

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère De l'Enseignement Supérieur et De la Recherche Scientifique

Université Abbés Laghrou – Khenchela -

Faculté des Sciences de la Nature Et de la Vie

Département Ecologie et Environnement



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

جامعة عباس لغرور خنشلة

كلية علوم الطبيعة والحياة

قسم البيئة والمحيط

Mémoire MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Science de la nature et de la vie.

Filière : Ecologie et environnement.

Spécialité : Protection des écosystèmes.

## THEME

**Vulnérabilité des eaux souterraines et périmètre de protection  
dans le bassin versant Ank Djemel (NE Algérie).**

**Présenté par :**

1. CHOUFAOUI Chaima.
2. RIHIA Ikram.

**Devant le jury:**

- Président: Mr. AOUIDANE Laiche MCA Université de Khenchela.
- Encadrant : Mr. BOULABAIZ Mahrez MCA Université de Khenchela.
- Examineur: Mme.BERKANI Cherifa MCB Université de Khenchela.

**Année Universitaire:2022/2023**





## *Remerciement*

*Nous remercions Dieu le tout puissante nous avoir donnés la santé et la volonté d'entamer et de terminer ce travail.*

*Nos vifs remerciements à notre encadreur **Mr. BOULABAIZ Mahrez***

*Qui a accepté de diriger ce mémoire et pour sa patience, sa disponibilité durant la préparation de ce mémoire, pour ses encouragements et ses commentaires bienveillants particulièrement appréciables dans les moments de doute.*

*Nous disons merci à **BOUALI Houria** afin de faciliter notre travail en fournissant des informations et des données sans aucune hésitation.*

*Nous remercie tout particulièrement messieurs les membres de Jury **Mr. AOUIDANE Laiche** et **Mme. BERKANI Cherifa** d'avoir accepté d'examiner ce modeste travail.*

*Un autre grand merci va à l'université d'Abess Laghrour khenchela, en particulier à tous les enseignants du département de l'Ecologie et Environnement.*

*Enfin, nous tenons à remercier toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.*



*Chaima & Ikram*

## *Dédicace*

*Avec l'expression de ma reconnaissance, je dédie ce modeste travail à ceux qui, quels que soient les termes embrassés, je n'arriverai jamais à leur exprimer mon amour sincère.*

*A l'homme, mon précieux offre du dieu, qui doit ma vie, ma réussite et tout mon respect : mon cher père Ali.*

*A la femme qui a souffert sans me laisser souffrir, qui n'a jamais dit non à mes exigences et qui n'a épargné aucun effort pour me rendre heureuse: mon adorable mère Djemaa.*

*A vous mes frères (Seddik, Omar, Salah) et sœurs (Fouzia, Fairouz) qui m'avez toujours soutenu et encouragé durant ces années d'études.*

*Mes très chères et fidèles amies : Nadjet, Salsabile, Chaima, Soumia, Aoulia, Dalal, Radia.*

*A tous les amis que je n'ai pas mentionnés sans exception.*

*Sans oublier mon binôme Ikram pour son soutien moral, sa patience et sa compréhension tout au long de ce projet.*

*A tous mes enseignants de tous les cycles d'étude.*

*A toutes mes collègues de ma promotion de protection des écosystèmes et M03 sans exceptions.*

*A ceux qui m'ont connu de près ou de loin.*

*Chaima Choufaoui*



# *Dédicace*

*Je dédie ce travail:*

*A l'âme de mon père décédé;*

*A ma mère qui m'a accompagné tout au long du parcours académique avec  
encouragements et supplications;*

*A mon frère Amar et ma sœur Chaima pour leur soutien et leur soutien  
durant la réalisation de ce travail;*

*À mon fiancé Seif Eddine ; l'homme qui m'a soutenu tout au long de la  
période de travail;*

*Ma très chère et fidèle amie : Nadjatte; Chaima ;*

*A tous les amis que je n'ai pas cités sans exception;*

*Sans oublier la personne la plus importante, ma collègue et partenaire  
Chaima, pour sa coopération et sa compréhension de tous les cas que nous  
avons vécus au cours du projet;*

*A tous mes enseignants de tous les cycles d'étude;*

*A toutes mes collègues de ma promotion de protection des écosystèmes et  
M03 sans exceptions;*

*A ceux qui m'ont connu de près ou de loin.*

*Ikram Rihia*



# TABLE DE MATIERE:

**REMERCIEMENT**

**DEDICACES**

**TABLE DE MATIERE**

**LISTE DES ABREVIATIONS**

**LISTE DES FIGURES**

**LISTE DES TABLEAUX**

**RESUME**

**ABSTRACT**

**ملخص**

**Introduction générale : ..... 1**

## **Chapitre I: Présentation de la zone d'étude**

**1.Introduction.....4**

**2.Situation géographique.....4**

**4.Climat générale.....7**

**5. Réseau hydrographique .....8**

**6. Géologie .....9**

**7.Milieu biotique .....12**

**7.1- Faune : .....12**

**7.2- Flore : .....13**

**8-Activités anthropiques : .....13**

**9-Conclusion:.....13**

## **Chapitre II:Etude morphométriques**

**1.Introduction : .....14**

**2- Paramètres géométriques: .....14**

**2.1- La superficie (S) : .....14**

**2.2- Le périmètre (P) : .....14**

**3-Paramètres morphométriques : .....14**

**3.2- Rectangle équivalent : .....15**

**3.3- Courbes hypsométriques.....16**

3.3.1- La courbe hypsométrique :	16
3.4- Les indices de pente :	17
3.5-Dénivelée spécifique (Ds) :	19
3-6- Le réseau hydrographique :	20
3.7.1- Densité de drainage (Dd):	20
3.7.2-Temps de concentration (Tc) :	21
3.7.4- La vitesse d'écoulement (V) :	21
4-Conclusion :	23
<b>CHAPITRE III:Vulnérabilité et périmètre de protection des eaux souterraines</b>	
1.Introduction :	25
2. Revue de littérature	25
2.1.La pollution des eaux souterraines:	25
2.1.1- Définition de la pollution des eaux souterraines :	25
2.1.2- Les sources de pollution des eaux souterraines:	25
3-Notion de vulnérabilité à la pollution :	26
4-Les types de vulnérabilité :	26
5.Les critères de vulnérabilité:	26
6.Les périmètres de protection :	27
6-1- Définition :	27
6-2- L'objectif des périmètres :	27
7- Indice de susceptibilité SI :	28
7-1-Les paramètres de méthode SI	29
7-2- Classe et note des paramètres méthode si	30
7.2.1-Profondeur de la surface de la nappe D :	30
7.2.4-L'occupation des sols:	31
8.Méthodologies d'application de la méthode SI:	32
8.1.Les classes d'indices SI et leurs degrés de vulnérabilité	32
9.Matériel et méthode:	34
10. Résultats de la méthode SI:	35

<b>11. Calcul de l'indice de vulnérabilité SI :</b> .....	40
<b>12. Carte de vulnérabilité spécifique SI :</b> .....	40
<b>13- Périmètre de protection proposée :</b> .....	43
<b>14. Conclusion.....</b>	45
<b>Conclusion Générale .....</b>	46
<b>Références bibliographique .....</b>	44

Liste des abréviations :

<b>BV</b>	<b>Bassin Versant</b>
<b>ESRI</b>	Institut de recherche sur les systèmes environnementaux
<b>ETP</b>	Evapotranspiration Potentielle.
<b>LU</b>	Land use factor
<b>MNT</b>	Modèle numérique de terrain
<b>OS</b>	Occupation du sol
<b>SI</b>	Indice de susceptibilité
<b>SIG</b>	Système d'information géographique

## Liste des figures :

<b>Figure 1:</b> Sebkhets du bassin versant Ank djemel. -----	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
<b>Figure2 :</b> situation géographique de la zone d'étude -----	4
<b>Figure3 :</b> Les classes d'altitudes de bassin versant Ank Djemel -----	7
<b>Figure4 :</b> Réseau hydrographique -----	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
<b>Figure 5:</b> La carte géologique de bassin versant Ank Djemel-----	121
<b>Figure 6:</b> La courbe hypsométrique -----	17
<b>Figure 7:</b> Schéma représentatif des périmètres de protection -----	28
<b>Figure 8:</b> Organigramme présente les étapes de la réalisation de la carte de vulnérabilité SI.-----	354
<b>Figure 9:</b> La carte de profondeur des eaux souterraines de bassin versant Ank Djemel. -----	365
<b>Figure10 :</b> La carte de la recharge nette.-----	376
<b>Figure 11:</b> La carte de lithologie.-----	<b>Error! Bookmark not defined.</b> 7
<b>Figure 12:</b> La carte de pente.-----	38
<b>Figure 13:</b> La carte de l'occupation de sol.-----	39
<b>Figure14 :</b> Calculatrice raster. -----	41
<b>Figure15 :</b> Carte de vulnérabilité SI de bassin versant Ank Djemel. <b>Error! Bookmark not defined.</b> 0	
<b>Figure16 :</b> Le cercle relatif représente les pourcentages de vulnérabilité du bassin. ---	43
<b>Figure 17:</b> Les périmètres de protection.....	44

## Liste des tableaux:

<b>Tableau 1:</b> Liste et caractéristiques des sites présentent dans le bassin versant Ank Djemel. ....	6
<b>Tableau 2:</b> La répartition de la surface en fonction de l'altitude. ....	16
<b>Tableau4:</b> Classification ORSTOM du relief selon l'indice de pente global. ....	19
<b>Tableau5:</b> Classification ORSTOM du relief selon la dénivelée spécifique. ....	20
<b>Tableau6:</b> récapitulatif des caractéristiques du bassin versant Ank Djemel. ....	22
<b>Tableau 7:</b> Les paramètres de la méthode SI. ....	29
<b>Tableau 8:</b> Classification et notation de la profondeur de la nappe. ....	30
<b>Tableau 9:</b> Classification et notation de la recharge nette. ....	30
<b>Tableau 10:</b> Classification et notation de la topographie. ....	31
<b>Tableau 11:</b> Classification et notation d'occupation des sols. ....	31
<b>Tableau 12:</b> Classification et valeur de facteurs d'occupation de sol. ....	31
<b>Tableau 13:</b> Classification et notation de la lithologie. ....	32
<b>Tableau14:</b> Les critères de vulnérabilité. ....	33
<b>Tableau 15:</b> Sources des données et mode de traitement de chaque paramètre. ....	33

## Résumé

Le bassin versant Ank Djemel se situe aux hauts plateaux constantinois dans le Nord-Est Algérien, constitue une réserve importante en eaux souterraines, qui nécessite une protection et préservation. Ici, nous avons évalué la vulnérabilité de l'aquifère à l'aide de la méthode de l'indice de susceptibilité (SI), considérée comme une méthode de vulnérabilité spécifique qui prend en considération l'impact des terres utilise des engrais chimiques, des activités anthropiques et des facteurs naturels comme source de contaminants dans les eaux souterraines. L'analyse des résultats de la carte de vulnérabilité obtenue a permis d'identifier quatre classes de vulnérabilité dans la zone d'étude. La classe de faible vulnérabilité, représentant 18,82 % de la superficie totale, La classe de vulnérabilité moyenne, couvrant 11,61 % de la superficie totale. La classe de vulnérabilité élevée, représentant 39,92 % de la superficie totale Enfin, la classe de vulnérabilité très élevée, couvrant 29,65 % de la superficie. Il est recommandé de définir des périmètres de protection adaptés à chaque classe de vulnérabilité identifiée. Les zones à faible vulnérabilité peuvent nécessiter des périmètres plus restreints, tandis que les zones à vulnérabilité élevée et très élevée nécessitent des périmètres plus étendus pour prévenir la contamination des eaux souterraines par les polluants agricoles.

**Mots-clés:** Eau souterraine, Vulnérabilité, Pollution, Périmètre de protection, NE Algérienne

## **Abstract**

The Ank Djemel watershed, located in the Constantine highlands in northeastern Algeria, constitutes an important groundwater reserve, which requires protection and preservation. Here, we assessed the vulnerability of the aquifer using the susceptibility index (SI) method, considered as a specific vulnerability method that takes into consideration the impact of land uses chemical fertilizers, anthropogenic activities and natural factors as a source of contaminants in groundwater. The analysis of the results of the vulnerability map obtained made it possible to identify four classes of vulnerability in the study area. The low vulnerability class, representing 18.82% of the total area, the medium vulnerability class, covering 11.61% of the total area. The high vulnerability class, representing 39.92% of the total area Finally, the very high vulnerability class, covering 29.65% of the area. It is recommended to define protection perimeters adapted to each class of vulnerability identified. Low vulnerability areas may require smaller perimeters, while high and very high vulnerability areas require larger perimeters to prevent groundwater contamination from agricultural pollutants.

**Keywords:** Groundwater, Vulnerability, Pollution, Protection perimeter, NE Algerian

## المخلص

يشكل حوض عنق الجمل الواقع في هضاب قسنطينة في شمال شرق، احتياطياً هاماً للمياه الجوفية ، الأمر الذي يتطلب الحماية والمحافظة عليه. هنا، قمنا بتقييم قابلية تعرض الخزان الجوفي للتأثر باستخدام طريقة مؤشر الحساسية (SI) ، والتي تعتبر طريقة ضعف محددة تأخذ في الاعتبار تأثير استخدامات الأرض للأسمدة الكيماوية والأنشطة البشرية والعوامل الطبيعية كمصدر للملوثات في المياه الجوفية. أتاح تحليل نتائج خريطة الضعف التي تم الحصول عليها تحديد أربع فئات من الضعف في منطقة الدراسة. فئة الضعف المنخفض، والتي تمثل 18.82% من المساحة الإجمالية، فئة الضعف المتوسط، وتغطي 11.61% من المساحة الإجمالية. فئة الضعف العالية، والتي تمثل 39.92% من المساحة الكلية أخيراً، فئة الضعف العالية جداً، والتي تغطي 29.65% من المنطقة. يوصى بتعريف محيطات حماية تتكيف مع كل فئة من فئات الثغرات الأمنية المحددة. قد تتطلب مناطق الضعف المنخفض محيطات أصغر، بينما تتطلب مناطق الضعف العالية والعالية للغاية محيطات أكبر لمنع تلوث المياه الجوفية من الملوثات الزراعية.

الكلمات المفتاحية: المياه الجوفية، الضعف، التلوث، محيط الحماية، شمال شرق الجزائر.



# INTRODUCTION GÉNÉRALE

## Introduction générale

L'eau, élément vital indispensable à la survie de toute forme de vie sur Terre, représente l'une des ressources naturelles les plus précieuses et essentielles à notre existence.

L'Algérie dispose de vastes ressources en eau souterraine, avec environ 4 milliards de mètres cubes d'eau renouvelable par an. Ces ressources sont principalement situées dans les aquifères du Sahara, notamment les aquifères du Complexe Terminal, du Continental Intercalaire et du Grand Erg Oriental (PNUD, 2009). Les eaux souterraines sont des ressources importantes pour l'eau potable, l'irrigation agricole, la biodiversité et le développement économique. Cependant, elles sont souvent menacées par des polluants de différentes natures : biologiques, chimiques ou physiques. De plus, les activités agricoles intenses, l'utilisation d'engrais chimiques et de produits phytosanitaires ont provoqué la contamination des eaux souterraines, créant ainsi un problème sérieux et complexe (Amharref et Bernoussi, 2007). L'est de l'Algérie est particulièrement touché par le problème de pollution de l'eau souterraine par les nitrates (Ghodbane, 2009).

