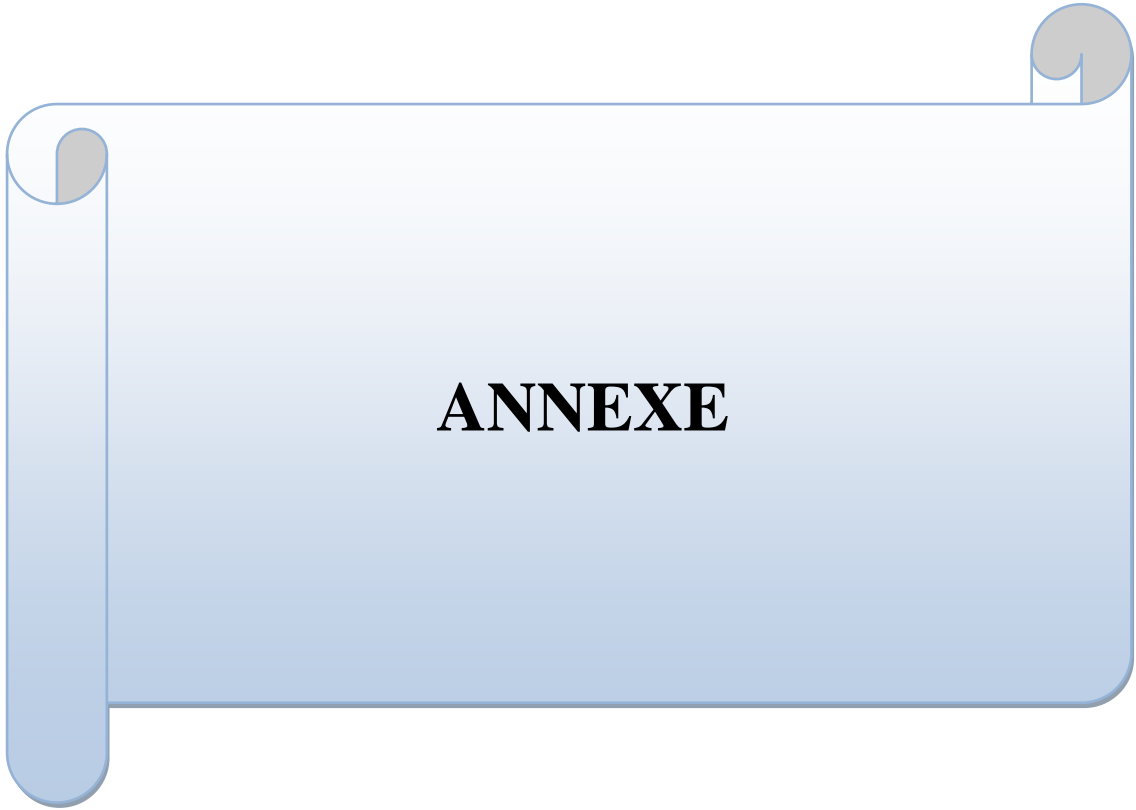
- d'information hydrogéologique à référence spatiale. Thèse de Doctorat de 3ème cycle, Université de Cocody, 196p.
- Koussoube Y.**, (1996). Hydrogéologie en milieu du socle cristallin du Burkina Faso : cas du bassin versant du bas-fond de Bidi (Province du Yatenga). Thèse Université Cheick Anta Diop, Dakar (Sénégal), 238p.
- Laffitie R.**, (1939a) - Étude géologique de l'Aurès. Thèse Sciences Paris. Bull. Serv. Carte géol. Algérie, (2), Stratigraphie, Bull. n° 15, 484 p., 26 fig., 1 carte 1/200.000° h.t;
- Lafitte Robert.**, (1939) Structure et relief de l'Aurès (Algérie). In: Bulletin de l'Association de géographes Français, N°119, 16e année, Février 1939. 34-40p;
- Lallemand Barres A. et Roux J.C.**, (1999). Périmètre de protection des captages d'eau souterraine destinée à la consommation humaine, édition BRGM.
- Lallmand-Barres A.**, (1994) – Normalisation des critères d'établissement des cartes de vulnérabilité aux pollutions. Étude documentaire. Rapport BRGM R 37928
- Mardhel N.**, (2001) – Evaluation et cartographie de la vulnérabilité des grands aquifères de l'île de réunion – Étude de l'aquifère de la plaine des Galets (rive droite de la rivière des Galets). Rapport BRGM/RP – 50590-FR-00 SGREU 40 ? 98P ? 62 fig., 4 tabl., 1 annexe.
- Margat J.**, (1968). Vulnérabilité des nappes d'eau souterraine a la pollution. Base de la cartographie, Doc. BRGM, 68 SGL 198 HYD. Orléans, France.
- Marmi R.**, (1995). Les bassins continentaux de l'avant-pays de la chaîne alpine d'Algérie nordorientale: Étude stratigraphique, sédimentaire, structurale et géochimique. Thèse, University Nancy I, France, 253p.
- Matthess G., Pekdeger A., & Schroter J.**, (1985). Behaviour of contaminants in groundwater. UNESCO/IAH/IUGS, Intl. Contributions to Hydrogeology, vol. 6, Heise, Hannover,. 1-186p.
- Metzmacher, M.**, (1979). Les oiseaux de la Macta et de sa région (Algérie) : Non passereaux. Aves, 3-4 p, 89–123p.
- Napolitano P.**, (1995). GIS for aquifer vulnerability assessment in the Piana Campana, southern Italy, using the DRASTIC and SINTACS methods. MSc Thesis, ITC, Enschede, The Netherlands.
- Osborn N.I., Eckenstein E. et Koon K.Q.**, (1998). Vulnerability assessment of twelve major aquifer in Oklahoma. Oklahoma water resources boards. Technical report.
- Piscopo, G.**, (2001). Groundwater vulnerability map explanatory notes, Castlereagh Catchment .NSW Department of Land and Water Conservation, Sydney, Australia.[http://www.naturalresources.nsw.gov.au/water/pdf/castlereagh\\_map\\_notes.pdf](http://www.naturalresources.nsw.gov.au/water/pdf/castlereagh_map_notes.pdf). Cited 20 May 2006. 18p
- Pitt R., Clark S., Field R.**, (1999). Groundwater contamination potential from stormwater infiltration practices. Urban Water. vol. 1, n° 3,. 217-236 p.

