

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université A. MIRA - Béjaïa

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie
Filière : Sciences Biologiques de l'Environnement
Option : Toxicologie Industrielle et Environnementale



جامعة بجاية
Tasdawit n'Bgayet
Université de Béjaïa

Réf :.....

Mémoire de Fin de Cycle
En vue de l'obtention du diplôme

MASTER

Thème

**Evaluation de la vulnérabilité à la pollution
de la nappe superficielle de Boulimat par la
méthode DRASTIC-EC-SO₄²⁻**

Présenté par :

MOULOUA Jugurtha & AIT SAIDI Nordine

Soutenu le : 25 Juin 2019

Devant le jury composé de :

M. Benhamiche Nadir

MCA

Président

M. Khemmoudj Kaddour

MCB

Encadreur

M. Saadali Riad

MAA

Examineur

Année universitaire : 2018 / 2019

Remerciements

On tient avant tout à remercier Dieu tout puissant de nous avoir donné la force et la volonté pour achever ce modeste travail.

*On adresse toutes nos gratitude et nos remerciements à monsieur **KHEMMOUDJ**, on le remercie pour ses accompagnements et ses conseils.*

*On remercie également les membres du jury : monsieur **Ben hammiche** et monsieur **Saadali** d'avoir accepté de prendre le temps d'évaluer et juger notre travail.*

On remercie également les enseignants de la faculté des sciences de la nature et de la vie pour tout le savoir qu'ils ont su nous transmettre durant nos années d'études.

Enfin, on remercie tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail aux êtres qui me sont les plus chers au monde

À mes chers parents

À ceux qui sont mon exemple de réussite, ceux que j'aime tant et je respecte, qui m'ont donné de l'amour, de la tendresse, du soutien et de la force. Mes parents, dont les conseils et sacrifices m'ont permis de réussir dans mes études, qu'ils trouvent ici, l'expression de mon profond respect, et ma parfaite reconnaissance,

Que Dieu vous protège et vous prête une longue et une heureuse vie, que ce travail soit le témoignage profond de mon amour

À mes chers frères

Yanis, Lamine et Massinissa auxquels je souhaite toute la réussite et le bonheur du monde

À mes chers oncles Tahar et Zahir

Qu'ils trouvent dans ce modeste travail ma parfaite reconnaissance pour leur encouragements et leurs conseils

À ma chère grand-mère

À la mémoire de mon cher grand-père

À tous les membres de ma famille sans aucune exception

À ma chère copine Besma

À celle que je dois mon profond amour sincère, qu'elle trouve dans ce modeste travail ma parfaite considération pour tous ses sacrifices, son accompagnement idéal et son soutien pour achever ce travail

À tous mes chers amis de près et de loin

À mon binôme Nordine et à toute la promotion Toxicologie Industrielle et Environnementale

À tous ceux qui m'ont aidé à achever ce modeste travail et que je n'ai pas cité

Jugurtha

Dédicaces

Je dédie ce mémoire :

*A mon cher père pour ses encouragements et son soutien
A ma très chère mère, à qui je souhaite une longue et heureuse vie
Et que je remercie infiniment pour son amour, son soutien, et ses sacrifices.*

A mon petit frère Massil

A ma grand-mère

A ma très chère Nassima

Les mots ne pourront suffire pour vous exprimer, mon amour et ma gratitude

A mes oncles et à mes tantes, ainsi qu'à tous mes cousins et cousines.

A Mr : Bennai 'que dieu l'accueille dans son vaste paradis'

*A toutes celles et ceux qui m'ont aidé, de près ou de loin, à achever ce travail
Et que je n'ai pas cité,*

*Sachez que je vous en serai éternellement reconnaissant
A mon binôme Jugurtha, et à toute la promotion Toxicologie et industrielle et
environnementale (2018-2019)*

A mes enseignants, pour tout ce qu'ils ont su me transmettre.

Nordine

TABLE DES MATIERES

Remerciements

Dédicaces

Liste des tableaux

Liste des figures

Liste des abréviations

Introduction	01
--------------------	----

Chapitre I : Synthèse bibliographique

I.1 Définition d'un bassin versant	03
I.1.1 Caractéristiques d'un bassin versant.....	04
I.2 Les nappes d'eau souterraines.....	04
I.2.1 Les grands types de nappes	04
I.3 Définition des pollutions.....	05
I.3.1 Sources de pollution des eaux souterraines.....	05
I.4 Notion de vulnérabilité.....	05
I.4.1 Origine de la vulnérabilité des eaux souterraines.....	06
I.4.2 Les différents types de la vulnérabilité.....	07
I.4.2.1 La vulnérabilité spécifique.....	07
I.4.2.2 La vulnérabilité intrinsèque.....	07
I.4.3 Les paramètres intervenants dans l'évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines.....	07
I.4.4 Méthodes d'évaluation de la vulnérabilité	08
I.5 Paramètres et attributs.....	08
I.5.1 Critères d'estimation de la vulnérabilité intrinsèque.....	08

I.6 But d'une carte de vulnérabilité.....	11
I.7 Domaines d'utilisation des cartes de vulnérabilité.....	12

Chapitre II : Matériel et méthodes

II.1 Présentation de la zone d'étude	13
II.1.1 Situation géographique de la région d'étude	13
II.1.2 Présentation de la population	14
II.1.2.1 Nombre d'habitants	14
II.1.2.2. Nombre d'estivants.....	14
II.1.2.3. L'accroissement démographique de la population (2008 à 2018) dans la région d'étude.....	15
II.1.3 La Biodiversité de la zone d'étude.....	16
II.2 Les caractéristiques morpho-métriques et hydrographiques du Bassin versant.....	16
II.2.1. Caractéristiques géométriques	16
II.2.2 Les caractéristiques topographique	17
II.2.3 Les caractéristiques hydrographiques.....	18
II.2.3.1 le réseau hydrographique.....	18
II.2.3.2 L'indice de pente globale	19
II.2.3.3 La densité de drainage.....	20
II.2.2.Délimitation et subdivision.....	20
II.3 Caractéristiques physiques de la région d'étude.....	21
II.3.1 Géologie.....	21
II.3.2 La pédologie.....	22
II.4 Climatologie.....	23
II.4.1 Climatologie de la région d'étude.....	23

II.4.1.1	Température.....	23
II.4.1.2	Précipitations.....	24
II.4.1.3	Humidité.....	25
II.4.1.4	Le vent.....	26
II.4.2	Synthèse Climatique.....	27
II.4.2.1	Le diagramme Ombro-thermique de Bagnouls et Gausсен.....	27
II.4.2.2	Bilan hydrique.....	28
II.5	Méthode de prélèvement et Echantillonnage.....	30
II.5.1	Date et critères de choix des points de prélèvements.....	31
II.5.2	Matériel de prélèvement	31
II.5.3	Techniques de prélèvements.....	32
II.6	Méthodes d'analyses.....	33
II.6.1	Les Analyses physico-chimiques	33
II.6.1.1	Présentation du lieu de stage	33
II.6.1.2	Les mesures in situ	34
II.6.2	Analyses des paramètres hydro-chimiques au laboratoire.....	34
II.6.2.1	Dosage des chlorures (Cl ⁻) par la méthode de MOHR.....	35
II.6.2.2	Dosage des nitrites (NO ₂ ⁻) par la méthode du réactif Zambelli.....	35
II.6.2.3	Dosage des sulfates (SO ₄ ⁻²)	36
II.6.2.4	Dosage des nitrates (NO ₃ ⁻) par la méthode de BRUCINE.....	36
II.7	Analyse des éléments traces métalliques (ETM) par la spectrophotométrie.....	37
II.8	Le logiciel utilisé (surfer 11).....	37

II.9 La méthode DRASTIC-EC-SO ₄ ⁻² (méthode améliorée).....	38
II.9.1 Méthode DRASTIC.....	38
II.9.2 Méthode DRASTIC-EC-SO ₄ ⁻²	38
II.9.3 Notations accordées aux paramètres DRASTIC-EC-SO ₄ ⁻²	39
II.9.3.1 Notations accordées aux paramètres DRASTIC (d'après Lallemand-Barrès, 1994)	39
II.9.3.2 Notations accordées aux paramètres proposés (Conductivité électriques et les sulfates)	41
II.9.4. Les degrés de vulnérabilité et leurs couleurs appropriés.....	42
II.9.5 Organigramme de la méthode utilisée.....	43

Chapitre III : Résultats et discussions

III.1 Coordonnées géographiques des points de prélèvements	44
III.2 Résultats des analyses physico-chimiques et hydro-chimiques.....	45
III.2.1 Résultats des analyses physico-chimiques et hydro-chimiques des eaux de surface	45
III.2.2 Résultats des analyses physico-chimiques et hydro-chimiques des eaux souterraines	46
III.3 Discussions des analyses physico-chimiques et hydro-chimiques	47
III.3.1 Les paramètres physico-chimiques	47
III.3.1.1 Température	47
III.3.1.2 Le potentiel d'hydrogène	48
III.3.1.3 Oxygène dissous	49
III.3.1.4 Conductivité électrique	49
III.3.1.5 Total des solides dissous (TDS)	50

III.3.1.6 Salinité.....	51
III.3.2 Discussions des analyses hydro-chimiques	52
III.3.2.1 Les nitrates.....	52
III.3.2.2 Les sulfates.....	53
III.3.2.3 Les chlorures.....	53
III.3.2.4 Les Nitrites.....	54
III.3.3 Discussion des éléments traces métalliques.....	54
III.3.3.1 Le cadmium.....	54
III.3.3.2 Le plomb	55
III.3.3.3 Le zinc.....	57
III.4. Description des paramètres de la méthode DRASTIC-EC-SO ₄ ²⁻	58
III.4.1 Paramètre profondeur de la nappe « D »	59
III.4.2 Paramètre de la recharge nette « R »	60
III.4.3 Paramètre de la nature des aquifères « A ».....	61
III.4.4 Paramètre type de sol « S »	62
III.4.5 Paramètre topographique « T »	63
III.4.6 Paramètre de la zone non saturée « I »	64
III.4.7 Paramètre de conductivité hydraulique «C»	65
III.4.8 Paramètre de conductivité électrique «EC».....	66
III.4.9 Paramètre de Sulfates « SO ₄ ⁻² ».....	66
III.5 Carte de vulnérabilité	67
III.6 Sources de pollutions potentielles dans la région d'étude.....	68
III.6.1 Les fosses septiques.....	68

III.6.2 Les décharges et dépotoirs sauvage.....	68
III.6.3 Pollution par le trafic routier.....	69
III.6.4 Pollution engendrée par les estivants.....	69
III.6.5 La pollution agricole.....	69
III.7 La carte risque.....	69
III.8 Impact des sources de pollution sur l'Environnement et la santé publique.....	71
Conclusion et recommandations...	72

Liste des tableaux

N°	Titre	page
I	Nombre d'habitants présent au niveau de la région d'étude par N° des districts (DPSB, 2019).	14
II	Nombre d'estivants présent au niveau de la région d'étude par N° des districts (DPSB, 2019).	15
III	Variation des altitudes du bassin versant de Boulimat.	18
IV	Classification des reliefs d'après l'ORSTOM.	20
V	Variations de la température mensuelle (1996-2018), (Station ONM de Bejaia 2018)	24
VI	Variations des précipitations mensuelles (1996-2018).	25
VII	Variations de l'humidité mensuelle (1996-2018).	25
VIII	Vitesse du vent maximale en m/s (1996-2018).	26
IX	Tableau des résultats du bilan hydrique selon la méthode de Thornthwaite	29
X	Les notations et le poids accordés au paramètre de « la profondeur D »	39
XI	Les notations et le poids accordés au paramètre de « la recharge nette R »	39
XII	Les notations et le poids accordés au paramètre du « milieu aquifère A »	39
XIII	Les notations et le poids accordés au paramètre « Nature du sol S »	40
XIV	Les notations et le poids accordées au paramètre « Topographie T »	40
XV	Les notations et le poids accordés au paramètre « Impact de la zone non saturée I »	40
XVI	Les notations et le poids accordés au paramètre « Conductivité hydraulique C »	41
XVII	Les notations et le poids accordés au paramètre « Conductivité électrique EC ».	41
XVIII	(proposé) : Notations et poids accordées au paramètre « Sulfates (SO₄²⁻) ».	41
XIX	Couleurs et les degrés pour les intervalles de l'indice DRASTIC.	42
XX	Couleurs et degrés de vulnérabilité de l'indice EC + l'indice SO ₄ ²⁻	42

XXI	Couleurs et les degrés de vulnérabilité pour les intervalles de l'indice DRASTIC-EC-SO ₄ ⁻²	42
XXII	Coordonnées géographiques des points de prélèvements de l'eau à Boulimat.	44
XXIII	Résultats des analyses physico-chimiques	45
XXIV	Résultats des analyses hydrominérales au niveau des eaux de surface	46
XXV	Résultats des analyses physico-chimiques des eaux souterraines	46
XXVI	Résultats des analyses hydro-chimiques des eaux souterraines	47
XXVII	Indices de la profondeur	58
XXVIII	Indices de recharge	59
XXIV	Indices de la nature des aquifères	60
XXX	Indices de types de sols.	61
XXXI	Indices de Topographie	62
XXXII	Indices d'impact de la zone vadoze	63
XXXIII	Indices de conductivité	64
XXXIV	Indice de conductivité électrique	65
XXXV	Indice de sulfates	66
XXXVI	Indice DRASTIC-EC-SO ₄ ⁻² et degré de vulnérabilité	67

Liste des figures

N°	Titre de figure	Page
1	Schéma illustratif d'un bassin versant (source : Institut de la terre et de la vie, science environnementale)	3
2	Modèle «origine – écoulements – cible» -modifié- (action COST620, 2004 in Cazaux, 2007)	6
3	Localisation de la zone d'étude	13
4	Répartition de la population de la zone d'étude en pourcentage	14
5	La répartition des estivants de la zone d'étude en pourcentage	15
6	L'accroissement démographique dans la région d'étude de 2008 à 2018.	16
7	La courbe hypsométrique du bassin versant de Boulimat	18
8	Carte de réseau hydrographique du bassin versant de Boulimat	19
9	Les deux sous bassins versant de la zone d'étude	21
10	Carte géologique de la région de Boulimat	22
11	Carte du sol de la région d'étude	22
12	Variation moyenne mensuelle de la température de la région de Bejaïa (1996-2018)	24
13	Variations des précipitations mensuelles (1996-2018)	25
14	Variations de l'humidité relative moyenne en (%) (1996-2018).	26
15	Répartition mensuelle de la force du vent dans la région de Bejaia (1996-2018).	26
16	Diagramme Ombro-thermique de la région de Bejaia (1996-2018)	27
17	Sites de prélèvements des eaux de surfaces de la région de Boulimat	31
18	Sites de prélèvements des eaux souterraines de la région de Boulimat	31
19	Matériel de prélèvement	32
20	Image représentative du lieu de stage (CNTC-Boumerdes)	33

21	Multi paramétré de type HANNA Instrument HI 9828	34
22	Dosage des chlorures au niveau du laboratoire chimie, CNTC de Boumerdes	35
23	Le test en cuve LCK 353 sur le spectrophotomètre UV-VIS DR6000, effectué au laboratoire chimie du centre CNTC de Boumerdes	36

24	Organigramme présentant les étapes de réalisation de la carte de vulnérabilité à partir de la méthode DRASTIC-EC-SO ₄ ²⁻	43
25	Carte d'inventaire des points de prélèvements au bassin versant de Boulimat	45
26	La répartition de la température des eaux souterraines dans la région d'étude.	48
27	La répartition de pH des eaux souterraines dans la région d'étude	48
28	La répartition de l'oxygène dissous des eaux souterraines dans la région d'étude	49
29	La répartition de la conductivité électrique des eaux souterraines dans la région d'étude	50
30	La répartition de la TDS des eaux souterraines dans la région d'étude	51
31	La répartition de la salinité des eaux souterraines dans la région d'étude	51
32	La répartition des nitrates des eaux souterraines dans la région d'étude	52
33	La répartition des sulfates des eaux souterraines dans la région d'étude	53
34	Carte de la répartition de la teneur en chlorures pour les eaux souterraines et superficielles du bassin versant de Boulimat	54
35	Carte de la répartition des concentrations du cadmium pour les eaux souterraines et superficielles du bassin versant de Boulimat	55
36	Carte de la répartition des concentrations du plomb pour les eaux souterraines et superficielles du bassin versant de Boulimat	56
37	Carte de la répartition des concentrations du zinc pour les eaux	57

	souterraines et superficielles du bassin versant de Boulimat	
38	Carte des indices de profondeur	59
39	Carte de l'indice de recharge	60
40	Carte des indices d'aquifères	61
41	Carte des indices du sol	62
42	Carte des indices topographiques	63
43	Carte des indices de la zone non saturée	64
44	Carte des indices de conductivité hydraulique	65
45	Carte d'indice de conductivité électrique	66
46	Carte d'indice des sulfates	67
47	Carte de vulnérabilité à la pollution de la nappe superficielle de Boulimat	68
48	Carte de risque du bassin versant de la région de Boulimat	70
49	Schéma illustratif de l'impact des sources de pollution sur l'environnement et la santé public	71

Liste des signes et des abréviations

A : Nature d'aquifère.

C : Conductivité hydraulique.

Cd : Cadmium

CE : Conductivité électrique

CNTC : Le Centre National de Technologies et de Consulting

D : Profondeur de la nappe.

Da : Déficit agricole

DCE : Directive Cadre-Européenne.

D_d : Densité de drainage

DO : Oxygène dissous

ETM : Eléments traces métalliques

ETP : Evapotranspiration Potentielle

ETR : Evapotranspiration Réelle

Fig : Figure

H : Humidité

I : Impact de la zone non saturée

I_A : Indice de la nature d'aquifère

I_C : Indice de conductivité hydraulique

ID : Indice DRASTIC

ISO : Organisation internationale de normalisation

I_D : Indice de profondeur

I_{EC} : Indice de conductivité électrique

I_I : Indice de l'impact de la zone vadose

I_R : Indice de la recharge

I_S : Indice de type de sol

I_T : Indice de topographie

I_g : Indice de pente globale

K_m : Kilomètre

K_G : Indice Gravilius

L : Longueur

m : Mètre

mg : Milligramme

ml : Millilitre

M_m : Millimètre

MNT : Modèle numérique de terrain

P : Précipitations

P_b : Plomb

pH : potentiel d'hydrogène

Psu : Unité pratique de salinité

R : Recharge nette

RFU : Réserve Facilement Utilisable.

RN : Route Nationale

S : Type de sol

T : Température

Tab : Tableau

TDS : Total des solides dissous

V : Vent

Zn : Zinc

Introduction générale

Introduction

Les eaux souterraines constituent une ressource vitale très importante pour la consommation humaine, l'industrie et l'agriculture. Ces eaux sont exposées à des menaces de contamination par des polluants de nature différentes : physique (limpidité altérée, température modifiée), Chimique (nitrates, métaux et autres micropolluants), Organique (entraînant une surconsommation d'oxygène indispensable à la vie aquatique) et microbiologique avec l'introduction de germes pathogènes (bactéries, Virus, Parasites).

La qualité de l'eau est un paramètre important qui touche à tous les aspects du bien-être des écosystèmes et de l'homme tels que la santé d'une communauté, les activités économiques, la santé des écosystèmes et la biodiversité.

L'étude de vulnérabilité à la pollution des nappes souterraines constitue une étape très importante, cela en analysant des différents paramètres de vulnérabilité des nappes souterraines.

La vulnérabilité est un thème introduit en hydrogéologie par Margat dans les années 60. Elle est définie et utilisée de manière très diverse (Gogu et Dassargues 1998 ; Lallemand Barres 1994). 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 agropédologique des terrains de surface (Amharref.M et Bernoussi.A, 2007).

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

Les méthodes de cartographie à index avec pondération des critères sont les plus pertinentes vis-à-vis des réalités de terrain du fait de la prise en compte de l'importance relative de chaque critère vis-à-vis de la vulnérabilité générale de la nappe. Ce sont aussi les plus reconnues et utilisées à l'heure actuelle (Gogu et Dassargues 2000 ; Zaporozec et Vrba 1994).

Différentes méthodes ont été développées :

La méthode **DRASTIC** (Aller et al., 1987), **SINTACS** (Civita, 1994), **EPIK** (Doerfliger et al., 1999), **RISK** (Petelet-Giraud et al., 2000) et la méthode **GOD** (Foster, 1987).

Plusieurs études de la vulnérabilité et d'évaluation ont été effectuées un peu partout dans le monde par (Margat, 1968 ; Albinet&Margat, 1970 ; Foster&Hirata, 1991 ; Doerfliger&Zwahlen, 1998). En Algérie (K. Khemmoudj, 2009 ; S. Sbagoud, 2013 ; Ben hamiche, 2015 ; K. Seghir, 2014 ; A Boudoukha et al, 2011 ; ...etc). Aussi dans la région de Bejaia par (Ben hamiche, 2015 ; Bensalem et Zair, 2014 ; Belkbir et Debbou, 2015 ; Boudjelil et Djafari, 2018 ; ...) et notamment à la zone de Boulimat par (Boutaya et Chalal, 2017 ; Salhi, 2018 ; Si Ahmed et Yahiaoui, 2017 ; ...etc).

L'objectif de notre travail est de réaliser une cartographie de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines de Boulimat par la méthode DRASTIC couplée à deux paramètres : la conductivité électrique (CE) et les sulfates (SO_4^{2-}).

Notre mémoire est structuré comme suit :

- Introduction
- Chapitre I : Synthèse bibliographique
- Chapitre II : Matériel et méthodes
- Chapitre III : Résultats et discussion
- Conclusion

Synthèse bibliographique

I.1 Définition d'un bassin versant

Un bassin versant est une portion de territoire délimitée par des lignes de crêtes (lignes de partage des eaux) et irriguée par un même réseau hydrographique. A l'intérieur d'un même bassin, toutes les eaux reçues suivent, du fait du relief, une pente naturelle et se concentrent vers un même point de sortie appelé exutoire (Fig. 1).

- Dans un bassin versant, l'eau se fraye des chemins sur et dans les sols. Elle prend en charge des particules : sédiments, matières organiques, produits chimiques, etc.
- Sur un bassin versant :
 - ✓ L'occupation du sol, les activités humaines et les aménagements conditionnent les chemins de l'eau et donc sa qualité à l'exutoire du bassin.
 - ✓ La multiplication de petites perturbations entraîne de grandes dégradations sur l'ensemble du bassin.
 - ✓ Le ruissellement, l'érosion des sols, l'inondation, le lessivage des intrants agricoles, etc. peuvent être fortement accentués ou diminués par une mauvaise gestion des milieux, des pratiques à risques, des aménagements inadaptés ...

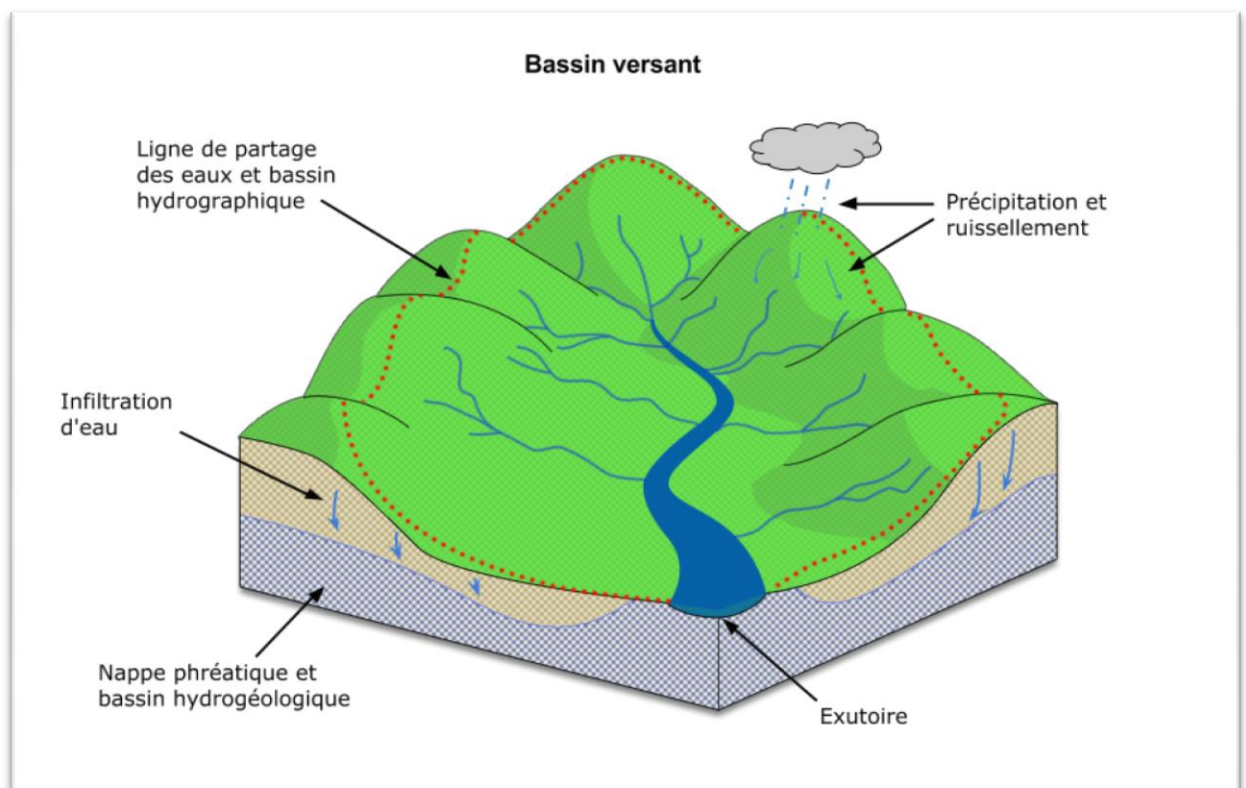


Figure 01: Schéma illustratif d'un bassin versant (source : Institut de la terre et de la vie, science environnementale)

I.1.1 Caractéristiques d'un bassin versant

D'après (Thibault, 2011), un bassin versant est caractérisé par trois composantes principales :

- Sa limite, l'enveloppe des surfaces potentiellement drainantes et les extrémités avalées du réseau de drainage.
- Son organisation qui peut être reliée à la structure du réseau, à la distribution surfacique des éléments de drainage etc.
- Sa composition, les types de recouvrement de surface, et quelques grandeurs géométriques associées.

I.2 Les nappes d'eau souterraines

Les nappes d'eau souterraines ne sont ni des lacs, ni des cours d'eau souterrains, il s'agit d'eau contenue dans les pores ou les fissures des roches, saturées par les eaux de pluie qui se sont infiltrées à travers le sol.

I.2.1 Les grands types de nappes

- ❖ **Les nappes libres** sont en contact direct avec la surface et sont généralement peu profondes ; le niveau piézométrique de la nappe monte ou baisse en fonction des précipitations. Elles se renouvellent rapidement. Les nappes phréatiques appartiennent à cette catégorie.
- ❖ **Les nappes captives** sont comprises entre deux couches géologiques imperméables. Elles sont souvent profondes, des centaines de mètres de profondeur et plus. Leur alimentation provient de la zone affleurante de l'aquifère, elles se renouvellent donc plus lentement. Dans la nappe captive, l'eau est soumise à une pression supérieure à la pression atmosphérique. La surface piézométrique de la nappe est donc supérieur au toit de l'aquifère.
- ❖ **Les nappes alluviales** constituent un type particulier de nappes, formées par les grands épandages de sables et graviers des fleuves et des rivières. C'est à travers ces nappes que les grands flux issus des nappes libres rejoignent les rivières.

I.3 Définition des pollutions

Selon (Ramade, 2012), « Constitue une pollution toute une modification anthropogénique d'un écosystème se traduisant par un changement de concentration des constituants chimiques naturels, ou résultant de l'introduction dans la biosphère de substances chimiques artificielles, d'une perturbation du flux de l'énergie, de l'intensité des rayonnements, de la circulation de la matière ou encore de l'introduction d'espèces exotiques dans une biocénose naturelle ».

I.3.1 Sources de pollution des eaux souterraines

Les eaux souterraines sont de plus en plus affectées par diverses causes de pollution. Celles-ci sont soit d'origine domestique et/ou urbaines ou encore industrielle (micro-organismes pathogènes, hydrocarbures, solvants organochlorés etc.), soit d'origine agricole. Le rôle des engrais chimiques est aujourd'hui bien identifié dans le cas de la contamination des nappes aquifères par les nitrates. Par ailleurs, une augmentation générale de la teneur en sulfates et en chlorures des eaux souterraines s'observe également depuis quelques années dans les pays industrialisés. De plus, la pollution des nappes phréatiques est aggravée par la lente percolation dans celles-ci de nombreux contaminants provenant de décharges industrielles (Ramade, 2012).

I.4 Notion de vulnérabilité

Le terme vulnérabilité est introduit en hydrogéologie par Margat dans les années 60 (Margat, 1968). Le concept de vulnérabilité de l'eau souterraine est généralement défini comme « la capacité d'un système hydrogéologique à transmettre un contaminant potentiel depuis la surface du sol jusqu'à atteindre la zone saturée » (Rahman, 2008). Véhiculé depuis l'eau des précipitations qui s'infiltré à la surface du sol, le contaminant percole ainsi à travers la zone vadose jusqu'à atteindre la zone saturée.

I.4.1 Origine de la vulnérabilité des eaux souterraines

D'après Cazaux (2007), le concept de vulnérabilité des eaux souterraines est basé sur un modèle « origine – écoulements – cible » (Fig. 2).