La prévention de la pollution des nappes est d'une importance cruciale. Pour cela, les scientifiques et les gestionnaires développent des techniques d'évaluation de la vulnérabilité des aquifères afin de prédire quelles zones sont les plus vulnérables (Mueller et al., 2012; Chenini et al., 2015; Civita, 1994). La vulnérabilité d'un aquifère à la pollution est définie comme sa susceptibilité intrinsèque à la modification de la qualité et de la quantité d'eau souterraine dans l'espace et dans le temps, en raison de processus naturels et/ou de l'activité anthropique. Ces dernières années, l'évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines a fait l'objet de recherches intensives et diverses méthodes ont été développées. Récemment, plusieurs méthodes ont été utilisées pour étudier la vulnérabilité des aquifères, parmi lesquelles DRASTIC, GOD, SINTACS et SI (Aller et al., 1987; Van Stempvoort et al., 1992; Foster, 1987; Ribeiro, 2000).

Dans les régions arides et semi-arides, les eaux souterraines jouent un rôle d'autant plus crucial qu'elles représentent souvent la seule source d'eau potable, ce qui les rend essentielles au développement de ces régions. Dans des zones agricoles semi-arides

telles que le bassin versant de Ank Djemel, située au nord-est de l'Algérie, la nécessité d'accroître la production alimentaire impose l'intensification de l'irrigation et l'utilisation de produits agricoles tels que les engrais et les pesticides. Cela favorise le lessivage des excédents de ces produits, entraînant leur transfert vers les eaux souterraines. Par ailleurs, la multiplication des activités principalement agricole génère une multitude de polluants de nature azotée, mettant ainsi en péril la durabilité des systèmes environnementaux dans leur ensemble.

Le but de la présente étude est d'évaluer la vulnérabilité des eaux souterraines à la contamination d'origine agricole du bassin Ank Djemel, de reconnaître les zones sensibles à la pollution d'origine agricole en adoptant la méthode SI, et de déterminer les zones nécessitant un périmètre de protection.

Notre plan de travail est structuré comme suit :

Le premier chapitre présente les principales données caractérisant la zone d'étude d'Ank Djemel, en abordant le cadre général (situation géographique, synthèse géologique, réseau hydrographique et données climatologiques).

**Le deuxième chapitre** traite des caractéristiques morphométriques du bassin, c'est-à-dire des aspects liés à sa forme et à sa structure.

**Le troisième chapitre**, combine l'étude bibliographique de la vulnérabilité, l'interprétation et la discussion des résultats obtenus grâce à l'application de la méthode SI pour la classification de la vulnérabilité. Il permet également de définir le périmètre de protection pour les zones sensibles.

Enfin, à la fin du document, nous présenterons une conclusion générale qui réexposera la problématique, détaillera les étapes de travail entreprises, résumera les résultats obtenus et proposera des recommandations.



# **CHAPITRE I**

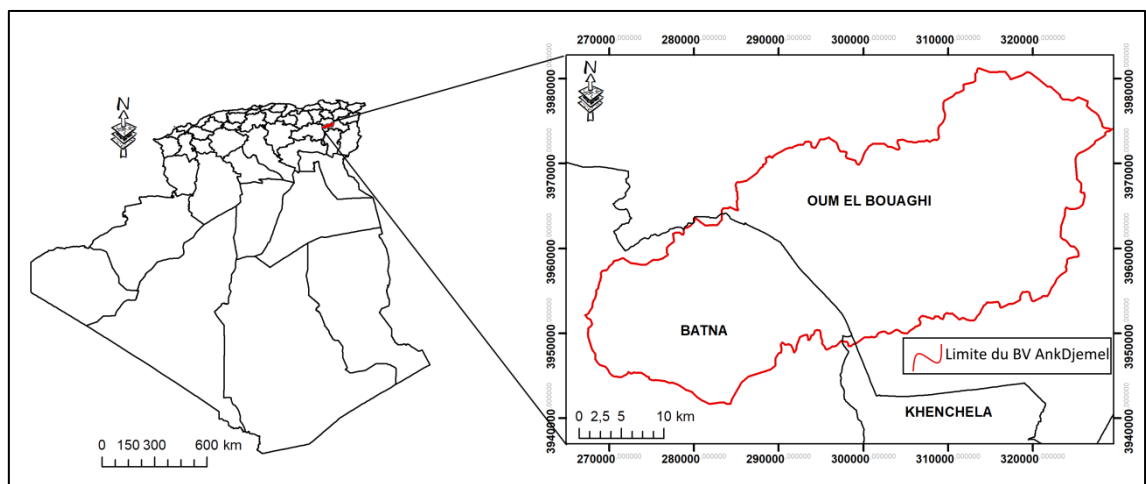
Présentation de la zone d'étude

## 1. Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons les principales caractéristiques physiques, hydrologiques et morphologiques du bassin versant Ank Djemel (Géologie, couvert végétal, faune, réseau hydrologique, etc.)

## 2. Situation géographique

Le bassin versant Ank Djemel est de superficie du 1243.97 km<sup>2</sup> avec un périmètre soit 202.19 km, est située au cœur des hautes plaines constantinoises, entre le sud de wilaya d'Oum ElBouaghi et le nord-est de wilaya de Batna. (Fig 1)



**Figure1:**situation géographique de la zone d'étude

Il contient 4 Sebket (Garaet) sont (Fig2):

### 2.1 Sebket Ank Djemel

Couvrant une superficie de 18140.41ha ; dépend de la wilaya d'Oum El Bouaghi, de la daïra d'Ain Fakroun et de la commune de Boughrara Saoudi. Son voisin Garaet Guelif.

Ce plan d'eau est le deuxième plan d'eau de la zone en termes de superficie, il est de nature temporaire, caractérisé par de l'eau salée, se lançant uniquement en automne et en hiver ; le reste de l'année il fait généralement sec. (Bensizerara,2014)

## 2.2 Garaet El-Marhsel

Le chott-sebkha est une dépression intérieure constituée d'un sol salin envahi par une végétation halophile. Administrativement, elle appartient à la wilaya d'Oum El Bouaghi, à la daïra d'Aïn Fakroun, à la commune de Boughrara Saoudi. Il est classé site Ramsar avec Ank Djemel depuis 2004. Il est entouré d'un massif montagneux composé principalement du Djebel El-Marhsel à l'ouest, des monts Oum Kechrid au nord et du Djebel Ank Djemel à l'hiver. et au Sud-Est, tandis que le Sud Garaet s'ouvre sur Sebkhet Ank Djemel.(**Anneb et Bouzid, 2021**)

## 2.3 Garaet Guellif

Ce chott est une dépression endoréique entièrement entourée de plantations céréalières, son niveau de salinité varie en fonction des facteurs climatiques. Le site est situé au nord d'Aïn-Zitoune, à 12 km au sud d'Oum El Bouaghi, accessible depuis la route reliant Oum El-Bouaghi à Khenchla. Elle est délimitée au nord par le Djebel Guellif, à l'est par le Djebel El Taref, au sud par le Djebel Fedjoudj, elle communique avec Garâet Ank-Djemel à l'ouest. Il est alimenté principalement par trois oueds non permanents, Talliserdine, El Houassi et Ourleiss qui prennent leur source dans les monts Touzzeline au Nord.(**Aliat, 2017**)

## 2.4 Sebkhet Djendli

Sebkhet Djendli couvre une superficie de 3700 ha, entourée de trois (03) massifs montagneux : Djebel Bou Arif au Sud, Djebel Tackouist et Toumbait au Nord et à l'Ouest, à l'Est-elle s'ouvre sur les plaines du Boulhilet et de chemora, principalement alimenté par l'eau de pluie, il est fréquenté par des espèces d'oiseaux aquatiques, dont les plus grands Belon (*Tadorna tadorna*) et flamants roses (*Phoenicopterus ruber*).

(**Boukaba, 2015.**)

Sebkhet Djendli est situé dans la partie Nord-est de la wilaya de Batna à 46 km du chef-lieu de cette dernière. Cette zone s'étend principalement sur le territoire de la commune de Boumai (Daïra d'El-Madher) avec une petite partie dans la commune de Boulhilet (Daïra de Chemora).(BENSIZERARA,2014)

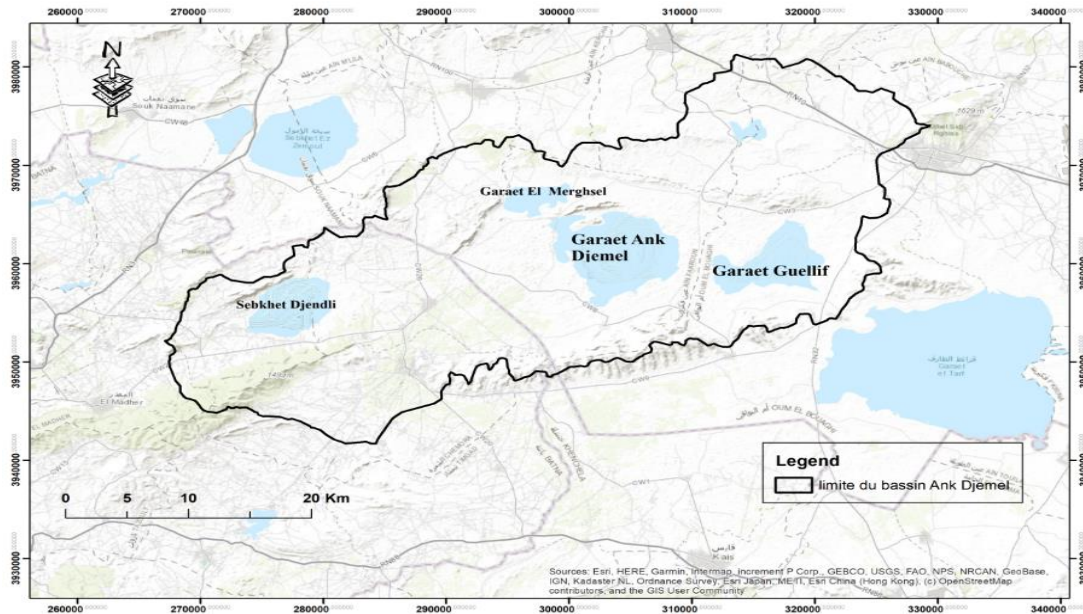


Figure 2: Sebkhets du bassin versant Ank djemel.

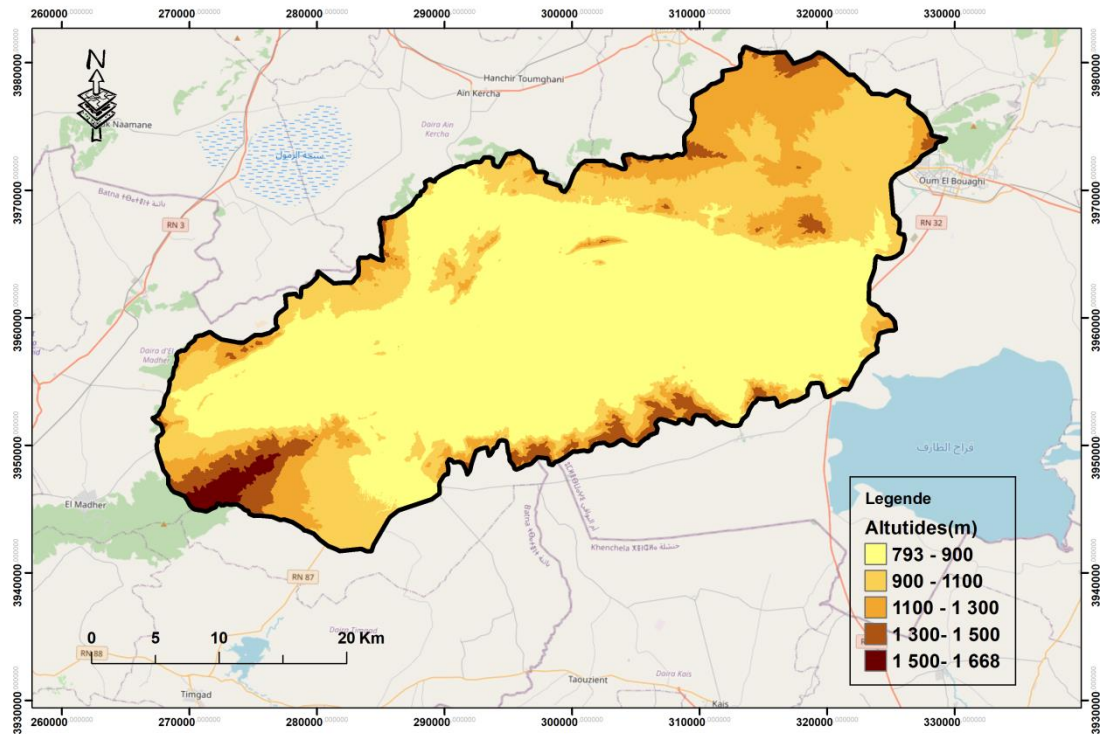
Tableau 1: Liste et caractéristiques des sites présentent dans le bassin versant Ank Djemel. (Aliat, 2016).

Nom de site	wilaya	Les coordonnées de site	Superficie (ha)	Ramsar convention
Garaet Ank Djemel	Oum Elbouaghi	35°47'N.06 °50'E	18140	Oui
Garaet el Merghsel	Oum Elbouaghi	35°49'N.06 °47'E	1000	Oui
Garaet Gulief	Oum Elbouaghi	35°47'N.06 °59'E	24000	Oui
Sebkheth Djendli	Batna	35° 35' N 06° 35' E	3700	Oui

### 3. L'Altitude

En observant la carte altimétrique (Fig. 3), on peut constater que le centre du bassin occupe la majeure partie de la surface et présente un relief relativement plat, avec des altitudes qui s'échelonnent entre 793 m et 900 m. Dans la partie nord-est du bassin, les altitudes sont d'une importance moyenne, variant entre 1100 m et 1300 m. En revanche,

dans la région nord-ouest du bassin, les altitudes sont plus élevées, atteignant des valeurs comprises entre 1500 m et 1668 m.



**Figure3:** Les classes d'altitudes de bassin versant Ank Djemel.

#### 4. Climat générale

Le climat de la zone d'étude est de type continental et fait partie de l'étage bioclimatique semi-aride. Il se caractérise par des hivers froids et des étés chauds et secs, ainsi que par une irrégularité des précipitations. Les vents dominants proviennent du Sud-Ouest, de l'Ouest et du Nord-Ouest. Les niveaux de précipitations varient de façon significative, avec une pluviométrie minimale de 107,7 mm et une pluviométrie maximale de 392 mm. La répartition saisonnière des précipitations est la suivante : 122 mm en hiver, 108 mm au printemps, 50 mm en été et 132 mm en automne. Les températures moyennes maximales varient de 6,11 °C en décembre à 38,27 °C en août. Les températures moyennes minimales sont de 2,07 °C en décembre, le mois le plus froid, et de 22,14 °C en août, le mois le plus chaud (Bousid et al., 2021).

## 5. Réseau hydrographique

Le réseau hydrographique représente l'ensemble des cours d'eau, affluents et sous-affluents, permanents ou temporaires, par lesquels s'écoulent les eaux de ruissellement et convergent vers un seul point de vidange du sous-bassin versant, également appelé exutoire (Ghodbane, 2009). Le réseau hydrographique du bassin d'Ank Djmel est relativement limité en développement. En raison du caractère semi-aride de la région, les affluents sont principalement temporaires. Parmi eux, le cours d'eau permanent de Chemora se distingue.

L'interprétation de la carte du réseau hydrographique (Fig.4) révèle des caractéristiques saisonnières de l'hydrologie du site, avec une période de remplissage des cours d'eau qui se produit généralement pendant l'automne et l'hiver. À moins d'années exceptionnellement pluvieuses, le niveau d'eau atteint rarement son pic maximal. Le réseau hydrographique principal, dépourvu d'affluents, joue un rôle crucial en drainant les eaux de pluie et les crues provenant des régions de Djebel El Tarf au nord-est, de Sidi R'ghiss à l'ouest, ainsi que des Djebels Touzaline, Yeddou et Oum Kechrid. Trois oueds temporaires majeurs, à savoir Berrou, Tallizerdine et Ghezal (un affluent de l'Oued Boulhilet), contribuent également à l'approvisionnement en eau du site. Les apports en eau dépendent des facteurs climatiques qui ont un impact direct sur les régimes des cours d'eau alimentant le site. La déshydratation de la zone est principalement causée par l'évaporation, qui devient particulièrement significative à partir du mois d'avril.