- Pochon A, Meylan B, Tripet J-P, Zwahlen F.,** (2003) Delineation of groundwater protection zones in fractured media: presentation of a new systematic methodological approach. In: Krasny J, Hrkal Z, Bruthands J (eds) Proc. of the Int. Conf. on Groundwater in Fractured Rocks. Prague, Czech Rep., 373–374 p.
- Ravbar N.,** (2007). The Protection of Karst Waters: a Comprehensive Slovene Approach to Vulnerability and Contamination Risk Mapping. ZRC Publishing, Ljubljana, 254p.
- Robins, N.S., Adams, B., Foster, S.S.D., Palmer, R.C.,** (1994). Groundwater vulnerability mapping: the British perspective. *Hydrogeologie* 3, p. 35–42p.
- Roy 85] Roy B.,** (1985) – Méthodologie multicritère d'aide à la décision, Economica, Paris
- Saa 84 Saaty T.,** (1984) Décider face à la complexité : une approche analytique multicritère d'aide à la décision.
- Saheb, M.,** (2003). Cartographie et rôle de la végétation dans le maintien de l'avifaunaquatique des sebkhas de Guellif et de Boucif (Oum-El-Bouaghi). Mémoire de magister en Ecologie et Environnement. Centre Universitaire d'Oum El-Bouaghi. 59p.
- Savadogo A.N.,** (1984). Géologie et hydrogéologie du socle cristallin de Haute Volta - Étude régionale du bassin versant de la Sissili. Thèse de Doctorat d'Etat ès Sciences Naturelles, Université de Grenoble 1, Institut Dolomieu, 350p.
- Savané I.,** (1997). Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique des aquifères discontinus du socle cristallin d'Odienné (Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire). Apport de la télédétection et d'un système d'information d'hydrogéologique à référence spatiale. Thèse de Doctorat Es Sciences Naturelles, Université d'Abidjan, 395p.
- Schneblen et al.,** (2002). Gestion des eaux souterraines en aquitaine, année 5, Protection de la nappe de l'Oligocene en région bordelaise, Rapport BRGM, RP-51178-FR
- Shemes, G.P.,** (1999). Department of the Environment and Local Government, E.P.A.a.G.S.o.I. Dublin. Ireland. 24p.
- Simard, G., M. Sylvestre,** (1977). Vulnérabilité des ressources en eau souterraine du Québec à la pollution. *Rev. Assoc. Qué. Tech. Eau*, 15p.
- Sinan, M., Maslouhi, R., Razack, M.,** (2003). Utilisation des SIG pour la caractérisation de la vulnérabilité et de la sensibilité à la pollution des nappes d'eau souterraine. Application à la nappe du Haouz de Marrakech, Maroc. 2nd FIG Regional Conference, Marrakech, Morocco, December 2-5, 15p.
- Smida H. Zairi M. ,Trabelsi R. Ben Dhia H.,** (2004). Utilisation des Systèmes d'Informations Géographiques (SIG) pour une gestion optimale des ressources en eau : Cas de la région de Chaffar – Sfax – Tunisie . conférence francophone SIG 2004 6 et 7 octobre à issy-les-moulineaux. 9p.
- Vias, J.M., Andreo, B., Perles, M.J., Carrasco, F., Vadillo, I., Jimeenz, P.,** (2006). Proposed method for groundwater vulnerability mapping in carbonate (karstic) aquifers: the COP method. *Hydrogeology Journal* 14, 912 – 925p.