- **L'origine de la contamination:** c'est le lieu d'infiltration du polluant au niveau de la surface du sol. Cette approche ne tient pas compte des pertes ou fuites de réseaux d'eau usée.
- **L'écoulement :** c'est le trajet du contaminant à travers le milieu naturel, c'est à dire sa composante verticale au sein de la zone non saturée. Si l'objet de la protection est le point de captage d'eau (puits, forage, exutoire), il faut également prendre en compte l'écoulement au sein de l'aquifère.
- **La cible:** est l'eau souterraine faisant l'objet d'une protection. Il peut s'agir soit du toit de la nappe, soit du captage d'eau.

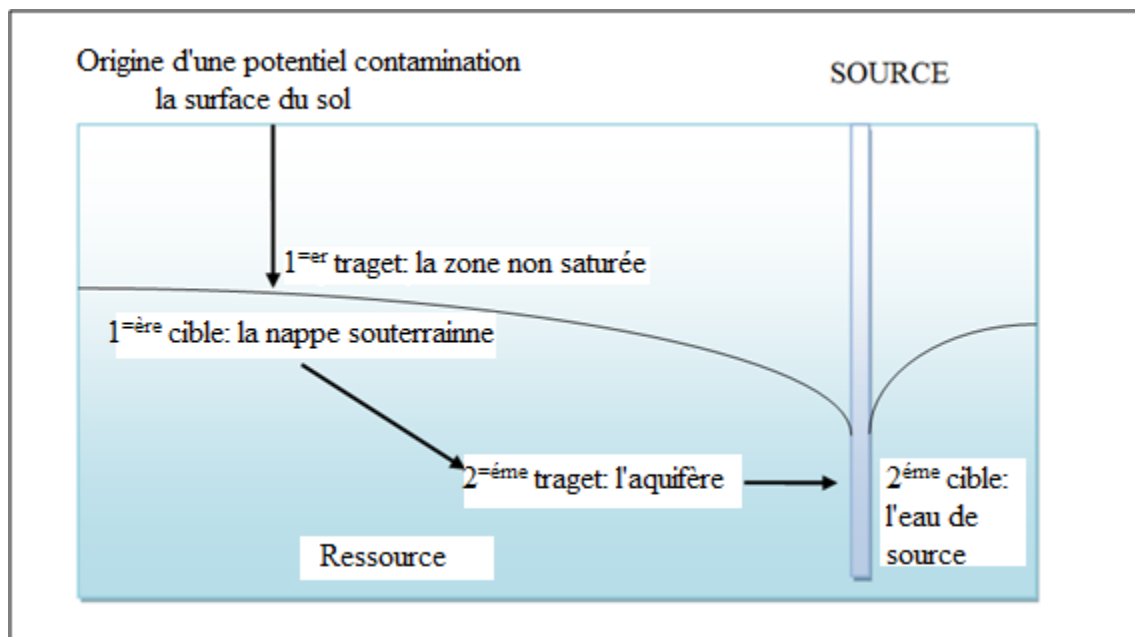


Figure 02: Modèle «origine – écoulements – cible» -modifié- (action COST620, 2004 in Cazaux, 2007)

I.4.2 Les différents types de la vulnérabilité

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

I.4.2.1 La vulnérabilité spécifique

C'est le terme utilisé pour définir la vulnérabilité d'une eau souterraine à un polluant particulier ou à un groupe de polluants. Elle prend en compte les propriétés des polluants et leurs relations avec les divers composants de la vulnérabilité intrinsèque (Schnebelen et al, 2002).

I.4.2.2 La vulnérabilité intrinsèque

C'est le terme utilisé pour représenter les caractéristiques du milieu naturel qui déterminent la sensibilité des eaux souterraines à la pollution par les activités humaines. Elle ne tient compte que des facteurs physiques influençant le mouvement d'un polluant vers la nappe (Schnebelen et al, 2002).

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

I.4.3 Les paramètres intervenants dans l'évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines

L'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque peut prendre en compte des paramètres relevant de trois milieux bien définis : le sol, la zone non saturée (ZNS) et la zone saturée (ZS). Ces paramètres sont sensés agir naturellement sur la nature ou/et la concentration du contaminant soit sur son temps de transfert. Margat et Suais-Prascandola en 1987, affirment que les facteurs hydrogéologiques fondamentaux sur lesquels les cartes doivent se baser sont la profondeur de la nappe, la perméabilité des dépôts sus-jacents, la connexion entre les eaux de surface et souterraines et la vitesse moyenne des écoulements souterrains. Tandis que, pour Vrba et Zaporozec, les principaux paramètres, généralement, pris en compte pour l'évaluation de la vulnérabilité sont : le type de sol, la zone saturée, le

type d'aquifère et la recharge et les paramètres secondaires sont : la topographie et la couche géologique sous-jacente de l'aquifère.

I.4.4 Méthodes d'évaluation de la vulnérabilité

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

Ces méthodes peuvent être classées en trois grandes catégories : voir **annexe I**

I.5 Paramètres et attributs

La cartographie de vulnérabilité se base sur une série d'attributs et de paramètres provenant de diverses sources de données : pédologiques, géologiques, géomorphologiques, hydrogéologiques et climatiques. Ces paramètres sont ensuite combinés en divers indices relatifs de vulnérabilité.

I.5.1 Critères d'estimation de la vulnérabilité intrinsèque

✓ Critères relatifs au type de sol

Le sol représente la partie supérieure de la zone non saturée et est caractérisé par une activité biologique significative.

Selon (Aller et al., 1987.), la composition, la texture et la structure des sols sont trois propriétés qui influencent l'intensité des processus d'atténuation. Alors, La capacité à atténuer et faire migrer le contaminant change en fonction du type de sol. Ainsi, il ne suffit pas de savoir qu'un sol est argileux pour affirmer que l'infiltration de contaminant est moindre, il faut également déterminer le degré de cohésion, la présence de fissures et de microorganismes (source de macrospores) (Vrba et Zaporozec, 1994).

✓ Critères relatifs à la recharge

Ce paramètre est déterminé en fonction du têt de précipitation qui s'infiltré jusqu'à la surface de la nappe. Plus la recharge est importante, plus la possibilité de la pollution de la nappe est importante. La recharge est liée à la nature des formations superficielle et à la topographie.

Le paramètre recharge contrôle également la dispersion du contaminant à travers la zone vadose et la zone saturée.

✓ **Profondeur à la nappe**

Ce paramètre détermine l'épaisseur de matériaux que doit traverser un contaminant avant d'arriver à la nappe.

D'après (Murat, 2000), C'est le long de cette zone que les processus de sorption, de dispersion, de filtration, de biodégradation, et d'oxydation-réduction vont avoir lieu. Donc, plus cette zone est grande plus le temps de passage sera long. De plus, les propriétés du milieu telles que la perméabilité relative des horizons traversés, la porosité, la hauteur de sol, la hauteur de la zone non saturée vont interagir avec ces processus.

✓ **Type d'Aquifère**

D'après Vrba et Zaporozec (1994), ce paramètre réfère aux matériaux de l'aquifère, à la porosité effective, à l'épaisseur et au type d'aquifère (confiné ou non). Le système d'écoulement est affecté par le milieu. Selon la taille des grains, l'agencement des grains, les propriétés chimiques des grains, la taille des pores, le chemin d'écoulement suivi sera différent, la conductivité hydraulique et les gradients également. De même, la perméabilité du milieu intervient sur la rapidité du contaminant à migrer. Ainsi, elle affecte les processus d'atténuation, de transport par advection et le temps disponible pour les phénomènes tels que la sorption, les réactions chimiques et la dispersion.

✓ **Topographie**

Le terme de topographie fait référence à la pente et à la variation du niveau de la pente de la surface du sol. Souvent le gradient et la direction d'écoulement peuvent subir une influence due à la pente. La topographie influence le développement des sols donc indirectement l'importance de l'atténuation d'un contaminant par le sol. Les pentes qui procurent des conditions favorables à l'infiltration, et donc un faible coefficient de ruissellement des polluants (surface importante, peu de pente) seront considérés comme fortement vulnérables (Murat, 2000).

✓ **Conductivité hydraulique**

C'est l'aptitude d'un aquifère à permettre le mouvement de l'eau, sous l'effet d'un gradient hydraulique donné dont la direction diffère généralement de celle de l'écoulement.

Ce paramètre est étroitement lié à la granulométrie des formations aquifères, il peut ainsi être calculé directement à partir de mesures de terrain ou encore être estimé à partir de la lithologie des formations aquifères.

✓ **Zone vadose**

La zone vadose est définie comme la zone au-dessus de la surface libre qui n'est pas saturée entièrement, et de manière continue. La délimitation de la zone vadose dépend du type d'aquifère. Le type de zone vadose (type de matériaux, porosité...) détermine les capacités d'atténuation du milieu. Les processus qui peuvent intervenir dans cette zone sont tous les processus de neutralisation, filtration, réactions chimiques, dispersion, volatilisation et biodégradation.

D'après Vrba et Zaporozec (1994), les principaux facteurs influençant l'atténuation des contaminants dans la zone vadose sont le type de matériel, la perméabilité verticale, et l'épaisseur de la zone vadose. Enfin, d'après Aller et al. (1987), le type de matériel règle l'adsorption du milieu (une grande surface de réaction d'un matériel fin rend l'adsorption plus forte), la perméabilité verticale détermine la rapidité du contaminant à atteindre la nappe et l'épaisseur influence l'arrivée du contaminant à la nappe. Il est à noter que l'effet des processus d'atténuation des contaminants s'affaiblit avec la profondeur (Vrba et Zaporozec, 1994. Aubre, 1992., Fagnan, 1998).

✓ **Matériaux géologiques**

Les matériaux géologiques constituent les dépôts stratifiés et non stratifiés et incluent le sol. Deux propriétés des matériaux géologiques sont essentielles pour l'évaluation de l'eau affectée et le mouvement des composés : la nature du sol, et la conductivité hydraulique.

✓ **Bilan hydrologique**

Selon (**Benhamiche, 2015**), le bilan permet d'évaluer les apports et les sorties en eau sur une période déterminé. L'évaluation du bilan d'eau est nécessaire aux paramètres aux paramètres physiques du milieu tels que les éléments climatologiques, pédologiques qui interviennent dans le cycle de l'eau. Le calcul de ce bilan est nécessaire pour la connaissance du milieu géographique, pour mieux définir les besoins globaux et chiffrés du milieu et essentiellement pour l'évaluation du volume des ressources en eaux souterraines (infiltration) et de surface (ruissellement).

✓ Taille de l'aquifère

D'après Vrba et Zaporozec (1994), ce paramètre réfère aux matériaux de l'aquifère, à la porosité effective, à l'épaisseur et au type d'aquifère (confiné ou non). Le système d'écoulement est affecté par le milieu. Selon la taille des grains, l'agencement des grains, les propriétés chimiques des grains, la taille des pores, le chemin d'écoulement suivi sera différent.

- ❖ Le thème de notre mémoire s'inscrit dans l'étude de la vulnérabilité intrinsèque, c'est pour cette raison qu'on a opté pour développer les paramètres et attributs propres à ce type de vulnérabilité.
- ❖ Les paramètres à étudier pour l'estimation de la vulnérabilité spécifique sont :
 - ✓ Comportement du polluant potentiel
 - ✓ Intrusion marine
 - ✓ Capacité dispersive et épuratoire des sols
 - ✓ Qualité du réseau hydrographique
 - ✓ Typologie de l'occupation du sol
 - ✓ Points sensibles

I.6 But d'une carte de vulnérabilité

D'après (Albinet et Margat, 1971), le but de réalisation d'une carte de vulnérabilité est de montrer quelles sont, suivant les terrains rencontrés en surface (et plus précisément suivant les réservoirs dans lesquels sont contenus les premières nappes d'eau souterraine généralement libres) les possibilités de pénétration et de propagation des polluants dans ces terrains c'est-à-dire la vulnérabilité de ces nappes, que la plupart des puits et forages de captage d'eau d'alimentation exploitent, et d'où sont issues la plupart des sources du territoire. Il ne s'agissait pas de faire l'inventaire des points de pollution ni d'indiquer les zones déjà polluées, il ne s'agissait pas non plus de montrer comment et par quel type de polluant va se matérialiser la pollution et quels en seront les effets. A partir de cette carte, il est donc possible de définir les zones sensibles dans lesquelles une pollution peut affecter gravement une nappe et d'avoir une idée des moyens à employer si l'on veut protéger cette nappe.

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.

I.7 Domaines d'utilisation des cartes de vulnérabilités

Selon (Vrba et Zoporozec, 1994), l'utilisation des cartes de vulnérabilité peut être divisée en trois domaines principaux :

- **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.
- **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.
- **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.

Matériel et méthodes

II.1 Présentation de la zone d'étude

II.1.1 Situation géographique de la région d'étude

Bejaïa, en berbère (Vgayéth) est une wilaya algérienne qui s'étend sur une superficie de 3223,48 Km², située au nord du pays dans la région de la Kabylie. Elle est divisée administrativement en 52 communes et 19 daïras (DPSBéjaia, 2019).

La zone d'étude se situe au Nord-Ouest de Bejaïa, au bord de la mer méditerranée, sa superficie est de 75 Km², avec une façade maritime de 7.9 Km et une distance de 15 Km du chef-lieu de la wilaya via la route nationale n° 24. Limitée au Nord par la méditerranée, au Sud par la commune d'Oued-Ghir et Toudja, à l'Ouest par la commune de Beni Ksila et à l'Est par la commune de Bejaia (Fig. 3).

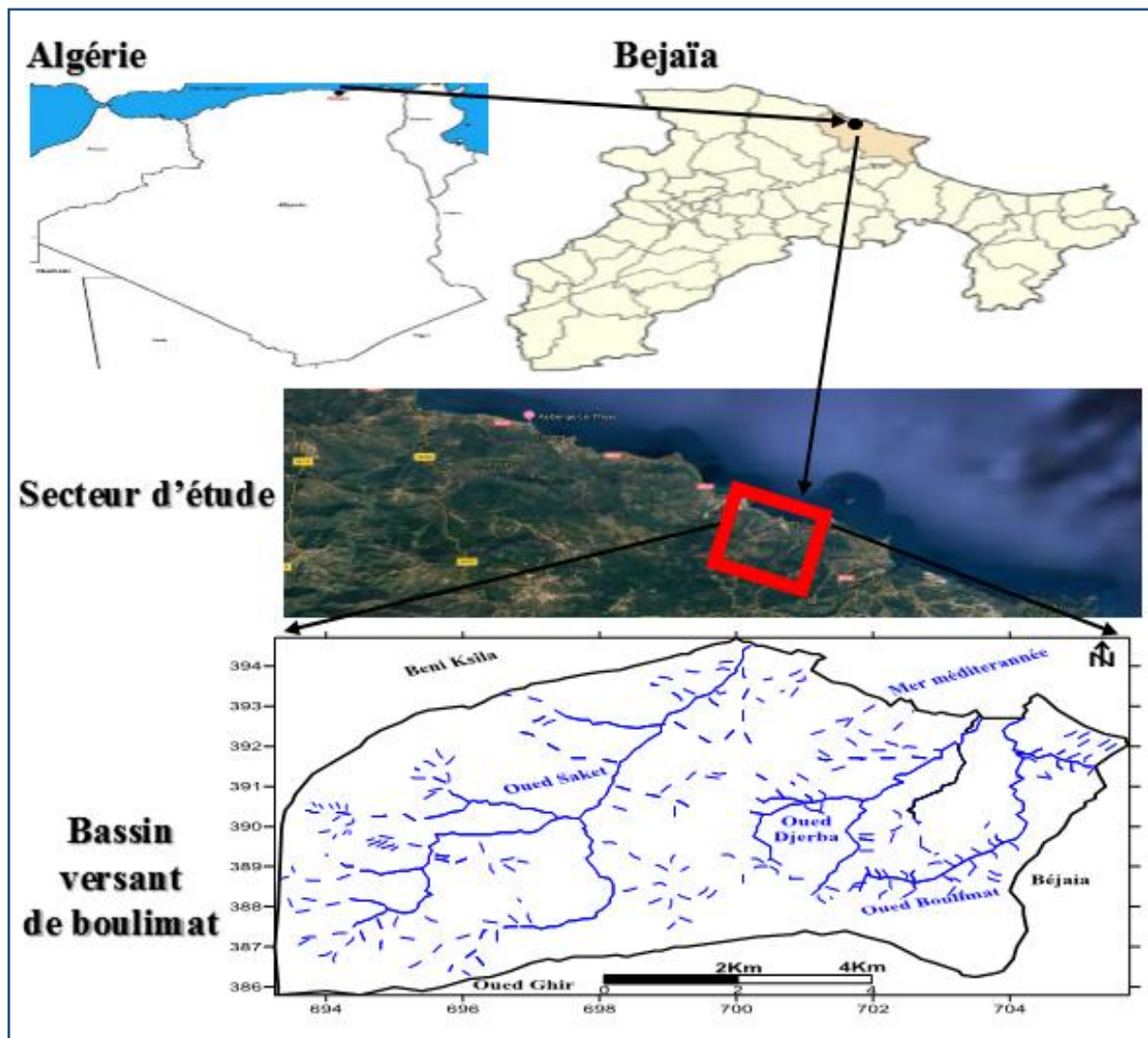


Figure 3. Localisation de la zone d'étude (Google earth, 2019)

II.1.2 Présentation de la population

II.1.2.1 Nombre d'habitants

Le nombre de la population de la zone d'étude à la fin de l'année 2018, est estimé à 1200 habitants d'où la densité de 16 habitants/Km². La répartition d'habitants par agglomération secondaire de la région d'étude et en pourcentage est donnée dans le tableau I et dans la figure 4 (DPS Béjaia, 2019).

Tableau I. Nombre d'habitants présent au niveau de la région d'étude par le N° des districts (DPSB, 2019).

Nom de l'agglomération Secondaire	N° des districts	Nombre d'habitants	Nombre Total d'habitants de la zone d'étude
Boulimat	011	680	1200
Saket, Aich Alvaz et thala ghilef	012	520	

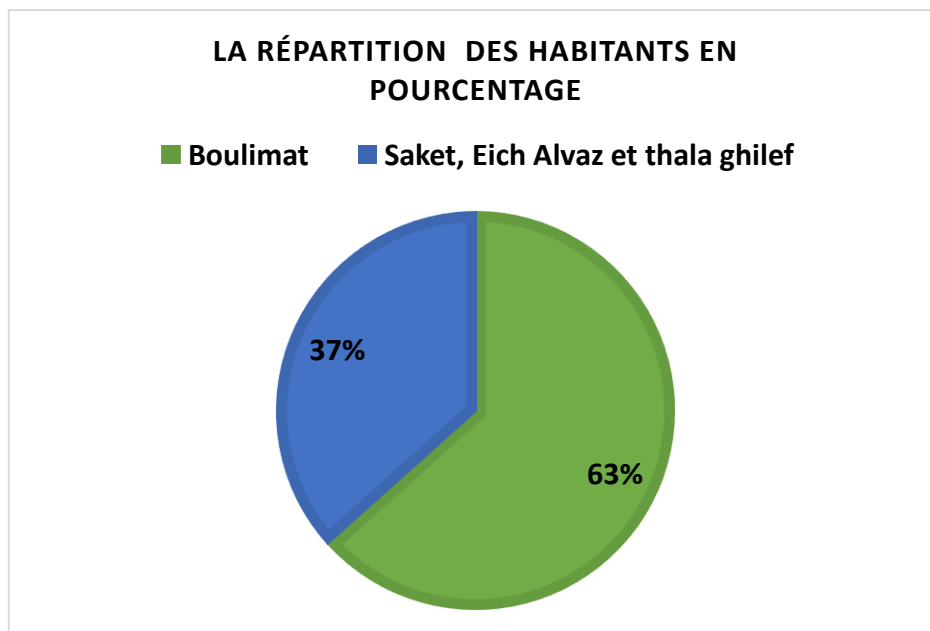


Figure 4. Répartition de la population de la zone d'étude en pourcentage (DPSB, 2019).

II.1.2.2 Nombre d'estivants

La zone d'étude reçoit plus de 150000 estivants/ année (Tab. II, Fig. 5) (DPSBéjaia, 2019).

Tableau II. Nombre d'estivants présent au niveau de la région d'étude par le N° des districts (DPSB, 2019).

Nom de l'agglomération Secondaire	N° des districts	Nombre d'estivants	Nombre Total d'habitants de la zone d'étude
Boulimat	011	95000	150 000
Saket, Tala Ghilef et Eich Alvaz	012	55000	

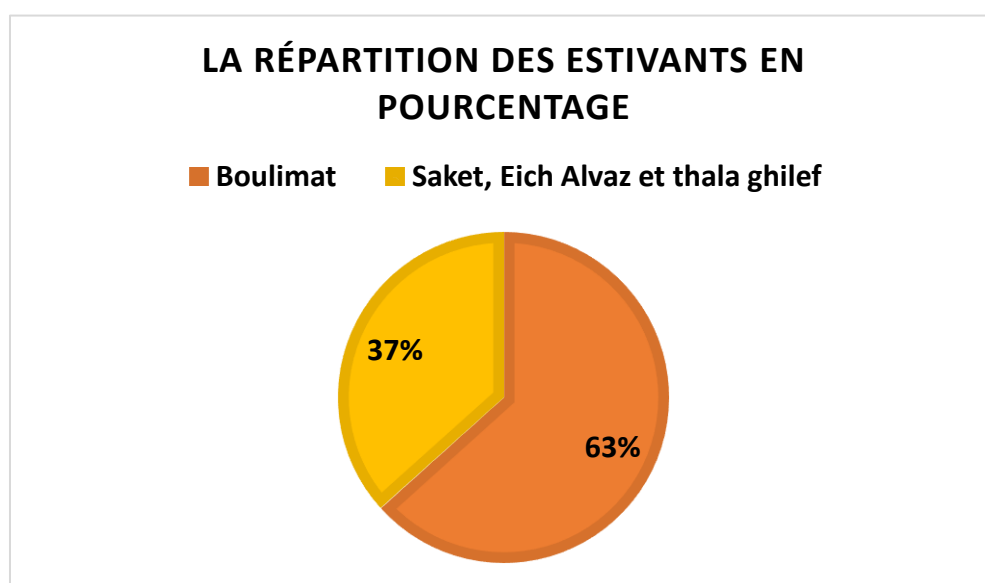


Figure 5. La répartition des estivants de la zone d'étude en pourcentage (DPSB, 2019).

II.1.2.3 L'accroissement démographique de la population (2008 et 2018) dans la région d'étude

Selon les informations fournis par la la DPS Béjaia (2018), le nombre de la population dans la région d'étude augmente de 200 habitants en 2008 pour atteindre 1200 habitants à la fin 2018 (Fig. 6).

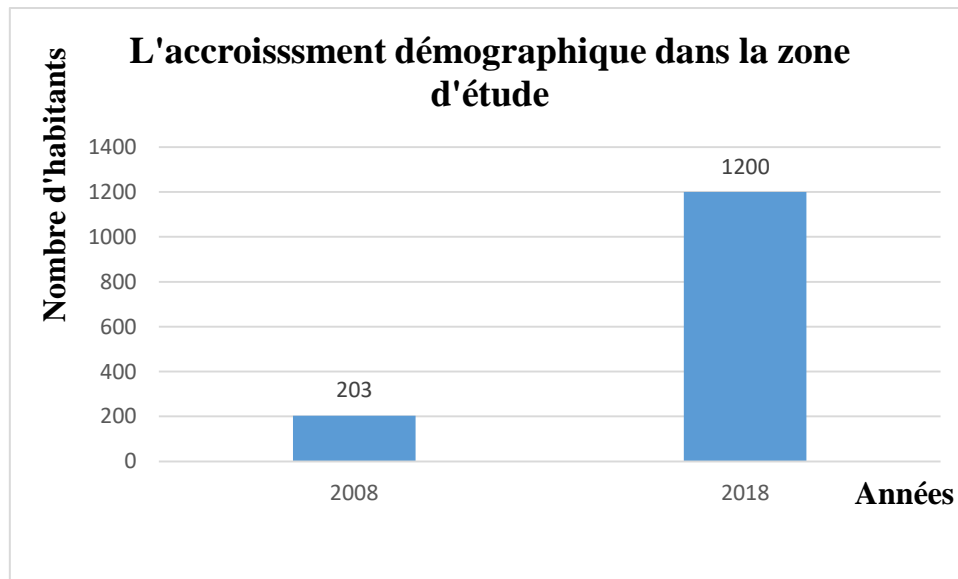


Figure 6. L'accroissement démographique dans la région d'étude de 2008 et 2018.

II.1.3 La Biodiversité de la zone d'étude

Le parc national de Gouraya englobe la zone centrale et maritime du bassin versant de boulimat.

La biodiversité du parc national de Gouraya est constituée de 1709 espèces dont 533 pour la flore et 1156 pour la faune. 67 espèces sont protégées dont 20 invertébrés, 1 reptile, 10 mammifères, 3 végétaux, 33 oiseaux (PNG).

II.2 Les caractéristiques morphométriques et hydrographiques du Bassin

II.2.1 Caractéristiques géométriques

➤ La superficie et le périmètre

Naturellement le bassin versant de Boulimat possède une superficie plane de 75 Km² et un périmètre de 40.55Km.

➤ La forme

Il s'est défini par Indice de capacité de Gravilius (K_G), qui est déterminé par la formule suivante :

$$K_G = \frac{p}{2\sqrt{\pi A}} = 0.28 \frac{p}{\sqrt{A}}$$

A : C'est la surface du Bassin en Km², (**A**= 75 Km²) ;

P : Son périmètre en km, **P**=40,55.

$$K_G = \frac{0.28 * 40.55}{\sqrt{75}}$$

➤ **K_G** = 1.31

Sur le plan morphologique, la valeur élevée de l'indice de compacité (**K_G**=1.31) qui est supérieur à 1, traduit la forme allongée du bassin versant de Boulimat.

➤ **Le rectangle équivalent**

Le rectangle équivalent se définit comme le rectangle qui a la même surface et même périmètre que le bassin versant dont les paramètres sont :

La longueur (**L**) :

$$L = \frac{KG\sqrt{A}}{1.12} \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{KG} \right)^2} \right]$$

L = 15.39 Km

La largeur (**l**) :

$$l = \frac{KG\sqrt{A}}{1.12} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{KG} \right)^2} \right]$$

l = 4.86 Km

A : C'est la surface du Bassin en Km²

K_G : L'indice de compacité.

II.2.2 Les caractéristiques topographique

➤ **Le relief**

Le relief du bassin versant de Boulimat est caractérisé par la courbe de sa répartition hypsométrique. La répartition hypsométrique est donnée par le pourcentage de la surface comprise entre les différentes courbes de niveau à la surface totale (Fig. 7).

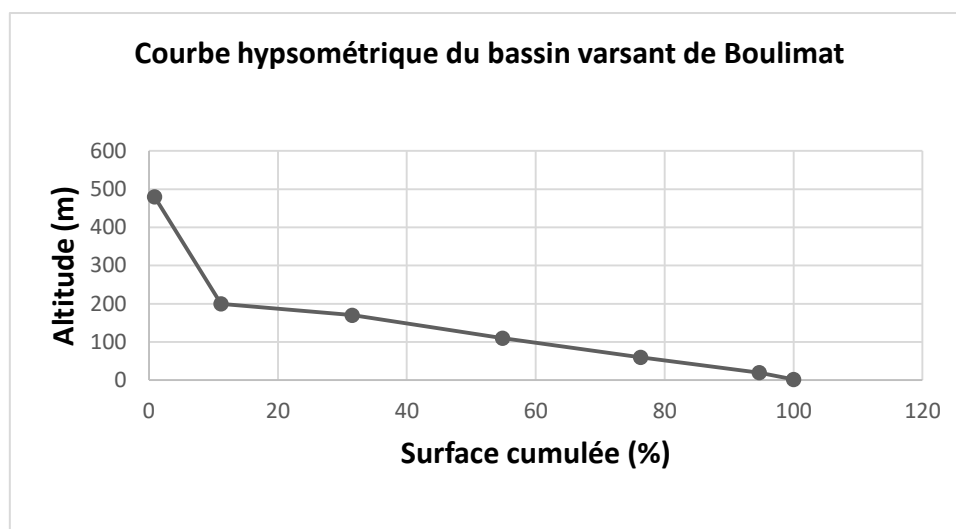


Figure 7. La courbe hypsométrique du bassin versant de Boulimat.

➤ Les altitudes

Les valeurs des altitudes ont été estimés en se référant aux cartes topographiques au 1/50000° de Bejaia.

Tableau III. Variation des altitudes du bassin versant de Boulimat.

Altitude (m)	Surface (Km ²)	Surface (%)	Surface cumulative (%)
380-480	0.64	0.86	0.86
200-380	7.73	10.31	11.17
170-200	15.26	20.35	31.52
110-170	17.49	23.33	54.85
60-110	16.06	21.42	76.27
20-60	13.8	18.4	94.67
2-20	3.99	5.33	100
Total	75	100	/

II.2.3 Les caractéristiques hydrographiques

II.2.3.1 Le réseau hydrographique

Le réseau hydrographique du bassin versant de Boulimat est composé de trois oueds et un nombre important d'affluents (Fig. 8).