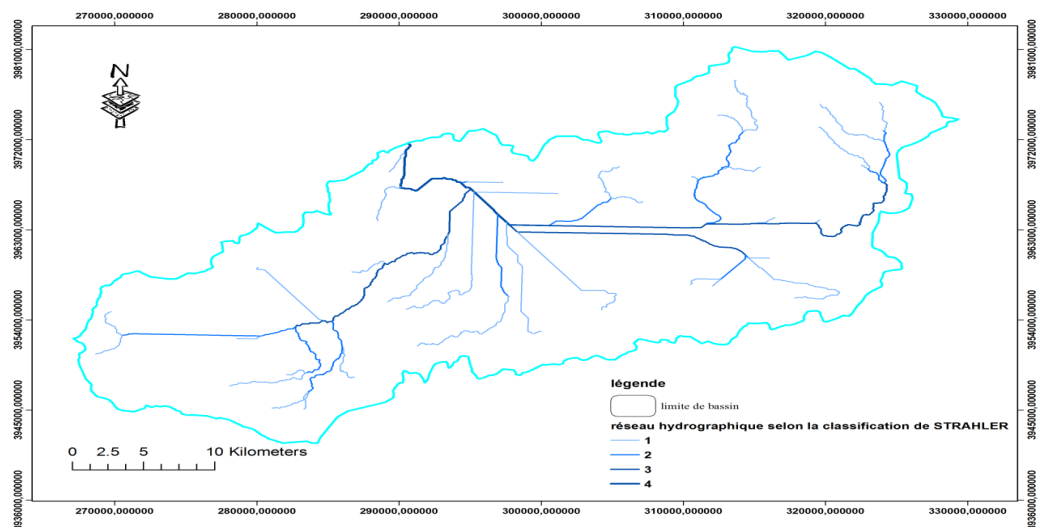


Figure4: Réseau hydrographique

## 6- Géologie

La géologie fournit des informations essentielles pour évaluer la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution. En comprenant la structure, la composition et les caractéristiques géologiques de l'aquifère, il est possible de cartographier les zones les plus sensibles à la pollution et de prendre des mesures de protection adéquates pour préserver la qualité des eaux souterraines.

L'examen de la carte géologique de la zone d'étude, montre les formations suivantes :

### 6.1. Quaternaire

#### 6.1.1. Alluvions actuelles et récentes

Les alluvions actuelles ou récentes ont une extension limitée dans le bassin versant de Ank Djamel. C'est de la boue et du gravier.

#### 6.1.2. Sols de sebkhas

Ce sont de vastes étendues de vases salines ou de sols salins stériles de Garaât Ghellife, Garaât Ank Djemal, Garaât El Maghsel, Sebkhas Djendli. Ces zones humides permanentes sont dépourvues de végétation, sauf à leur périphérie où commence une invasion de plantes halophiles.

#### 6.1.3. Sols salés anciens

Ils forment de grandes étendues de terre plates avec une végétation caractéristique de Salsolacée séparées par un sol nu. Ils correspondent à d'anciens sols aquatiques salins qui se sont asséchés avec le temps. Leur culture estivale est compliquée et peu faite. L'irrigation les rend cultivables localement. Les anciens sols salins se retrouvent surtout aux abords des chotts et des sebkhas.

#### 6.1.4. Quaternaire ancien (terre arable, formations de pentes, alluvions anciennes):

Il correspond à de grands aplats arables de faible pente, recouverts d'alluvions sombres, sur lesquels poussent des sols grossiers ou bruns. Leur âge est difficile à déterminer, probablement Soltaniens. Ces alluvions anciennes sont souvent rattachées à des glaciations polymorphes à faible pente. Ces glaciers sont très escarpés près des plaines et ont une pente croissante vers les montagnes. Les montagnes sont recouvertes de matériaux classiques faiblement corrigés (vase fine et gravier) et sont très fragmentées vers le bas, devenant plus grossières au voisinage des contreforts.

En profondeur, on rencontre souvent des croûtes calcaires multicouches, leurs âges attribués au Tensiftien, liaison entre les anciennes couches alluviales des plaines et les calottes glaciaires polygéniques créées par un manteau d'éléments fins et grossiers,

véhiculés par des écoulements de plaques au moment des pluies de printemps, août et septembre.

#### **6.1.5 Villafranchien probable**

Croûte calcaire géante La croûte calcaire géante occupe de grands espaces dans les zones basses. Ces formations, situées sur des surfaces antérieures, sont faciles à repérer. De manière générale, les coquilles calcaires de la région d'Oum El Bouaghi sont fragmentées par l'érosion, sous forme d'écaillage, leur position est assez proche de la roche calcaire ou cacaro-marneuse s'appelle la croûte calcaire.

#### **6.1.6. Mio-pliocène continental**

Formations lacustres, argileuses et calcaires Les formations du Pliocène moyen se développent principalement dans la partie occidentale de la ceinture, au sud du djebel GuelaâtOuledSellam, à l'ouest du djebel Tarf, au sud du djebel Oum Kechrid et du djebel Guellif, et à l'est du djebel GuernAhmer ; il s'agit généralement d'argiles jaunes et grises peu cohésives et de calcaires lacustres blancs ou roses qui reproduisent essentiellement l'étendue des calcaires et des grès, et se situent parfois directement au-dessus du Trias.

#### **6.1.7. Miocène**

Grès, marnes et calcaires gréseux Trois surplombs de cette formation existent au nord de la Meskiana (communes de Rahia et Bheir Chergui). Ce sont des roches calcaires gréseuses qui se trouvent probablement sur mars.

#### **6.1.8. Turonien inférieur (marno-calcaires)**

Des calcaires marneux turoniens émergent autour de JebelMetloug, El KoudiatGourine et à la surface de KoudiatDjabria et Argoub Bou Cheb. Des marnes beiges ou noires se trouvent sur une épaisseur de 70 à 150 m, entrecoupées de calcaires en couches décimétriques de 10 à 12 m d'épaisseur. Souvent les marnes campaniennes contenaient des débris calcaires de couleur ocre.

#### **6.1.9. Campanien (marnes et calcaires)**

Campanien (marnes et calcaires) affleurant sur les versants sud du djebel Boutekhma, il est constitué d'une alternance de marnes et de calcaires ; les marnes noires à ocre forment une couche de 70 à 100 m d'épaisseur contenant de rares alternances de calcaire ocre.

#### **6.1.10. Cénomaniens (marnes)**

C'est une succession de marnes grises ou parfois beiges de 300 à 450 m d'épaisseur (exception), cette formation pétrographique est riche en fossiles. A la base du Cénomaniens, c'est le Bulconien (argile calcaire, noir avec une rare alternance de calcaire marneux).

#### **6.1.11. Aptien et Maastrichtien supérieur (calcaire)**

L'Aptien contient de nombreux calcaires situés entre le grès de l'Albien et le rebord rugueux des affleurements de l'Aptien inférieur pratiquement dans toute la région. Le calcaire d'Aptien est formé de couches constituées essentiellement de blocs calcaires d'une épaisseur variant de 150 à 400 m.

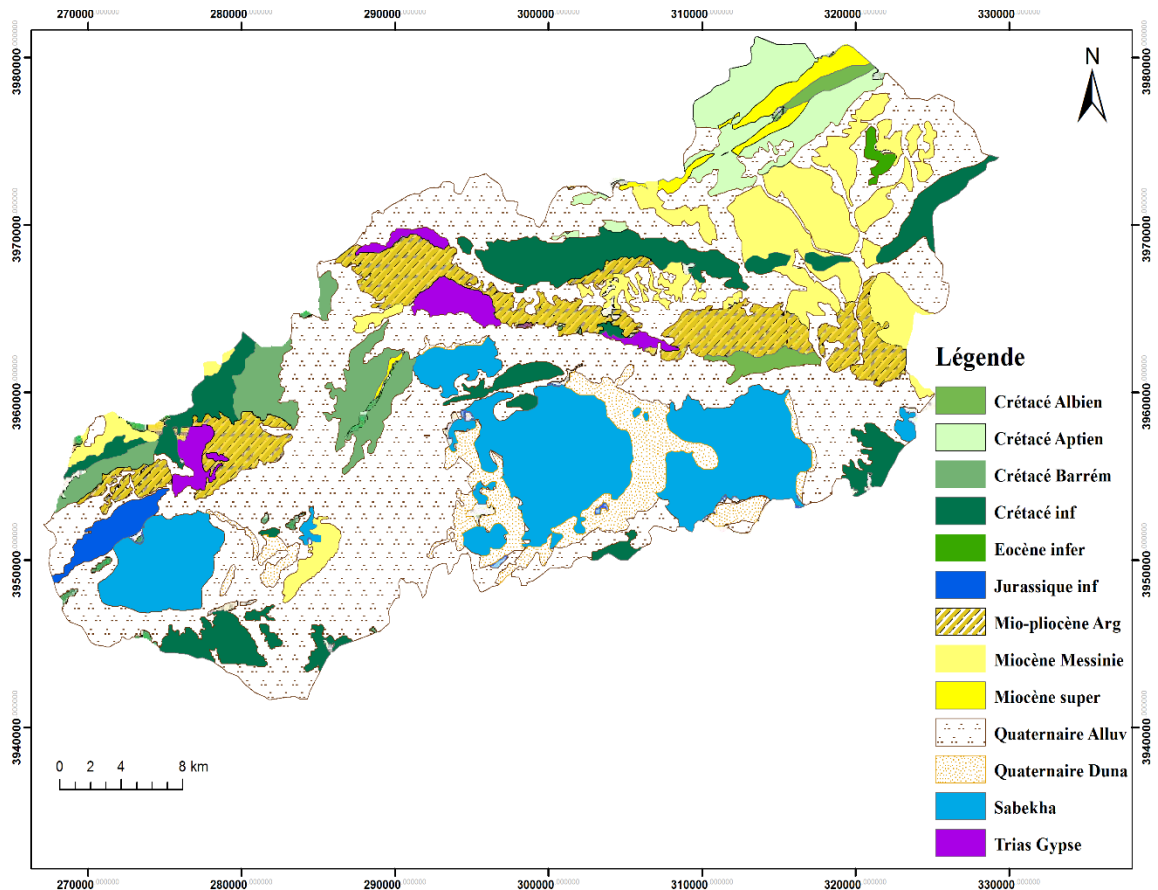
#### **6.1.12. Barrémien (calcaire et dolomite)**

Il s'agit d'une formation complexe organisée en larges bandes calcaires-dolomitiques séparées par des zones plus tendres où l'alternance argileuse ou argilo-limoneuse s'effectue assez mal.

#### **6.1.13. Trias (argiles et marnes bariolées, gypses broyés et glaçon)**

Le Trias est très répandu, présentant la forme classique de Constantine, d'une masse argileuse polychrome mixte, de plâtre concassé avec des débris calcaro-dolomiques.

**(Ghodbane, 2009)**



**Figure5:** La carte géologique de bassin versant Ank Djemel

## 7- Milieu biotique:

### 7.1- Faune

En l'absence d'un inventaire exhaustif, la faune mammalienne de la région comprend le renard roux (*Vulpes vulpes*), le chacal doré (*Canis aureus*), le lièvre du Cap (*Lepus capensis*) et le rat noir (*Rattus rattus*). Les amphibiens sont représentés par le crapaud mauritanien (*Bufo Mauritanica*) et le crapaud vert (*Bufo Viridis*), tandis que les reptiles comprennent l'Acanthodactylus, la tortue cistude (*Emys Orbicularis*) et les invertébrés tels que le Daphniasp., l'Artémia sp. et l'escargot pyramidale (*Helix Pyramidata*). En janvier 2003, lors des recensements hivernaux annuels, en raison d'inondations importantes, le site n'a pas pu faire l'objet d'observations en raison des difficultés d'accès liées aux précipitations pluviales. En revanche, l'avifaune a été davantage étudiée et en 2004, elle comprenait 5 425 flamants roses (*Phoenicopterus ruber roseus*) et 2 700 tadornes de Belon (*Tadorna tadorna*). (Bellatreche, Chalabi, 1988)

### 7.2- Flore

La végétation ne trouve pas des conditions favorables (lumière, température, humidité de l'air, composition chimique de l'eau...), pour sa croissance, la couverture végétale est xérophile (adaptée à l'aridité), l'arbre est absent, seules les plantes steppiques comme *Salicornia*, *Artemisia*, et *Atriplex*. En revanche, les cultures de blé et de l'orge peuvent se faire sans irrigation sur ces vastes hauts plains. (Rayen, 2022).

### 8-Activités anthropiques

L'agriculture intensive est la principale activité dans le bassin versant d'Ank Djemel surtout l'environ de Chemora et Boughrara Saoudi.

### 9-Conclusion

Le bassin versant d'Ank Djemel est d'une superficie de 1243.97km<sup>2</sup> ; Il est caractérisé par un climat semi-aride et un réseau hydrographique très important. Les formations géologiques prédominantes sont celles du Quaternaire et celles du Crétacé représentées par l'Aptien et le Barrémien. Cependant les argiles et les marnes gréseuses localisées dans la partie Sud de la Zone d'étude et les formations de calcaires sont assez peu représentées à Djebel Fedjoudj. Leur couvert végétale est faible et contient des espèces rares telles que le Flamant Rose. Le pâturage et l'agriculture est les principales activités dans la zone d'étude.



## **CHAPITRE II**

### **Etude morphométriques**

## 1- Introduction

L'étude de la morphométrie d'un bassin versant est une évaluation quantitative qui implique des paramètres numériques dont les valeurs sont dérivées à partir d'un MNT. L'analyse morphométriques est basée sur la géométrie du bassin versant et trois catégories de composantes majeurs, le réseau hydrographique, la forme du bassin versant et les caractéristiques du relief (Gagaai, 2009).

## 2- Paramètres géométriques

### 2.1- La superficie (S)

La surface topographique est le paramètre le plus important, elle permet de contrôler certains phénomènes hydrologiques (apport, précipitation ou infiltration.)

La superficie du bassin versant d'Ank Djemel est estimée par le logiciel Arc gis sur une carte MNT, soit 1243.97 Km<sup>2</sup>.

### 2.2- Le périmètre (P)

Le périmètre du bassin versant d'Ank Djemel soit 202.19 Km.

## 3-Paramètres morphométriques

La forme du bassin versant influence fortement le débit global et surtout le temps de réponse du bassin versant. C'est un profil géométrique projeté sur un plan horizontal. Un bassin versant étendu ne réagira pas de la même manière qu'un bassin versant creusé s'il est exposé aux mêmes conditions météorologiques.

### 3.1-Indice de compacité de GRAVILIUS. (Kc)

L'indice est établi en comparant la circonférence du bassin versant à la circonférence d'un cercle de même superficie. Plus cet indice est proche de 1, plus la surface du bassin est dense et plus le temps de concentration du bassin est court. Ce paramètre est estimé à l'aide de la formule suivante :

$$k_c = 0.28 * \frac{P}{\sqrt{S}}$$

Avec :

P : périmètre du bassin versant en (Km)

S : superficie du bassin versant en (Km<sup>2</sup>)

> L'application numérique :

$$k_c = 0.28 * \frac{202.19}{\sqrt{1243.97}}$$

$$k_c = 1.61$$

Selon la valeur de  $K_c$ , le bassin versant a une forme bien déterminée. Ainsi :

- ❖ Si  $K_c \leq 1$ : implique que le bassin versant à une forme circulaire.
- ❖ Si  $K_c = 1.12$ : implique que le bassin versant à une forme carrée.
- ❖ Si  $K_c > 1.12$ : implique que le bassin versant à une forme allongée.