- Viessmann W, Knapp JW, Lewis GL.** (1977). Introduction to hydrology. Haper and Row publishers, NY, 618-625.
- Vila J.-M.,** (1977) - Carte géologique de l'Algérie au 1/50.000, feuille n° 175, Garet et Tarf (1<sup>ère</sup> édition) avec notice explicative détaillée (levés de S. Guellal) . Serv. Carte géol. Algérie / SONATRACH, (Div. Hydrocarbures, Dir. Explor.)
- Vranken I.,** (2010), - Pollution et contamination des sols aux métaux lourds dues à l'industrie métallurgique à Lubumbashi : Empreinte écologique, impact paysager, pistes de gestion TFE Sciences et Gestion de l'Environnement, ULB
- Vrba J. et Zaporozec A., Eds.,** (1994). Guidebook on Mapping Groundwater Vulnerability. International Contributions to Hydrogeology, vol. 16. 131p. Heinz Heise GmbH. Hannover
- Williams, J.R., Kissel, D.E.,** (1991). Water percolation: an indicator of nitrogen- leaching potential. In: R.F. Follet, D.R. Keeney, and R.M. Cruse (Eds.). Managing nitrogen for groundwater quality and farm profitability. Soil Science Society of America, Inc. Madison, Wisconsin. pp 59-83.
- Zwahlen F.,** (2003). Vulnerability and Risk Mapping for the Protection of Carbonate (Karst) aquifers. (COST Action 620) Final report. Official Publications of the European Communities, Brussels. 297p.