- Oued Saket et oued Djerba a écoulement permanents, alimentés par les eaux usées domestiques et les eaux pluviales.
- Oued Boulimat dont l'écoulement est temporaire, alimenté essentiellement pendant la période pluvieuse

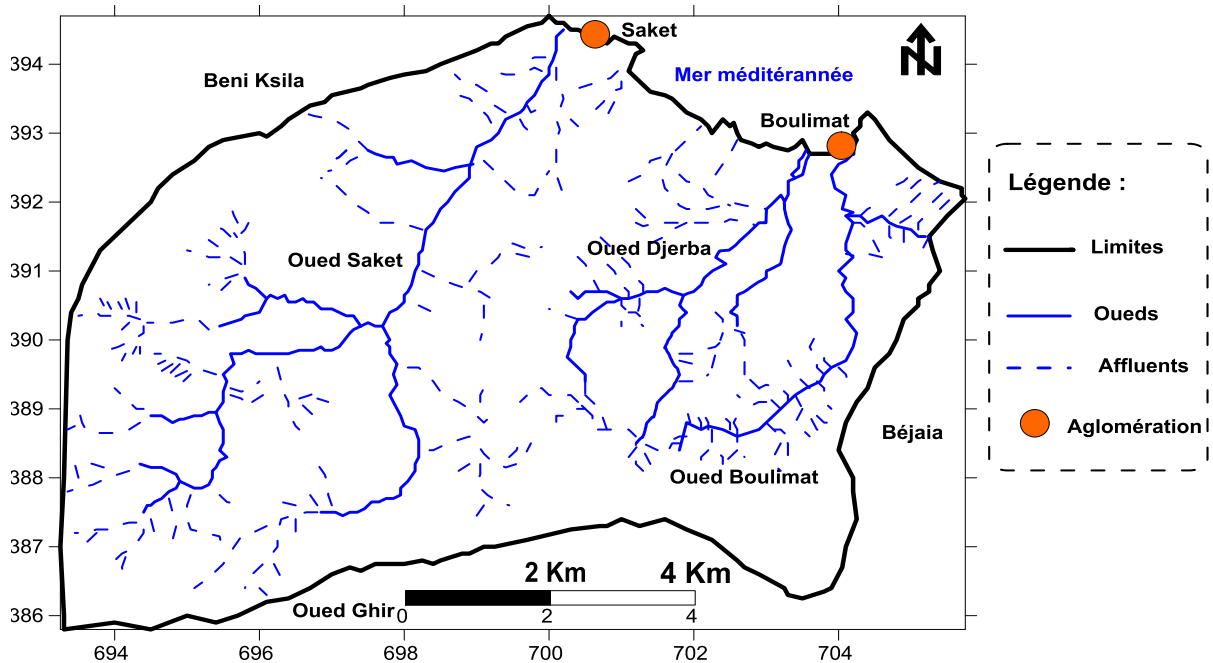


Figure 8. Carte de réseau hydrographique du bassin versant de Boulimat.

II.2.3.2 L'indice de pente globale

L'indice de pente globale (I_g) est utilisé pour déterminer la dénivelée spécifique du bassin versant.

$H_{5\%}$ et $H_{95\%}$ sont des altitudes entre lesquelles s'écrivent 90% de la surface du bassin. La dénivelée D est donc $H_{5\%} - H_{95\%}$ où $H_{5\%} = 380m$ et $H_{95\%} = 60m$.

L'indice de pente est égale à :

$$I_g = \frac{D}{L} \quad ; \quad \boxed{I_g = 0.0207}$$

D : dénivelée (m) = 320 m

L : Longueur du rectangle équivalent = 15390 m

D'après le tableau IV de L'ORSTOM, et la valeur obtenue de $I_g = 2.07\%$ ($0.02 < I_g < 0.05$), le bassin versant de Boulimat est dans la classe du relief assez fort.

Tableau IV. Classification des reliefs d’après l’ORSTOM.

Relief très faible	$I_g < 0.002$
Relief faible	$0.002 < I_g < 0.005$
Relief assez faible	$0.005 < I_g < 0.01$
Relief modéré	$0.01 < I_g < 0.02$
Relief assez fort	$0.02 < I_g < 0.05$
Relief fort	$0.05 < I_g < 0.1$
Relief assez fort	$0.1 < I_g$

II.2.3.3 La densité de drainage

Elle reflète la dynamique du bassin, c’est le rapport de la longueur des cours d’eau à la superficie du bassin versant.

Le réseau hydrographique du bassin versant de boulimat a une longueur totale de 98.9 Km, la densité de drainage :

$$D_d = \sum L / A ; D_d = 98.9/75$$

$D_d = 1.32$

D_d : Densité du drainage en km.

L : La longueur totale cumulée des cours d’eaux en Km ; $L = 98.9$ Km.

A : Surface du bassin en km^2 ; $A = 75Km^2$.

II.2.2. Délimitation et subdivision

Le bassin versant de Boulimat est délimité par des lignes de partage des eaux entre les différents bassins. Ces lignes sont des frontières naturelles dessinées par le relief (Fig. 9). Et Il est divisé en deux sous-unités :

- Le sous bassin de Boulimat.
- Le sous bassin d’Oued Saket.

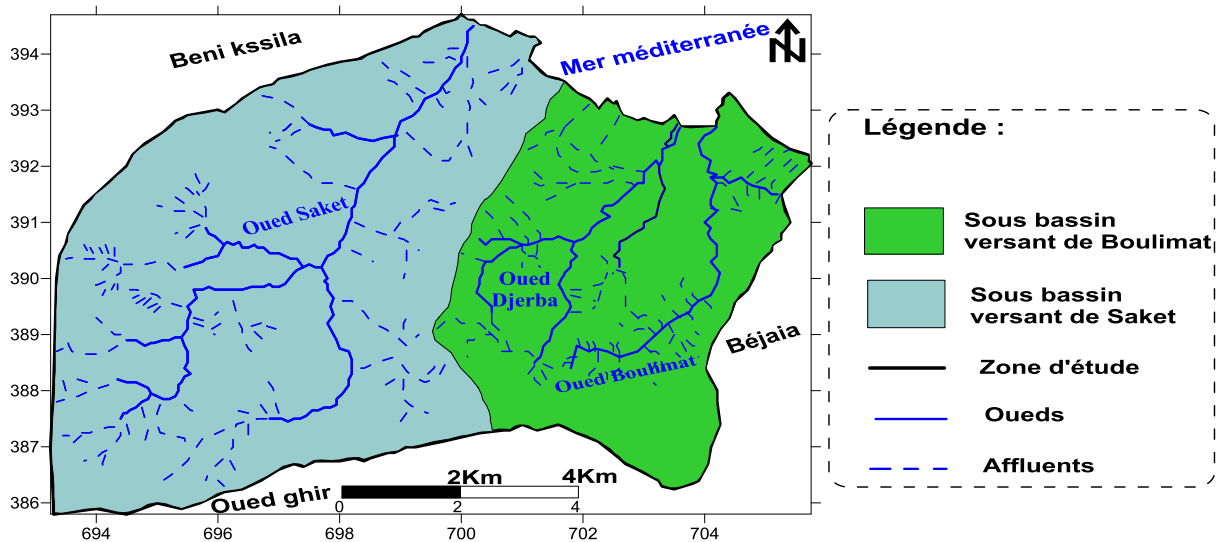


Figure 9. Les deux sous bassins versant de la zone d'étude.

II.3 Caractéristiques physiques de la région d'étude

II.3.1 Géologie

D'après les travaux de Hassissen (1989), La géologie de la région de Boulimat (Fig. 10) est formée par trois grands ensembles de formations :

➤ Les formations autochtones

Sont caractérisées par la présence des alluvions tout le long des oueds et les argiles des Miocènes ;

➤ Les formations allochtones

Les argiles et les grés de la nappe des flysch ainsi les conglomérats qui occupent la quasi totale de terrain ;

➤ Le haut fond berbère

Il est caractérisé par la présence des grès et une alternance oligocène des faciès de la chaîne calcaire jurassique, et le socle des formations cristallophylliennes du paléozoïque.

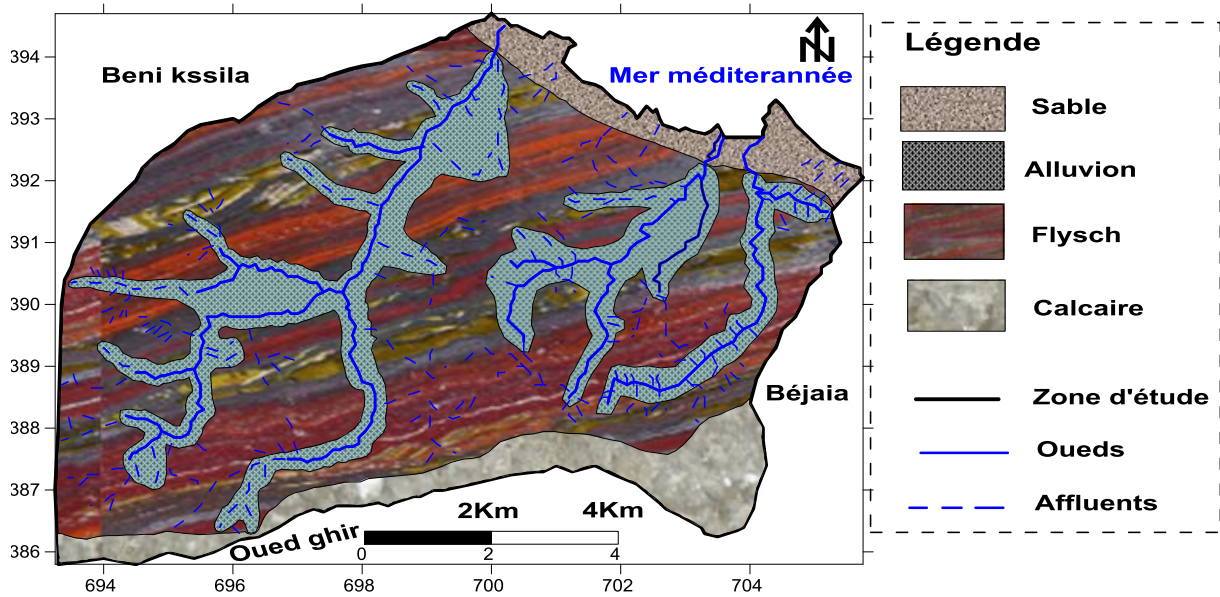


Figure 10. Carte géologique de la région de Boulimat (in Hassissen, 1989)

II.3.2 La pédologie

La région d'étude est formée par trois types de sols (Fig. 11), la plus grande partie du terrain est dominée par des sols limono-sableux, les alentours des oueds et affluents sont caractérisés par un sol alluvionnaire, tandis que le long du littoral est caractérisé par un sol sableux.

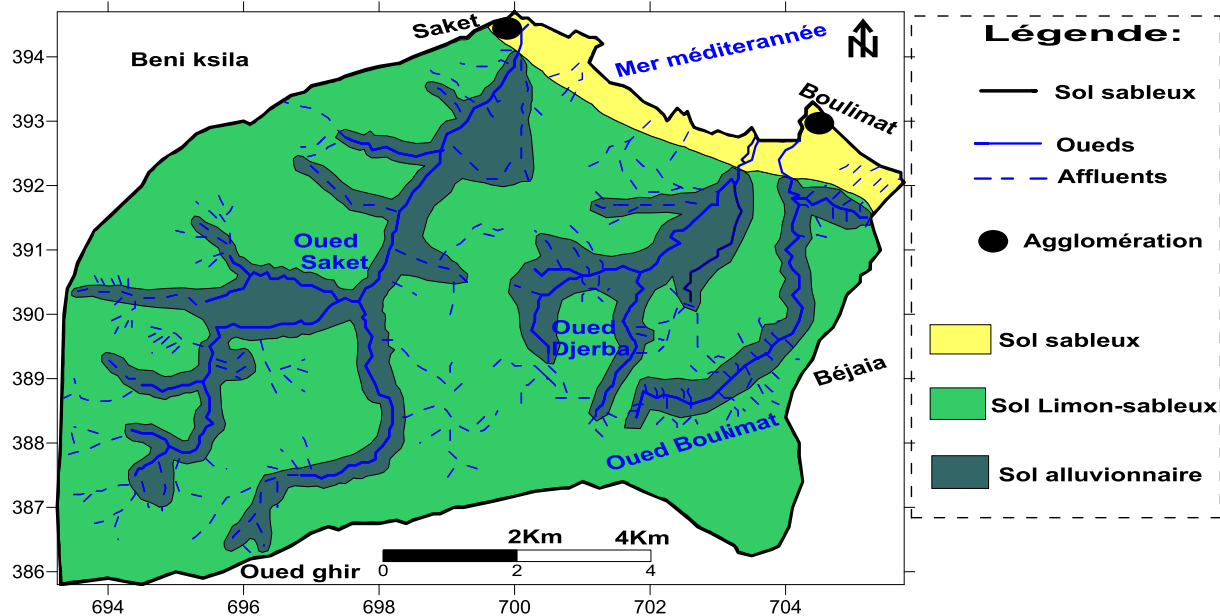


Figure 11. Carte du sol de la région d'étude.

II.4 Climatologie

Toute étude hydrogéologique passe principalement par un traitement détaillé des mesures hydro climatique permettant d'établir le bilan hydrique et par conséquent de comprendre les mécanismes d'alimentation et de circulation des eaux de surface et souterraines.

L'établissement d'un bilan hydrique nécessaire pour le fonctionnement d'un système hydraulique de surface, implique la connaissance des paramètres suivants : la précipitation, l'évaporation, l'infiltration et le ruissellement qui conditionnent ce bilan. Cette étude climatique débouchera sur un calcul du bilan en exploitant les données météorologiques disponibles et en utilisant la méthode adaptée à la région.

Nous présenterons dans cette partie les caractéristiques climatiques du bassin qui jouent un rôle important dans la connaissance de ses ressources en eaux souterraines, de surface et les processus d'alimentation. Leurs variations influent directement sur le potentiel hydrique et la qualité chimique des eaux.

II.4.1 Climatologie de la région d'étude

La région de Boulimat est soumise à un climat de type méditerranéen, pluvieux et froid en hiver, chaud et sec en été. Les données climatiques utilisées sont recueillies auprès de la station météorologique de Bejaia, qui s'étale sur une période de vingt-deux ans ; allant de 1996 à 2018.

Les caractéristiques de la station météorologique de Béjaia sont :

- Coordonnées géographiques : 36°43'N. 05°04 'E ;
- Altitude : 1.75m ;
- Localisation : Aéroport Abane Ramdane, Bejaia.

II.4.1.1 Température

La température est l'un des facteurs majeurs de première importance, elle contrôle l'ensemble des phénomènes métaboliques et conditionne de ce fait la répartition d'espèces et communautés d'êtres vivants dans la biosphère (Ramade, 1984).

A partir des informations fournis par la station météorologique de Bejaia :

La moyenne des températures varie entre les deux valeurs extrêmes 11,72-25.9C° (Fig. 12).

Les valeurs moyennes des températures mensuelles interannuelles de l'air, de la région de Bejaïa, période (1996/2016), sont représentées dans le tableau suivant :

Tableau V. Variations de la température mensuelle à la station de Béjaïa (1996-2018).

Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout
T °C	23.5	20.63	15.95	12.77	11.86	11.72	13.81	15.86	18.6	22.3	25.1	25.9

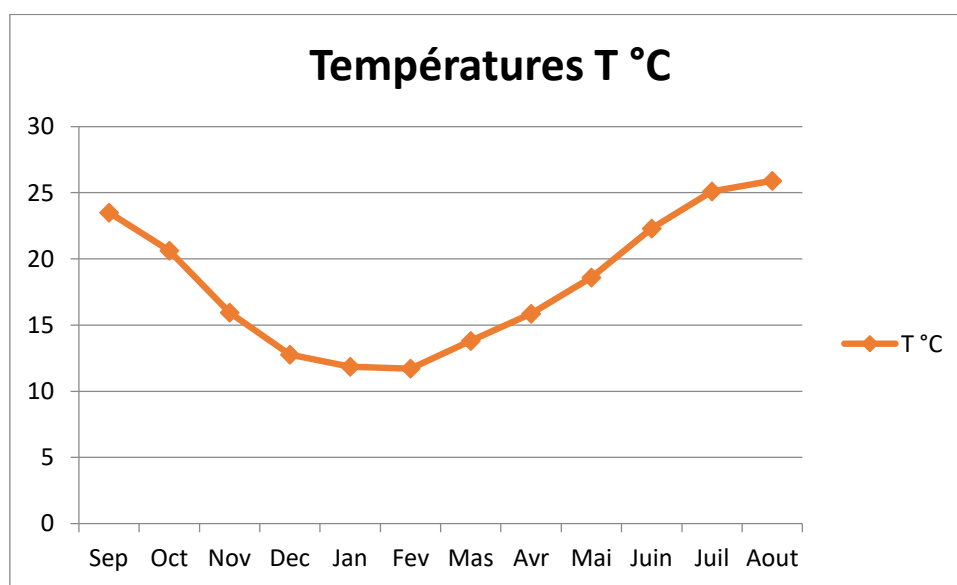


Figure 12. Variation moyenne mensuelle de la température à la station de Béjaïa (1996-2018).

II.4.1.2 Précipitations

La pluviométrie constitue un facteur écologique important (Ramade, 2003). Elle exerce une influence sur la vitesse de développement des végétaux.

La distribution saisonnière des pluies n'est pas homogène, d'après le tableau VI et figure 13, les précipitations moyennes interannuelles sont abondantes, dépassant les 800 mm/an.

- Le mois le plus pluvieux est le mois de Décembre avec un max de précipitations qui vaut à P = 120.6 mm ;
- Le minimum de précipitations est constaté au mois de Juillet.

Tableau VI. Variations des précipitations mensuelles à la station de Béjaia (1996-2018).

Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout
P(mm)	65.05	69.5	110.4	120.6	114.8	104.2	77.1	70.53	44.26	17.97	7.23	10.24

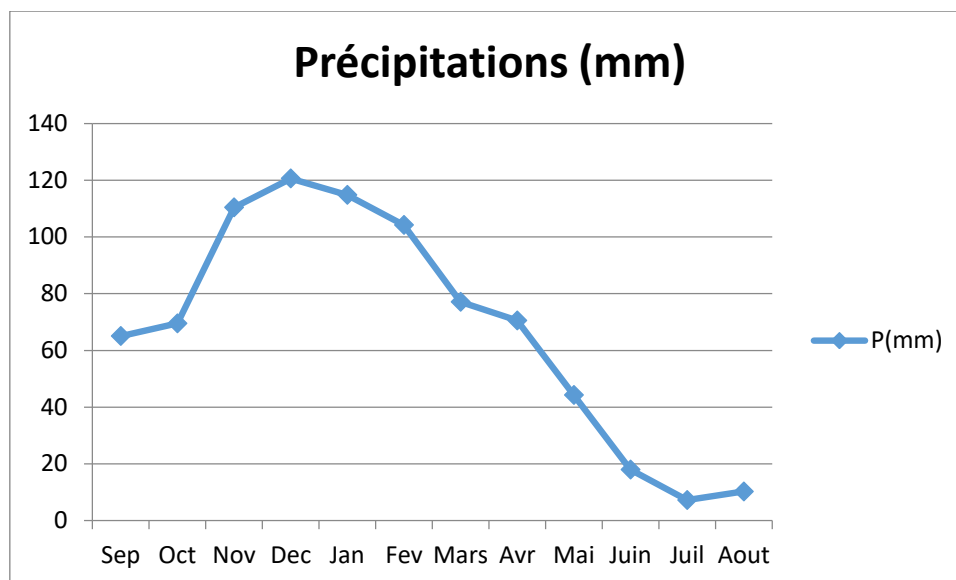


Figure 13. Variations des précipitations mensuelles à la station de Béjaia (1996-2018).

II.4.1.3 Humidité

La disponibilité en eau du milieu et l’hygrométrie atmosphérique jouent un rôle essentiel dans l’écologie des organismes terrestres (Barbault, 2000).

L’humidité relative atteint son maximum en mois de Mai avec un taux de 77.53%, et elle atteint son minimum qui vaut à 71.91% en mois de Janvier (Tab. VII, Fig. 14).

Tableau VII. Variations de l’humidité mensuelle à la station de Béjaia (1996-2018).

Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout
H (%)	75.96	75.05	75.14	75.1	71.91	76.52	76.6	77.32	77.53	76.68	75.1	74.84

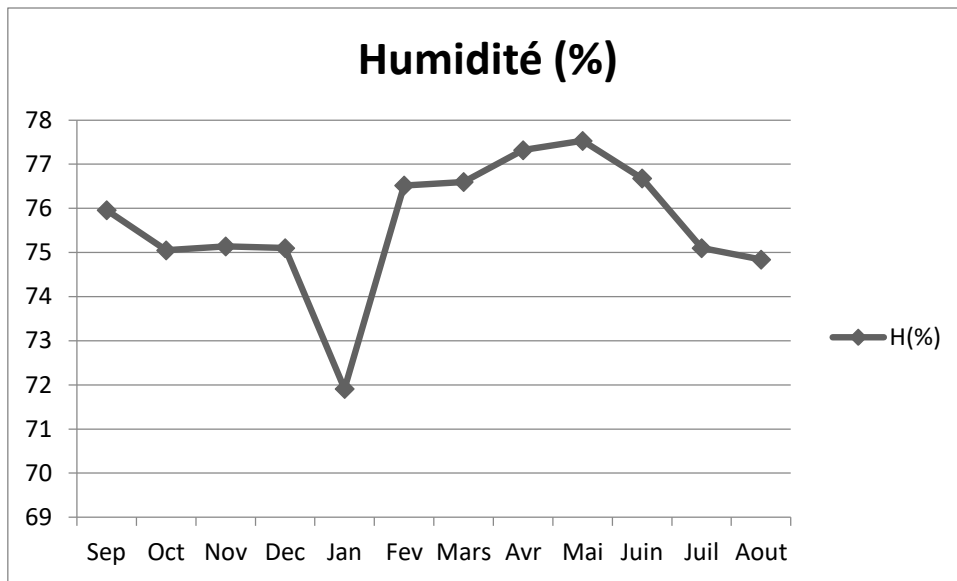


Figure 14. Variations de l’humidité relative moyenne à la station de Béjaia (1996-2018).

II.4.1.4 Le vent

Tableau VIII. Vitesse du vent maximale à la station de Béjaia (1996-2018).

Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout
V m/s	6.79	7.55	8.5	8.86	8.7	9.08	7.54	6.88	6.63	5.95	6.7	6.96

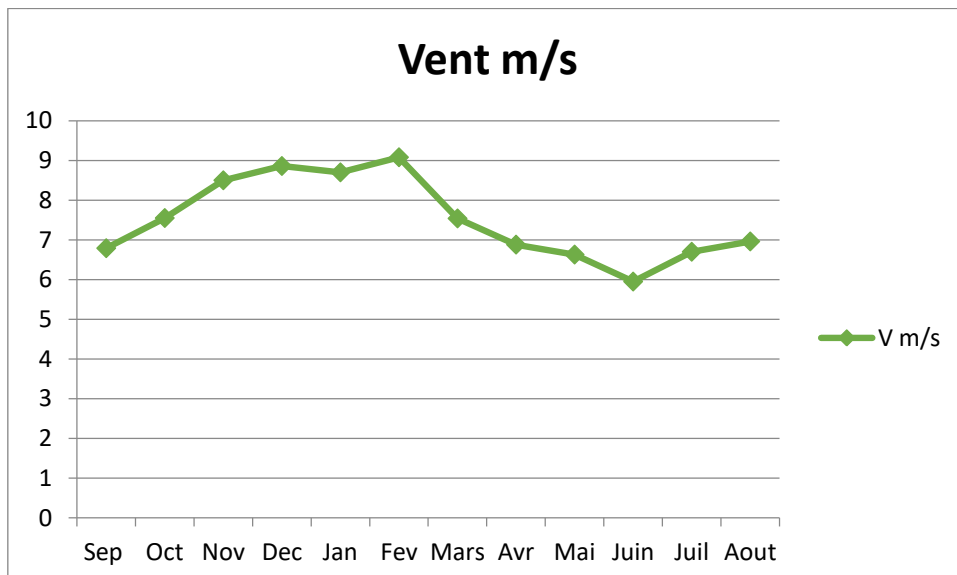


Figure 15. Répartition mensuelle de la force du vent à la station de Béjaia (1996-2018).

II.4.2 Synthèse Climatique

II.4.2.1 Le diagramme Ombro-thermique de Bagnouls et Gausсен

Le but d'établir ce diagramme, est de se permettre à se renseigner sur la saison sèche d'une région donnée. On introduisant sur un même graphe les températures et les précipitations sur deux axes des ordonnées indépendants et les mois sur l'axe des abscisses.

Il est conçu de telle sorte que la pluviométrie est égale au double de la température moyenne mensuelle ($P = 2T$).

Selon **Bagnouls et Gausсен (1953)** un mois est dit sec si, "le total mensuel des précipitations exprimées en millimètres est égal ou inférieur au double de la température moyenne, exprimée en degrés centigrades" ; cette formule ($P \leq 2T$) permet de construire des diagrammes Ombrothermique traduisant la durée de la saison sèche d'après les intersections des deux courbes.

D'après le diagramme ci-dessous (Fig. 16) :

- La saison sèche s'étend à partir de la troisième semaine du mois de Mai Jusqu'à la première semaine du mois de Septembre ;
- La période humide s'étend de la première semaine de septembre jusqu'à la dernière semaine du mois de Mai.

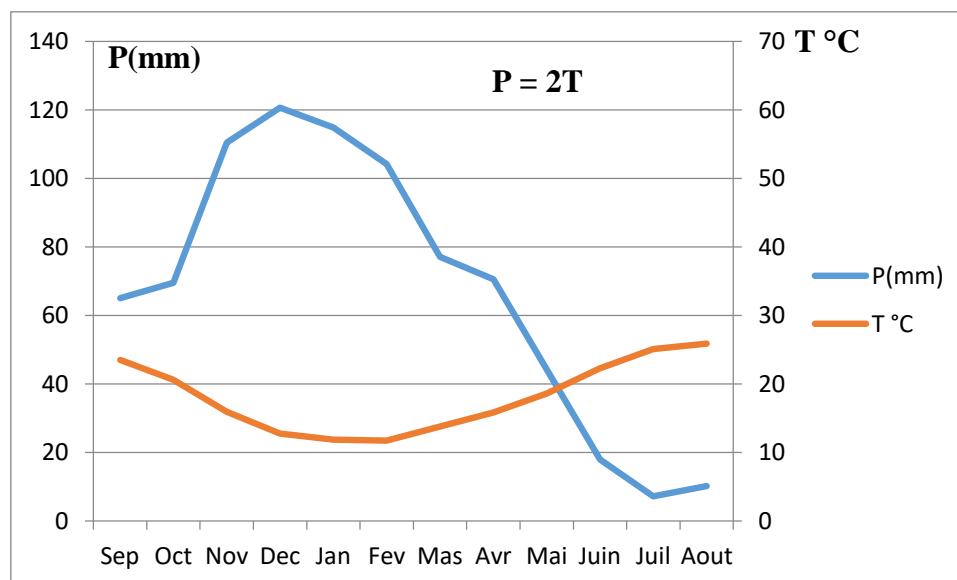


Figure 16. Diagramme Ombro-thermique à la station de Béjaia (1996-2018).

II.4.2.2 Bilan hydrique

❖ La méthode Thornthwaite

Nous avons utilisé cette méthode pour calculer l'évapotranspiration potentielle mensuelle à partir des données de base (Températures et précipitations moyennes mensuelles, l'indice mensuel « i » et le coefficient thermique « K ») selon la relation suivante :

$$ETP = 16 \left(10 \frac{T}{I}\right)^a K$$

$$a = 1.6 + \frac{1}{100} + 0.5$$

$$i = \left(\frac{T}{5}\right)^{1.514}$$

$$I = \sum^n i = 1 i$$

❖ L'évapotranspiration potentielle (ETP)

Selon Roche (1963) : « L'ETP correspond à l'évaporation d'une surface qui serait suffisamment approvisionnée en eau pour évaporer la quantité d'eau maximale permise par les conditions climatiques».

❖ Evapotranspiration réelle (ETR)

Elle correspond à l'évapotranspiration qui se produit pendant un intervalle de temps donné, dans des conditions réelles des teneurs en eau abondantes du sol. Ce paramètre est calculé par plusieurs méthodes empiriques prenant en compte les précipitations et les températures.

❖ Principe de calcul du bilan hydrologique

➤ Si pour un mois $P \geq ETP$, on pose que l'ETP = ETR ;

L'excédent ($P - ETR$) va éliminer la RFU jusqu'à son maximum (100 mm) et si elle dépasse cette valeur, il y aura un excès qui va partir soit sous forme d'infiltration efficace vers la nappe, soit sous la forme de ruissellement.

➤ Si $P < ETP$,

La valeur de $ETR = P + RFU$, jusqu'à égalisation avec ETP . Si la RFU est nulle, il va se produire un déficit agricole $Da = ETP - ETR$, ce dernier paramètre représente alors le besoin des cultures à l'irrigation.

Les résultats du bilan hydrique selon la méthode de Thornthwaite sont représentés dans le tableau IX.