Donc le bassin versant d'Ank Djemel est allongé et se rapproche d'un rectangle.

### 3.2- Rectangle équivalent

> **Les dimensions du rectangle équivalent**

Cette notion introduite par L. Roche en 1963, permet la comparaison des bassins versants entre eux, quant à l'influence de leurs caractéristiques physiques sur l'écoulement global. Quand l'indice de compacité est supérieur à 1.12, les dimensions du rectangle équivalent sont obtenues à l'aide des relations suivantes :

#### 3.2.1- Longueur équivalente:

Ce paramètre est calculé à l'aide de la formule suivante :

$$L = \frac{K_c \sqrt{S}}{1.12} \left[ \left( 1 + \sqrt{1 - \left( \frac{1.128}{K_c} \right)^2} \right) \right]$$

Ce qui nous donne une longueur :

$$L = 86.76 \text{ Km}$$

#### 3.2.2- Largeur équivalente

La largeur du rectangle est calculée à l'aide de la formule suivante :

$$l = \frac{K_c \sqrt{S}}{1.12} \left[ \left( 1 - \sqrt{1 - \left( \frac{1.128}{K_c} \right)^2} \right) \right]$$

Ce qui nous donne une largeur :

**l = 14.34 Km**

### 3.3- Courbes hypsométriques

Le relief d'un bassin est souvent caractérisé par la courbe de sa répartition hypsométrique.(Fig. 6)

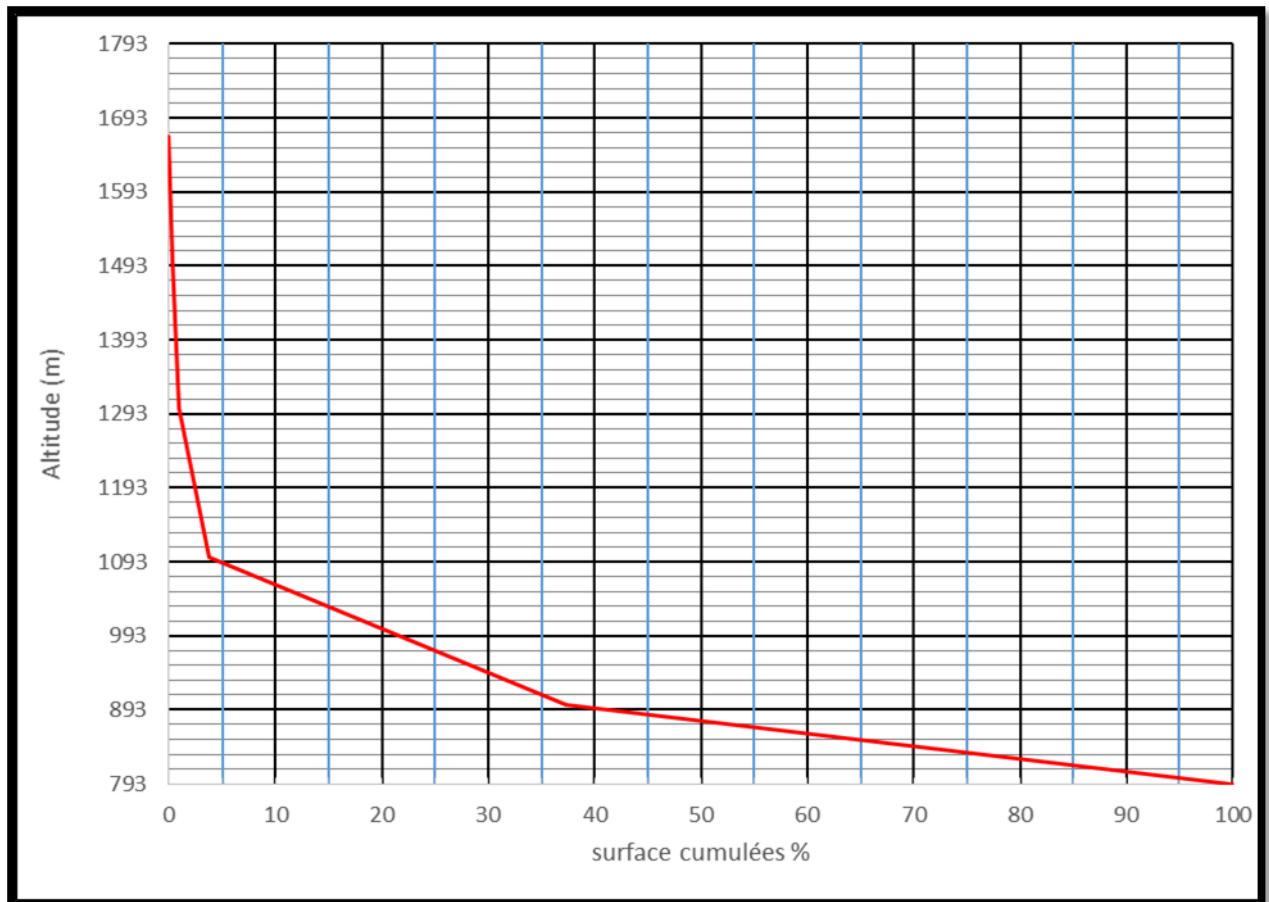
Elle est tracé en reportant en ordonnée l'altitude  $H$ , et, en abscisse le pourcentage de la surface du bassin dont l'altitude est à supérieure ou égale à  $H$ .

**Tableau 2:**La répartition de la surface en fonction de l'altitude.

Classe d'altitude	altitude (H)	Surface en Km <sup>2</sup>	Surface en %	S cumulée en %
793-900	793	780.59	62.7	100.00
900-1100	900	416.88	33.5	37.27
1100-1300	1100	34.99	2.8	3.77
1300-1500	1300	8.41	0.7	0.96
1500-1668	1500	3.55	0.3	0.29
	1668	1244.42	100	0.00

#### 3.3.1- La courbe hypsométrique

Pour le relief, on utilise la courbe hypsométrique, celle-ci renseigne sur la répartition de la surface en fonction de tranche d'altitude.



**Figure6:** La courbe hypsométrique

A partir de cette courbe on détermine les paramètres altimétriques :

- ✓ Altitude à 5% : **H5% = 1093 m**
- ✓ Altitude à 50% : **H50% = 875 m**
- ✓ Altitude à 95% : **H95% = 813 m**
- ✓ L'altitude maximale est obtenue directement des cartes topographique, elle correspond au point culminant: **H max= 1668 m**
- ✓ L'altitude minimale correspond à l'exutoire : **H min= 793 m**
- ✓ L'altitude moyenne : **H moy= 1237.5 m**

### 3.4- Les indices de pente

Le but de ces indices est de caractériser les pentes d'un bassin et de permettre des comparaisons et des classifications. Les indices de pente se déterminaient à partir de la courbe hypsométrique du bassin.

**3.4.1- Indice de pente de Roche(Ip)**

Ce paramètre est estimé à l'aide de la formule suivante :

$$Ip = \frac{1}{\sqrt{L}} \sum_{i=1}^n \sqrt{ai \cdot Di}$$

Avec :

L: Longueur du rectangle équivalent en km.

ai: Fractions de surfaces entre les deux courbes de niveau.

Di: équidistance entre deux courbes en m .

**Tableau3:** Paramètres de l'indice de pente.

Altitudes (m)	( Si × Di ) <sup>1/2</sup>
793-900	289
900-1100	288.75
1100-1300	83.65
1300-1500	41.01
1500-1668	24.42
Somme	726.83

Ces différentes étapes permettent d'avoir le résultat suivant :

$$Ip = 3.37$$

**3.4.2- Indice de pente globale (Ig)**

L'indice de pente globale est déterminé, à partir de la courbe hypsométrique en éliminant les valeurs extrêmes, de manière à ne garder que 90 % de l'aire du sous bassin. Pour cela on utilise la formule suivante :

$$Ig = \frac{D}{L} = \frac{H5\% - H95\%}{L}$$

D: La dénivelée entre la hauteur de 5% et la hauteur 95%

L: Longueur du rectangle équivalent

Ce qui nous donne :

$$I_g = 3.23 \text{ m/km.}$$

**Tableau4:** Classification ORSTOM du relief selon l'indice de pente global.

relief assez fort	$I_g > 35 \text{ m/km}$
relief fort	$20 < I_g < 35 \text{ m/km}$
relief modéré	$I_g < 20 \text{ m/km}$

Selon la valeur de "  $I_g$ ", on peut dire que le relief du bassin versant d'Ank Djemel est modéré.

### 3.4.3- Indice de pente moyenne ( $I_m$ )

La pente moyenne est une caractéristique importante du bassin, elle donne une bonne indication sur le temps de ruissellement des eaux.

Par définition  $I_m$  est exprimé par le rapport :

$$I_m = \frac{(H_{max} - H_{min})}{L}$$

Avec:

$H_{max}$  : l'altitude maximale du bassin versant (m) ;

$H_{min}$  : l'altitude minimale du bassin versant (m) ;

$L$  : longueur du rectangle équivalent (km).

Ce qui nous donne :

$$I_m = 10.09 \text{ m/km}$$

### 3.5-Dénivelée spécifique ( $D_s$ )

L'indice  $I_g$  décroît pour un même bassin, lorsque la surface augmente, il est donc difficile de comparer des bassins de taille différente, d'où la nécessité de l'introduction de la dénivelée spécifique ( $D_s$ ). Ce paramètre est définie comme étant le produit de l'indice de pente globale par la racine carrée de la surface du bassin versant. Cet indice indique l'état de relief et il est donné par la formule suivante :

$$D_s = I_g \times \sqrt{S}$$

Avec :

$I_g$  : indice de pente globale.

$S$  : la surface du bassin versant.

L'application de cette formule permet d'avoir le résultat suivant :

$D_s = 113.83$  m.

**Tableau5:** Classification ORSTOM du relief selon la dénivelée spécifique.

R1	Relief très faible	$D_s < 10m$
R2	Relief faible	$10 < D_s < 25m$
R3	Relief assez faible	$25 < D_s < 50m$
R4	Relief modéré	$50 < D_s < 100m$
R5	Relief assez fort	$100 < D_s < 250m$
R6	Relief fort	$250 < D_s < 500m$
R7	Relief très fort	$D_s > 500m$

Donc on remarque que le relief de bassin d'Ank Djemel est un relief assez fort.

### 3-6- Le réseau hydrographique

La région étudiée est caractérisée par un réseau hydrographique très important (Fig.04).

### 3.7- Caractéristiques du réseau hydrographique

#### 3.7.1- Densité de drainage (Dd)

La densité de drainage est étroitement liée à deux facteurs :

La lithologie et les précipitations. Cet indice permet d'apprécier l'importance du réseau hydrographique dans le bassin versant, les géomorphologies l'appellent, densité des talwegs, densité de drainage.

Elle exprime la longueur moyenne du réseau hydrographique sur une superficie de  $1Km^2$  du bassin versant. C'est à dire le rapport de la longueur totale de tous les cours d'eau sur la superficie du bassin versant. En utilisant la formule suivante :

$$Dd = \sum_{i=1}^n \frac{Lx}{S}$$

Où:

**Dd**: densité de drainage en (km/km<sup>2</sup>)

**Lx**: longueur totale cumulée de l'ensemble des talwegs .

**S**: superficie du bassin versant; S = 1243.97 km<sup>2</sup>

**On aura :**

$$Dd = 0.66 \text{ km/km}^2$$

### 3.7.2-Temps de concentration (Tc)

C'est le temps parcouru par une particule d'eau pour s'écouler depuis l'élément (point) hydrographiquement le plus éloigné, jusqu'à l'exutoire. Plusieurs formules permettent de calculer ce paramètre.

#### > Formule de GIANDOTTI

Le temps de concentration est estimé selon Giandotti par la formule suivante :

$$Tc = \frac{4\sqrt{s} + 1.5 Lp}{0.8(Hmoy - Hmin)^{1/2}}$$

Avec :

**Tc** : temps de concentration (**heures**)

**Lp** : longueur du talweg principal (**Lp=44.09km**)

**H min** : altitude minimale.

**H moy** : altitude moyenne.

Ce qui nous donne :

$$Tc = 12.29 \text{ heures.}$$

### 3.7.4- La vitesse d'écoulement (V)

Ce paramètre est estimé à l'aide de la formule suivante :

$$V = \frac{Lp}{Tc}$$

Donc :  $V = 3.59 \text{ km/h}$

Les paramètres morphométriques du bassin versant Ank Djemel sont reportés dans le tableau n°06.

**Tableau6:** récapitulatif des caractéristiques du bassin versant Ank Djemel.

N°	Symboles	Paramètres	Valeurs	Unités
01	S	Superficie du bassin versant	1243.97	Km <sup>2</sup>
02	P	Périmètre du bassin versant	202.19	km
03	Hmax	Altitude maximale	1668	m
04	Hmoy	Altitude moyenne	1237.5	m
05	Hmin	Altitude minimale	793	m
06	H5%	Altitude 5 %	1093	m
07	H95%	Altitude 95%	813	m
08	Kc	Indice de compacité de GRAVILUS	1.61	-
09	L	Longueur du rectangle équivalent	86.76	km
10	l	Largeur du rectangle équivalent	14.34	km
11	Ig	Indice de pente global	3.23	km /m
12	Lp	Longueur du talweg principal	44.09	km
13	Dd	Densité de drainage	0.66	Km/km <sup>2</sup>
14	Tc	Temps de concentration	12.29	h
15	V	Vitesse de l'écoulement	3.59	Km/h

#### 4- Conclusion

Le bassin versant d'Ank Djemel se présente sous forme d'un bassin allongé avec une superficie de 1243.97 km<sup>2</sup>. Il est caractérisé par un relief entre modéré et assez fort.

L'analyse morphométrique a permis de voir que le réseau hydrographique est très peu développé avec une densité de drainage ( $Dd=0.66\text{km/km}^2$ ). et les indices de pente et de compacité permettent de dire que les eaux du sous-bassin versant tendent à ruisseler plutôt que de s'infiltrer. Ceci aura des répercussions sur le plan hydrologique.

# **CHAPITRE III**

**Vulnérabilité et périmètre de protection des  
eaux souterraines**

## 1. Introduction

La cartographie de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines permet d'identifier les zones à haut risque de contamination, quel que soit le type de polluant. Elle devrait en principe conditionner les plans d'occupation des sols ou, du moins, permettre de cibler les zones où des mesures rigoureuses de protection devraient être adoptées. (Dahbia et al, 2020)

Cependant, il est important de choisir une méthode qui satisfasse aux recommandations de concepteurs, en tenant compte des conditions hydrogéologiques, de la disponibilité des informations et du nombre de paramètres utilisés (Aller et al, 1987). En raison des activités agricoles exercées dans la zone d'étude, la méthode de l'indice de susceptibilité SI (Susceptibilité Index) (Ribeiro, 2000) a été choisie pour cartographier la vulnérabilité spécifique aux nitrates. Cette méthode a également été utilisée pour déterminer les périmètres de protection des forages destinés à l'approvisionnement en eau potable (AEP) ou à l'irrigation.

## 2. Revue de littérature

### 2.1. La pollution des eaux souterraines

#### 2.1.1- Définition de la pollution des eaux souterraines

Les eaux souterraines sont dans la plupart des cas de meilleure qualité que les eaux de surface car elles sont moins directement exposées aux polluants. Cependant, si les contaminants sont généralement plus discrets, ils peuvent persister plus longtemps et être plus difficiles à éliminer. L'eau souterraine étant souvent utilisée pour fournir de l'eau potable, la protéger des contaminants est un enjeu majeur. (Brahmi et Boossadia, 2019)

#### 2.1.2- Les sources de pollution des eaux souterraines

Les sources sont diverses et sont associées à de nombreuses activités :

- Déchets municipaux dus à la collecte et au traitement des eaux usées des ménages, des équipements publics, des entreprises, ainsi qu'au ruissellement des eaux pluviales en milieu urbain, problèmes de collecte des eaux usées urbaines (individus mal raccordés, fuites et saturation du réseau).
- Déchets agricoles causés par l'infiltration des eaux pluviales dans le sol, épandage de produits chimiques sur le sol (engrais, pesticides,...)