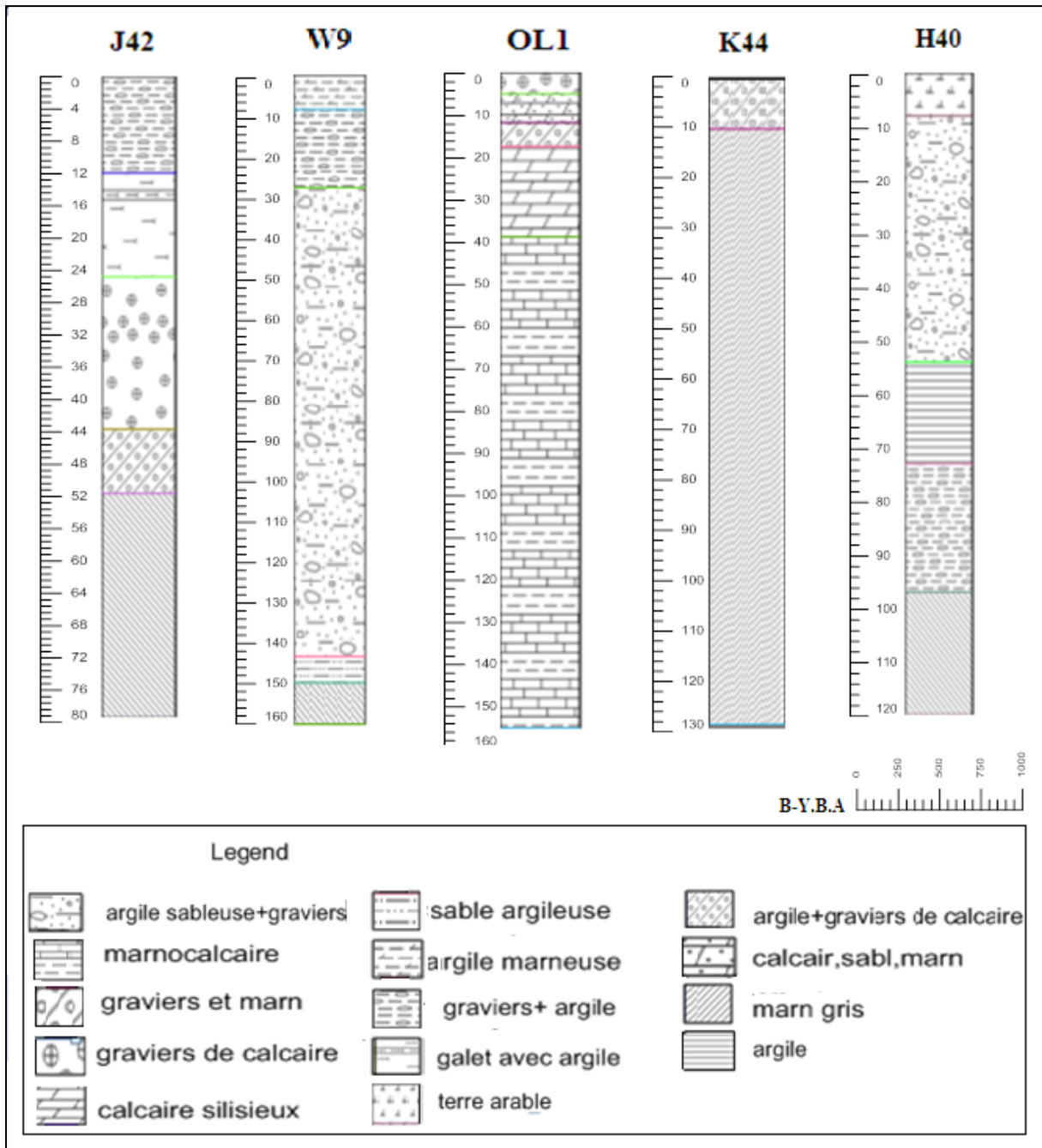
**Site Web :**

- Stratigraphie séquentielle et évolution paléogéographique de la zone du Ziban au Néogène (Atlas saharien, Algérie) (PDF Free Download). Available from: [https://www.researchgate.net/publication/298789670\\_Stratigraphie\\_sequentielle\\_et\\_evolution\\_paleogeographique\\_de\\_la\\_zone\\_du\\_Ziban\\_au\\_Neogene\\_Atlas\\_saharien\\_Algerie](https://www.researchgate.net/publication/298789670_Stratigraphie_sequentielle_et_evolution_paleogeographique_de_la_zone_du_Ziban_au_Neogene_Atlas_saharien_Algerie) [accessed May 30 2018].
- Evaluation de la vulnérabilité à la pollution des aquifères alluviaux de montagne par utilisation conjointe d'un modèle d'écoulement souterrain et d'un modèle de suivi de particules. Application au Massif Central (France), (PDF Free Download). Available from: [https://www.researchgate.net/publication/47513699\\_Evaluation\\_de\\_la\\_vulnerabilite\\_a\\_la\\_pollution\\_des\\_aquiferes\\_alluviaux\\_de\\_montagne\\_par\\_utilisation\\_conjointe\\_d\\_un\\_modele\\_d\\_ecoulement\\_souterrain\\_et\\_d\\_un\\_modele\\_de\\_suivi\\_de\\_particules\\_Application\\_au\\_Mas](https://www.researchgate.net/publication/47513699_Evaluation_de_la_vulnerabilite_a_la_pollution_des_aquiferes_alluviaux_de_montagne_par_utilisation_conjointe_d_un_modele_d_ecoulement_souterrain_et_d_un_modele_de_suivi_de_particules_Application_au_Mas) [accessed May 18 2018].
- Conférence de presse. (2002, 20 septembre). Home, Nature et pesticides. [accessed May 10 2018].