Tableau IX. Tableau des résultats du bilan hydrique selon la méthode de Thornthwaite:

Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mas	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Annuel
T°C	23.5	20.63	15.95	12.77	11.86	11.72	13.81	15.86	18.6	22.3	25.1	25.9	18.16
P	65.05	69.5	110.4	120.6	114.8	104.2	77.1	70.53	44.26	17.97	7.23	10.24	811.88
I	10.41	8.55	5.79	4.13	3.7	3.63	4.65	5.74	7.3	9.62	11.5	12.06	87.08
A	1.89												
K	1.03	0.97	0.86	0.84	0.87	0.87	1.03	1.1	1.21	1.22	1.24	1.16	/
ETP	104.5	81.67	50.22	32.99	28.68	28.05	38.25	49.68	67.15	94.61	118.3	125.5	819.6
ETR	65.05	69.5	50.22	32.99	28.68	28.05	38.25	49.68	44.26	17.97	7.23	10.24	442.12
RFU	0	0	100	100	100	100	100	100	0	0	0	0	/
DA	39.45	12.17	0	0	0	0	0	0	22.89	76.64	111.07	115.26	377.48
Ex	-	-	60.18	87.61	86.75	76.15	38.85	20.85	-	-	-	-	370.39

➤ **Calcul du ruissellement de surface**

Le ruissellement est l'écoulement instantané et temporaire des eaux sur un versant à la suite d'une averse, si $P < 600\text{mm}$, le ruissellement est donné par la formule empirique de TixerontBerkaloff :

Sachant que :

$$R = \frac{P^3}{3(ETP)^2}$$

$P^3 = 535149999.2$
 $3(ETP)^2 = 2015232.48$

} $R = 265.55 \text{ mm/an}$

➤ **Calcul d'infiltration selon Thornthwaite**

L'infiltration présente la quantité d'eau qui pénètre dans le sol et le sous-sol pour alimenter les aquifères. Le paramètre est difficile à évaluer car il échappe aux mesures directes. Grace à l'équation du bilan hydrique on peut déduire les infiltrations :

$$I = P - (ETR + R) ;$$

$$I = 811.88 - (442.12 + 265.55) ;$$

$$I = 104.21$$

La formule du bilan hydrique selon Thornthwaite est :

$$P = ETR + (R+I)$$

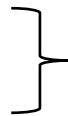
(R+I) : Ruissellement + Infiltration

P : Précipitation en mm/an

✓ **Calculs :**

$$(R + I) = P - ETR$$

$$(R + I) = 811.88 - 440.25$$



$$E + I = 369.76$$

D'après les résultats obtenus ci-dessus :

$$I = 104.21 \text{ mm}$$

II.5 Méthode de prélèvement et Echantillonnage

Pour évaluer la vulnérabilité à la pollution de la nappe superficielle de la région de Boulimat, nous avons prélevé 10 échantillons d'eau dans différents sites de la région d'étude.

II.5.1 Date et critères de choix des points de prélèvements

Le choix du site de prélèvement des échantillons a reposé, sur la facilité d'accès, l'origine et la répartition des points d'eau dans la région d'étude. Nous avons prélevé 5 échantillons pour les eaux de surfaces ; 4 échantillons à oued Djerba, et 1 échantillon à oued Saket (Fig. 17), et 5 échantillons pour les eaux souterraines ; 4 puits et 1 forage (Fig. 18). La campagne de prélèvements d'échantillons a été effectuée à la période de hautes eaux le 29 Avril 2018.



Figure 17. Points de prélèvements des eaux de surfaces de la région de Boulimat (Avril, 2018).



Figure 18. Points de prélèvements des eaux souterraines de la région de Boulimat (Avril, 2018).

II.5.2 Matériel de prélèvement

- un GPS (Global Positionnement System) pour prendre les coordonnées des points de prélèvements ;
- des flacons pour le prélèvement des échantillons d'eau ;
- un appareil photo numérique pour la prise de différentes vues ;

- une glacière et des morceaux de glace pour la conservation des échantillons ;
- un entonnoir ;
- des tubes à essai en verre ;
- des étiquettes pour étiqueter les flacons et les tubes de prélèvement ;
- pichet en plastique ;
- Une corde.

Le matériel utilisé est représenté dans la figure 19.



Figure 19. Matériel de prélèvement.

II.5.3 Techniques de prélèvements

- Le prélèvement de l'eau se fait dans une profondeur qui nous permet de remplir le pichet, et rincer la bouteille utilisée 3 fois avec de l'eau à prélever pour les analyses physico-chimiques ;
- Remplir la bouteille à ras bord afin d'éviter la présence d'air ;
- Fermer la bouteille hermétiquement avec le bouchon ;
- La bouteille est désignée par une étiquette ou est indiquée l'origine et le numéro de l'échantillon ;
- La conservation des échantillons dans une glacière pendant leur transport jusqu'au laboratoire d'analyse ;
- Garder l'échantillon au frais en le déposant au réfrigérateur jusqu'au moment de son envoi au laboratoire.

II.6 Méthodes d'analyses

II.6.1 Les Analyses physico-chimiques

Les mesures de la qualité de l'eau de la zone d'étude comprennent les mesures in situ et les mesures ex situ (laboratoires d'analyses chimiques).

II.6.1.1 Présentation du lieu de stage

Le Centre National de Technologies et de Consulting (CNTC)- SPA Boumerdes a été créé le 30 mai 1998, il est structuré pour prendre en charge toute étude de gestion et de Management liée à toute branche d'activité.

Il fait l'accompagnement des entreprises dans leur processus de Certification ou d'Accréditation suivant les normes ISO 9001, 14001, l'existence de ses laboratoires certifiées ISO 9000 lui permette d'assurer diverses prestations spécifiques aux branches industrielles, ainsi qu'à toute activité de services en relation avec elles en particulier pour l'Industrie Textiles – Plastiques- Jouets – Eaux (Fig. 20).



Figure 20. Image représentative du lieu de stage (CNTC-Boumerdes).

II.6.1.2 Les mesures in situ

Les mesures in situ sont des analyses réalisées sur le terrain, pour déterminer les paramètres physico-chimiques (température, pH, conductivité électrique, salinité, et TDS), à l'aide d'un multi paramètre de type HANNA Instrument HI 9828 (Fig. 21).



Figure 21. Multi paramétré de type HANNA Instrument HI 9828.

❖ Technique de mesure

Les paramètres physico-chimiques (température, pH, conductivité électrique, salinité, et TDS) ont été mesurés sur place :

- Tremper la sonde dans l'eau ;
- Laisser la sonde dans l'eau jusqu'à la stabilité du résultat ;
- Noter la valeur du prélèvement ;
- On rince la sonde avec l'eau distillée et on l'essuie avec le papier absorbant avant chaque prélèvement ;
- ✓ Pour obtenir la valeur moyenne des paramètres mesurés, on a réalisé 3 prélèvements pour chaque station en respectant les techniques de mesure précédentes.

II.6.2 Analyses des paramètres hydro-chimiques au laboratoire

Les paramètres hydro-chimiques (Chlorure, Nitrite, Sulfate, Nitrate) ont été dosés au laboratoire chimie du centre CNTC de Boumerdes.

II.6.2.1 Dosage des chlorures (Cl⁻) par la méthode de MOHR**❖ Principe**

Les chlorures sont dosés en milieu neutre par une solution titrée de nitrate d'argent en présence de chromate de potassium (Fig. 22). La fin de la réaction est indiquée par l'apparition de la teinte rouge caractéristique du chromate d'argent (Mode opératoire voir annexe II).

❖ Matériel utilisé

- Matériel courant de laboratoire : erlenmeyer, pipette, bécher, turbulent ;
- Burette de Mohr ;
- Agitateur magnétique ;

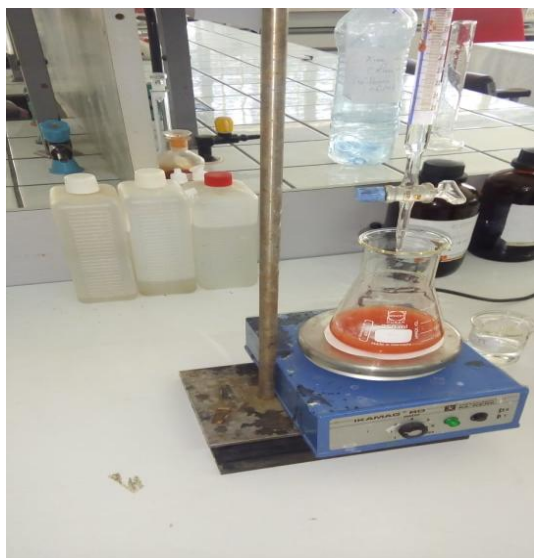


Figure 22. Dosage des chlorures au niveau du laboratoire chimie, CNTC de Boumerdes.

II.6.2.2 Dosage des nitrites (NO₂⁻) par la méthode du réactif Zambelli**❖ Principe**

En présence d'ion ammonium et de phénol (réactif de Zambelli), forme avec les ions nitrites un complexe coloré jaune, on effectue la lecture au spectromètre à la longueur d'onde de 434 nm (Mode opératoire voir **annexe III**).

❖ Matériel

- Matériel courant de laboratoire : pipette, bécher, éprouvette graduée ;
- Spectrophotomètre ;
- Fiole.

II.6.2.3 Dosage des sulfates (SO_4^{2-})

❖ Principe

Les ions sulfate réagissent en solution aqueuse avec le réactif LCK 353, ce qui donne une lecture automatique sur le spectrophotomètre UV-VIS DR6000 (Fig. 23), le mode opératoire mentionné dans l'annexe III, ainsi que les tests en cuves (LCK) utilisés sont mentionnés dans l'annexe V.

❖ Matériel

- Le spectrophotomètre UV-VIS DR6000 ;
- Matériel courant de laboratoire : pipette, bécher, éprouvette graduée.



Figure 23. Le test en cuve LCK 353 sur le spectrophotomètre UV-VIS DR6000, effectué au laboratoire chimie du centre CNTC de Boumerdes.

II.6.2.4 Dosage des nitrates (NO_3^-) par la méthode de BRUCINE

❖ Principe

L'acide sulfosalicylique réagit sur les nitrates en donnant un dérivé : acide nitro-sulfosalicylique de couleur jaune (Mode opératoire voir l'annexe IV).

❖ Matériel

- Une étuve ;
- Matériel courant de laboratoire : pipette, bécher, éprouvette graduée ;
- Spectrophotomètre UV-VIS DR6000.

II.7 Analyse des éléments traces métalliques (ETM) par la spectrophotométrie

Les éléments traces métalliques ont été analysés au spectromètre d'absorption atomique en flamme (SAA) au niveau du laboratoire de génie des procédés de l'université de Bejaia.

Les paramètres analysés selon la disponibilité des lampes sont : le Plomb (Pb), le Zinc (Zn), le Cadmium (Cd).

❖ Principe

Proposée par WALSH en 1955, la spectrophotométrie d'absorption atomique est une méthode d'analyse quantitative s'adressant essentiellement aux métaux. Elle est basée sur la propriété des atomes de l'élément qui peuvent absorber des radiations de longueur d'onde déterminée.

La solution de l'élément à analyser est nébulisée dans une flamme, ce qui provoque successivement ; l'évaporation du solvant, la vaporisation de l'élément sous forme de combinaisons chimique et en fin la dissociation de ces combinaisons avec production d'atomes libres à l'état fondamental (Rodier, 2009).

II.8 Le logiciel utilisé (surfer 11)

Le logiciel Surfer d'origine américain, conçu par Golden Software, permet de réaliser des cartes à partir d'un modèle numérique de terrain (MNT) en coordonnées Lambert 93, ou bien en se basant sur une carte déjà préétablie. Ce logiciel permet de créer des grilles qui vont interpoler les données irrégulières des points x, y, et z, afin de les ordonner. Ces grilles peuvent être importées depuis plusieurs sources pour produire différents types de cartes, incluant des contours, des vecteurs, des images ainsi que des cartes superficielles (Wichda, 2016).

II.9 La méthode DRASTIC-EC-SO₄⁻² (méthode améliorée)

II.9.1 Méthode DRASTIC

La méthode DRASTIC, développée par les services de l'Agence américaine de protection de l'environnement USEPA (ALLER et al. 1987), est une méthode d'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque verticale à la pollution des aquifères par systèmes paramétriques.

La méthode DRASTIC est basée sur l'évaluation de sept paramètres : la profondeur à la nappe (D), la recharge (R), le type d'aquifère (A), le type du sol (S), la topographie (T), l'impact de la zone vadose (I) et la conductivité hydraulique (C), pour chaque paramètre, la plage de valeurs possibles est subdivisée en différents intervalles et une cote est attribuée à chacun d'eux. Un indice de vulnérabilité (I_{DRASTIC}) est alors calculé en additionnant la contribution des sept paramètres, pondérées selon l'importance de chacun de ses paramètres dans l'évaluation de la vulnérabilité, à l'aide de l'équation :

$$I_{DRASTIC} = D_p D_c + R_p R_c + A_p A_c + S_p S_c + T_p T_c + I_p I_c + C_p C_c$$

Où p et c désigne respectivement le poids et la valeur de l'intervalle (cote) attribués à chaque paramètre. Aux fins d'interprétation, les valeurs possibles de l'indice DRASTIC sont subdivisées en huit intervalles ou classes.

II.9.2 Méthode DRASTIC-EC-SO₄⁻²

La méthodologie que nous proposons DRASTIC-EC-SO₄ est basée sur les mêmes paramètres de la méthode DRASTIC et en ajoutant deux paramètres : La conductivité électrique (EC) et les sulfates (SO₄⁻²), la méthode sera basée sur l'évaluation de neuf paramètres.

L'indice de vulnérabilité DRASTIC-EC-SO₄ est calculé en faisant la somme des produits des cotes par les poids des paramètres correspondants :

$$I_{DRASTIC-EC-SO_4} = D_p D_c + R_p R_c + A_p A_c + S_p S_c + T_p T_c + I_p I_c + C_p C_c + EC_p EC_c + (SO_4^{-2})_p (SO_4^{-2})_c$$

II.9.3 Notations accordées aux paramètres DRASTIC-EC-SO₄⁻²

II.9.3.1 Notations accordées aux paramètres DRASTIC (d'après Lallemand-Barrès, 1994)

Tableau X. Les notations et le poids accordés au paramètre de « la profondeur D »

D : Distance à la nappe, épaisseur de la Zone non saturée	
Valeurs en mètre	Notation
0 à 2	10
2 à 4	9
4 à 6	8
6 à 8	7
8 à 11	6
11 à 14	5
14 à 18	4
18 à 25	3
25 à 33	2
> à 33	1
Poids : 5	

Tableau XI. Les notations et le poids accordés au paramètre de « la recharge nette R »

R : Recherche (pluie efficace)	
Valeurs en mm	Notation
0 à 5	1
5 à 10	3
10 à 15	6
15 à 25	8
>à 25	9
Poids : 4	

Tableau XII. Les notations et le poids accordés au paramètre du « milieu aquifère A »

A : Milieu aquifère	
Nature du milieu aquifère	Notation
Calcaire karstique	10
Basalte	9
Sable et gravier	8
Calcaire massif	6
Grès massif	6
Shales en séquence	6
Métamorphique altérée, grés	4
Métamorphique	3
Shale massif	2
Poids : 3	

Tableau XIII. Les notations et le poids accordés au paramètre « **Nature du sol S** »

S : Type du sol	
Nature du sol	Notation
Peu épais ou absent	10
Gravier	10
Sable	9
Argile, agrégats	7
Limon sableux	6
Limon	5
Limon siliceux	4
Limon argileux	3
Argile non agrégé et non fissuré	1
Poids : 2	

Tableau XIV. Les notations et le poids accordées au paramètre « **Topographie T** »

T : Topographie	
Pente en %	Notation
0 à 2	10
2 à 6	9
6 à 8	8
8 à 10	7
10 à 12	5
12 à 18	3
>à 18	1
Poids : 1	

Tableau XV. Les notations et le poids accordés au paramètre « **Impact de la zone non saturée I** »

I : Impact de la zone non saturée	
Nature de la zone non saturée	Notation
Calcaire karstique	10
Basalte	9
Sable et gravier	8
Sable et gravier avec silt et argile	6
Calcaire lité, grés, shale	6
Grés	6
Calcaire	6
Shale	3
Silt/Argile	1
Poids : 5	

Tableau XVI. Les notations et le poids accordés au paramètre « **Conductivité hydraulique C** »

C : Conductivité hydraulique	
Intervalle (m/s)	Notation
>9,4 10 ⁻⁴	10
4,7.10 ⁻⁴ à 9,4 10 ⁻⁴	8
32,9.10 ⁻⁵ à 4,7.10 ⁻⁴	6
14,7.10 ⁻⁵ à 32,9.10 ⁻⁵	4
4,7.10 ⁻⁵ à 14,7.10 ⁻⁵	2
4,7.10 ⁻⁷ à 4,7.10 ⁻⁵	1
Poids : 3	

II.9.3.2 Notations accordées aux paramètres proposés : conductivité électriques et sulfates (EC-SO₄⁻²)

Tableau XVII. Les notations et le poids accordés au paramètre « **Conductivité électrique EC** » (Proposé).

EC : Conductivité électrique	
Intervalle (µs/cm)	Notation
>1500	10
1000-1500	9
500-700	8
<500	7
Poids : 5	

Tableau XVIII. (proposé) : Notations et poids accordées au paramètre «**Sulfates (SO₄⁻²)**».

(SO₄⁻²): Conductivité électrique	
Intervalle (mg/l)	Notation
>1000	7
500-1000	6
250-500	5
<250	4
Poids : 4	

II.9.4 Les degrés de vulnérabilité et leurs couleurs appropriés

La couleur est un mode de visualisation du potentiel de vulnérabilité. Les couleurs : Rouge, Orange, indiquant les sites à fort potentiel de vulnérabilité nécessitant une protection, les couleurs bleu, vert , et jaune indiquant les zones à moyen risque de pollution (Aller et al, 1987).

Tableau XIX. Couleurs et les degrés pour les intervalles de l'indice DRASTIC.

Intervalle de l'indice DRASTIC	Couleur et degrés
23-83	Très faible
84-113	Faible
114-144	Moyen
145-174	Elevé
175-226	Très élevé

Tableau XX. Couleurs et degrés de vulnérabilité de l'indice EC + l'indice SO₄⁻² (Proposé).

Intervalle : EC + l'indice SO ₄ ⁻²	Couleur degrés
51	Très faible
56	Faible
64	Moyen
69	Elevé
78	Très élevé

Tableau XXI. Couleurs et les degrés de vulnérabilité pour les intervalles de l'indice DRASTIC-EC-SO₄⁻² (proposé).

Intervalle de l'indice DRASTIC-EC-SO ₄ ⁻²	Couleur
74-139	Très faible
140-177	Faible
178-208	Moyen
209-243	Elevé
244-304	Très élevé

II.9.5 Organigramme de la méthode utilisée

Toute la méthodologie utilisée dans le cadre de cette étude est résumée dans l'organigramme (Fig. 24) suivant :

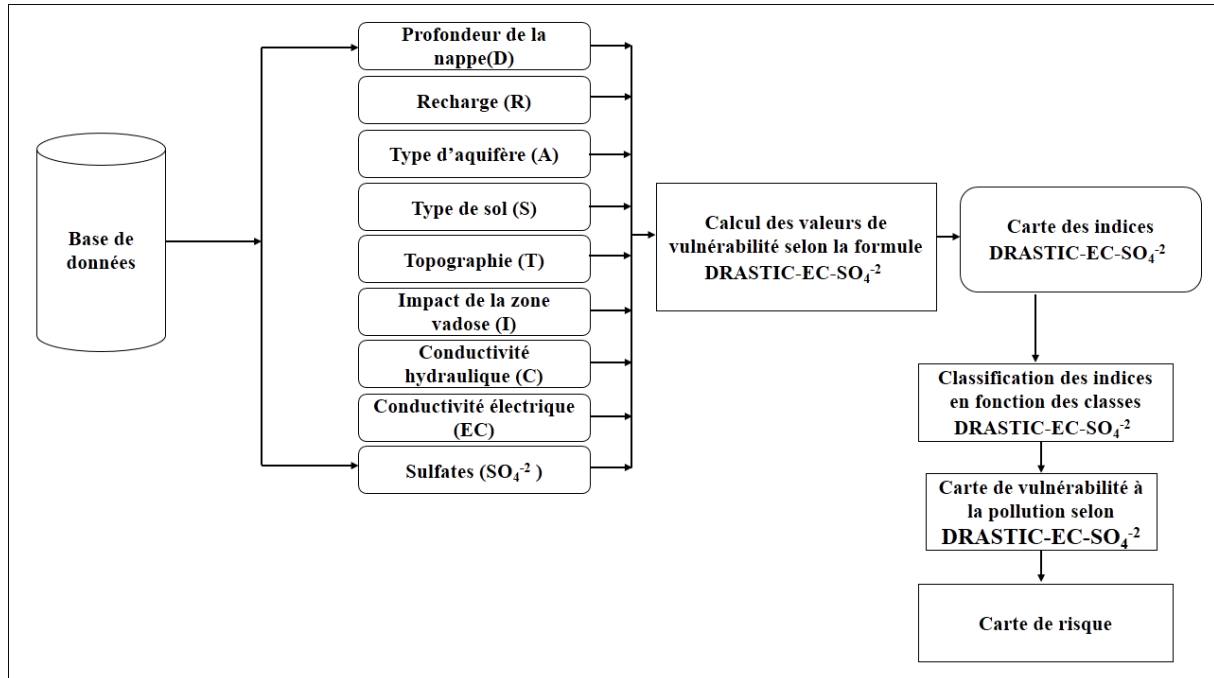


Figure 24. Organigramme présentant les étapes de réalisation de la carte de vulnérabilité à partir de la méthode DRASTIC-EC-SO₄²⁻.

Résultats et Discussions

III.1 Coordonnées géographiques des points de prélèvements

Les coordonnées géographiques des points de prélèvements (Tab. XXII) sont représentées dans la carte du bassin versant de Boulimat (Fig. 25).

Tableau XXII. Coordonnées géographiques des points de prélèvements de l'eau à Boulimat (Avril, 2018).

Nom de la source	Points de prélèvements	X (°)	X (Km)	Y (°)	Y (Km)	Z (m)
Puits Boulimat1 (piste 1)	P1	E4°59'09.1''	704	N36°48'46.3''	392.6	+2
Puits Boulimat2 (piste 2)	P2	E4°58'48.2''	703.8	N36°48'45.4''	392.6	+2
Puits Boulimat3 (piste 2)	P3	E4°58'49.0''	703.7	N36°48'45.3''	392.4	+2
Puits Boulimat4 (piste 3)	P4	E4°58'45.1''	703.7	N36°48'45.5''	392.1	+2
Puits Boulimat5 (piste 3)	P5	E4°58'42.9''	703.5	N36°48'41.6''	391.75	+2
Oued Djerba	O1	E4°58'41.3''	703.6	N36°48'50.4''	392.7	+1
"	O2	E4°58'43.2''	703.5	N36°48'48.3''	392.4	+2
"	O3	E4°58'43.8''	703.3	N36°48'46.7''	392.2	+3
"	O4	E4°58'38.2''	703.25	N36°48'39.8''	392	+4
Oued Saket	O5	E4°56'22.5''	700.1	N36°49'39.5''	394.4	+3

X : Longitude en degrés-minutes-secondes et en Kilomètres.

Y : Latitude en degrés-minutes-secondes et en Kilomètres.

Z : Altitude en mètres.

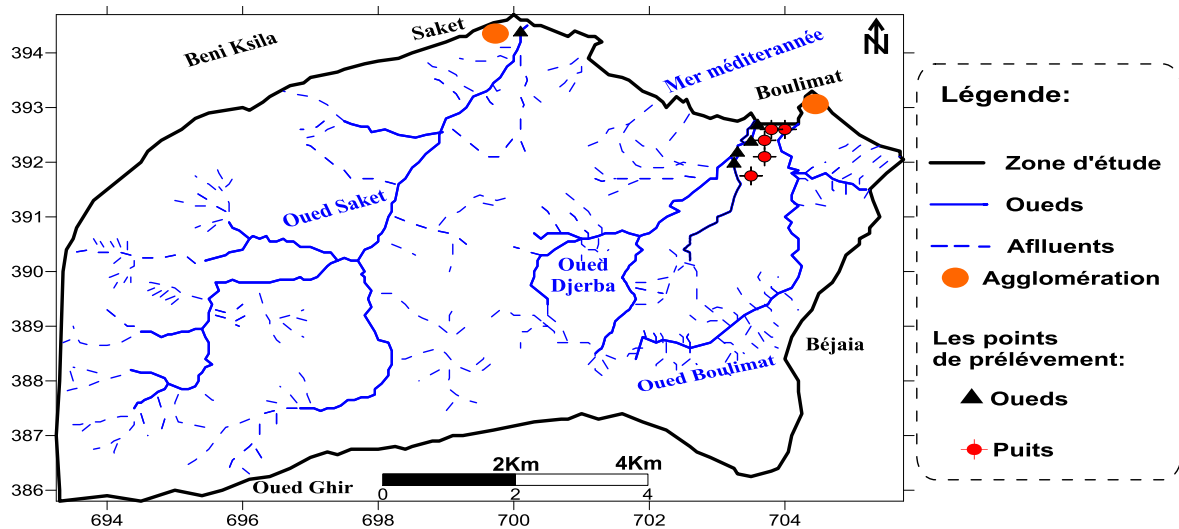


Figure 25. Carte d’inventaire des points de prélèvements au bassin versant de Boulimat.

III.2 Résultats des analyses physico-chimiques et hydro-chimiques

III.2.1 Résultats des analyses physico-chimiques et hydro-chimiques des eaux de surface

❖ Résultats d’analyses physico-chimiques

Les résultats des analyses physico-chimiques des eaux de surface sont représentés dans le tableau XXIII.

Tableau XXIII. Résultats des analyses physico-chimiques des eaux de surface de la zone d’étude (Avril, 2018).

	T	pH	CE	TDS	Sal	DO
Unités	°C	/	µS/cm	mg/l	Psu	Mg/l
Normes Selon (JORA, 2014)	25	6.5-9	2800	1200	/	8
O1	22.93	8	1272	640	0.63	6.42
O2	20.37	7.44	1026	513	0.51	5.89
O3	18.71	7.54	1040.6	520	0.51	6.49
O4	16.94	7.88	1004.3	502	0.5	6.57
O5	19.82	8.16	763.6	382	0.37	5

❖ Résultats des analyses hydro-chimiques

Les résultats des analyses hydro-chimiques des eaux de surface sont représentés dans le tableau XXIV.

Tableau XXIV. Résultats des analyses hydro-chimiques des eaux de surface (Avril, 2018).

/	Anions				ETM		
	Cl ⁻	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻²	Pb	Zn	Cd
Unités	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	µg/l	µg /l	µg/l
Normes selon (JORA, 2014)	500	0.2	50	400	10	5000	3
O1	122	0	0.124	161	22.3782	13.4686	1.7792
O2	118	0	0.114	149	41.9	6.66	3.6832
O3	125	0	0.116	155	0.0431	0.1619	0.9516
O4	136	0	0.128	167	1.0019	6.69	0.8865
O5	142	0	0.035	214	0.0254	0.27	0.898

III.2.2 Résultats des analyses physico-chimiques et hydro-chimiques des eaux souterraines

❖ Résultats d'analyses physico-chimiques

Les résultats des analyses physico-chimiques des eaux souterraines sont représentés dans le tableau XXV.

Tableau XXV. Résultats des analyses physico-chimiques des eaux souterraines (Avril, 2018).

	T	pH	CE	TDS	Sal	DO
Unités	°C	/	µS/cm	mg/l	Psu	mg/l
Normes selon (JORA, 2014)	25	6.5 – 9	2800	1200	/	8
P1	18.16	7.32	2391.33	1196	1.24	6.13
P2	17.81	7.35	1627.66	814	0.82	7.63
P3	17.95	7.36	1832.33	916	0.93	7.36
P4	17.38	7.06	2471.33	1235	1.28	8.35
P5	16.98	7.2	3144.5	1343	1.4	7.82

❖ Résultats d'analyses hydro-chimiques des eaux souterraines

Les résultats des analyses hydro-chimiques des eaux souterraines sont représentés dans le tableau XXVI.

Tableau XXVI. Résultats des analyses hydro-chimiques des eaux souterraines (Avril, 2018).

Anions	Cl ⁻	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻²	Pb	Zn	Cd
Unités	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	µg/l	µg/l	µg/l
Normes selon (JORA, 2014)	500	0.2	50	400	10	5000	3
P1	390.5	0	0.155	164	0.3627	0.7686	1.4918
P2	357.5	0	0.876	201	1.0019	10.2068	1.2351
P3	342	0	0.893	204	1.499	1.6966	0.967
P4	319.5	0	0.987	212	0.2029	0.5444	1.0627
P5	710	0	0.044	139	52.9868	0.99	1.0742

III.3 Discussions des analyses physico-chimiques et hydro-chimiques

III.3.1 Les paramètres physico-chimiques

III.3.1.1 Température

C'est important de connaître la température de l'eau avec une bonne précision. En effet celle-ci joue un rôle important dans la solubilité des gaz, dans la dissociation des sels et dans la détermination du pH, pour la compréhension de l'origine de l'eau et les mélanges éventuels. En outre, cette mesure est très utile pour les études limnologiques (Rodier et al. 2005).

Dans cette étude, les températures des eaux souterraines observées varient de 16.98 °C à 18.16 °C ; avec une température moyenne de 17.65 °C (Fig. 26). Par contre les températures des eaux de surface varient de 16.94 °C à 22.93 °C, avec une température moyenne de 19.75 °C.

On remarque que la température moyenne des eaux de surface, sont un peu plus élevées à celles des eaux souterraines ; ceci est due à leurs contacte directe avec l'atmosphère.