• Déchets industriels dans le milieu naturel sans traitement : Intensification : Le degré de pollution des nappes phréatiques dépend de plusieurs paramètres, notamment la nature des milieux sécants, qui détermine le taux d'infiltration (**Benhamida et Bouguetit, 2015**).

### 3- Notion de vulnérabilité à la pollution

La notion de vulnérabilité repose sur l'idée que le milieu physique, en relation avec la nappe d'eau souterraine, procure un degré plus ou moins élevé de protection vis-à-vis des pollutions, selon les caractéristiques du milieu.

La vulnérabilité est un terme introduit en hydrogéologie par Margat en 1960 et a été choisi afin de sensibiliser la pollution au fait que même si la notion d'eau souterraine est associée à une image de pureté, cette ressource n'en reste pas moins sensible aux agents extérieurs et susceptible d'être polluée. (**Brahmi et Boussadia, 2019**)

### 4- Les types de vulnérabilité

Selon la nature et la structure des sols aquifères le concept de vulnérabilité pourra prendre des formes et des degrés variés de manière à mettre en évidence les capacités de résistances naturelles diverses des milieux.

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

- **La vulnérabilité intrinsèque** : est le terme utilisé pour représenter les caractéristiques du milieu naturel qui détermine la sensibilité des eaux souterraines à la pollution par les activités humaines. (**Bakalowicz , 1999**)
- **La vulnérabilité spécifique** : est le terme utilisé pour définir la vulnérabilité d'une eau souterraine à un polluant particulier ou à un groupe de polluants. Elle prend en compte la propriété des polluants et leurs relations avec les divers composants la vulnérabilité intrinsèque. (**Guerdi et Chadoul, 2018**)

### 5. Les critères de vulnérabilité

La vulnérabilité d'une nappe dépend de multiples facteurs intervenant soit sur la nature et/ou la concentration, soit sur son temps de transfert. Elle est évaluée en prenant en compte les caractéristiques du sol, de la zone saturée et de la zone non saturée qui contrôlent le comportement des polluants. Un certain nombre de critères sont disponibles, ils sont associés aux ensembles souterrains (le sol, la zone saturée, la zone non saturée) (**Brella, 2019**)

## 6. Les périmètres de protection

### 6-1- Définition

Un périmètre est un espace physiquement limité (clôture, cercle de pierre, etc.) qui protège et protège l'accès à un espace d'intérêt esthétique ou patrimonial, ou d'un danger certain. Détermination de la protection périmétrique pour les puits d'exploitation des eaux souterraines comme un outil idéal pour avertir et atténuer toute source potentielle de contamination de la qualité des approvisionnements en eau potable. (Nessah et Omdi,2011)

### 6-2- L'objectif des périmètres

La mise en place de périmètres de protection des sources d'eau destinées à la consommation, et le suivi de la réglementation y afférente, améliorent la sécurité sanitaire en réduisant le risque de contamination microbienne ou toxique soudaine et importante. En contrôlant les activités polluantes potentiellement accidentelles susceptibles d'affecter la qualité de l'eau.

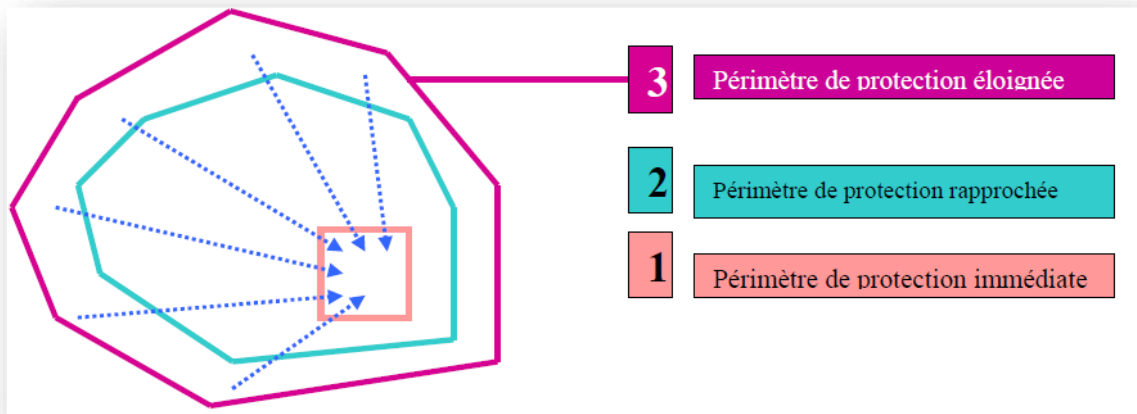
### 6-3- Les types des périmètres de protection

Trois Périmètres de protection sont définis, l'immédiat, le rapproché et l'éloigné (figure07).

- **Le périmètre de protection immédiat (PPI)** : Aussi connue sous le nom de zone de retrait. Ce périmètre a pour but de sécuriser les installations minières contre toute forme de dégradation et d'empêcher le déversement ou l'entrée de contaminants à l'intérieur ou à proximité du point de prélèvement. Les seules activités autorisées dans cette zone sont celles liées à l'exploitation et à l'entretien du bassin. Le périmètre de protection s'étend immédiatement sur une surface de 15 m<sup>2</sup> autour de l'ouvrage de captage. Les terrains situés dans cette zone sont acquis par l'Etat ou la collectivité locale et doivent être clôturés avec des matériaux solides. (Bussard,2005)
- **Le périmètre de protection rapproché (PPR)** ou zone protégée. Le but de cette ceinture est de protéger efficacement le bassin de la contamination dissoute dans les eaux souterraines ou de la pollution s'écoulant vers les réservoirs d'eau de surface. Le périmètre de protection étanche s'étend sur une surface de 150 m<sup>2</sup> autour de l'ouvrage de captage. Le terrain compris dans ce périmètre n'est pas la propriété de la Classe, il reste la propriété de son propriétaire actuel mais est soumis aux dispositions relatives au droit d'usage du sol décrites à l'article 13 du

présent arrêté. En cas de violations répétées des droits d'usage des terres dans ces ceintures, les terres où se sont déroulées les activités alléguées seront acquises par la Collectivité.

- **Le périmètre de protection éloigné (PPE)** ou zone d'alerte. Cette ceinture n'a pas vocation à conduire à la création d'ouvrages d'art mais à alerter les maîtres d'ouvrage, les maîtres d'œuvre, les bureaux d'études et le grand public sur la nécessité de préserver la qualité de l'eau dans cette zone (devoir de vigilance). Le périmètre de téléprotection s'étend sur une superficie de 500 m<sup>2</sup> autour de l'ouvrage de captage. Le terrain situé dans ce périmètre n'a pas été acquis par la Collectivité, il reste la propriété de l'actuel propriétaire.



**Figure 7:** Schéma représentatif des périmètres de protection. (Nessah et Omdi, 2011)

### 7- Indice de susceptibilité SI

La méthode SI (Sensitivity Index ou Sensitivity Index method), développée au Portugal par RIBEIRO (2000), estime une vulnérabilité longitudinale spécifique à la pollution agricole, notamment les nitrates. Prend en compte cinq paramètres. Les quatre premiers paramètres sont identiques aux quatre qui on étaient utilisés dans la méthode DRATIC, à savoir (D : profondeur de nappe, R : recharge effective de nappe, A : lithologie de nappe et T : topographie de pente), il introduit un nouveau paramètre lié à la "couverture terrestre". La classification utilisée pour ce paramètre est la classification CORINE Land Cover.

**7-1-Les paramètres de méthode SI**

Les poids attribués aux paramètres SI varient de 0 à 1 selon l'importance du paramètre dans la vulnérabilité.

**Tableau 3:** Les paramètres de la méthode SI.

	Paramètres	Propriété	Poids
<b>D</b>	Profondeur de la surface de la nappe	Profondeur de l'aquifère est facteur important dans l'étude de la vulnérabilité, car toute atténuation du polluant s'opère en relation avec la profondeur. Plus cette profondeur est élevée, plus le contaminant met beaucoup pour atteindre la surface piézométrique.	0,186
<b>R</b>	Recharge nette	définit la quantité d'eau est importante, plus la possibilité de contaminer la nappe est élevée.et c'est facteur important de la vulnérabilité. Généralement plus la quantité d'eau est importante, plus la possibilité de contaminer la nappe est élevé.	0,212
<b>A</b>	Nature lithologique de l'aquifère	Le facteur milieu aquifère met en relation la capacité des matériaux aquifères à stocker et à transporter les polluants dans les souterraines pendant l'infiltration dans les couches. caractérisé par la granulométrie des terrains saturés, plus la granulométrie est fine, plus le piégeage est grand.	0,259
<b>T</b>	Topographique (pente du terrain)	La topographie influence le développement du sol qui a un effet sur l'atténuation des contaminants. Plus la pente de la terre est grande, plus le ruissellement d'eau est grand et la pollution des eaux souterraines est très faible.	0,212
<b>Os</b>	L'occupation des sols	La couverture biophysique de la surface des	0,222

		terres émergées, s'est basée sur la vectorisation des différentes entités (roche, sol nu, habitation et zone humide)	
--	--	--	--

**7-2- Classe et note des paramètres méthode si**

Pour chacun des paramètres SI, une note est affectée sur une échelle entière allant de 1 (le moins important) à 10 (le plus important). Pour un paramètre donné, une note basse implique que la nappe concernée n'est pas vulnérable à la pollution et vice-versa.

- **Les tableaux suivants montrent les cotes typiques attribuées à chacun des 5 paramètres :**

**7.2.1-Profondeur de la surface de la nappe D**

La méthode SI donne une note à chaque profondeur (niveau statique d'eau).

**Tableau 4:** Classification et notation de la profondeur de la nappe. (Lallemand, 1994)

Les classes	Note
4.5 - 9	7
9.0 – 15.0	5
15 - 23	3
23 - 30	2
> 30	1

**7.2.2- Recharge nette**

Dans la méthode SI donne une note pour la Recharge.

**Tableau 5:** Classification et notation de la recharge nette.(Lallemand ,1994)

Les Classes	Note
0 - 50	1
50 -	3
100	6
100 -	8
175	9
175 -	
225	
> 225	

### 7.2.3- Topographique (pente du terrain) (T)

La méthode SI donne une note topographie de la terre.

**Tableau 6:** Classification et notation de la topographie. (Lallemand, 1994)

Les classes	Note
0à2	10
2à6	9
6à12	5
12à18	3
>18	1

### 7.2.4-L'occupation des sols

L'occupation de sol présente une pondération OSp de 0.222. dans la méthode SI donne une note à chaque les propriétés du sol de la zone.

**Tableau 7:** Classification et notation d'occupation des sols. (Lallemand, 1994)

Les classes	Note
Sols salins	1
Sols calcaires	3
Sols calciques	4
Sols alluvi basiques	8
Roche mère	2

Occupation des sols selon la classification CORINE Land Cover Valeur du facteur d'occupation des sols LU (Land use factor).

Une valeur appelée facteur d'occupation des sols et notée LU, variant de 0 à 100, est attribuée à chaque classe d'occupation des sols. Il est à signaler que les valeurs des cotes attribuées aux classes des différents paramètres ont été multipliées par 10 pour faciliter la lecture des résultats obtenus. Ces valeurs varient par conséquent de 0 à 100, allant du moins vulnérable au plus vulnérable.

**Tableau 8:** Classification et valeur de facteurs d'occupation de sol. (Lallemand, 1994)

Décharge industrielle, décharge d'ordures, mines	100
Périmètres irrigués, rizières	90
Carrière, chantier naval	80
Zones artificielles couvertes, zones vertes	75

Cultures permanentes (vignes, vergers, oliviers, etc.)	70
Zones urbaines discontinues	70
Pâturages et zones agro-forestières	50
Milieux aquatiques (marais, salines, etc.)	50
Forêts et zones semi-naturelles	0

**7.2.5- Nature lithologique de l'aquifère**

La méthode SI donne une note à chaque classe de lithologie

**Tableau 9:** Classification et notation de la lithologie.(Lallemand, 1994)

Classes de lithologie	Note
3- 4,90	2
4,90 - 6,45	5
6,45 - 8,99	9

**8. Méthodologies d'application de la méthode SI**

L'indice de vulnérabilité (SI) est calculé en faisant la somme des produits des cotes par les poids des paramètres correspondants :

$$I_{SI} = (D_c \times D_p) + (R_c \times R_p) + (A_c \times A_p) + (T_c \times T_p) + (OS_c \times OS_p)$$

Où:

I<sub>SI</sub>: l'indice de SI.

D<sub>c</sub>: note de profondeur.

D<sub>p</sub>: poids de la profondeur.

R<sub>c</sub>: note de Recharge.

R<sub>p</sub>: Poids de Recharge.

A<sub>c</sub>: note de Lithologie.

A<sub>p</sub>: poids de Lithologie.

T<sub>c</sub>: note de Topographie.

T<sub>p</sub>: poids de Topographie.

I<sub>c</sub>: note de L'occupation des sols.

I<sub>p</sub>: poids de L'occupation des sols.

**8.1.Les classes d'indices SI et leurs degrés de vulnérabilité**

La méthode SI présente quatre degrés de vulnérabilité selon les valeurs des indices obtenues.

**Tableau 10:** Les critères de vulnérabilité.

<i>Critères de vulnérabilité</i>	<i>Intervalle de la vulnérabilité</i>
Faible	<9
Moyen	9– 17
Elevé	17–20
Très élevé	20– 25

**8.2.Collection des données**

**Tableau 11:** Sources des données et mode de traitement de chaque paramètre.

<b>Paramètre</b>	<b>Source de données</b>	<b>Type de données</b>	<b>Mode de traitement</b>
Profondeur de la nappe D	Lever des niveaux statiques des forages	Points	Interpolation
Recharge nette R	Etude hydro climatique (P, ETP) et carte pédologique	Polygone	Digitalisation
Lithologie de l'aquifère A	Fiche technique des forages	Polygone	Digitalisation
Occupation du sol OS	CCI LAND COVER-S2 prototype landcover20mmap of Afric 2016 (ESA)	Points Polygone Polyline	Digitalisation
Topographie T	Modèle numérique du terrain MNT	Polygone	Digitalisation

## 9. Matériel et méthode

### 9-1- Logiciels utilisés

Dans l'étude de la vulnérabilité de bassin d'Ank Djemel le logiciel ArcGis version 10.8 a été utilisé. ArcGIS est une suite de logiciels d'information géographique (ou logiciels SIG) développés par la société américaine Esri (Environmental Systems Research Institute, Inc.).