**ANNEXE**

# Annexe 1



# Annexe 2

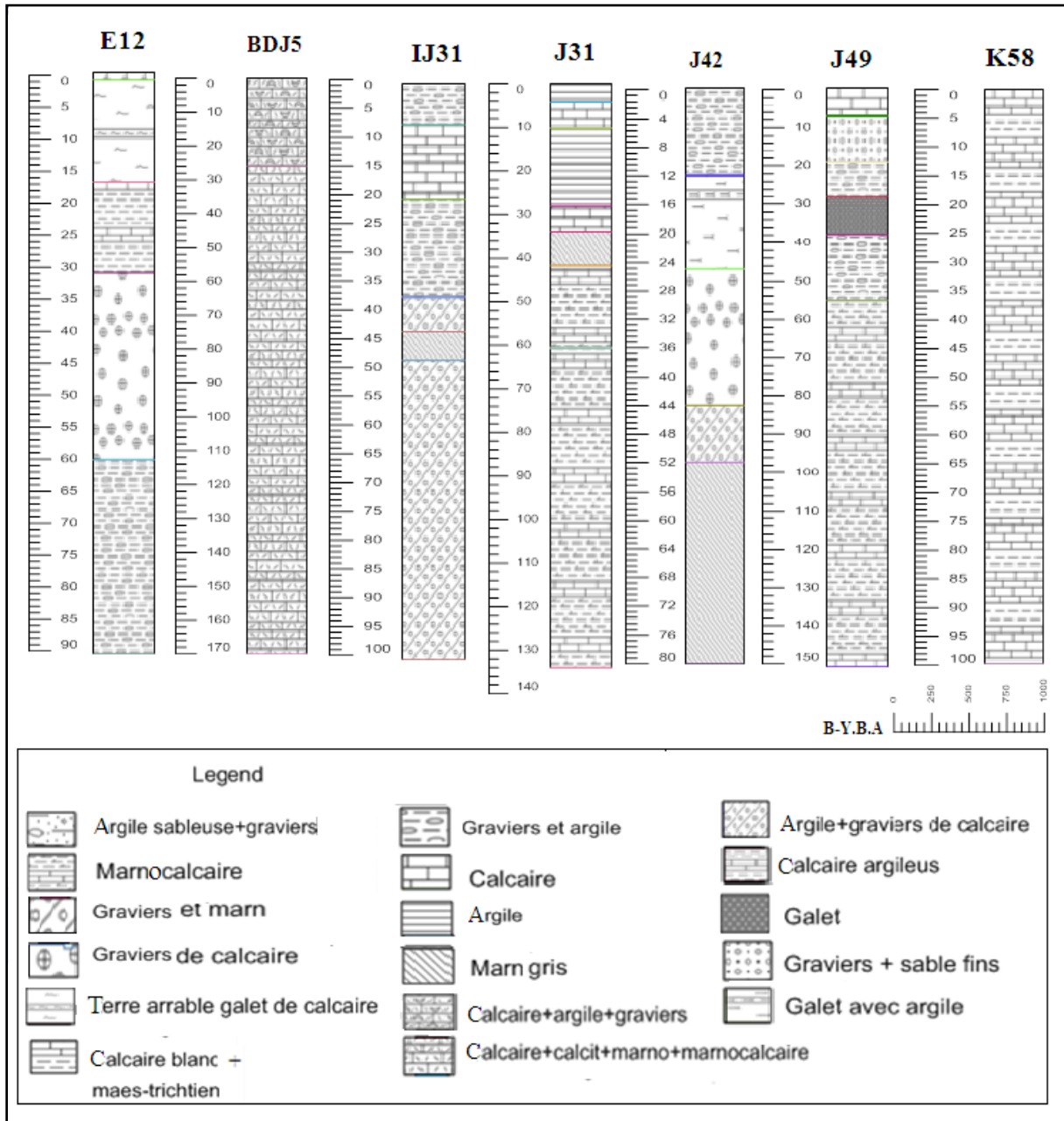


Fig. 38 : Logs stratigraphiques des forages.