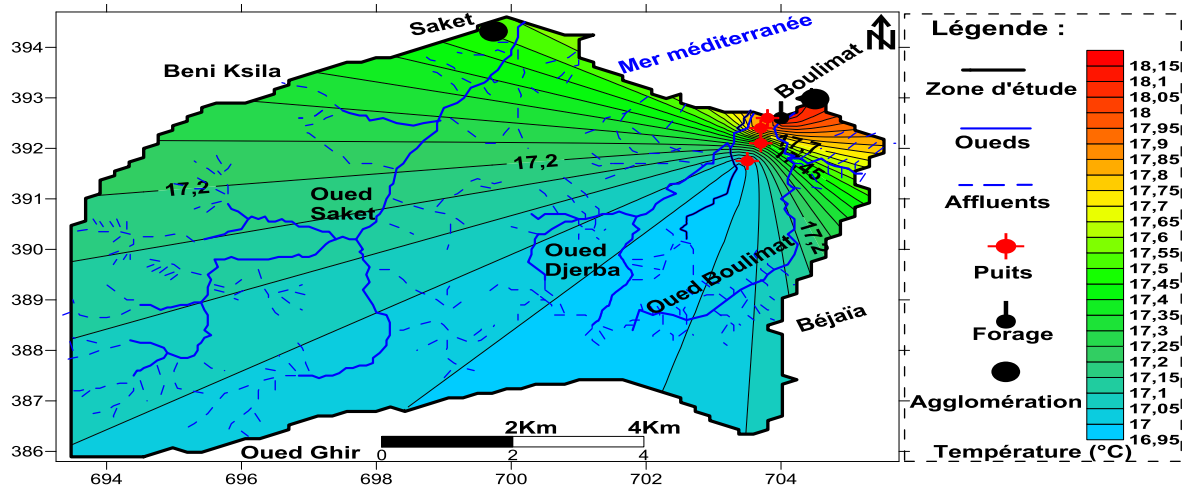


Figure 26. La répartition spatiale de la température des eaux souterraines dans la région d'étude (Avril, 2018).

III.3.1.2 Le potentiel d'hydrogène

L'acidité de l'eau ne pose en soi aucun problème vis-à-vis de la santé du consommateur. Toutefois, l'eau acide distribuée par un réseau de canalisations peut constituer indirectement une menace pour la santé du consommateur mal informé ou imprudent. L'eau acide est en effet agressive (corrosive) et peut libérer les métaux constitutifs des canalisations, à savoir le fer, le cuivre, le plomb, le nickel, le chrome et le zinc (Hanon et Rouelle, 2011).

Les mesures du pH sur les échantillons, ont été effectuées sur terrain. Les valeurs obtenues varient de 7.06 (P4) à 7.36 (P3) pour les eaux souterraines (Fig. 27), et de 7.44 (O2) à 8.16 (O5) pour les eaux superficielles. Toutes les valeurs mesurées sont conformes aux normes algériennes de la potabilité qui sont fixées entre 6.5 à 9.

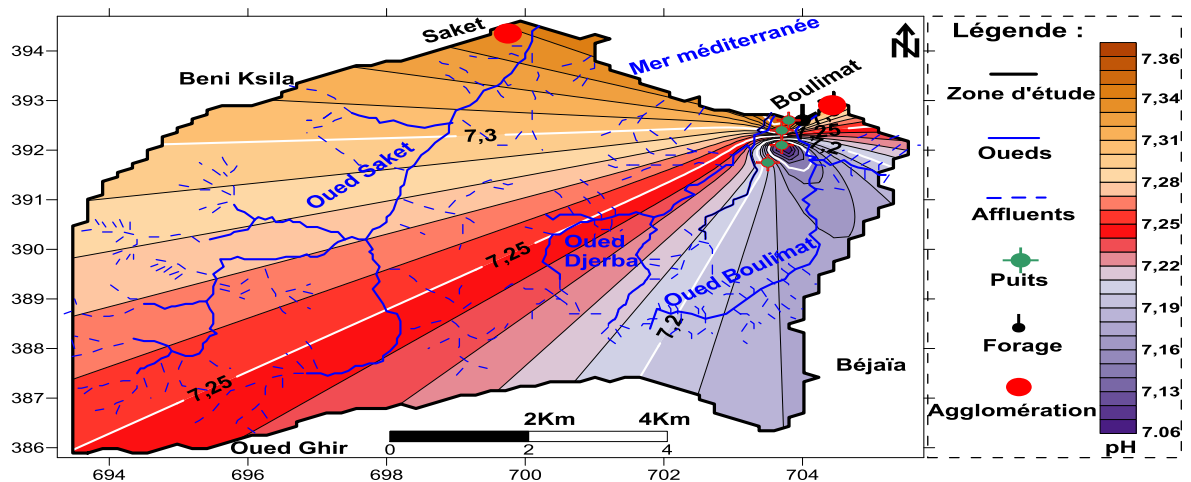


Figure 27. La répartition spatiale de pH des eaux souterraines dans la région d'étude (Avril, 2018).

III.3.1.3 Oxygène dissous

Les teneurs d'oxygène dissous les plus élevées sont observées au niveau des eaux souterraines comprises entre 6.13 mg/l (P1) à 8.35 mg/l (P4) avec une moyenne de 7.45 mg/l (Fig. 28). Les valeurs basses sont présentées au niveau des eaux superficielles varient entre 5 mg/l (O5) à 6.57 (O4) avec une moyenne de 6.07 mg/l.

Les valeurs moyennes des eaux superficielles et souterraines, sont conformes aux normes algériennes de la potabilité qui sont fixées à 8 mg/l.

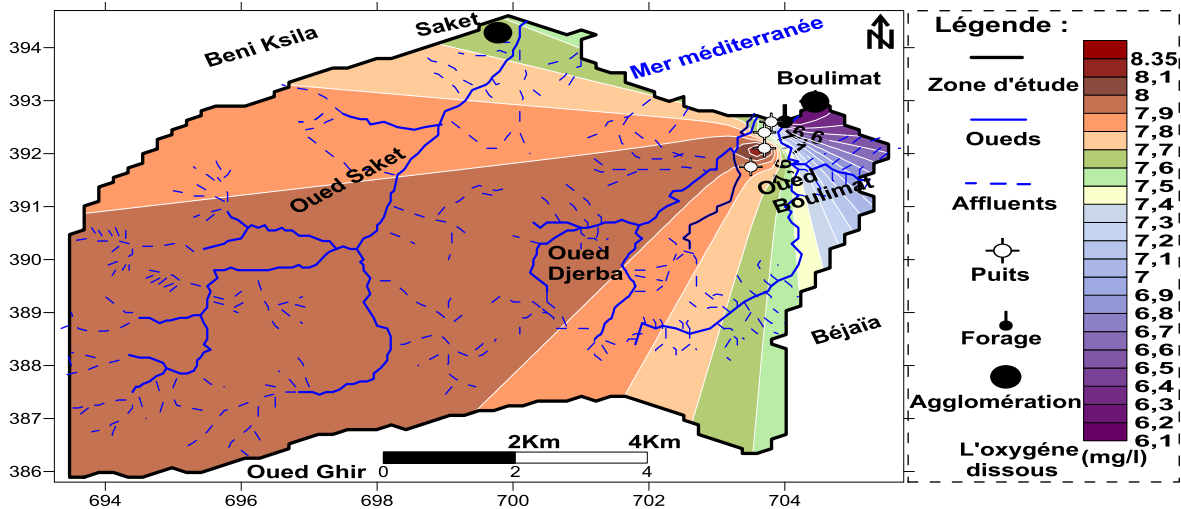


Figure 28. La répartition spatiale de l'oxygène dissous des eaux souterraines dans la région d'étude (Avril, 2018).

III.3.1.4 Conductivité électrique

Selon Rodier (2009), La conductivité permet d'apprécier le degré de minéralisation de l'eau dans la mesure où la plupart des matières dissoutes dans l'eau se trouvent sous forme d'ions chargés électriquement. La classification des eaux en fonction de la conductivité se présente de la manière suivante : Conductivité égale à 0.05µS/cm : eau déminéralisée ; Conductivité de 10 à 80 µS/cm : eau de pluie ; Conductivité de 80 à 100 µS/cm : eau peu minéralisée ; Conductivité de 300 à 500 µS/cm : eau moyennement minéralisée ; Conductivité de 1000 à 3000 µS/cm : eau saline ; Conductivité supérieure à 3000 µS/cm : eau de mer.

Les valeurs de la conductivité électrique des eaux superficielles varient entre 763.6 µS/cm (O5, Oued Saket) à 1272 µS/cm (O1, Oued Djerba) ; avec une moyenne de 1021.3 µS/cm. Pour les eaux souterraines nous avons enregistré des valeurs qui varient de 1627.66 µS/cm (P2) à 3144.5 (P5) ; avec une moyenne de 2293.43 µS/cm (Fig. 29).

À partir des deux moyennes nous avons remarqué une grande différence entre la conductivité des eaux souterraines et les eaux de surface, et pour cela nous pouvons dire que les eaux souterraines ont plus la capacité à conduire le courant électrique (minéralisation plus élevée).

La conductivité électrique obtenue par la mesure de (P5), n'est pas conforme aux normes algériennes de la potabilité qui sont fixées à 2800 $\mu\text{S}/\text{cm}$, ceci est probablement lié à l'intrusion marine, contrairement aux autres valeurs qui sont conformes.

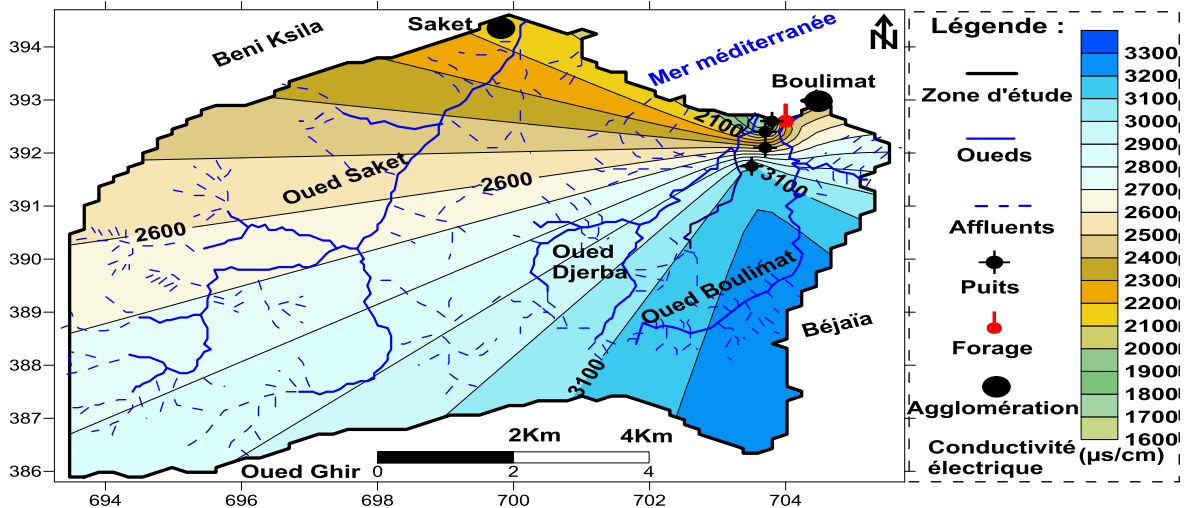


Figure 29. La répartition spatiale de la conductivité électrique des eaux souterraines dans la région d'étude (Avril, 2018).

III.3.1.5 Total des solides dissous (TDS)

Les concentrations des solides dissous des eaux souterraines varient de 814.4 mg/l (P2) à 1343 mg/l (p5), avec une moyenne de 1100.8 mg/l (Fig. 30). Pour les eaux superficielles nous avons enregistré des valeurs qui varient de 382 mg/l (O5) à 640 (O1), avec une moyenne de 511.4 mg/l.

À partir des deux moyennes nous avons remarqué une grande différence qui provient de la dissolution des roches carbonatées (origine naturelle), ou des eaux usées (origine anthropique). Les valeurs TDS des puits (P4) et (P5) sont non conformes aux normes algériennes des eaux potables.

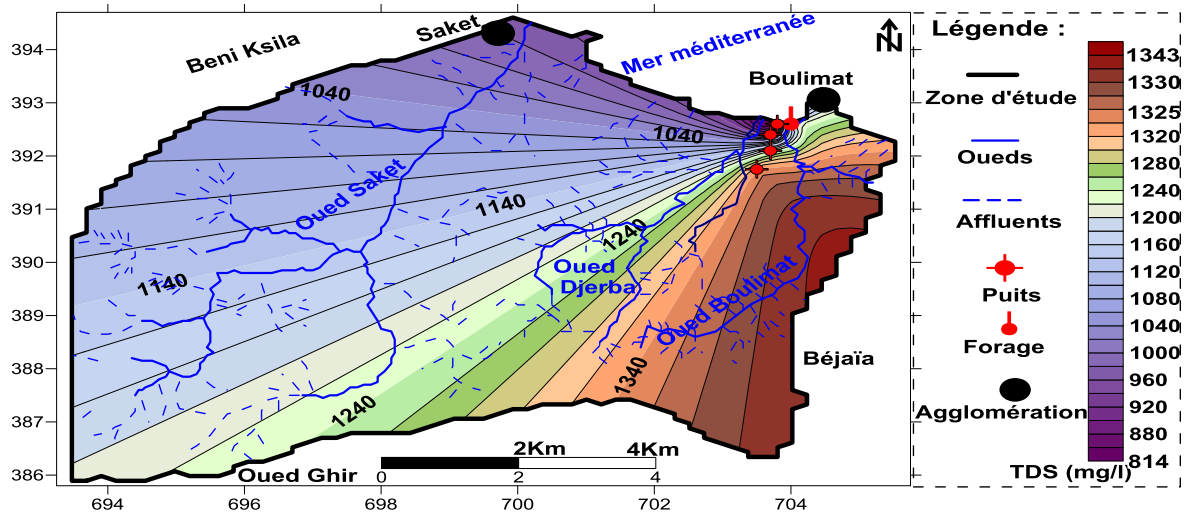


Figure 30. La répartition spatiale de la TDS des eaux souterraines dans la région d'étude (Avril, 2018).

III.3.1.6 Salinité

La salinité des eaux souterraines varient de 0.82 Psu (P2) à 1.4 Psu (P5), avec une moyenne de 1.13 (Fig. 31). Pour les eaux superficielles nous avons enregistré des valeurs qui varient entre 0.37 Psu (O5) à 0.63 Psu (O1).

On remarque que la salinité des eaux souterraines est élevée à celle des eaux superficielles, ceci est dû probablement à la nature géologique du terrain, l'intrusion marine.

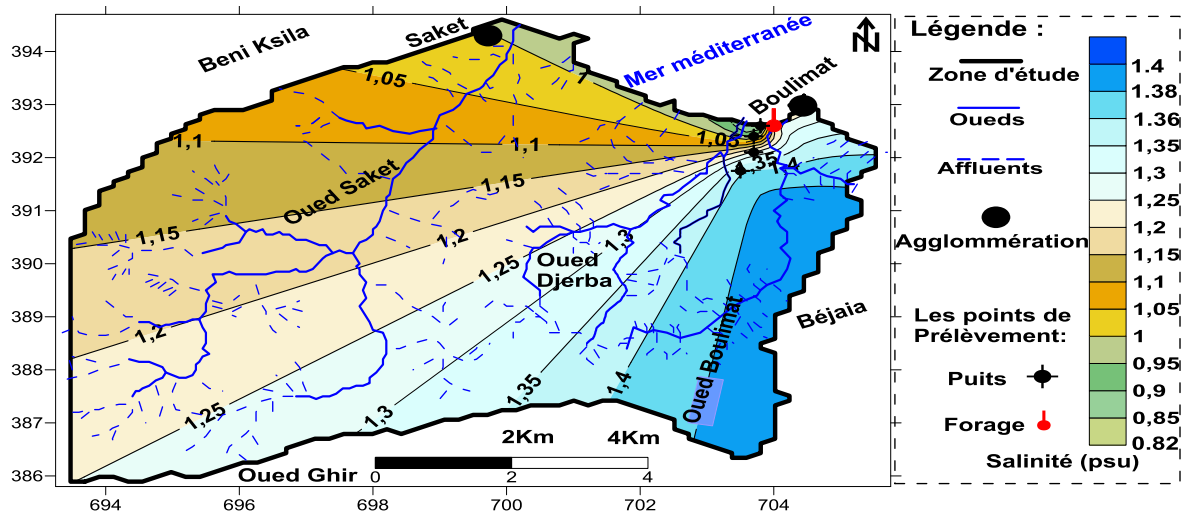


Figure 31. La répartition spatiale de la salinité des eaux souterraines dans la région d'étude (Avril, 2018).

III.3.2 Discussions des analyses hydro-chimiques

III.3.2.1 Les nitrates

Les nitrates (NO_3^-) sont des ions naturels présents partout dans l'environnement. Ils sont le produit de l'oxydation de l'azote par les microorganismes dans les plantes, le sol ou l'eau, et dans une moindre mesure, par les décharges électriques comme la foudre (Beatson, 1978). Les sources de nitrates dans l'eau (en particulier les eaux souterraines) comprennent les matières animales et végétales en décomposition, les engrais agricoles, le fumier, les eaux usées domestiques et les formations géologiques contenant des composés azotés solubles (Adam, 1980 ; Egboka, 1984).

D'après la réglementation algérienne (JORA, 2014), il est recommandé pour le cas des nitrates, une valeur maximale de 50mg/l dans une eau destinée à la consommation. Les valeurs de notre étude varient entre 0.044 mg/l (P5) et 0.987 mg/l (P4) ; avec une moyenne de 0.591 mg/l pour les eaux souterraine, et de 0.035 mg/l à 0.128 mg/l (O4) ; avec une moyenne de 0.1 mg/l pour les eaux de surface (Fig. 32). Les résultats de notre étude ont révélé que toutes les teneurs en nitrates dans les échantillons d'eau analysés sont conformes aux normes algériennes de potabilité qui sont fixées à 50 mg/l.

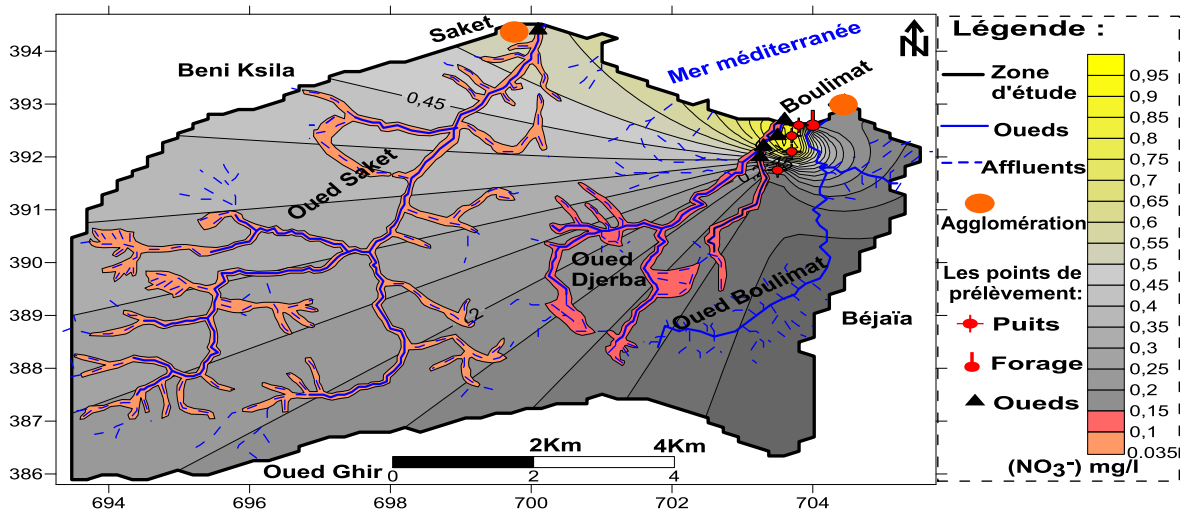


Figure 32. La répartition spatiale des nitrates des eaux souterraines dans la région d'étude (Avril, 2018).

III.3.2.2 Les sulfates

Les sulfates qui se dissolvent dans l'eau proviennent de certains minéraux en particulier du gypse ou apparaissent à partir de l'oxydation de minéraux sulfureux (Beriere, 2000).

Les résultats de notre étude ont révélés que les teneurs en sulfates dans les échantillons d'eau analysés varient de 139 mg/l (P5) à 212 mg/l (P4), avec une moyenne de 184 mg/l ; pour les eaux souterraines, et de 149 mg/l (O2) à 167 mg/l (O4) ; avec une moyenne de 169.2 mg/l pour les eaux superficielles (Fig. 33).

Ces valeurs des sulfates sont considérées normales étant donné que les normes algériennes de l'eau potable pour cet élément sont fixées à 400 mg/l.

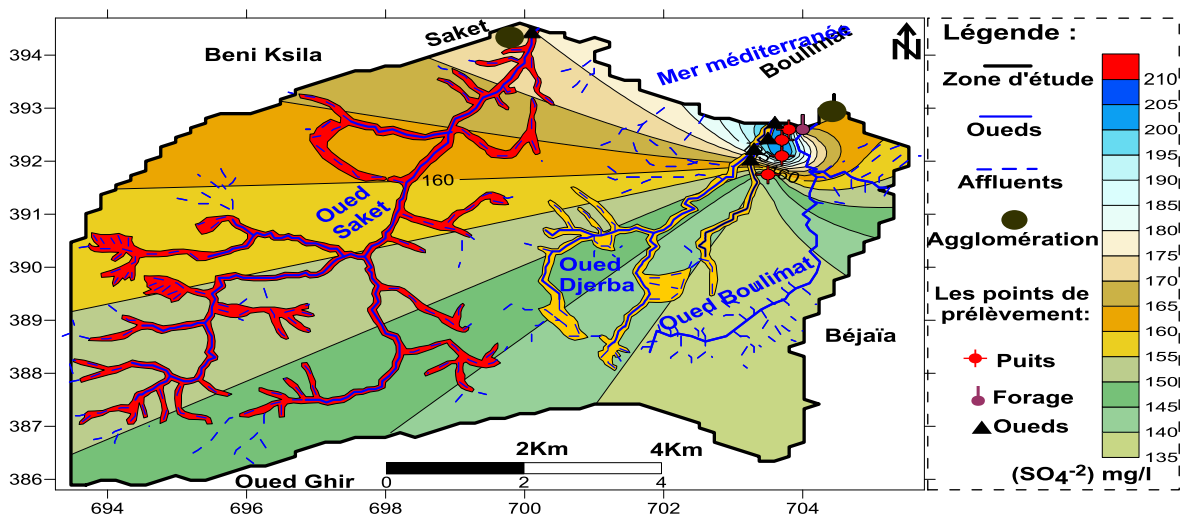


Figure 33. La répartition spatiale des sulfates des eaux souterraines dans la région d'étude (Avril, 2018).

III.3.2.3 Les chlorures

Les chlorures présents dans l'eau potable proviennent des eaux usées et des effluents industriels (OMS 2003).

Selon les normes algériennes de la potabilité des eaux, les chlorures doivent avoir une teneur inférieure à 500 mg/l dans les eaux de consommation (JORA, 2014).

L'analyse des eaux souterraines et de surface a révélée des quantités de chlorures qui varient de 342 mg/l (P3) à 710 mg/l (P5) ; avec une moyenne de 423.9 mg/l pour les eaux souterraines, et de 118 mg/l (O2) à 142 mg/l (O5) ; avec une moyenne de 128.6 mg/l pour les eaux de surface (Fig. 34).

On remarque un excès en chlorures au (P5). Ceci est probablement relié à la géologie de la région et/ou à la présence d'une fosse septique à côté de puits 5.

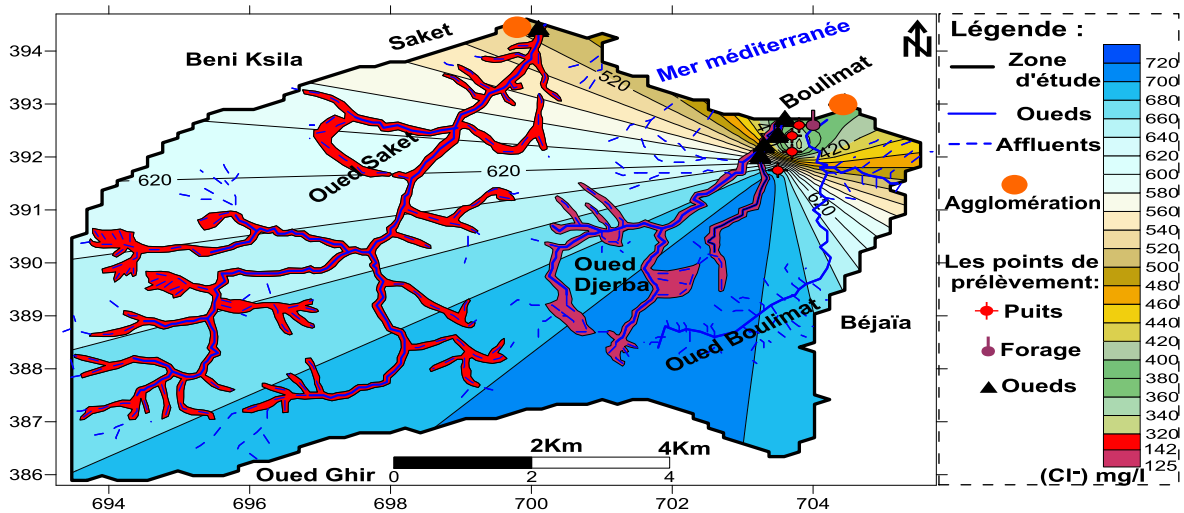


Figure 34. Carte de la répartition spatiale de la teneur en chlorures pour les eaux souterraines et superficielles du bassin versant de Boulimat (Avril, 2018).

III.3.2.4 Les Nitrites

Les nitrites sont réponsus dans les sols, dans les eaux et dans les plantes, mais en quantité relativement faibles. Les nitrites non liées à une pollution, se retrouvent parfois dans les eaux pauvres en oxygène. Leur présence a également été signalée dans les eaux de pluie et dans celles provenant de la fonte des neiges. En effet la pollution atmosphérique favorise l'augmentation de la teneur en nitrites. Toutefois, une eau qui renferme des nitrites est à considérer comme suspecte car cette présence est souvent liée à une détérioration de qualité microbiologique (Savary, 2003).

Les résultats d'analyses sur les eaux souterraines et superficielles de la zone d'étude démontrent une absence totale de la teneur en nitrite.

III.3.3 Discussion des éléments traces métalliques

III.3.3.1 Le cadmium

Les concentrations du cadmium dans les échantillons qui ont été prélevées et analysées varient entre 0.96 µg/l (P3) et 1.49 µg/l (P1) pour les eaux souterraines, et de 0.88 µg/l (O4) à 3.68 µg/l (O2) pour les eaux de surface (Fig. 35). On remarque que les

teneurs en Cadmium pour les eaux souterraines, sont conformes à la norme algérienne qui est fixée de 3 µg/l, par contre la valeur obtenue au point (O2, Oued Djerba) dépasse la norme. La présence de cadmium aux eaux souterraines et superficielles est probablement reliée aux décharges de déchets ménagers et le trafic routier.

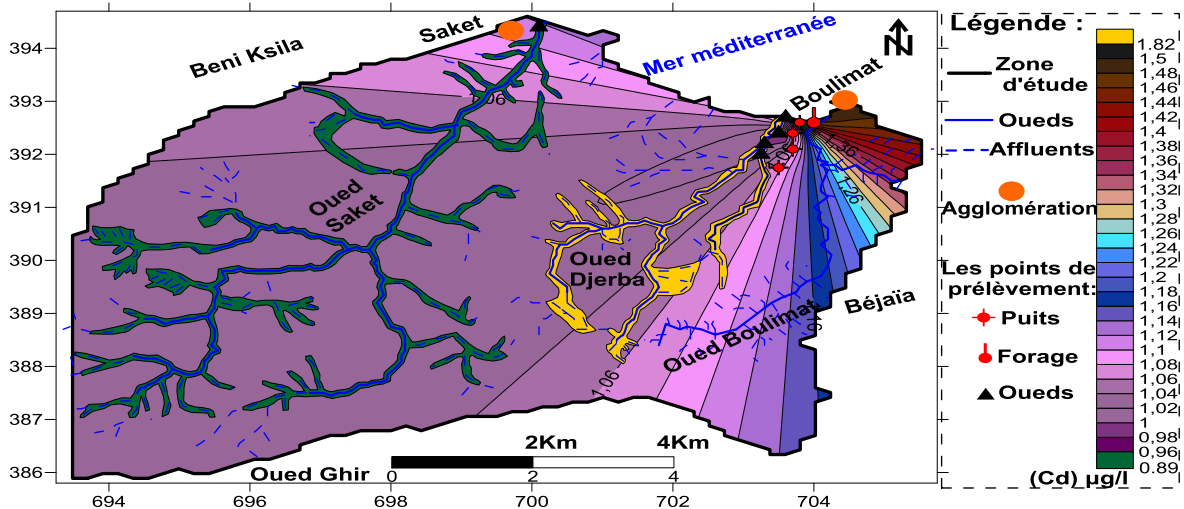


Figure 35. Carte de la répartition spatiale des concentrations du cadmium pour les eaux souterraines et superficielles du bassin versant de Boulimat (Avril, 2018).

➤ **Toxicité**

Le cadmium présente des risques chez le consommateur. Même à de faibles concentrations, il tend à s'accumuler dans le cortex rénal sur de très longues périodes (50 ans) où il entraîne une perte anormale de protéines par les urines (protéinurie) et provoque des dysfonctionnements urinaires chez les personnes âgées. Cet élément n'a aucun rôle métabolique connu et ne semble pas biologiquement essentiel ou bénéfique au métabolisme des êtres vivants (Casas, 2005).

III.3.3.2 Le plomb

L'utilisation du plomb est directement liée à la métallurgie. Avec deux pics notables : sous l'empire romain pour la production de la monnaie, les canalisations et la vaisselle ; et pendant la révolution industrielle pour l'industrie, l'imprimerie, les peintures et les carburants automobiles. Cette dernière utilisation qui consistait à ajouter du plomb à l'essence comme antidétonant est aujourd'hui prohibée (Miquel, 2001).