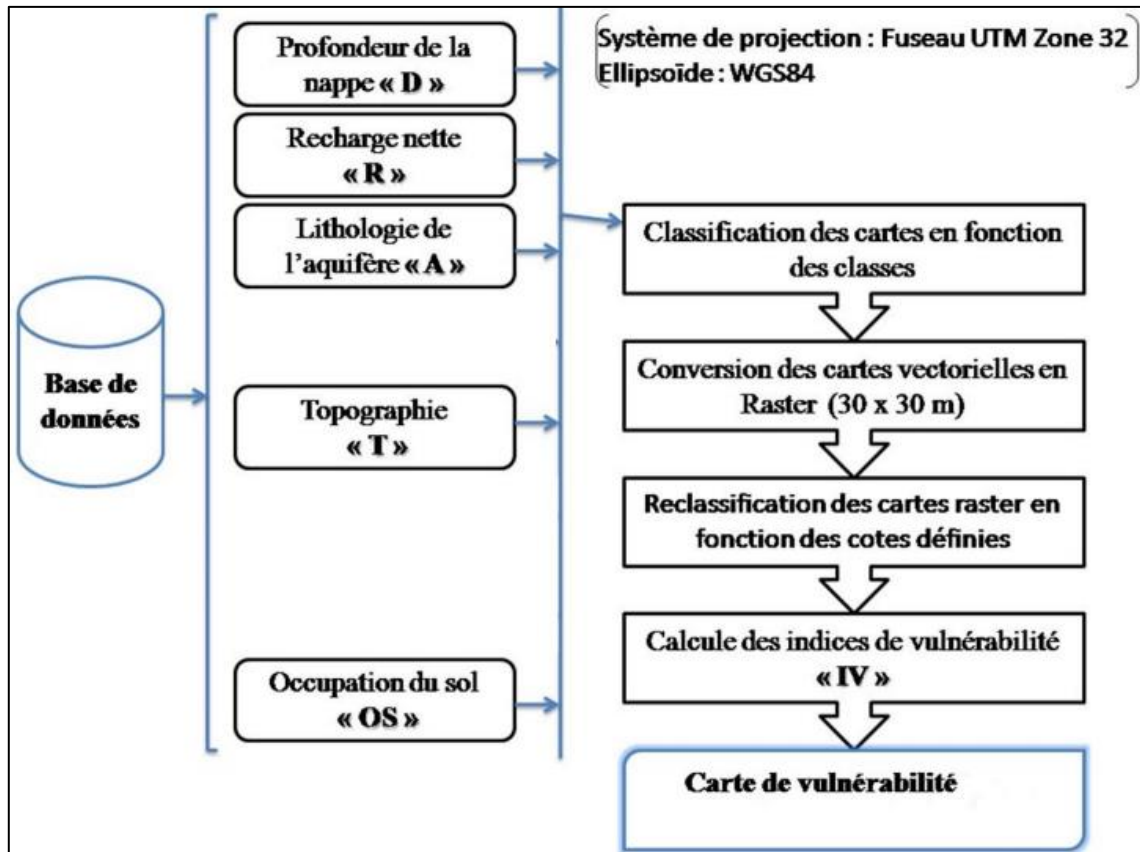
Le SIG est un système informatique de matériels et de processus conçus pour permettre la collecte, la gestion, la manipulation, l'analyse, la modélisation et l'affichage de données à référence spatiale afin de résoudre des problèmes complexes d'aménagement et de gestion. (Nessah et omd, 2011)

Un SIG contient à la fois des données géométriques (coordonnées et informations topologiques) et des données attributaires (des informations décrivant les propriétés des objets géométriques tels que des points, des lignes et des zones).

**Arc GIS :** Desktop comprend une suite d'applications intégrées

**Arc Map :** pour analyser les données, réaliser des produits cartographiques;

**Arc Tool box :** pour effectuer la conversion, la manipulation, le traitement et l'analyse de données. (Rayen, 2022)



**Figure8:** Organigramme présente les étapes de la réalisation de la carte de vulnérabilité SI.

## 10. Résultats de la méthode SI

L'application de la méthode SI sur la zone d'étude nos a données les résultats suivants :

### 10.1. Profondeur

La carte de la profondeur de la nappe en Fig. 8 présente l'un des paramètres les plus importants au niveau de l'évaluation de la vulnérabilité à la pollution. Elle donne une idée de la distance que doit parcourir le polluant avant d'atteindre la nappe. Elle joue un grand rôle car le risque de la pollution est important lorsque le niveau d'eau dans les nappes augmente.

Les zones de la nappe situées à faible profondeur, c'est-à-dire entre 0 et 15 mètres, occupent environ 49 % de la surface totale de la zone d'étude. Les zones de profondeur moyenne, comprises entre 15 et 23 mètres, représentent quant à elles 25,25 % de la surface totale. Les zones de profondeur de 23 à 30 mètres constituent 23,25 % de la surface. Les zones de profondeur très élevée sont dispersées sur le reste de la surface, ce qui représente environ 2,16 %.

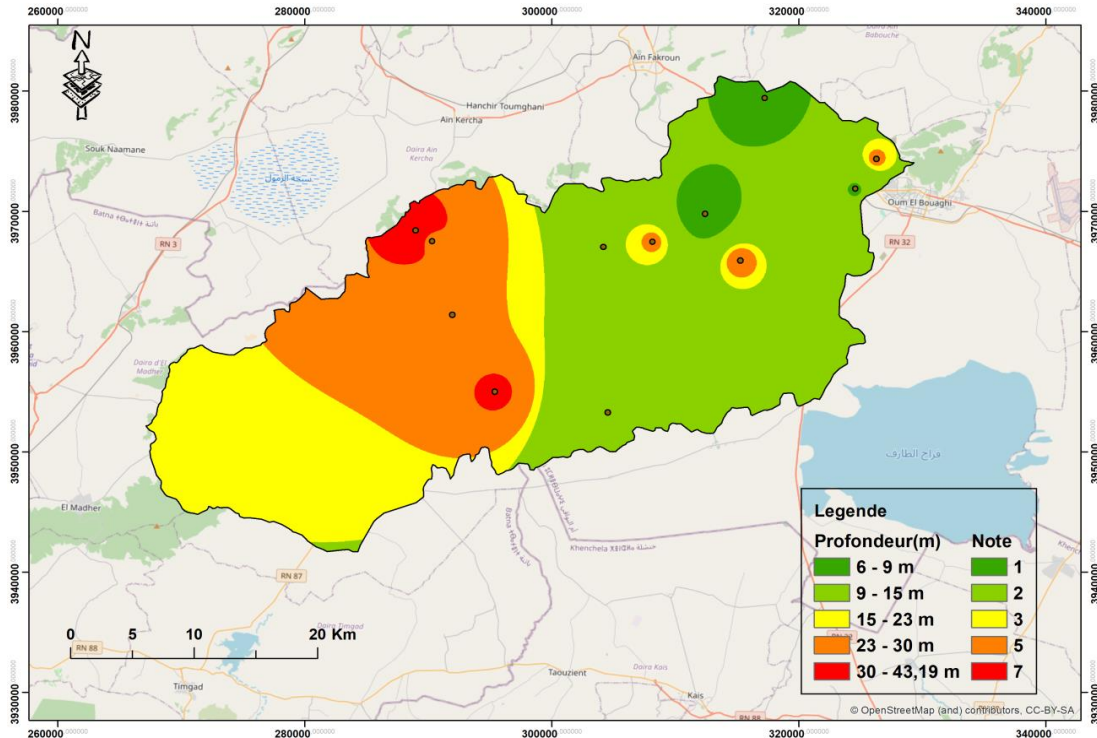


Figure 9: La carte de profondeur des eaux souterraines de bassin versant Ank Djemel.

### 10-2 - Recharge nette

La recharge nette est le paramètre responsable sur le transport de polluant vers la nappe d'eau ; elle est aussi responsable de la dissolution de l'agent polluant. La quantité d'eau qui arrive au niveau de l'aquifère constitue la recharge nette. (Moulay et Kermadi, 2020).

La recharge nette dans la zone d'étude est obtenue selon la méthode Williams and Kissel(1991). Cette méthode a été appliquée pour plusieurs zones semi-arides aux Etats Unis. La recharge « R » est calculée selon cette méthode avec les équations suivantes correspondantes à différents groupes hydrologiques de sols:

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

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

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

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

Cinq types de sols qui couvrent la zone d'étude : roche mère avec une note 2, les sols salins noté 3, les sols calciques avec une note de 6 et les sols de note 7, les sols alluviaux basiques de note 9 qui représentent la classe des sols les plus perméable.

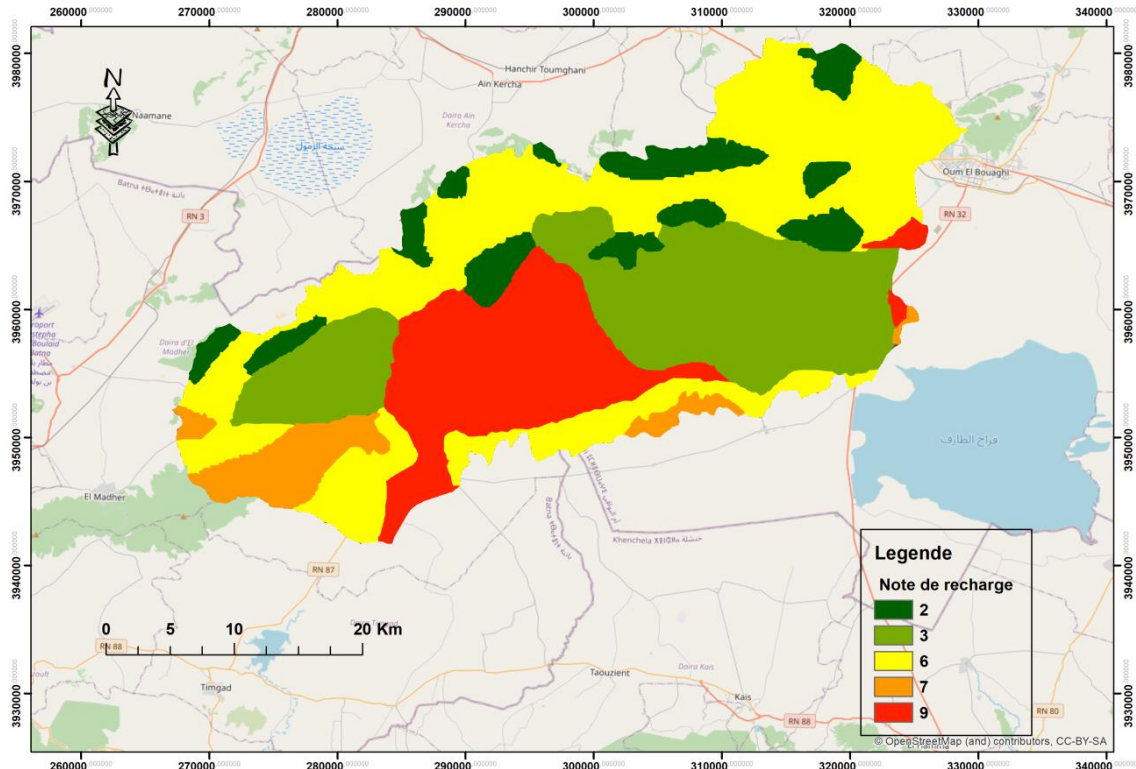


Figure10:La carte de la recharge nette.

### 10.3.La lithologie

La lithologie de la zone saturée est le responsable du contrôle de l'écoulement des eaux souterraines et qui définit le chemin du polluant et le temps du processus d'atténuation.(WWRC, 1988).

Cette carte représente la lithologie de la région d'Ank Djemel. Nous constatons que 15,93 % de la superficie totale de la zone d'étude est constituée d'argiles, ou la note 2 est attribuée. Le centre et le nord-ouest du bassin sont principalement composés d'argile sableuse, couvrant 42,20 % de la surface en l'attribue une note de 5. Le reste de la zone, qui représente 41,88 %, est caractérisé par la présence de graviers et de calcaire, avec une note de 9.

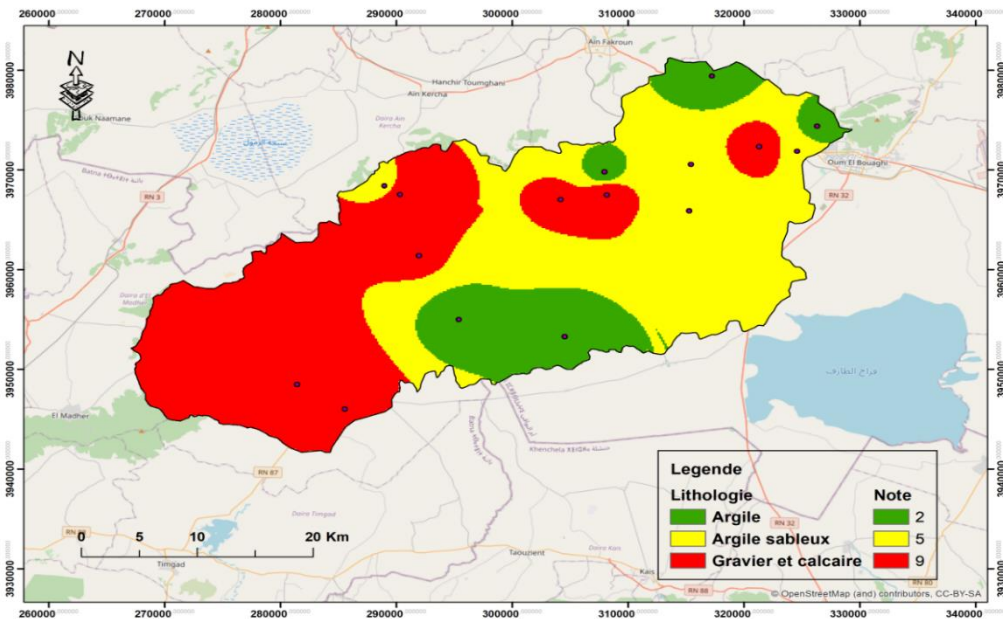


Figure 11: La carte de lithologie

#### 10.4. La pente

La pente de terrain influe directement sur le temps de concentration des polluants. Elle contrôle certains paramètres tels que l'infiltration. L'examen de la carte topographique de la région nous donne 5 classes :

- La classe de 0 à 2% représente 49,96% de la superficie totale. Dans cette classe, le ruissellement est faible, ce qui favorise l'infiltration des polluants dans le sol jusqu'aux eaux souterraines.
- La classe de 2 à 6% représente 30,62% de la superficie totale et se trouve dans différentes zones du bassin, principalement dans le Nord et le Nord-Ouest.
- La classe de 6 à 12% représente 9,40% de la superficie totale de la zone d'étude. Cette classe présente la même situation que la classe précédente.

- La classe de 12 à 18% représente 4,85% de la superficie totale. Elle présente la même situation que la classe précédente.
- La classe supérieure à 18% représente 5,16% de la superficie. Elle est principalement située dans le sud de la zone d'étude, avec quelques portions dans l'Est et le Nord-Ouest. Les eaux de précipitation s'écoulent facilement dans cette classe.

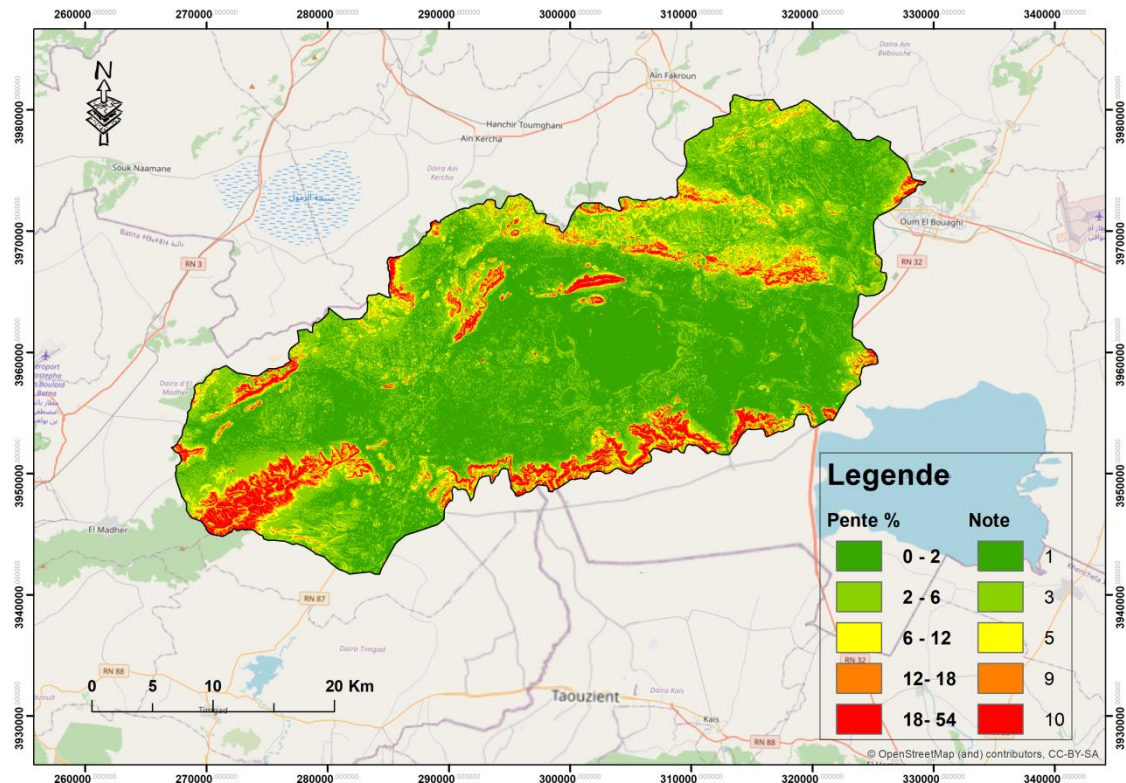


Figure 12: La carte de pente.