## Résumé :

Les eaux souterraines constituent la principale source d'approvisionnement en eaux potables et pour l'irrigation de la population du bassin versant de Garaet El Tarf. Au cours des dernières années, la qualité des eaux souterraines s'est détériorée dans de nombreux endroits du bassin à la suite de l'expansion de l'agriculture. L'étude de la cartographie de la vulnérabilité intrinsèque des ressources de cette aquifère consiste à évaluer la sensibilité de la ressource à toute forme de polluant introduit à partir de la surface du sol en se basant sur les propriétés physiques du milieu. La méthode DRASTIC couplée à un SIG a été appliquée afin d'évaluer la vulnérabilité de ce système aquifère. Les résultats montrent que la zone d'étude se décline en quatre classes de vulnérabilité. Les indices DRASTIC les plus élevés sont localisés essentiellement dans la région d'Oum El Bouaghi et F'Kirina. Ceci est expliqué par la nature des formations lithologiques perméables relatives dans cette zone. Les zones à vulnérabilité très faible et faible occupent El Garaet et ces alentours jusqu'au sud-ouest du bassin, ceci due à la couverture argileuse formant une protection naturelle et à la faible perméabilité de l'aquifère.

**Mots clés :** Plaine de Garaet El Tarf, Climat semi-aride, vulnérabilité des eaux souterraines, Model DRASTIC, Algérie.

## ABSTRACT

Groundwater is the main source of drinking water supply and irrigation for the population of the Garaet El Tarf watershed. In recent years, groundwater quality has deteriorated in many parts of the basin as a result of the expansion of agriculture. The study of the intrinsic vulnerability mapping of the resources of this aquifer consists of evaluating the sensitivity of the resource to any form of pollutant introduced from the surface of the soil based on the physical properties of the environment. The DRASTIC method combined with a GIS has been applied to assess the vulnerability of this aquifer system. The results show that the study area is divided into four vulnerability classes. The highest DRASTIC indices are mainly located in the Oum El Bouaghi and F'Kirina region. This is explained by the nature of the relative permeable lithological formations in this area. Areas with very low and low vulnerability occupy El Garaet and all surroundings up to the south-west of the basin, it's because the clay cover forming a natural protection and the low permeability of the aquifer.

**Key words:** Garaet El Tarf plain, semi-arid climate, groundwater vulnerability, Model DRASTIC, Algeria

## ملخص:

تعتبر المياه الجوفية المصدر الرئيسي لإمدادات مياه الشرب والري لحوض قرعة الطرف. في السنوات الأخيرة، تدهورت نوعية المياه الجوفية في أجزاء كثيرة من الحوض نتيجة لتوسع الزراعة. دراسة خريطة درجة الحماية لموارد المياه الجوفية لهذا الحوض هي تقييم حساسية الموارد إلى أي شكل من أشكال التلوث القادم من من أجل تقييم مدى حساسية المياه الجوفية. الخصائص الفيزيائية للمجال. تم تطبيق طريقة DRASTIC مقترنة بنظام

تظهر النتائج أن منطقة الدراسة مقسمة إلى أربع فئات من درجة الحساسية. تقع أعلى مؤشرات الحساسية بشكل أساسي في منطقة أم البواقي و فكيرينة. وهذا مايفسر بطبيعة التشكيلات الصخرية النفوذة في هذه المنطقة. المناطق المسؤولة عن درجات الحساسية الضعيفة والضعيفة جدا تظهر في القرعة و محيطها إلى غاية الجنوب الغربي للحوض. وهذا راجع إلى غطاء الطين الذي يشكل حماية طبيعية و نفاذية ضعيفة للمياه الجوفية.

## الكلمات المفتاحية :

حوض قرعة الطرف، المناخ شبه الجاف حساسية المياه الجوفية، نموذج DRASTIC ، الجزائر.