Les concentrations du plomb des eaux souterraines varient de 0.2 µg/l (P2) à 52.98 µg/l (p5) ; avec une moyenne de 11.2 µg/l, et de 0.02 µg/l (O5) à 41.9 (O2) ; avec une moyenne de 13.06 µg/l pour les eaux superficielles (Fig. 36).

On remarque que les concentrations moyennes des eaux souterraines et superficielles dépassent les normes. Ceci est probablement dû au rapprochement à : la Route nationale n° 24 (pollution causées par le trafic routier) et aux décharges non contrôlées.

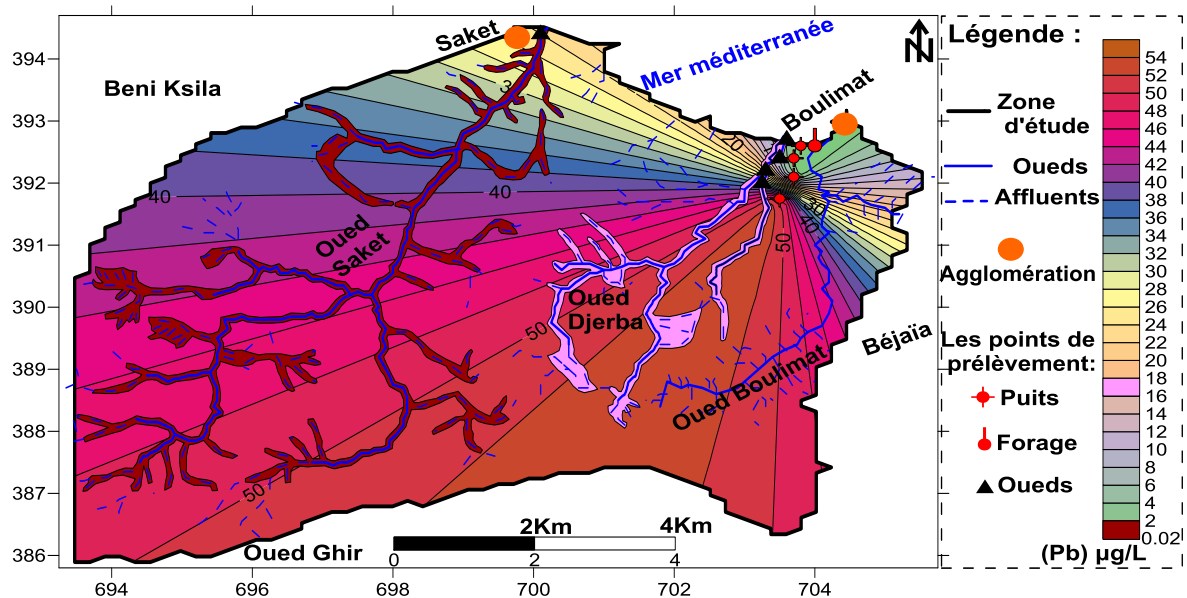


Figure 36. Carte de la répartition spatiale des concentrations du plomb pour les eaux souterraines et superficielles du bassin versant de Boulimat (Avril, 2018).

➤ **Toxicité**

Grâce à sa large utilisation, les humains sont exposés au plomb et ces dérivés quotidiennement par l'ingestion des aliments, de l'eau potable et de l'inhalation (Florea et Busselberg, 2006), le système aminergique dans le cortex cérébral, le cervelet et l'hippocampe ; et peut contribuer à la déficience cognitive et comportementale (Devi et al., 2005) provoque une insuffisance rénale irréversible même au cours de l'intoxication aiguë (Barbier, et al., 2004).

III.3.3.3 Le zinc

Il est utilisé dans la construction immobilière, les équipements pour l'automobile, les chemins de fer et dans la fabrication de produits laminés ou formés. Il constitue un intermédiaire dans la fabrication d'autres composés et sert d'agent réducteur en chimie organique et de réactif en chimie analytique (Casas, 2005).

Les résultats illustrés dans la figure 37, révèlent la présence de faible concentration du Zn au niveau des 10 points échantillonnés. Les teneurs en Zinc varient de 0.54 $\mu\text{g/l}$ (P4) à 10.20 $\mu\text{g/l}$ (P2) ; avec une moyenne de 2.83 $\mu\text{g/l}$ pour les eaux souterraines, et de 0.16 $\mu\text{g/l}$ (O3) à 13.46 $\mu\text{g/l}$ (O1) ; avec une moyenne de 5.44 $\mu\text{g/l}$ pour les eaux superficielles. La teneur du zinc a été détectée dans les 10 points échantillonnés. Ces valeurs peuvent être expliqués par : la formation géologique, le trafic routier et/ou les décharges publiques.

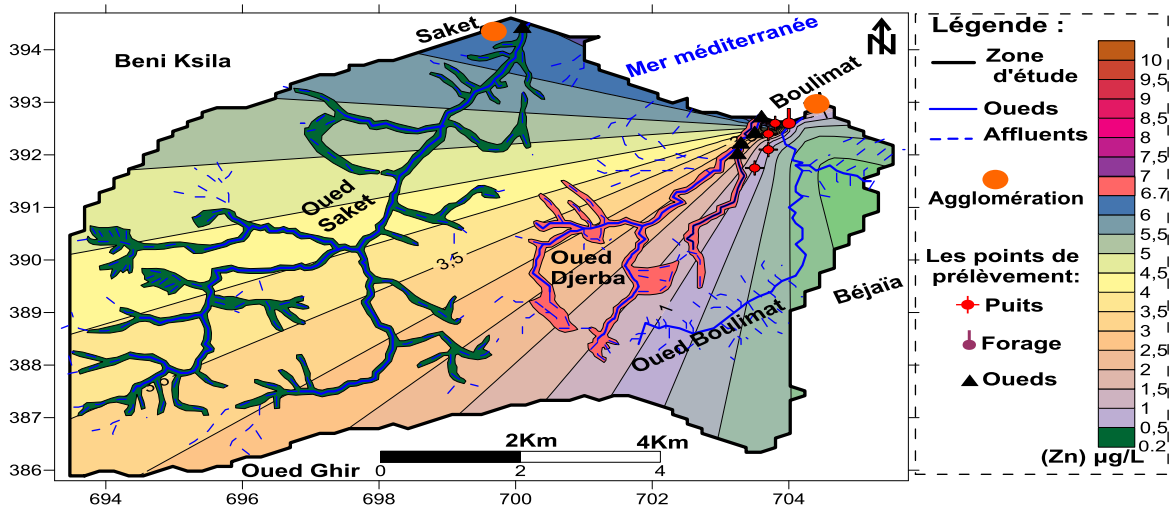


Figure 37. Carte de la répartition spatiale des concentrations du zinc pour les eaux souterraines et superficielles du bassin versant de Boulimat (Avril, 2018).

➤ Toxicité

L'inhalation des fumées d'oxydes de zinc peut conduire à une intoxication aigüe caractérisée par une asthénie accompagnée de fièvre (Ramade, 2000). Chez certaines personnes par des troubles digestifs (Savary, 2003).

III.4. Description des paramètres de la méthode DRASTIC-EC-SO₄²⁻

On a réalisé 9 cartes thématiques et des tableaux sur lesquelles sont délimitées des zones caractérisées par un indice de vulnérabilité partiel du paramètre correspondant. Les sept premiers sont identiques à celle de la méthode DRASTIC en ajoutant la conductivité électrique et les sulfates.

III.4.1 Paramètre profondeur de la nappe « D »

L'évaluation de ce paramètre a été faite à partir des valeurs relevées au niveau des coupes des puits et forage (période hautes eaux). Ces valeurs ont été classées selon le système de cotation DRASTIC (Tab. XXVII, Fig. 38).

Quatre classes sont distinguées sur la carte :

- Les sables dans les profondeurs varient entre 0 - 1,5 m, qui induit un indice de vulnérabilité de l'ordre de 50.
- Les plaines côtières constituées de nappes des alluvions dans les profondeurs varient entre 1,5 à 4,5m, Impliquant ainsi un indice de vulnérabilité partiel égale à 45.
- La nappe des flyschs qui occupent la quasi-totalité de terrain, les profondeurs varient de 4,5 à 9 m ce qui nous donne un indice de vulnérabilité de l'ordre de 35.
- La nappe du calcaire et de grés qui se situes à l'extrême Sud-ouest du sous bassin versant, la profondeur est de 30 m ce qui nous donne un indice de vulnérabilité de l'ordre 5.

Tableau XXVII. Indices de la profondeur.

Profondeur de la nappe « D »				
Zone	Gammes	Cotes	Poids	Indices
Sable	0-1.5	10	5	50
Alluvion	1.5-4.5	9		45
Flysch	4.5-9	7		35
Calcaire massif	30	1		5

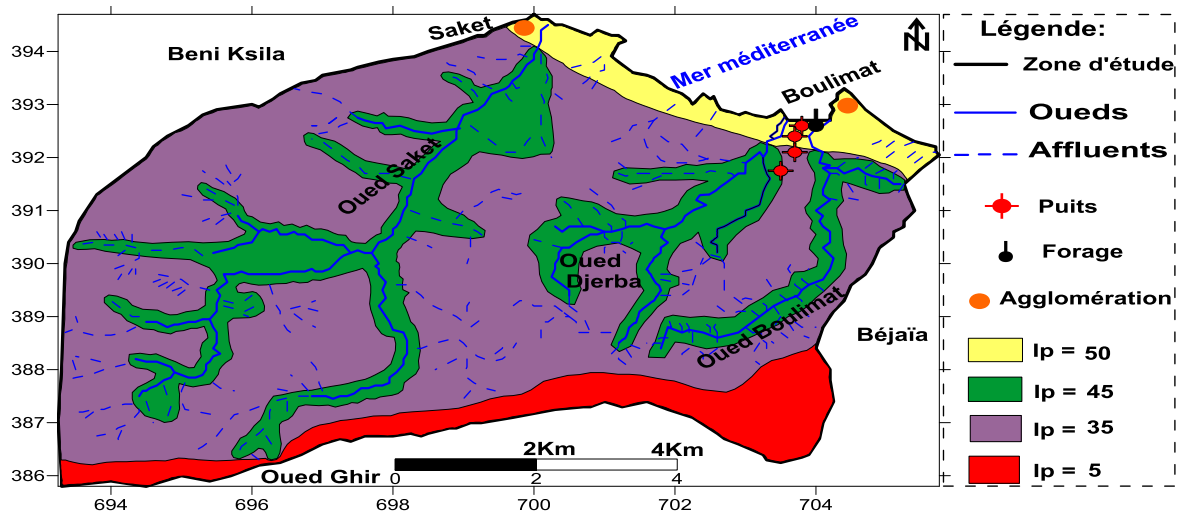


Figure 38. Carte des indices de profondeur.

III.4.2 Paramètre de la recharge nette « R »

La moyenne des précipitations de la région d'étude atteint 811.5mm. La recharge nette des sols sableux et limono-sableux est de 761.25 mm, et pour le sol alluvionnaire est de 736.33 mm. Ces valeurs sont classées dans la gamme de 25,5.

L'indice partiel de recharge selon le model DRASTIC est de 36 (Tab. XXVIII). La carte d'indice « R » est représentée dans la figure 39.

Tableau XXVIII. Indice de la recharge.

Recharge nette « R »				
Zone	Gammes	Cotes	Poids	Indice
Sableux	25.5	9	4	36
Limono-sableux	25.5	9		
Alluvionnaire	25.5	9		

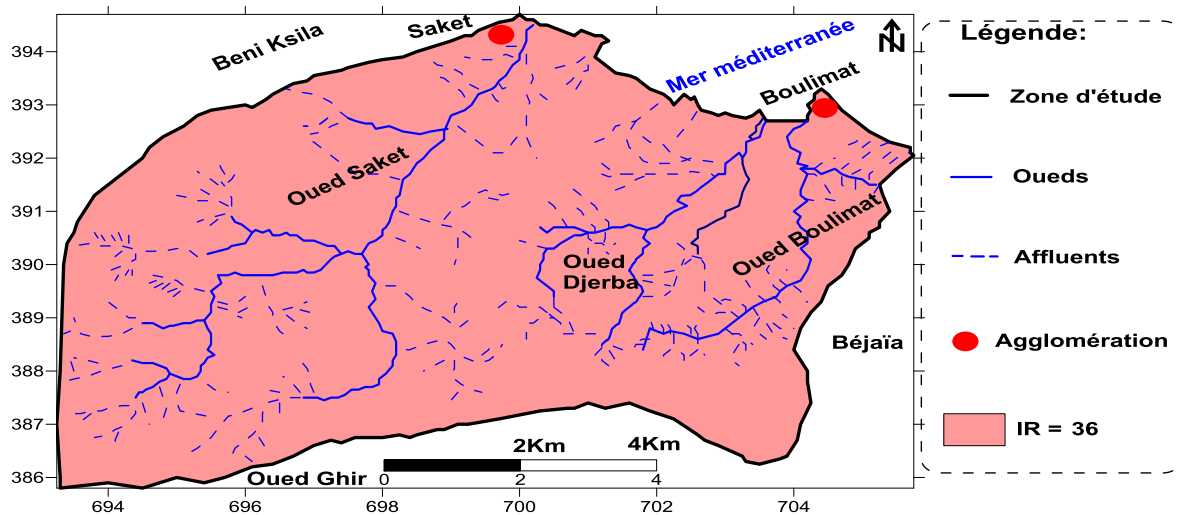


Figure 39. Carte de l'indice de recharge (Station de Bejaia, 1996-2018)

III.4.3 Paramètre de la nature des aquifères « A »

Ce paramètre désigne la lithologie de l'aquifère, son identification a été basée sur les logs des puits creusés pour le captage de la nappe.

Le matériau aquifère de la nappe de la zone d'étude est constitué essentiellement de sables et graviers avec un indice partiel = 24, de grés massifs et calcaire massif avec un indice partiel = 18 (Tab. XXIX). Et la carte d'indice « A » est représentée dans la figure 40.

Tableau XXIX. Indice de la nature des aquifères.

Nature de l'aquifère « A »			
Zone	Cotes	Poids	Indices
sables et graviers	8	3	24
grés massifs	6		18
calcaire massif	6		

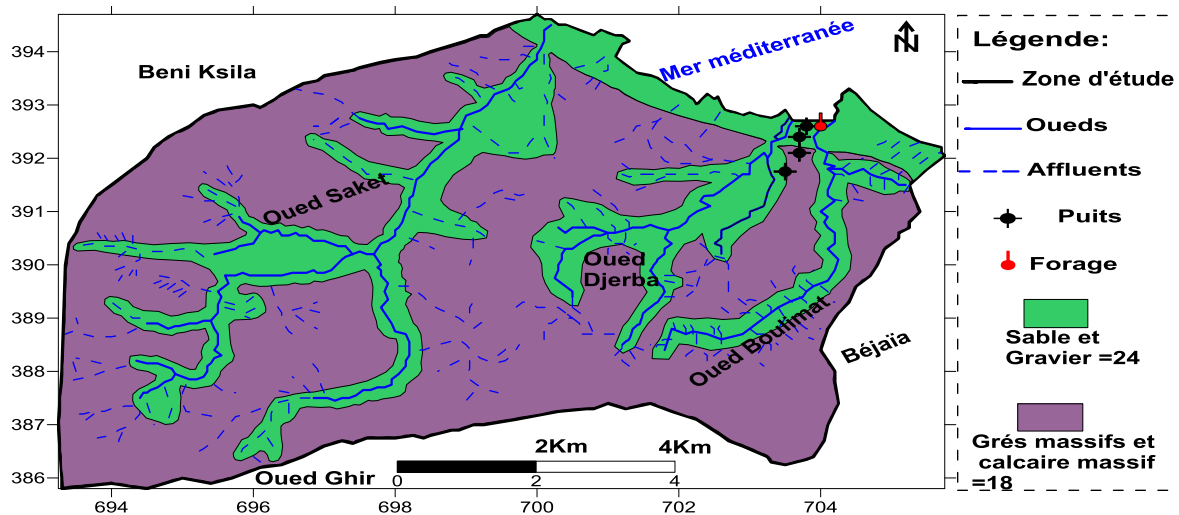


Figure 40. Carte des indices d'aquifères.

III.4.4 Paramètre type de sol « S »

La description du sol constituant le bassin versant de Boulimat a été réalisée à partir d'une carte de sol. Celui-ci est composé, essentiellement, de sables, de graviers et limono-sableux.

Les indices partiels de sol selon le model DRASTIC sont représentés au (Tab. XXVIII). Et la carte l'indice « S » est représentée dans la figure 41.

Tableau XXX. Indices de types de sols.

Type de sol « S »			
Zone	Cotes	Poids	Indices
Gravier	10	2	20
Sables	9		18
Limon sableux	6		12

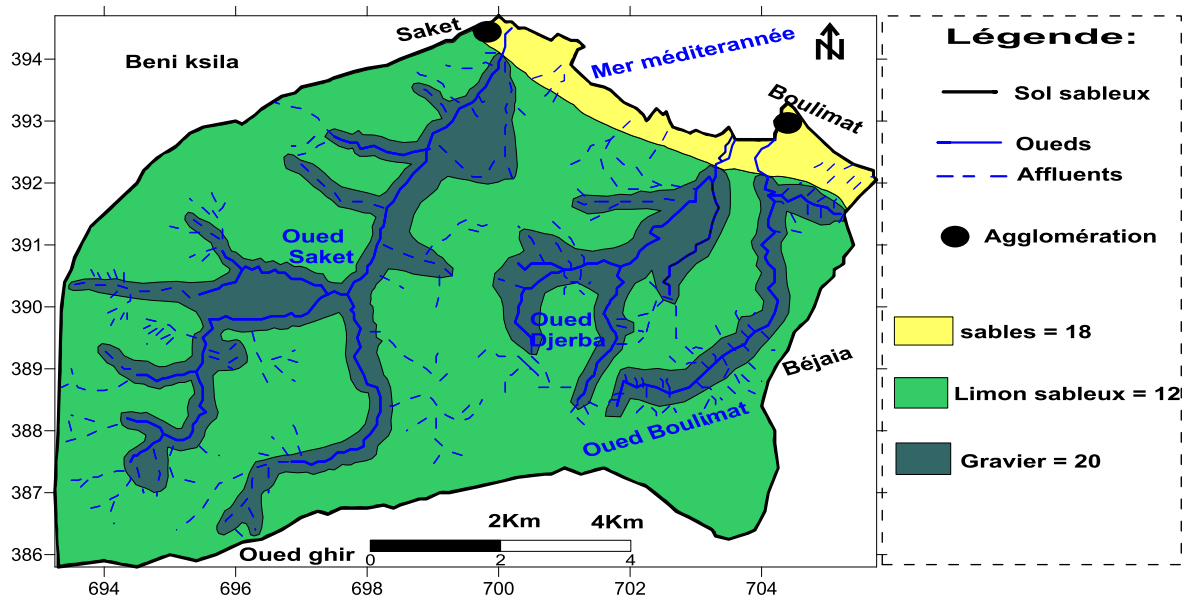


Figure 41. Carte des indices du sol.

III.4.5 Paramètre topographique « T »

Selon le paramètre de la topographie, le bassin versant de Boulimat est divisé en Trois zones :

- La première couvre le littoral, les altitudes varient de 2 m à 20 m sur une distance de 350 m ; la pente est inférieure à 5.14 %. L'Indice partiel de topographie = 9.
- La deuxième couvre la plus grande partie du bassin dont la dénivellation est de 360 m sur une distance de 5500 m, la pente est de 6.54 %. L'indice partiel de topographie = 5.
- La troisième couvre la partie extrême sud du bassin dont la dénivellation est de 100 m sur une distance de 440 m, la pente est de 22.7 %. L'indice partiel de topographie = 1.

Les indices partiels de topographie selon le model DRASTIC sont représentés dans le tableau XXXI). Et la carte des indices « T » est représentée dans la figure 42.

Tableau XXXI. Indices de topographie.

Topographie « T »				
Zone	Gammes	Cotes	Poids	Indices
Littoral	2-6	9	1	9
Centrale	6-12	5		5
Extrême sud	18	1		1

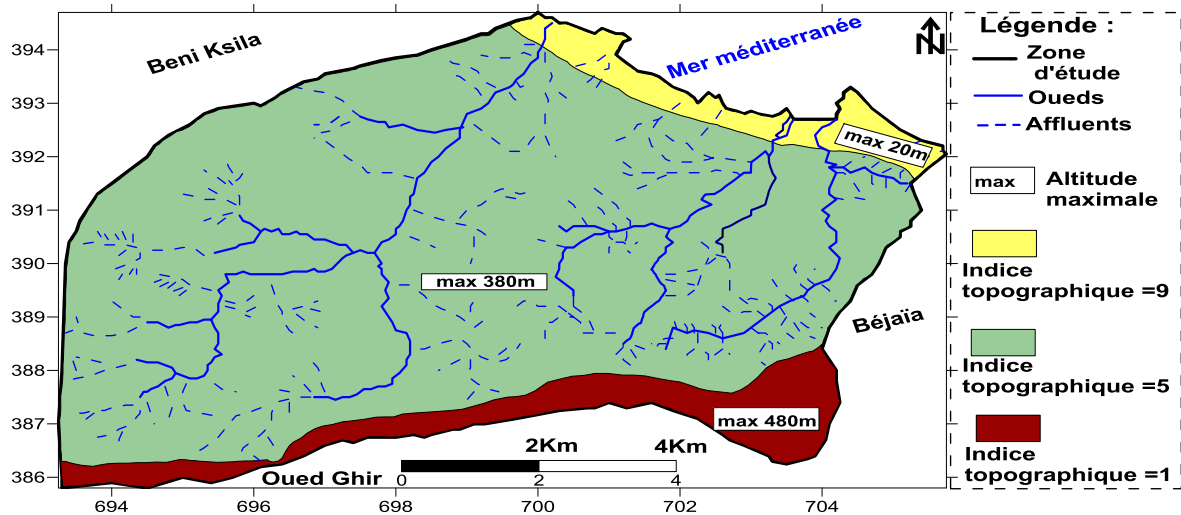


Figure 42. Carte des indices topographiques.

III.4.6 Paramètre de la zone non saturée « I »

La nature de la zone non saturée constitue un paramètre important dans l'estimation de la vulnérabilité, car elle influe sur la vitesse de propagation des polluants.

On rencontre trois types de couches vadoses de la nappe de Boulimat :

- 1^{er} : La couche de sables et gravier
- 2^{ème} : La couche de grés
- 3^{ème} : La couche de calcaire

Les indices partiels de la zone non saturée selon le model DRASTIC sont représentés dans le tableau XXXII). Et la carte des indices «I» est représentée dans la figure 43.

Tableau XXXII. Indices d'impact de la zone vadoze.

Paramètre de la zone non saturée (Impact de la zone vadosé)			
Zone	Cotes	Poids	Indices
sables et gravier	9	5	45
grés	6		30
calcaire	6		

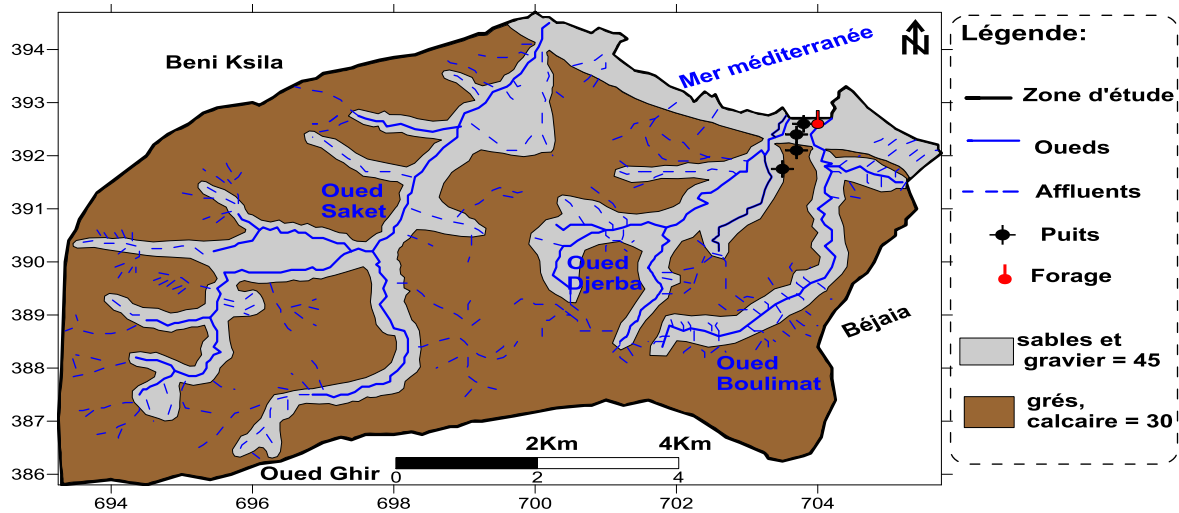


Figure 43. Carte des indices de la zone non saturée.

III.4.7 Paramètre de conductivité hydraulique «C»

La perméabilité de la couche aquifère nous renseigne sur la vitesse de propagation des polluants dans la nappe. Plus ce paramètre est important, plus le transfert des polluants est rapide (Benhamiche, 2015).

L'estimation de ces indices a été faite selon la nature des aquifères de la zone d'étude :

- Les sables et graviers, sont les plus perméables ($K > 9.4 \cdot 10^{-4}$ m/s).
- Grés massifs et calcaire massif, sont peu perméables ($32.9 \cdot 10^{-5} < K < 4.7 \cdot 10^{-4}$).

Les indices partiels de conductivité hydraulique selon le model DRASTIC sont représentés dans le tableau XXXIII). Et la carte des indices « C » est représentée dans la figure 44.

Tableau XXXIII. Indices de conductivité hydraulique.

Paramètres de conductivité (C)			
Zone	Cotes	Poids	Indices
sables et graviers	10	3	30
grés massifs	6		18
calcaire massif	6		

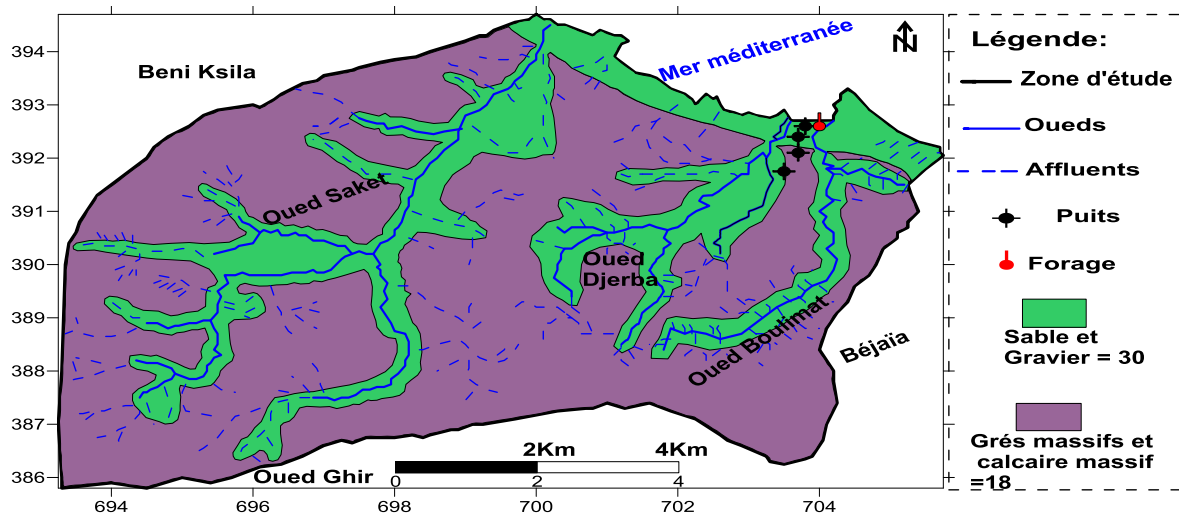


Figure 44. Carte des indices de conductivité hydraulique.

III.4.8 Paramètre de conductivité électrique «EC»

La conductivité électrique des eaux souterraines de l'ensemble du bassin versant de Boulimat est élevée ($EC > 1500 \mu\text{S}/\text{cm}$), cela démontre que l'eau est chargée en sels minéraux (anions et cations), C'est le signe d'une augmentation des apports de substances dissoutes provenant du bassin versant. Plus ce paramètre est important, plus la fixation de l'eau à des polluants est importante.

L'indice partiel de conductivité électrique selon le model DRASTIC est représenté dans le tableau XXXIV). Et la carte d'indice « EC » est représentée dans la figure 45.

Tableau XXXIV. Indice de conductivité électrique.