### 10.5.L'occupation du sol

La carte d'occupation du sol de la zone d'étude a été extraite à partir de la carte globale de l'occupation des sols de l'Afrique (CCI LAND COVER - S2 PROTOTYPE LAND COVER20m MAP OF AFRICA ,2016) cette carte est réaliser par les observations du satellite européen Sentinel-2A pendant une année de 2015 à 2016.

Notre zone d'étude beaucoup plus à vocation agricole et pâturage (en rouge et orange), Ce qui augmente le risque de pollution d'origine agricole.

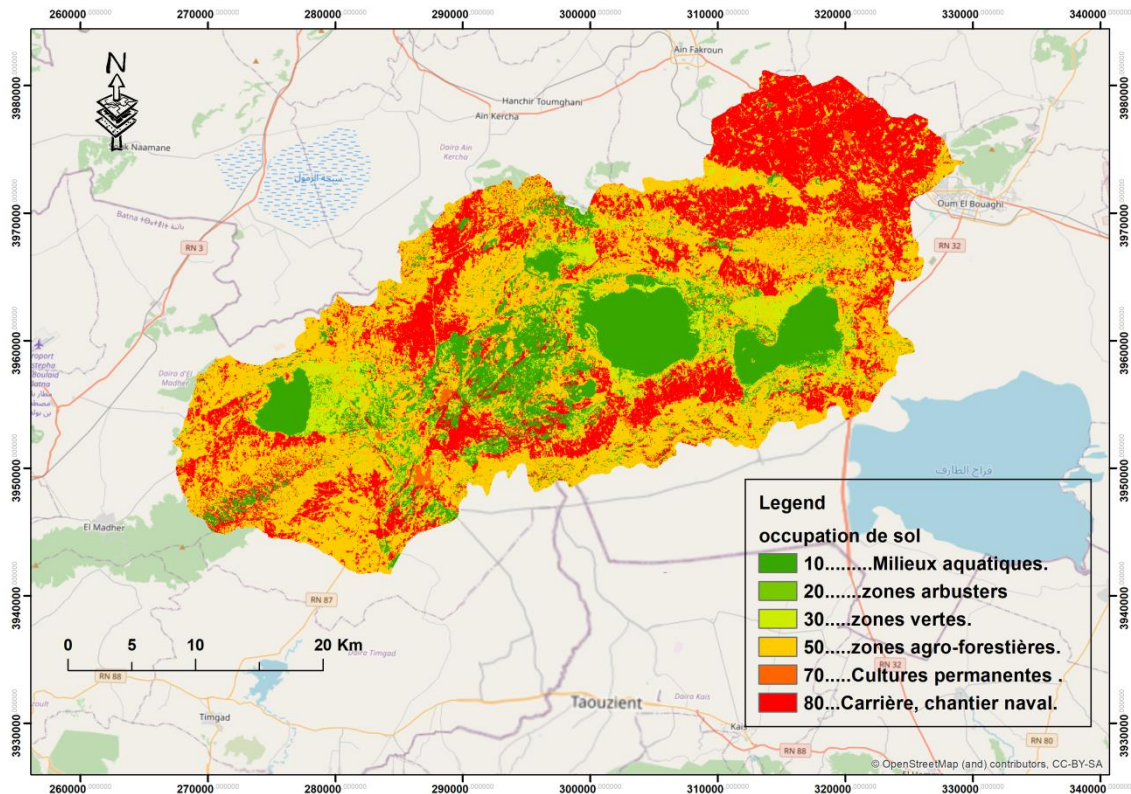


Figure 13: La carte de l'occupation de sol.

**11. Calcul de l'indice de vulnérabilité SI**

L'outil "Raster Calculator" intégré dans le module ArcToolbox a été utilisé pour calculer l'indice de vulnérabilité SI (Susceptibilité Index) Fig. 14. Cet outil nous a permis d'effectuer des calculs complexes en utilisant des couches raster représentant différents thèmes (D, R, A, T, et OS). Le calcul est effectué selon l'équation spécifique de la méthode SI.

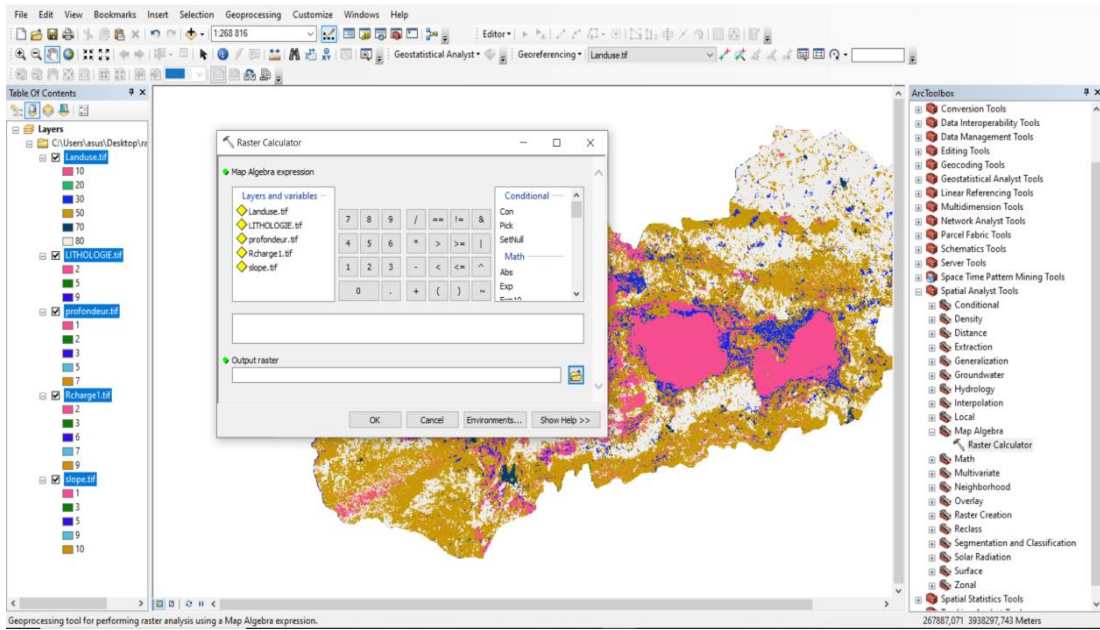


Figure14: Calculatrice raster.

## 12. Carte de vulnérabilité spécifique SI

Le calcul de l'indice de vulnérabilité est effectué en utilisant la formule SI, telle que définie dans la méthode. Les paramètres qui servent d'évaluation de la vulnérabilité sont subdivisés en intervalles de valeurs significatives et attribués à une notation numérique croissante en fonction de leur importance dans la vulnérabilité

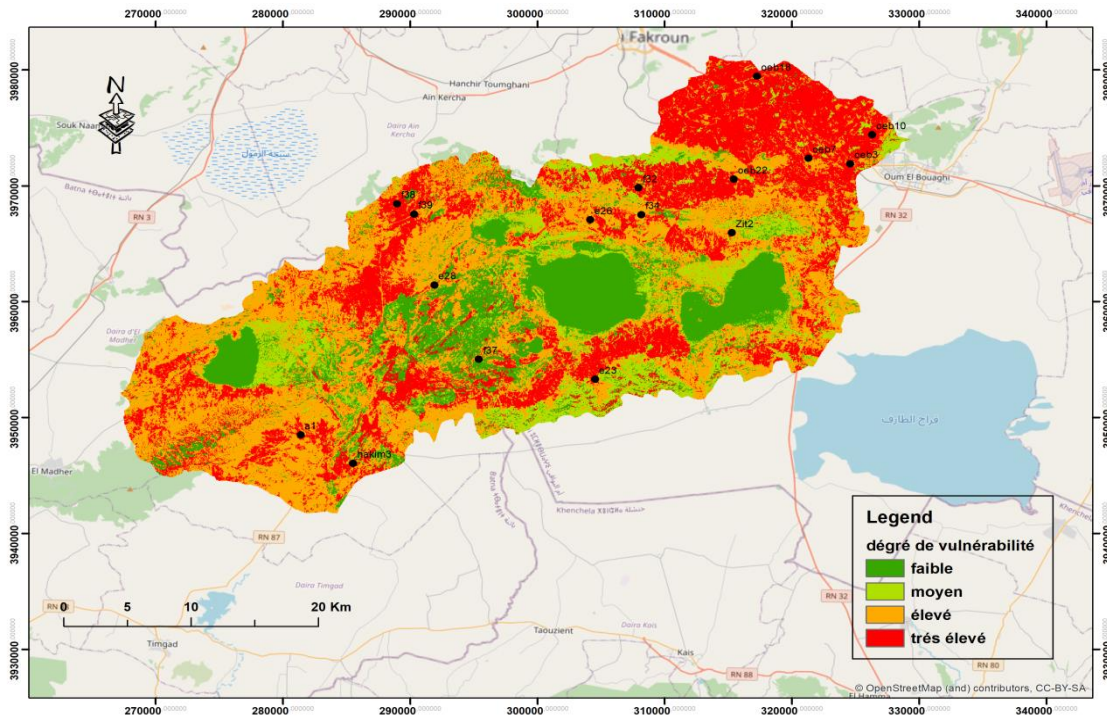
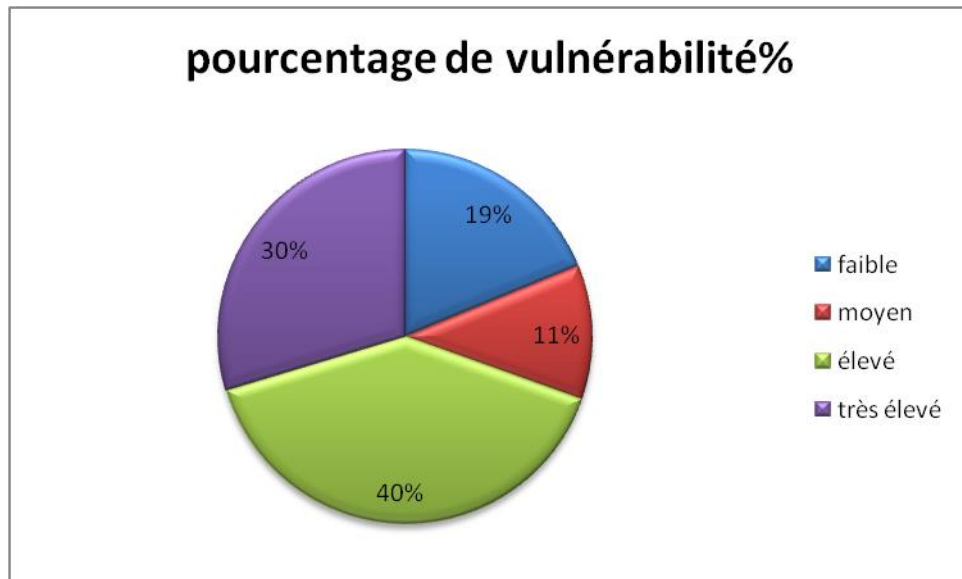


Figure 15 : la carte de vulnérabilité de bassin versant Ank Djemel

La carte obtenue montre quatre classes de vulnérabilité :

- **Faible vulnérabilité** : Cette classe représente 18,82 % de la superficie totale de la zone d'étude. Elle est caractérisée par la présence de sols salins imperméables appelés Sebkhats, qui empêchent l'infiltration des polluants agricoles vers les eaux souterraines. Cela indique que cette zone présente une faible probabilité de contamination.
- **Moyenne vulnérabilité** : Cette classe couvre 11,61 % de la superficie totale de la zone d'étude. Elle est associée à des pentes de 2-6 %. Bien que cette catégorie présente un niveau de vulnérabilité plus élevé que la classe précédente, elle n'est pas aussi préoccupante que les deux catégories suivantes.
- **Vulnérabilité élevée** : Cette classe représente 39,92 % de la superficie totale de la zone d'étude et est principalement répartie dans le bassin, en particulier dans sa partie Est. Elle est considérée comme la classe dominante en termes de vulnérabilité. Cela indique un risque plus élevé de contamination des eaux souterraines dans cette zone.
- **Vulnérabilité très élevée** : Cette classe couvre 29,65 % de la superficie et se situe principalement dans la partie nord-ouest du bassin. Elle englobe une grande partie de la zone consacrée aux activités agricoles. Cette catégorie présente le plus haut niveau de vulnérabilité, indiquant un risque élevé de contamination des eaux souterraines en raison des activités agricoles intensives.

Ces différentes classes de vulnérabilité permettent d'identifier les zones qui nécessitent une attention particulière en matière de gestion et de protection des ressources en eau souterraine.



**Figure16:**Le cercle relatif représente les pourcentages de vulnérabilité du bassin.

### 13- Périmètre de protection proposée :

Les périmètres de protection des forages d'eaux souterraines sont des zones délimitées autour des puits ou des sources d'eau souterraine, où des mesures de protection spécifiques sont mises en place pour prévenir la contamination de la ressource en eau.

Les périmètres de protection varient d'une région à une autre en fonction des réglementations et des caractéristiques locales. Ils peuvent être définis en termes de distance radiale autour du puits ou de la source d'eau souterraine, ou en fonction de critères hydrogéologiques tels que la perméabilité des sols, la profondeur de la nappe phréatique, ou la direction de l'écoulement des eaux souterraines.

À la lumière de l'analyse précédente de la carte de vulnérabilité, il est crucial de proposer des périmètres de protection pour les forages (Fig. 17) afin de préserver la qualité des ressources en eau souterraine. Ces périmètres de protection visent à réduire les risques de contamination et à assurer un approvisionnement en eau potable sûr et durable. En se basant sur les résultats de l'analyse, certaines recommandations peuvent être formulées pour délimiter ces périmètres de protection :

- Pour les zones présentant une faible vulnérabilité, où la probabilité de contamination est minime en raison de la présence de sols salins imperméables, un périmètre de protection plus restreint peut être envisagé. Cela permettrait de minimiser les coûts et les contraintes liés à la mise en place de mesures de protection supplémentaires.

- Dans les zones de vulnérabilité moyenne, où des pentes de 2-6 % sont présentes, il est recommandé d'établir un périmètre de protection plus étendu. Cela aiderait à prévenir les risques potentiels liés aux activités agricoles et aux mouvements des polluants.
- Pour les zones de vulnérabilité élevée, qui sont dispersées dans le bassin et constituent la classe dominante en termes de vulnérabilité, un périmètre de protection plus large est nécessaire. Il devrait englober les zones d'activités agricoles intenses et tenir compte des chemins potentiels de transport des contaminants vers les forages.
- Les zones de vulnérabilité très élevée, principalement situées dans la partie nord-ouest du bassin, nécessitent un périmètre de protection étendu et rigoureux. En raison de l'importance des activités agricoles dans ces zones, des mesures spécifiques de gestion des pratiques agricoles devraient être mises en place pour minimiser les impacts sur la qualité de l'eau souterraine.