Paramètre de conductivité électrique «EC»			
Zone	Cote	Poids	Indice
Eaux souterraine, EC > 1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$	10	5	50

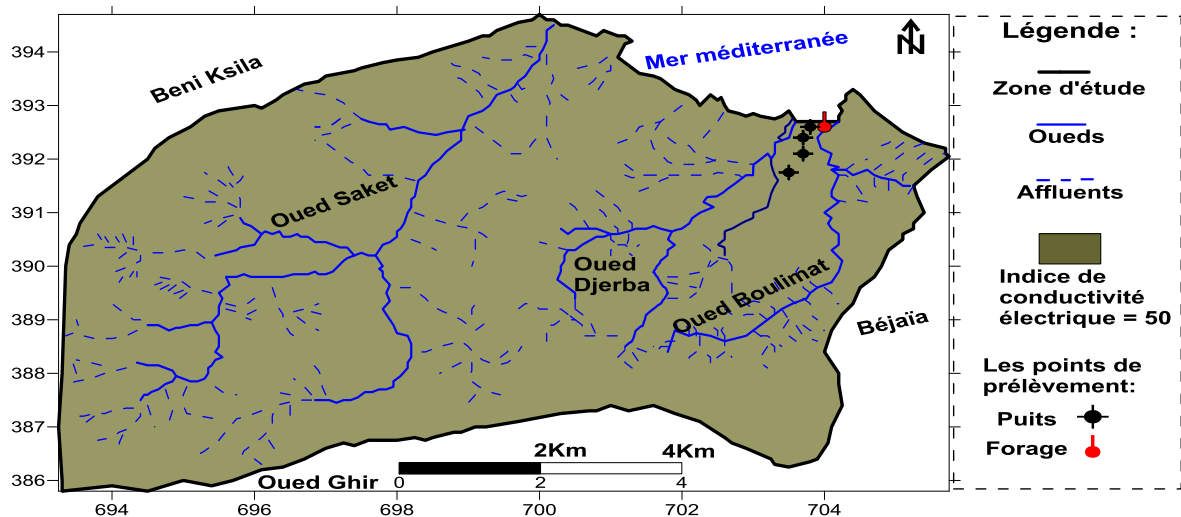


Figure45. Carte d'indice de conductivité électrique.

III.4.9 Paramètre de Sulfates « SO_4^{-2} »

Les résultats d'analyses chimiques, montrent que les teneurs en Sulfates des eaux souterraines et les eaux de surface, sont inférieures à 250 mg/l. L'indice partiel des sulfates sur toute la zone d'étude = 16 (Tab. XXXV).

Naturellement, les eaux contiennent toujours des sulfates en proportion très variables. Leur présence résulte de la légère solubilité du sulfate de calcium des roches gypseuses et de l'oxydation des sulfures répandus dans les roches. La carte d'indice des sulfates est représentée dans la figure 46.

Tableau XXXV. Indice des sulfates.

Paramètre de Sulfates « SO_4^{-2} »			
Zone	Cote	Poids	Indice
Les eaux souterraines et les eaux de surface : $(SO_4^{-2}) < 250$ mg/l	4	4	16

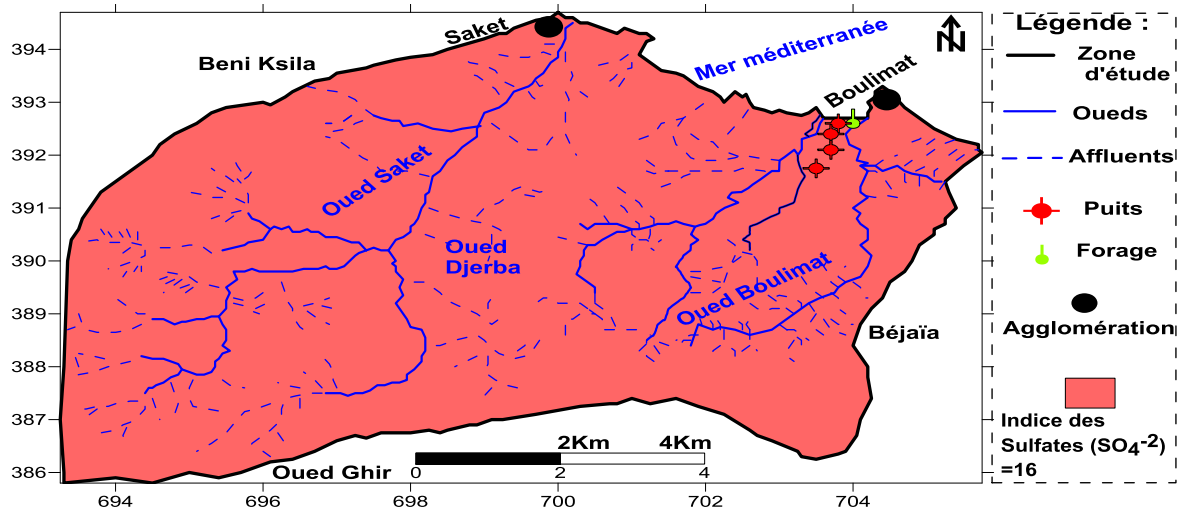


Figure 46. Carte d'indice des sulfates.

III.5 Carte de vulnérabilité

L'indice de vulnérabilité pour chaque zone est calculé en faisant les sommes des 9 indices partiels pour chaque paramètre ; ($I_D+I_R+I_A+I_S+I_T+I_I+I_C+I_{EC}+I_{SO_4^{2-}}$) spécifique à la zone (tableau XXXVI).

Tableau XXXVI. Indice DRASTIC-EC-SO₄⁻² et degré de vulnérabilité.

Calcul de l'indice « DRASTIC-EC-SO ₄ ⁻² » dans chaque zone											
Zone	D	R	A	S	T	I	C	EC	SO ₄ ⁻²	TOTAL	Degré de vulnérabilité
Littorale	50	36	24	18	9	45	30	50	16	278	Très élevé
Alentours des oueds	45	36	24	20	5	45	30	50	16	271	Très élevé
Centrale	35	36	18	12	5	30	18	50	16	220	Elevé
Extrême sud	5	36	18	12	1	30	18	50	16	186	Moyen

- ✓ La carte de vulnérabilité à la pollution de la nappe superficielle de Boulimat permet de visualiser les principales zones vulnérables, liées à des indices élevés (Fig. 47).

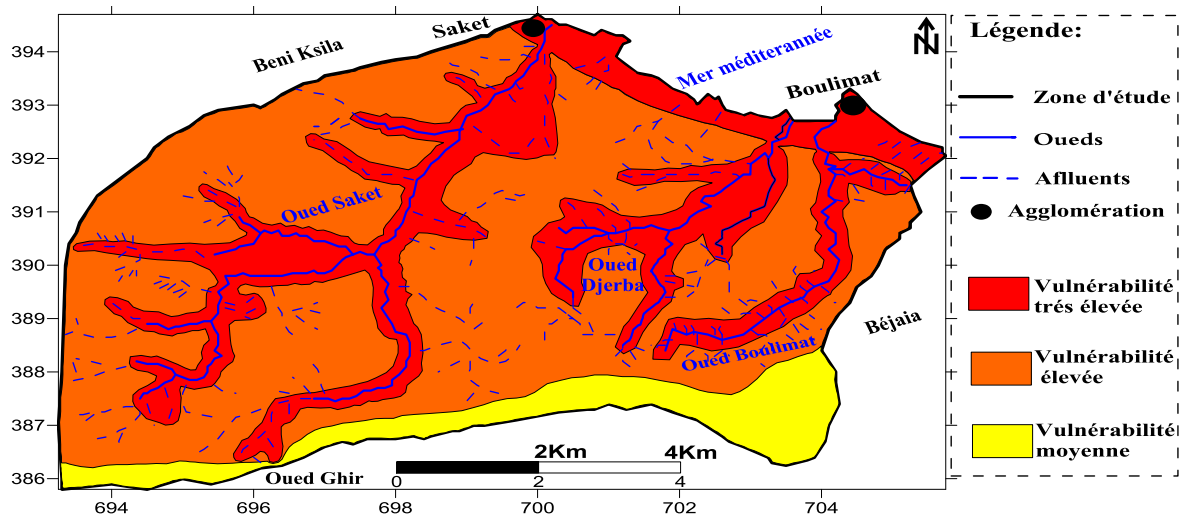


Figure 47. Carte de vulnérabilité à la pollution de la nappe superficielle de Boulimat.

III.6 Sources de pollution potentielles dans la région d'étude

III.6.1 Les fosses septiques

Pendant notre sortie sur le terrain, Nous avons effectué une enquête auprès des peuples autochtones de la région pour se renseigner sur le sort des eaux d'assainissement sortants de leurs maisons, leurs réponses étaient inattendues ; elles se jettent directement dans les fosses !

III.6.2 Les décharges et dépotoirs sauvages

Durant le trajet emprunté, Nous avons constaté une fréquence importante de dépotoirs sauvages surtout à la phase littorale du bassin ;

Le travail sur la région de Boulimat ne peut pas s'achever sans insister sur la grande décharge publique destinée aux ordures ménagère et industrielle de toute la commune de Béjaia qui comporte plus de 190 milles habitants (recensement 2018), 2 campus et 6 résidences universitaires, et le nombre des activités industrielles est important.

Alors, les eaux souterraines seront affectées par l'infiltration des lixiviats provenant non seulement de la dégradation des déchets ménagères, mais aussi de la dégradation des déchets industriels de nature chimique différentes.

L'incinération quotidienne et la dégradation des déchets produisent des particules chimiques et des gaz toxiques causant une pollution atmosphérique sur un rayon de plusieurs kilomètres, de ce fait, la région d'étude est plus visée par le dépôt de particules solides qui atteignent les nappes souterraines après lessivage par les eaux de pluie.

III.6.3 Pollution par le trafic routier

Les émissions de substances susceptibles de générer des pollutions émanant des infrastructures routières sont générées par plusieurs types de sources :

- Les véhicules en circulation sur l'infrastructure (Gaz d'échappement, des huiles de moteur, Gasoil et essences provenant surtout d'anciens véhicules ayant des fuites et des pannes mécaniques).
- L'abrasion de la chaussée.

III.6.4 Pollution engendrée par les estivants

La région de Boulimat est visée par un nombre important d'estivants qui dépasse 100 000 visiteurs/année. Ils se concentrent sur la phase littorale du bassin. Le bilan de la pollution engendrée est lourd ;

D'après des témoignages des gens autochtones de la région, l'aspect organoleptique de l'eau des puits en saison estivale est différent par rapport à ce qu'il était avant (changement dans l'odeur) ; le problème, sans doute est dans les eaux d'assainissement qui se jettent dans des fosses septiques.

La phase littorale du bassin, connaît aussi une pollution importante par des déchets ménagers.

III.6.5 La pollution agricole

L'utilisation de pesticides et de fertilisants est une cause majeure de pollution des eaux douces, surtout dans le cas de l'agriculture intensive.

Dans le cas de notre région d'étude, l'activité agricole est faible.

III.7 La carte risque

La projection des sources de pollution sur la carte de vulnérabilité à la pollution, nous a mené à établir une carte de risque (Fig. 48), qui est donnée par la relation suivante :

$$\text{Risque} = \text{Vulnérabilité} \times \text{Aléa}$$

La carte de risque de pollution de la nappe superficielle de Boulimat (Fig. 48), a été élaborée, par combinaison de la carte de vulnérabilité intrinsèque (Fig. 47) et les sources potentielles de pollution et en tenant compte aussi de la gravité des polluants potentiels.

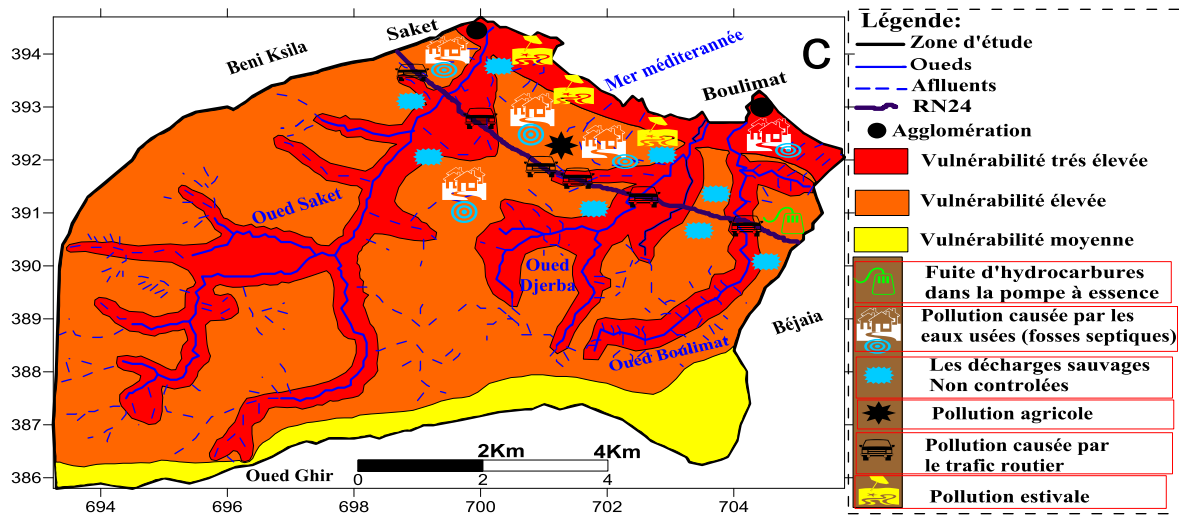


Figure 48. Carte de risque du bassin versant de la région de Boulimat.

- D'après la carte de risque, on remarque que toutes les sources de pollution se concentrent dans le littoral, alentours des oueds, qui sont des zones à vulnérabilité très élevée, et à vulnérabilité élevée. Ceci constitue une menace pour la nappe superficielle du bassin versant de Boulimat.

III.8 Impact des sources de pollution sur l'Environnement et la santé publique

Les sources de pollution constatées dans la région d'étude, n'ont pas seulement un impact négatif sur les eaux, mais constituent aussi une menace pour la santé publique, les écosystèmes naturels, la faune et la flore aquatique, ainsi que la faune et la flore terrestre (Fig. 49).

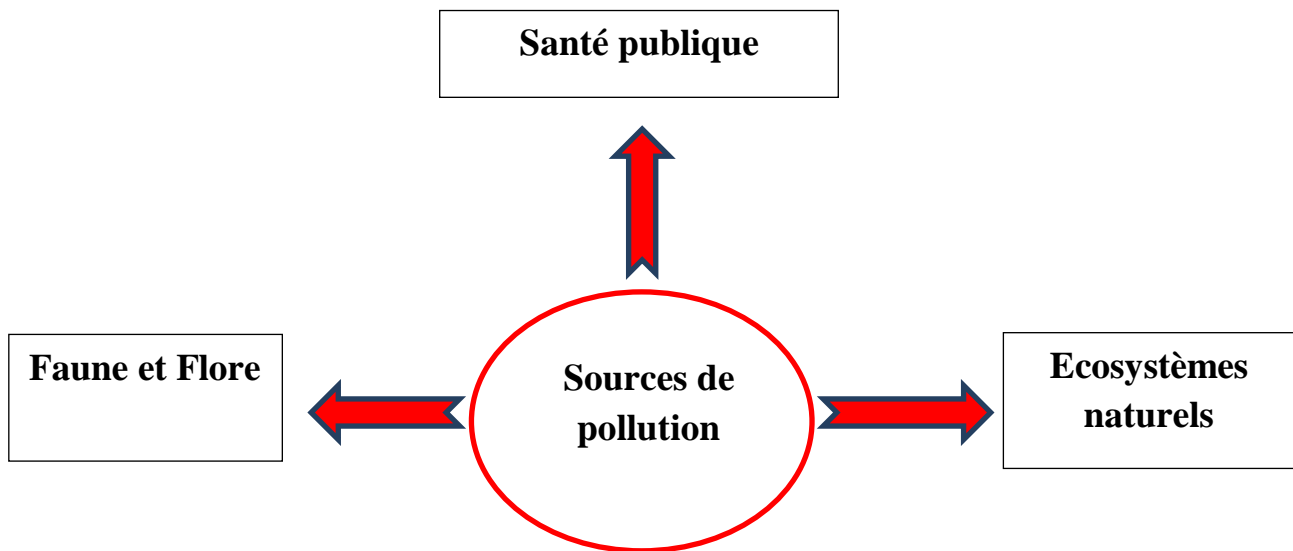


Figure 49. Schéma illustratif de l'impact des sources de pollution sur l'Environnement et la santé publique.

*Conclusion et
recommandations*

Conclusion et recommandations

1) Conclusion

Au cours de cette recherche, nous avons présenté d'abord la zone d'étude, la population, les caractéristiques géomorphologiques et climatiques de la région de Boulimat.

Sur le plan climatique : la région de Boulimat a un climat méditerranéen humide dont la période sèche varie de la dernière semaine du mois de Mai jusqu'à la première semaine du mois de Septembre et une période humide à partir de la deuxième semaine du mois de Septembre jusqu'à la troisième semaine du mois de Mai.

Sur les plans hydrogéologiques on a quatre aquifères :

Les aquifères des sables, d'alluvions, des flysch et conglomérats et les aquifères de calcaires fissurées.

A partir des résultats obtenus par l'application de la méthode DRASTIC-EC-SO₄²⁻ à la nappe superficielle de la région de Boulimat, on a réalisé une carte de vulnérabilité qui définit le degré de vulnérabilité pour chaque indice DRASTIC-EC-SO₄²⁻ calculé.

On a défini trois zones de vulnérabilité à degré très élevé, élevé, moyen, tel qu'elles sont citées ci-dessous :

- Les zones à vulnérabilité très élevée des sables et alluvions.
- La zone centrale des flyschs et des conglomérats à vulnérabilité élevée.
- La zone extrême sud du calcaire à vulnérabilité moyenne.

La carte de vulnérabilité établie, est facilement actualisable est modifiable, en fonction de nouvelles conditions hydrogéologiques et des objectifs à atteindre sans contrainte d'échelle.

La cartographie de la vulnérabilité et des risques de pollution des eaux souterraines est une méthodologie fiable et nécessaire afin d'assurer la gestion qualitative des ressources en eau, ce type de cartes permet d'identifier facilement les zones à risques de pollutions potentielles et sont facilement exploitables. Elle servira donc comme un outil d'aide à la décision aux gestionnaires des ressources en eau et permettra également d'orienter l'aménagement du territoire.

2) Recommandations

Cette étude nous a amené à proposer les recommandations suivantes qu'on estime qu'elles soient prises en considération à fin de participer à la protection qualitative et quantitative de la ressource en eau :

- Mise en place d'un réseau de canalisation planifié pour les eaux d'assainissement et les eaux usées domestiques pour éradiquer les fosses septiques.
- Installer une station d'épuration des eaux usées pour plusieurs raisons ;
 - ✓ Supprimer les fosses septiques qui constituent la source majeure de pollution
 - ✓ Réutiliser l'eau traitée, une façon de préserver la ressource en eau souterraine, surtout vue que la région souffre de pénurie d'eau en saison estivale
 - ✓ Encourager les agriculteurs à travailler leur terre, vue la bonne qualité des eaux de surface.
- Aménagement des décharges vers les zones à faible vulnérabilité.
- Mettre à niveau les moyens nécessaires pour la collecte de déchets, permettant l'élimination des dépotoirs.
- Développement et application des méthodes pour contrôler l'évolution de la pollution.
- Sensibiliser la population et les estivants sur le danger de pollution de la région.
- Faire un suivi hydro-chimique des eaux de surface et souterraines.

*Références
bibliographiques*

Références bibliographiques

ADAM J.W.H. (1980). Health aspects of nitrate in drinking-water and possible means of denitrification (literature review). *Water SA*, 6(2), 79-89.

Albinet, M., et Magat, J. (1970). Cartographie de la vulnérabilité à la pollution des nappes d'eau souterraines. *Bull. BRGM*, 2^{ème} série, 3(4), 13-22.

Aller, L., Bennet, T., Lehr, J. H., Petty, R. J., et Hackett, G. (1987). DRASTIC: A standardised system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic setting. US Environmental Protection Agency.

AMHARREF, M., & Bernoussi, A. (2007). Vulnérabilité et risque de pollution des eaux souterraines. Actes des JSIRAUF, Hanoi, 2007, p. 6-9.

Bagnouls, F. Gaussen, H. 1957. Les climats biologiques et leur classification géographique. *Annales de géographie*, n° 355, p.193-220.

Barbier, O., Jacquillet, G., Tauc, M., Poujeol, P., & Cougnon, M. (2004). Acute study of interaction among cadmium, calcium, and Zinc transport along the rat nephron in vivo. *American Journal of Physiology-Renal Physiology*, 287(5), F1067-F1075.

BEATSON, C.G. (1978). Methaemoglobinaemia-Nitrates in drinking water, *Environ. Health*, 86, 31-33.

Belkhir, H., Debbou, F. (2015). Evaluation de la vulnérabilité à la pollution de la région d'Aokas. Mémoire de Master en sciences environnementales, Université MIRA de Bejaia.

Benhamiche, N. 2015. Contribution à l'étude de l'influence climatique, lithologique et anthropique sur la variation des paramètres physico-chimiques des eaux d'un aquifère du Nord-est algérien : Cas de la basse Soummam, Bejaia. Thèse de Doctorat. Université de Béjaia.

Références bibliographiques

Boudjellil, E., Djafari, A. (2018). Etude de la vulnérabilité à la pollution de la nappe superficielle de Souk El Tenine par la méthode GALDIT. Mémoire de Master en sciences environnementales, Université A. MIRA de Bejaia.

Boutaya, I., Challal, S., (2017). Etude de la vulnérabilité à la pollution de la région de Boulimat par la méthode Drastic. Mémoire de master faculté des sciences de la nature et de la vie. Université de Bejaia. 43p.

Briere F.G., (2012). Distribution et collecte des eaux. Presses inter Polytechnique.

Casas S., (2005). Modélisation de la bioaccumulation de métaux traces (Hg, Cd, Pb, Cu et Zn) chez la moule, *Mytilus galloprovincialis*, en milieu méditerranéen (Doctoral dissertation).

Cazaux M. (2007) .Les eaux souterraines en Girande cartographie de la vulnérabilité aux pollutions des nappes éocènes dans le secteur du Blayais. Rapport de stage master II. Département des sciences de la terre et de l'environnement de Montpellier.

Civita, M. (1994). Le carte della vulnerabilita degli acquiferi all'inquinamento : teoria e pratica. Pitagora.

Devi CB., Reddy GH., Prasanthi RP., Chetty CS. et Reddy GR. (2005). Developmental lead exposure alters mitochondrial monoamine oxidase and synaptosomal catecholamine levels in rat brain. *International journal of developmental neuroscience*, 23.4 (2005): 375–381.

Doerfliger, N., Jeannin, P.Y., & Zwahlen, F. (1999). Water vulnerability assessment in karst environments: a new method of defining protection areas using a multi-attribute approach and GIS tools (EPIK method). *Environmental Geology*, 39(2), 165-176.

Egboka, B.C.E. (1984). Nitrate contamination of shallow groundwaters in Ontario, Canada. *Science of the total Environment.*, 35(1), 53-70.

Florea, A.M., & Busselberg, D. (2006). Occurrence, use and potential toxic effects of metals and metal compounds. *Biometals*, 19(4), 419–427.

Foster, S.S.D. (1987). Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy: Vulnerability of soil and Groundwater to pollutants. RIVM.TNO Committee on Hydrological Research, p. 69-86.

Références bibliographiques

Foster, S., Hirata, R. C. A. (1991). Groundwater pollution risk assessment, a methodology using available data. CEPIS.

Gogu, R. & Dassargues, A. (1998). A short overview on groundwater vulnerability assessment: basic statements for use in the framework of the Cost 620 action.

Gouadia, L., Boudoukha, A., Djabri, L., & Guefafia, O. (2011). Evaluation de la vulnérabilité d'une nappe en milieu semi-aride et comparaison des méthodes appliquées : cas de la nappe de Meskiana (Est algérien). *Sciences et changements planétaires/Sécheresse*, 22(1), 35-42.

Hanon M., Rouelle A. (2011). Le pH de l'eau de distribution, Portail environnement de Wallonie, Belgique.

Hassisén M. (1989)- Etude géologique des djebels Gouraya-Aghbalou. Thèse de magister, IST, USTHB.

JORADP (2014). Décret exécutif n°14-96, modifiant et complétant de décret exécutif n° 11-125 (2011) relatif à la qualité de l'eau de consommation humaine.

Khemmoudj, K., 2009. Dynamique des systèmes et stratégie d'aménagement et gestion de la ressource en eau en zone semi-aride : cas de la région d'EL-EULMA, Sétif. Thèse de doctorat. Université de Badji Mokhtar, Annaba.

Lallemand-Barres, A., 1994. Normalisation des critères d'établissement des cartes de vulnérabilité aux pollutions. Etude documentaire préliminaire. Rapport BRGM R 37928.

Margat, J. (1968). Vulnérabilité des nappes d'eau souterraine à la pollution. Base de la cartographie, Doc. BRGM, 68 SGL 198 HYD. Orléans, France.

Miquel G., 2001. Les effets des métaux lourds sur l'environnement et la santé. Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques.

Murat V. 2000. Etude comparative des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque des aquifères à la pollution, université du Québec INRS –Géoressources.

NAS/NRC (1989). Recommended dietary allowances, National Academy of Science/National Research Council, Washington.

Références bibliographiques

OMS (W.H.O.): WORLD HEALTH ORGANISATION. (2003). Background document for preparation of WHO Guidelines for drinking-water quality. Geneva. World Health Organisation.

Petelet-Giraud, E., Dorfliger, N., & Crochet, P. (2000). RISKE : méthode d'évaluation multicritère de la vulnérabilité des aquifères karstiques. Application aux systèmes des Fontanilles et Cent-Fonts (Hérault, Sud de la France). *Hydrogéologie*, 4, 71-88.

Rahman, A. (2008). A Gis DRASTIC model for assessing groundwater vulnerability in shallow aquifer in Aligarh, India. *Applied Geography*. Vol. 28(1), pp. 32-53.

Ramade, F. (2012). *Eléments d'écologie-7^{éd.}-Ecologie appliquée*. Dunod.

Rodier J. E. A. N., Bernard, L., & Nicole, M. (2005). *L'analyse de l'eau, eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer*. 8th ed. by Dunod, DL, Paris.

Rodier, J. (2009). *L'analyse de l'eau*. 9eme édition, Dunod.

Salhi, S., (2018). Etude de la vulnérabilité à la pollution de la région de Boulimat par la méthode IS., Mémoire de master faculté des sciences de la nature et de la vie .Université de Bejaia. 51p.

Savary P. (2003). *Guide des analyses de la qualité de l'eau*. Ed. Techni. Cités.

Sbargoud, S. (2013). Validité de l'application de la méthode de vulnérabilité DRASTIC à l'étude de la pollution par les nitrates dans la mitidja (Nord d'Algérie). In conférence Geo Tunis (Vol. 8, p.12).

Schnebelen, N., Platel, J. P., Le Nindre, Y., & Baudry, D. (2002). *Gestion des eaux souterraines en Aquitaine Année 5. Opération sectorielle. Protection de la nappe de l'Oligocène en région bordelaise* [Water management in Aquitaine 5. Sectorial operation.Oligocene aquifer protection in the Bordeaux region].Rapport, BRGM, Orléans, France.

Seghir, K. (2014). La vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines de la région Tebessa-Hammamet (Est Algérien). *LARHYSS Journal* ISSN 1112-3680, 2014, no18.

Si Ahmed, A., Yahiaoui, N. (2017). Etude de la vulnérabilité à la pollution de la région de Boulimat par la méthode Sintacs., Mémoire de master faculté des sciences de la nature et de la vie .Université de Bejaia. 41p.

Références bibliographiques

Station Office National Météorologique de Bejaia. 2018. La réparation des moyennes mensuelles des (températures, précipitations, Humidité, vent). Période de (1996-2018).

Thibault S., (2011). Bassin versant. Encyclopédie de l'hydrologie urbaine et de l'assainissement, Lavoisier, pp.116, 1997, technique et documentation. Hal-00577977.

Wichda, S. 2016. Tutoriel d'utilisation de logiciel surfer 11, université de Maroura. P. 03.

Zair, S., Bensalem, I. Etude de la vulnérabilité à la pollution de la baie de Bejaia par les méthodes DRASTIC et SINTACS., Mémoire de master faculté des sciences de la nature et de la vie .Université de Bejaia. 107p.

Zaporozec, A., & Vrba, J. (1994). Classification and review of groundwater vulnerability maps. Guidebook on mapping groundwater vulnerability, 16, 21-29.

Annexes

Annexe I

Les méthodes de détermination de la vulnérabilité des eaux souterraines peuvent être classées en trois grandes catégories :

Les **méthodes de cartographies à index** basées sur la combinaison de cartes de divers paramètres d'une région (critères de vulnérabilité), en donnant un index numérique ou une valeur à chaque paramètre. La combinaison des cartes se fait au moyen de logiciels de traitement multicritères.

Les **modèles de simulation** : ils consistent à trouver une solution numérique à des équations mathématiques représentant le processus de transfert de contaminants (Schnebelen 2002). Ils donnent une image de vulnérabilité spécifique de la nappe.

Les **méthodes statistiques** : elles sont basées sur une variable qui dépend de la concentration en contaminant ou d'une probabilité de contamination. Ces méthodes intègrent des données sur la distribution des contaminants sur la zone d'étude et fournissent des caractéristiques sur les probabilités de contamination sur la zone d'étude. Elles donnent une image de la vulnérabilité spécifique de la nappe.

Les **méthodes de cartographie à index** comportent deux types d'approche : les systèmes hiérarchisés et les systèmes paramétrés. (N. Schnebelen et al., 2002)

La méthode des systèmes hiérarchisés est basée sur la comparaison d'une zone donnée avec les critères représentant les conditions de vulnérabilité d'autres zones (autres bassins ou autres systèmes aquifères). Elle est généralement utilisée pour évaluer la vulnérabilité de contextes hydrogéologiques variés à moyenne ou grande échelle (régionale ou nationale).