En résumé, la proposition des périmètres de protection des forages doit tenir compte des différentes classes de vulnérabilité identifiées dans l'analyse. Les périmètres devraient être adaptés en fonction du niveau de vulnérabilité et des risques associés dans chaque zone spécifique. Une approche intégrée, impliquant les parties prenantes locales et les autorités compétentes, est essentielle pour mettre en œuvre ces mesures de protection et assurer la préservation à long terme des ressources en eau souterraine.

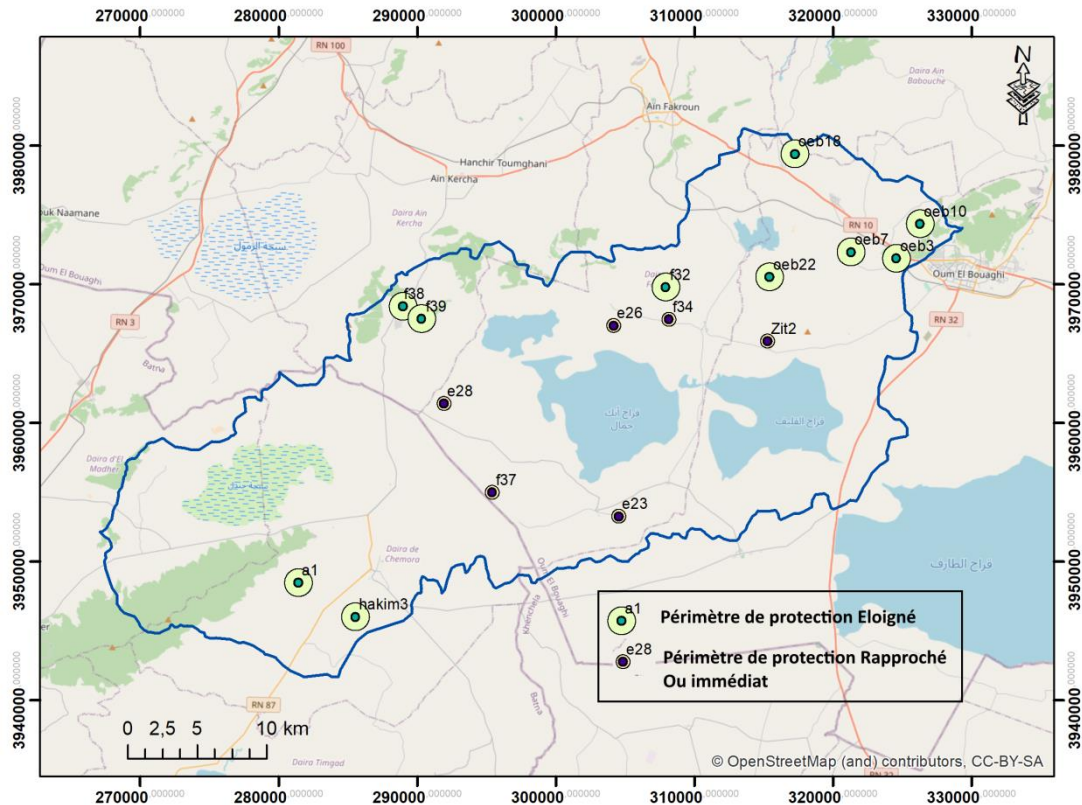


Figure 27: Les périmètres de protection.

## 14. Conclusion

L'analyse de la carte de vulnérabilité a permis d'identifier différentes classes de vulnérabilité dans la zone d'étude. Ces classes comprennent une faible vulnérabilité, une vulnérabilité moyenne, une vulnérabilité élevée et une vulnérabilité très élevée. Ces résultats soulignent l'importance de mettre en place des mesures de protection des forages afin de préserver la qualité des ressources en eau souterraine.

Les périmètres de protection proposés doivent être adaptés en fonction du niveau de vulnérabilité dans chaque zone. Les zones présentant une faible vulnérabilité peuvent nécessiter des périmètres de protection plus restreints, tandis que les zones de vulnérabilité élevée et très élevée nécessitent des périmètres plus étendus. Ces périmètres de protection doivent prendre en compte les activités agricoles, les mouvements potentiels des polluants et les chemins de transport vers les forages.



**CONCLUSION**  
**GÉNÉRALE**

## Conclusion

Le bassin versant Ank Djemel qui s'étend sur une superficie de 1243.97 km<sup>2</sup>, caractérisé par un étage climatique semi-aride froid et pluvieux en hiver- chaud et sec en été. Il se caractérise par des précipitations irrégulières. Les vents dominants sont du sud-ouest, de l'ouest et du nord-ouest. Les formations géologiques prédominantes sont celles du Quaternaire et celles du Crétacé représentées par l'Aptien et le Barrémien.

Le but de la présente étude est d'évaluer la vulnérabilité des aquifères d'Ank Djemelet les zones sensibles à la pollution. Délimitée la vulnérabilité des eaux souterraines aidera à gérer leur qualité et à protéger les ressources en eaux souterraines.

Dans cette étude, la méthode SI (Ribeiro, 2000) intégré dans un environnement SIG a été utilisée pour évaluer la vulnérabilité des eaux souterraine a la pollution nitrique issue principalement de l'activité agricole et l'utilisation des engrais chimiques. Cette méthode fournit des informations précises pour la prise de décisions éclairées, la planification des ressources en eau et la sensibilisation des parties prenantes. En utilisant cette méthode, il est possible de protéger les ressources en eau souterraine et de garantir un approvisionnement en eau potable sûr et durable.

On distingue quatre classes

- Classe de vulnérabilité très forte qui a représenté 29,65 % ;
- Et classe de vulnérabilité forte qui représenté 39,92 % ;
- Classe de vulnérabilité moyenne qui occupe 11,61 % ;
- Et classe faible qui occupe 18,82 % % de la zone d'étude.

La mise en place de périmètres de protection appropriés contribuera à réduire les risques de contamination et à garantir un approvisionnement en eau potable sûr et durable. Cela nécessitera une approche intégrée impliquant la collaboration entre les parties prenantes locales, les autorités compétentes et les acteurs du secteur de l'agriculture. Il est également essentiel de sensibiliser et d'éduquer les utilisateurs de la zone d'étude sur les bonnes pratiques de gestion des ressources en eau souterraine.

## **Recommandations :**

Des efforts restent à faire dans le domaine de la protection de ce réservoir en eau souterraine, les recommandations suivantes sont proposées pour affronter les défis de l'eau qui se présentent pour l'avenir dans le bassin versant d'Ank Djemel :

- Mettre en place Un périmètre de protection éloignée dans les parties qui présente une vulnérabilité forte dans la zone d'étude, dans lequel l'activité agricole est interdite.
- Sensibilisation et formation : Il est important de sensibiliser les agriculteurs et les acteurs du secteur agricole aux impacts de la pollution par les nitrates et de les former aux meilleures pratiques agricoles durables. Des programmes de sensibilisation et d'éducation peuvent contribuer à promouvoir une gestion responsable des engrais et à encourager l'adoption de pratiques respectueuses de l'environnement.
- L'application des textes législatifs correctement en Algérie par l'installation des périmètres de protection des eaux souterraines
- Gestion raisonnée de l'utilisation des engrais : Il est important d'appliquer les engrais de manière précise, en fonction des besoins réels des cultures. Cela implique d'effectuer des analyses régulières du sol pour déterminer les besoins en éléments nutritifs, afin d'éviter une surutilisation d'engrais.
- Utilisation d'engrais organiques : Les engrais organiques, tels que le compost et les fumiers, sont des alternatives plus naturelles aux engrais chimiques. Ils libèrent les nutriments de manière plus lente et favorisent une utilisation plus efficace par les plantes, réduisant ainsi le risque de lessivage des nitrates vers les eaux souterraines.



## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

## Références bibliographiques :

- 1- **Aliat, T., Kaabeche, M., Khomri H., Nouri, L., Neffar, S. and Chenchouni, H. (2016).** A pedological characterisation of some inland wetlands and Ramsar sites in Algeria. *Land degradation & development*, 27: 693-705.
- 2- **Aliat, T. (2017).** *Les écosystèmes humides des hautes plaines orientales algériennes Biodiversité : Préservation et Valorisation.* Thèse de doctorat. Université Ferhat Abbas. Sétif. P 7, 8.
- 3- **Aller, L., Bennet, T., Lehr, JH., Petty, RJ ., (1987).** DRASTIC a standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydro geologic settings. USEPA document no. EPA/600/2-85-018; p. 62
- 4- **Amharref, M., Bernoussi, A. (2007).** Vulnérabilité et risque de pollution des eaux souterraines. *Actes des JSIRAUF, Hanoi, 10.*
- 5- **Allaoua N., Annab S., Bousid A. (2021).** Evaluation temporelle de la qualité physico-chimique et biologique des zones humides d'Oum El Bouaghi.
- 6- **Annab, S., Bousid, A. (2021).** *Evaluation temporelle de la qualité physico-chimique et biologique des zones humides d'Oum el Bouaghi.* Mémoire de Master. Université Larbi Ben M'hidi. Oum El Bouaghi. P 37.
- 7- **Attoui, B. (2009).** *Etat de la vulnérabilité à la pollution des eaux des grands réservoirs d'eaux souterraines de la région de Annaba el-taref et identification des sites d'enfouissement de déchets* (Doctoral dissertation, Annaba).
- 8- **Bakalowicz, M. (1999).** Connaissance et gestion des ressources en eau souterraines dans les régions Karstiques. Lyon Agence de l'eau Rhone-Méditerranée-Corse, 44p., Guide technique n°3.
- 9- **Bellatreche, M., Chalabi, B. (1988).** Recensement hivernal annuel des oiseaux d'eau, Algérie 1988. INA, 19p.
- 10- **Bensizerara, D. (2014).** *Ecologie des oiseaux de sebkhet Djendli (Batna, Est Algérie)* Thèse de doctorat. Université Mohamed Khidher. Biskra .P 8.
- 11- **Benhamida, N ., Bouguetit, K. (2015)** Etude de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines de la cuvette d'Ouargla (Cas de la nappe du Continental Intercalaire) mémoire de master UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA
- 12- **Boukaba, R. (2015).** *Evaluation des changements des zones humides du Sud Constantinois par télédétection, avec application particulière au lac barrage de*

*KoudietMedaouar (Timgad, Batna).* Mémoire de Magister. Université Larbi Ben M'hidi. Oum El Bouaghi. P31.

- 13- **BOUSSADIA F., BRAHAMI S.(2019).** *Evaluation de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines dans la région d'Aokas par la méthode COP.* Mémoire master académique. Université A. MIRA – Bejaia.
- 14- **BRELLA D.(2019).** *Vulnérabilité des Eaux Souterraines à la Pollution dans la Région de Touggourt.* Mémoire master académique. Université KASDI MERBAH OUARGLA.
- 15- **BRGM.(2008).** *Analyse de la vulnérabilité intrinsèque des eaux souterraine autour des sites BASOL du bassin Adour.* rapport final : Garonne.
- 16- **CASTANY G. (1982).** *Principe et méthode d'hydrogéologie .*ED. Dunod. Paris France.217p.
- 17- **CHENINI I., ZGHIBI A., KOUZANA L., (2015).** *Hydrogeological investigations and groundwater vulnerability assessment and mapping for groundwater resource protection and management: state of the art and a case study.* J Afric Earth Sci 109:11–26.).
- 18- **CIVITA M. (1994).** *La carte dellavulnerabilitàdegliacquiferiali'inquinamento : Teoriaepratica* PITAGORA (Editeurs), Bologna, 325p.
- 19- **Dahbia, D., Khelf, M.,Sadek, Z. (2020).** *Approche géostatistique de l'étude de la vulnérabilité des eaux souterraines de la Mitidja Orientale : Application de trois modèles DRASTIC, PRAST et GALDIT ;*Conference: 14 eme journées de 'eGéostatistique,Fontainebleau,Paris,France 18 au 20 septembre 2019.
- 20- **Dahmani, O., Zeraoulia, R. (2022).** *Cartographie de risque de salinité du sol (Cas de bassin versant de Garaet El Tarf NE Algérie).* Mémoire master académique. Université Abbas Laghrour. Khenchela. P 36.
- 21- **Ferroudj, F. (2019).** *Application de la prospection électrique à l'étude des formations géologique de la région d'Oum El Bouaghi.* Diplôme de Master Université L'arbi Ben Mhidi-Oum El Bouaghi. p14.
- 22- **Gaagai, A.(2009).** *Etude hydrologique et hydrochimique du bassin versant du barrage de babar sur oued el Arabregion est de l'Algérie. Mémoire De Magistère.* Université De Batna 1. P 13.

- 23- Guerdi, H., Chedule, A.(2018).**Vulnérabilité et protection des ressources en eau souterraines du système aquifère de la région de Tisssilt. Mémoire Master académique.Université Ibn Khaldoun –Tiaret- p38.
- 24- Ghodbane, M.(2009).**Etude de la contamination des eaux souterraines De la zone nord de chemora par les nitrates est algerian. Mémoir de magister. université de Batna.P5.
- 25- LallemandBarres, A.(1997).**Normalisation des critères d'établissement des cartes de vulnérabilité aux pollutions, Etude documentaire préliminaire., R37928. BRGM.
- 26- Latifi, S., Chaab, S. (2017).***Evaluation et cartographie de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines, selon les méthodes DRASTIC et GOD, dans la plaine alluviale de Guelma, Nord-Est Algérien. Synthèse*, 23(1), 48-62.
- 27- Moulay, A., Kermadi, M. (2020).***Cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines à l'aide des modèles d'analyse multicritères cas de la nappe alluviale de la plaine de Sidi Bel Abbes (Nord-ouest Algerie).* (Doctoral dissertation, Université KASDI-MERBAH Ouargla).
- 28- Mueller, NC., Braun, J., Bruns, J., Černík, M., Rissing, P., Rickerby, D., Nowack, B. (2012).** Application of nanoscale zerovalent iron (NZVI) for groundwater remediation in Europe. *Environ Sci Pollut Res* 19:550–558.)
- 29- Muet, F., Vier, E. (2011).**Stratégies de protection de ressources karstiques utilisées pour l'eau potable, Corse. Guide pratique Agence de l'eau Rhone-Méditerranée.
- 30- Nassah, H., Omdi, F. (2011).***Les périmètres de protection des champs de captage des eaux souterraines Cas du champ captant du N'Fis (Maroc)* mémoire licences Université Cadi Ayyad Merrakach p18-36.
- 31- PNUD. (2009).** Rapport mondial sur le développement humain.
- 32- Ribeiro, L. (2000).**Desenvolvimento de um índice para avaliar a susceptibilidade dos aquíferos à contaminação, Nota interna, (não publicada), ERSHA-CVRM, 8 p.
- 33- Thierry, B. (2005).** *Méthodologie de dimensionnement des zones de protection des captages d'eaux souterraines contre les polluants chimiques persistants.* École Polytechnique Fédérale De Lausanne.97.
- 34- Van Stempvoort, D., Ewert, L, Wassenaar, L. (1993).**Aquifer vulnerability index (AVI) a GIS compatible method for ground water vulnerability mapping *Can Water Resour J* 18 : 25-37.)

**35- Zeghid, K. (2013).** *Cartographie de la vulnérabilité a la pollution des eaux souterrains karstique cas de bassin versant de mafferouch.* Mémoire demagistère.Université Aboubaker Belkaid.Telmesan.