La méthode des systèmes paramétrés repose sur la sélection de paramètres (ou critères) considérés comme représentatifs pour estimer la vulnérabilité d'une eau souterraine. Chaque critère a une gamme de variation naturelle définie qui est subdivisée en intervalles discrétisés et hiérarchisés. Un index est attribué à chaque intervalle, reflétant le degré de sensibilité relatif à une contamination. Les systèmes paramétrés peuvent être classés en trois principaux groupes : systèmes matriciels, systèmes indexés et méthodes de pondération et d'indexation des paramètres. Chacun est adapté à un objectif différent : respectivement, petite échelle d'étude, échelle moyenne d'étude, mais non prise en compte de l'importance relative des critères de vulnérabilité, échelle moyenne d'étude et prise en compte de l'importance relative des critères de vulnérabilité.

Les **méthodes de cartographie à index avec pondération des critères** (Point Count Systems Models, PCSM) sont les plus pertinentes vis à vis des réalités de terrain du fait de la prise en

compte de l'importance relative de chaque critère vis-à-vis de la vulnérabilité générale de la nappe. Ce sont aussi les plus reconnues et utilisées à l'heure actuelle (Gogu et Dassargues 2000 ; Zaporozec et Vrba 1994).

Différentes méthodes développées et normalisées sont présentes ci-après :

DRASTIC : La méthode DRASTIC a été mise au point par l'EPA (Environmental Protection Agency) aux Etats-Unis en 1985 et Aller *et al.* en 1987, 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 : D : Depth to groundwater (distance à la nappe, épaisseur de la zone non saturée) ; R : Recharge (recharge) ; A : Aquifer media (nature de la zone saturée) ; S : Soil media (nature du sol) ; T : Topographie (topographie, pente en %) ; I : Impact of the vadose zone (nature de la zone non saturée) ; C : Conductivity (perméabilité de l'aquifère). La méthode DRASTIC est principalement utilisée pour la cartographie à petite échelle (Lyakhloufi *et al.* 1999).

SINTACS : La méthode SINTACS est dérivée de la méthode DRASTIC. Elle a été développée en Italie, au début des années 1990, de manière à s'adapter à la cartographie à plus grande échelle compte tenu de la grande diversité hydrogéologique de l'Italie (Petelet *et al.*, 2000). Les paramètres de caractérisation de la vulnérabilité qui ont été retenus dans cette approche sont les mêmes que ceux de la méthode DRASTIC, soit en italien : S : Soggiacenza (profondeur de la nappe) ; I : Infiltrazione (infiltration) ; N : Azione del Non Saturo (fonction de la zone non saturée) ; T : Tipologia della Copertura (sol) ; A : Carratteri Idrogeologici dell' Acquifero (caractéristique hydrogéologiques de l'aquifère) ; C : Conducibilita Idraulica (conductivité hydraulique) ; S : Acclività della Superficie Topographica (pente moyenne de la surface topographique).

Contrairement à DRASTIC, la méthode SINTACS permet d'utiliser, en même temps et dans des cellules différentes, des facteurs de pondération variables selon les situations (Schnebelen *et al.*, 2002).

EPIK : C'est la première méthode dédiée spécifiquement aux aquifères karstiques sensu-stricto (Doerfliger, 1996 ; Doerfliger et Zwahlen, 1997). Elle est basée sur quatre critères : Epikarst ; Protective Cover (couverture protectrice : sol) ; Infiltration Conditions (conditions d'infiltration) ; Karst network development (développement du réseau karstique).

RISKE : Cette méthode s'inspire de la méthode suisse EPIK en raison de sa spécificité karstique. RISKE est un acronyme qui reprend les initiales des 5 critères pris en compte : Roche aquifère, Infiltration, Sol, Karstification, Epikarst (Petelet-Giraud *et al.*, 2000).

DISCO : La méthode "DISCO" (discontinuités - couverture protectrice) a pour but de définir les zones de protection en tenant compte de l'hétérogénéité du milieu. Trois paramètres sont nécessaires et suffisants pour évaluer le transport d'un polluant d'un point quel conque du bassin d'alimentation jusqu'à son arrivée au captage : le paramètre "discontinuités" ; le paramètre "couverture protectrice" ; le paramètre "ruissellement" englobe les phénomènes d'écoulement de l'eau en surface avant son infiltration (ruissellement de pente, cours d'eau permanents ou temporaires).

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 de la migration latérale des polluants dans la zone saturée.

Cette méthode est basée sur l'identification de trois critères : Type de nappe (**G**roundwater occurrence) ; Type d'aquifère en termes de facteurs lithologiques (**O**verall aquifer class) ; Profondeur de la nappe (**D**epth to groundwater table).

Annexe II

❖ Détermination des chlorures (Cl⁻)

➤ Réactifs

Solution de nitrate d'argent à 0.01 N :

1,6987 d'AgNO₃ 1000 ml d'eau distillée

Indicateur coloré K₂CrO₄ à 10% :

10 g deK₂CrO₄ Q.S.P 100 ml d'H₂O distillée.

Solution de chlorures à 71 mg/l :

0,107g de NH₄Cl.....1000 ml d'eau distillée.

Mode opératoire

- On prélève dans un erlenmeyer, 50 ml de l'échantillon d'eau à analyser ;
- On y ajoute deux gouttes de chromate de potassium qui lui donne une couleur jaune ;
- On titre avec une solution de nitrate d'argent (AgNO₃) jusqu'au virage de la couleur du jaune à l'orange marron.

Expression des résultats

Le calcul de la concentration se détermine de la manière suivante :

(Cl) en mg/l = V x 71 avec V : le volume du nitrate d'argent noté.

Annexe III

❖ Dosage des nitrites NO_2^-

Réactifs

- Ammoniaque pure ($d=0,928$) ;
- Réactif de Zambelli ;
- Solution étalon mère de NO_2^- à 0,23.

Mode opératoire

- On prélève 50 ml de l'échantillon d'eau à analyser ;
- On ajoute 2 ml de réactif de Zambelli, on ajuste et après 10 minutes on ajoute 2ml d'ammoniaque pur ;
- En présence d'ion ammonium et de phénol (réactif de Zambelli), forme avec les ions nitrites un complexe coloré jaune ;
- On effectue la lecture au spectromètre à la longueur d'onde de 434nm.

Expression des résultats

Le résultat est donné directement en mg/l.

❖ Dosage des sulfates (SO_4^{2-}) par un test en cuve

Mode opératoire

- On ajoute 2ml de l'eau à analyser dans la cuve qui contient la quantité exacte LCK 353 ;
- Le temps de réaction et d'agitation : 2 minutes.

Expression des résultats

On insère la cuve dans le spectrophotomètre et on prend la mesure.

Annexe IV

❖ Dosage des nitrates NO³⁻

Réactifs

- Solution de salicylate de sodium 0,05% ;
- Hydroxyde de sodium ;
- Nitrate de potassium ;
- Ammoniaque diluée au demi ;
- Tarte double de sodium et de potassium.

Mode opératoire

- On prend 10 ml d'eau à analyser ;
- + 1 ml de salicylate de sodium ;
- On évapore dans une étuve l'élimination de l'eau ;
- Puis on laisse refroidir, et on ajoute 2 ml d'acide sulfurique ;
- Après 10 minutes, on ajoute 15 ml de l'eau distillée et 15 ml de tartrate double de sodium et potassium.

Expression des résultats

- Le résultat est donné directement en mg/l.

Annexe V

❖ Les tests en cuve LCK

Les tests en cuve LCK permettent de déterminer le dosage des paramètres chimiques de l'eau en suivant le mode opératoire représenté à l'intérieur de la couverture de chaque boîte LCK qui indique la quantité de l'eau à ajouter, la manière d'agitation de la solution dans la cuve et le temps de réaction. La cuve contient la quantité exacte de réactif.

❖ Le spectrophotomètre utilisé

Le DR 6000 est un spectrophotomètre UV-VIS de haute précision, doté de toutes les fonctions nécessaires pour le travail quotidien d'un laboratoire de contrôle ou de recherche. La qualité supérieure des composants optiques assurent des résultats précis et une durée d'utilisation accrue.

Le DR 6000 est également doté d'un support pour les tests en cuve. Un laser identifie la cuve insérée grâce à son code-barres (IBR = Integrated Bar code Reading System). Le DR 6000 commence la mesure automatiquement et affiche le résultat en mg/l. La mesure s'effectue sans autre manipulation.

Annexe VI

Calcul de l'indice général « DRASTIC-EC-SO ₄ ⁻² »											Degré de vulnérabilité
N°	D	R	A	S	T	I	C	EC	SO ₄ ⁻²	Total	
1	50	36	24	18	9	45	30	50	16	278	Très élevé
2	50	36	24	18	9	45	18	50	16	266	Très élevé
3	50	36	24	18	9	30	30	50	16	263	Très élevé
4	50	36	24	18	9	30	18	50	16	251	Très élevé
5	50	36	24	18	5	45	30	50	16	274	Très élevé
6	50	36	24	18	5	45	18	50	16	262	Très élevé
7	50	36	24	18	5	30	30	50	16	259	Très élevé
8	50	36	24	18	5	30	18	50	16	247	Très élevé
9	50	36	24	18	1	45	30	50	16	270	Très élevé
10	50	36	24	18	1	45	18	50	16	258	Très élevé
11	50	36	24	18	1	30	30	50	16	255	Très élevé
12	50	36	24	18	1	30	18	50	16	243	Elevé
13	50	36	24	20	9	45	30	50	16	280	Très élevé
14	50	36	24	20	9	45	18	50	16	268	Très élevé
15	50	36	24	20	9	30	30	50	16	265	Très élevé
16	50	36	24	20	9	30	18	50	16	253	Très élevé
17	50	36	24	20	5	45	30	50	16	276	Très élevé
18	50	36	24	20	5	45	18	50	16	264	Très élevé
19	50	36	24	20	5	30	30	50	16	261	Très élevé
20	50	36	24	20	5	30	18	50	16	249	Très élevé
21	50	36	24	20	1	45	30	50	16	272	Très élevé
22	50	36	24	20	1	45	18	50	16	260	Très élevé
23	50	36	24	20	1	30	30	50	16	257	Très élevé
24	50	36	24	20	1	30	18	50	16	245	Très élevé
25	50	36	24	12	9	45	30	50	16	272	Très élevé
26	50	36	24	12	9	45	18	50	16	260	Très élevé
27	50	36	24	12	9	30	30	50	16	257	Très élevé
28	50	36	24	12	9	30	18	50	16	245	Très élevé
29	50	36	24	12	5	45	30	50	16	268	Très élevé
30	50	36	24	12	5	45	18	50	16	256	Très élevé
31	50	36	24	12	5	30	30	50	16	253	Très élevé
32	50	36	24	12	5	30	18	50	16	241	Elevé
33	50	36	24	12	1	45	30	50	16	264	Très élevé
34	50	36	24	12	1	45	18	50	16	252	Très élevé
35	50	36	24	12	1	30	30	50	16	249	Très élevé
36	50	36	24	12	1	30	18	50	16	237	Très élevé
37	50	36	18	18	9	45	30	50	16	272	Très élevé
38	50	36	18	18	9	45	18	50	16	260	Très élevé
39	50	36	18	18	9	30	30	50	16	257	Très élevé
40	50	36	18	18	9	30	18	50	16	245	Très élevé
41	50	36	18	18	5	45	30	50	16	268	Très élevé
42	50	36	18	18	5	45	18	50	16	256	Très élevé

43	50	36	18	18	5	30	30	50	16	253	Très élevé
44	50	36	18	18	5	30	18	50	16	241	Elevé
45	50	36	18	18	1	45	30	50	16	264	Très élevé
46	50	36	18	18	1	45	18	50	16	252	Très élevé
47	50	36	18	18	1	30	30	50	16	249	Très élevé
48	50	36	18	18	1	30	18	50	16	237	Elevé
49	50	36	18	20	9	45	30	50	16	274	Très élevé
50	50	36	18	20	9	45	18	50	16	262	Très élevé
51	50	36	18	20	9	30	30	50	16	259	Très élevé
52	50	36	18	20	9	30	18	50	16	247	Très élevé
53	50	36	18	20	5	45	30	50	16	270	Très élevé
54	50	36	18	20	5	45	18	50	16	258	Très élevé
55	50	36	18	20	5	30	30	50	16	255	Très élevé
56	50	36	18	20	5	30	18	50	16	243	Elevé
57	50	36	18	20	1	45	30	50	16	266	Très élevé
58	50	36	18	20	1	45	18	50	16	254	Très élevé
59	50	36	18	20	1	30	30	50	16	251	Très élevé
60	50	36	18	20	1	30	18	50	16	239	Elevé
61	50	36	18	12	9	45	30	50	16	266	Très élevé
62	50	36	18	12	9	45	18	50	16	254	Très élevé
63	50	36	18	12	9	30	30	50	16	251	Très élevé
64	50	36	18	12	9	30	18	50	16	239	Elevé
65	50	36	18	12	5	45	30	50	16	262	Très élevé
66	50	36	18	12	5	45	18	50	16	250	Très élevé
67	50	36	18	12	5	30	30	50	16	247	Très élevé
68	50	36	18	12	5	30	18	50	16	235	Très élevé
69	50	36	18	12	1	45	30	50	16	258	Très élevé
70	50	36	18	12	1	45	18	50	16	246	Très élevé
71	50	36	18	12	1	30	30	50	16	243	Elevé
72	50	36	18	12	1	30	18	50	16	231	Elevé
73	45	36	24	18	9	45	30	50	16	273	Très élevé
74	45	36	24	18	9	45	18	50	16	261	Très élevé
75	45	36	24	18	9	30	30	50	16	258	Très élevé
76	45	36	24	18	9	30	18	50	16	246	Très élevé
77	45	36	24	18	5	45	30	50	16	269	Très élevé
78	45	36	24	18	5	45	18	50	16	257	Très élevé
79	45	36	24	18	5	30	30	50	16	254	Très élevé
80	45	36	24	18	5	30	18	50	16	242	Elevé
81	45	36	24	18	1	45	30	50	16	265	Très élevé
82	45	36	24	18	1	45	18	50	16	253	Très élevé
83	45	36	24	18	1	30	30	50	16	250	Très élevé
84	45	36	24	18	1	30	18	50	16	238	Elevé
85	45	36	24	20	9	45	30	50	16	275	Très élevé
86	45	36	24	20	9	45	18	50	16	263	Très élevé
87	45	36	24	20	9	30	30	50	16	260	Très élevé
88	45	36	24	20	9	30	18	50	16	248	Très élevé

89	45	36	24	20	5	45	30	50	16	271	Très élevé
90	45	36	24	20	5	45	18	50	16	259	Très élevé
91	45	36	24	20	5	30	30	50	16	256	Très élevé
92	45	36	24	20	5	30	18	50	16	244	Très élevé
93	45	36	24	20	1	45	30	50	16	267	Très élevé
94	45	36	24	20	1	45	18	50	16	255	Très élevé
95	45	36	24	20	1	30	30	50	16	252	Très élevé
96	45	36	24	20	1	30	18	50	16	240	Elevé
97	45	36	24	12	9	45	30	50	16	267	Très élevé
98	45	36	24	12	9	45	18	50	16	255	Très élevé
99	45	36	24	12	9	30	30	50	16	252	Très élevé
100	45	36	24	12	9	30	18	50	16	240	Elevé
101	45	36	24	12	5	45	30	50	16	263	Très élevé
102	45	36	24	12	5	45	18	50	16	251	Très élevé
103	45	36	24	12	5	30	30	50	16	248	Très élevé
104	45	36	24	12	5	30	18	50	16	236	Elevé
105	45	36	24	12	1	45	30	50	16	259	Très élevé
106	45	36	24	12	1	45	18	50	16	247	Très élevé
107	45	36	24	12	1	30	30	50	16	244	Très élevé
108	45	36	24	12	1	30	18	50	16	232	Elevé
109	45	36	18	18	9	45	30	50	16	267	Très élevé
110	45	36	18	18	9	45	18	50	16	255	Très élevé
111	45	36	18	18	9	30	30	50	16	252	Très élevé
112	45	36	18	18	9	30	18	50	16	240	Elevé
113	45	36	18	18	5	45	30	50	16	263	Très élevé
114	45	36	18	18	5	45	18	50	16	251	Très élevé
115	45	50	36	18	18	5	30	30	50	282	Très élevé
116	45	50	36	18	18	5	30	18	50	270	Très élevé
117	45	50	36	18	18	1	45	30	50	293	Très élevé
118	45	50	36	18	18	1	45	18	50	281	Très élevé
119	45	50	36	18	18	1	30	30	50	278	Très élevé
120	45	50	36	18	18	1	30	18	50	266	Très élevé
121	45	50	36	18	20	9	45	30	50	303	Très élevé
122	45	50	36	18	20	9	45	18	50	291	Très élevé
123	45	50	36	18	20	9	30	30	50	288	Très élevé
124	45	50	36	18	20	9	30	18	50	276	Très élevé
125	45	36	18	20	5	45	30	50	16	265	Très élevé
126	45	36	18	20	5	45	18	50	16	253	Très élevé
127	45	36	18	20	5	30	30	50	16	250	Très élevé
128	45	36	18	20	5	30	18	50	16	238	Elevé
129	45	36	18	20	1	45	30	50	16	261	Très élevé
130	45	36	18	20	1	45	18	50	16	249	Très élevé
131	45	36	18	20	1	30	30	50	16	246	Très élevé
132	45	36	18	20	1	30	18	50	16	234	Elevé
133	45	36	18	12	9	45	30	50	16	261	Très élevé
134	45	36	18	12	9	45	18	50	16	249	Très élevé

135	45	36	18	12	9	30	30	50	16	246	Très élevé
136	45	36	18	12	9	30	18	50	16	234	Elevé
137	45	36	18	12	5	45	30	50	16	257	Très élevé
138	45	36	18	12	5	45	18	50	16	245	Très élevé
139	45	36	18	12	5	30	30	50	16	242	Elevé
140	45	36	18	12	5	30	18	50	16	230	Elevé
141	45	36	18	12	1	45	30	50	16	253	Très élevé
142	45	36	18	12	1	45	18	50	16	241	Elevé
143	45	36	18	12	1	30	30	50	16	238	Elevé
144	45	36	18	12	1	30	18	50	16	226	Elevé
145	35	36	24	18	9	45	30	50	16	263	Très élevé
146	35	36	24	18	9	45	18	50	16	251	Très élevé
147	35	36	24	18	9	30	30	50	16	248	Très élevé
148	35	36	24	18	9	30	18	50	16	236	Elevé
149	35	36	24	18	5	45	30	50	16	259	Très élevé
150	35	36	24	18	5	45	18	50	16	247	Très élevé
151	35	36	24	18	5	30	30	50	16	244	Très élevé
152	35	36	24	18	5	30	18	50	16	232	Elevé
153	35	36	24	18	1	45	30	50	16	255	Très élevé
154	35	36	24	18	1	45	18	50	16	243	Elevé
155	35	36	24	18	1	30	30	50	16	240	Elevé
156	35	36	24	18	1	30	18	50	16	228	Elevé
157	35	36	24	20	9	45	30	50	16	265	Très élevé
158	35	36	24	20	9	45	18	50	16	253	Très élevé
159	35	36	24	20	9	30	30	50	16	250	Très élevé
160	35	36	24	20	9	30	18	50	16	238	Elevé
161	35	36	24	20	5	45	30	50	16	261	Très élevé
162	35	36	24	20	5	45	18	50	16	249	Très élevé
163	35	36	24	20	5	30	30	50	16	246	Très élevé
164	35	36	24	20	5	30	18	50	16	234	Elevé
165	35	36	24	20	1	45	30	50	16	257	Très élevé
166	35	36	24	20	1	45	18	50	16	245	Très élevé
167	35	36	24	20	1	30	30	50	16	242	Elevé
168	35	36	24	20	1	30	18	50	16	230	Elevé
169	35	36	24	12	9	45	30	50	16	257	Très élevé
170	35	36	24	12	9	45	18	50	16	245	Très élevé
171	35	36	24	12	9	30	30	50	16	242	Elevé
172	35	36	24	12	9	30	18	50	16	230	Elevé
173	35	36	24	12	5	45	30	50	16	253	Très élevé
174	35	36	24	12	5	45	18	50	16	241	Elevé
175	35	36	24	12	5	30	30	50	16	238	Elevé
176	35	36	24	12	5	30	18	50	16	226	Elevé
177	35	36	24	12	1	45	30	50	16	249	Très élevé
178	35	36	24	12	1	45	18	50	16	237	Elevé
179	35	36	24	12	1	30	30	50	16	234	Elevé
180	35	36	24	12	1	30	18	50	16	222	Elevé

181	35	36	18	18	9	45	30	50	16	257	Très élevé
182	35	36	18	18	9	45	18	50	16	245	Très élevé
183	35	36	18	18	9	30	30	50	16	242	Elevé
184	35	36	18	18	9	30	18	50	16	230	Elevé
185	35	36	18	18	5	45	30	50	16	253	Très élevé
186	35	36	18	18	5	45	18	50	16	241	Elevé
187	35	36	18	18	5	30	30	50	16	238	Elevé
188	35	36	18	18	5	30	18	50	16	226	Elevé
189	35	36	18	18	1	45	30	50	16	249	Très élevé
190	35	36	18	18	1	45	18	50	16	237	Elevé
191	35	36	18	18	1	30	30	50	16	234	Elevé
192	35	36	18	18	1	30	18	50	16	222	Elevé
193	35	36	18	20	9	45	30	50	16	259	Très élevé
194	35	36	18	20	9	45	18	50	16	247	Très élevé
195	35	36	18	20	9	30	30	50	16	244	Très élevé
196	35	36	18	20	9	30	18	50	16	232	Elevé
197	35	36	18	20	5	45	30	50	16	255	Très élevé
198	35	36	18	20	5	45	18	50	16	243	Elevé
199	35	36	18	20	5	30	30	50	16	240	Elevé
200	35	36	18	20	5	30	18	50	16	228	Elevé
201	35	36	18	20	1	45	30	50	16	251	Très élevé
202	35	36	18	20	1	45	18	50	16	239	Elevé
203	35	36	18	20	1	30	30	50	16	236	Elevé
204	35	36	18	20	1	30	18	50	16	224	Elevé
205	35	36	18	12	9	45	30	50	16	251	Très élevé
206	35	36	18	12	9	45	18	50	16	239	Elevé
207	35	36	18	12	9	30	30	50	16	236	Elevé
208	35	36	18	12	9	30	18	50	16	224	Elevé
209	35	36	18	12	5	45	30	50	16	247	Très élevé
210	35	36	18	12	5	45	18	50	16	235	Elevé
211	35	36	18	12	5	30	30	50	16	232	Elevé
212	35	36	18	12	5	30	18	50	16	220	Elevé
213	35	36	18	12	1	45	30	50	16	243	Elevé
214	35	36	18	12	1	45	18	50	16	231	Elevé
215	35	36	18	12	1	30	30	50	16	228	Elevé
216	35	36	18	12	1	30	18	50	16	216	Elevé
217	5	36	24	18	9	45	30	50	16	233	Elevé
218	5	36	24	18	9	45	18	50	16	221	Elevé
219	5	36	24	18	9	30	30	50	16	218	Elevé
220	5	36	24	18	9	30	18	50	16	206	Moyen
221	5	36	24	18	5	45	30	50	16	229	Elevé
222	5	36	24	18	5	45	18	50	16	217	Elevé
223	5	36	24	18	5	30	30	50	16	214	Elevé
224	5	36	24	18	5	30	18	50	16	202	Moyen
225	5	36	24	18	1	45	30	50	16	225	Elevé
226	5	36	24	18	1	45	18	50	16	213	Elevé

227	5	36	24	18	1	30	30	50	16	210	Elevé
228	5	36	24	18	1	30	18	50	16	198	Moyen
229	5	36	24	20	9	45	30	50	16	235	Elevé
230	5	36	24	20	9	45	18	50	16	223	Elevé
231	5	36	24	20	9	30	30	50	16	220	Elevé
232	5	36	24	20	9	30	18	50	16	208	Moyen
233	5	36	24	20	5	45	30	50	16	231	Elevé
234	5	36	24	20	5	45	18	50	16	219	Elevé
235	5	36	24	20	5	30	30	50	16	216	Elevé
236	5	36	24	20	5	30	18	50	16	204	Moyen
237	5	36	24	20	1	45	30	50	16	227	Elevé
238	5	36	24	20	1	45	18	50	16	215	Elevé
239	5	36	24	20	1	30	30	50	16	212	Elevé
240	5	36	24	20	1	30	18	50	16	200	Moyen
241	5	36	24	12	9	45	30	50	16	227	Elevé
242	5	36	24	12	9	45	18	50	16	215	Elevé
243	5	36	24	12	9	30	30	50	16	212	Elevé
244	5	36	24	12	9	30	18	50	16	200	Moyen
245	5	36	24	12	5	45	30	50	16	223	Elevé
246	5	36	24	12	5	45	18	50	16	211	Elevé
247	5	36	24	12	5	30	30	50	16	208	Moyen
248	5	36	24	12	5	30	18	50	16	196	Moyen
249	5	36	24	12	1	45	30	50	16	219	Elevé
250	5	36	24	12	1	45	18	50	16	207	Moyen
251	5	36	24	12	1	30	30	50	16	204	Moyen
252	5	36	24	12	1	30	18	50	16	192	Moyen
253	5	36	18	18	9	45	30	50	16	227	Elevé
254	5	36	18	18	9	45	18	50	16	215	Elevé
255	5	36	18	18	9	30	30	50	16	212	Elevé
256	5	36	18	18	9	30	18	50	16	200	Moyen
257	5	36	18	18	5	45	30	50	16	223	Elevé
258	5	36	18	18	5	45	18	50	16	211	Elevé
259	5	36	18	18	5	30	30	50	16	208	Moyen
260	5	36	18	18	5	30	18	50	16	196	Moyen
261	5	36	18	18	1	45	30	50	16	219	Elevé
262	5	36	18	18	1	45	18	50	16	207	Moyen
263	5	36	18	18	1	30	30	50	16	204	Moyen
264	5	36	18	18	1	30	18	50	16	192	Moyen
265	5	36	18	20	9	45	30	50	16	229	Elevé
266	5	36	18	20	9	45	18	50	16	217	Elevé
267	5	36	18	20	9	30	30	50	16	214	Elevé
268	5	36	18	20	9	30	18	50	16	202	Moyen
269	5	36	18	20	5	45	30	50	16	225	Elevé
270	5	36	18	20	5	45	18	50	16	213	Elevé
271	5	36	18	20	5	30	30	50	16	210	Elevé
272	5	36	18	20	5	30	18	50	16	198	Moyen

273	5	36	18	20	1	45	30	50	16	221	Elevé
274	5	36	18	20	1	45	18	50	16	209	Elevé
275	5	36	18	20	1	30	30	50	16	206	Moyen
276	5	36	18	20	1	30	18	50	16	194	Moyen
277	5	36	18	12	9	45	30	50	16	221	Elevé
278	5	36	18	12	9	45	18	50	16	209	Elevé
279	5	36	18	12	9	30	30	50	16	206	Moyen
280	5	36	18	12	9	30	18	50	16	194	Moyen
281	5	36	18	12	5	45	30	50	16	217	Elevé
282	5	36	18	12	5	45	18	50	16	205	Moyen
283	5	36	18	12	5	30	30	50	16	202	Moyen
284	5	36	18	12	5	30	18	50	16	190	Moyen
285	5	36	18	12	1	45	30	50	16	213	Elevé
286	5	36	18	12	1	45	18	50	16	201	Moyen
287	5	36	18	12	1	30	30	50	16	198	Moyen
288	5	36	18	12	1	30	18	50	16	186	Moyen

Résumé

Les cartes de vulnérabilité des aquifères sont des outils utiles pour contribuer à la protection des ressources hydriques souterraines contre une éventuelle pollution.

L'objectif de cette étude est de déterminer la vulnérabilité à la pollution de la nappe superficielle de Boulimat en se basant sur la méthode DRASTIC-EC-SO₄²⁻. Les paramètres étudiés sont la Profondeur de la nappe(D), Recharge efficace de l'aquifère(R), la lithologie de l'aquifère(A), type de sol(S), topographie(T), impact de la zone vadose(I), conductivité hydraulique de l'aquifère(C), conductivité électrique (Ec) et l'analyse des sulfates des eaux souterraines. La cartographie de ces différents paramètres permet, après leur superposition, l'établissement de la carte de vulnérabilité.

La carte obtenue a mis en évidence trois zones à différents degrés de vulnérabilité : une zone à vulnérabilité moyenne, une zone à vulnérabilité élevée, et une zone à vulnérabilité très élevée.

L'exploitation de la carte de vulnérabilité contribue à la protection durable des ressources naturelles. La projection des sources de pollution sur la carte de vulnérabilité nous a permis d'établir la carte de risque.

Mots clés : *vulnérabilité, aquifères, pollution, eaux souterraines, Boulimat, carte de risque, DRASTIC-EC-SO₄²⁻.*

Abstract

Aquifer vulnerability maps are useful tools for contributing to the protection of underground water resources from possible pollution.

The objective of this study is to determine the vulnerability to pollution of surface Boulimat ply based on the DRASTIC-EC-SO₄²⁻ method The parameters studied are the depth of the web (D), effective recharge of aquifer (R), aquifer lithology (A), soil type (S), topography (T), vadose zone impact (I), hydraulic conductivity of the aquifer (C), electrical conductivity (Ec) and sulfate analysis of groundwater. The mapping of these different parameters allows, after their superposition, the establishment of the vulnerability map.

The resulting map highlighted three areas with varying degrees of vulnerability: a medium vulnerability area, a high vulnerability area, and a very high vulnerability area.

The exploitation of the vulnerability map contributes to the sustainable protection of natural resources. The projection of the pollution sources on the vulnerability map allowed us to establish the risk map.

Key words: *vulnerability, aquifers, pollution, groundwater, Bulimat, risk map, DRASTIC-EC-SO₄²⁻.*