

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة محمد الصديق بن يحيى - جيجل -
Université Mohammed Seddik Benyahia -Jijel

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie
Département : des Sciences de la Terre et de
l'Univers



كلية علوم الطبيعة و الحياة
قسم : علوم الأرض و الكون

Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme : Master Académique en Géologie

Option : Hydrogéologie

Thème

**Application et comparaison des méthodes de vulnérabilité
à la pollution des eaux souterraines : cas de la plaine
alluviale d'oued Nil (Jijel, Nord-Est Algérien)**

Membres de Jury

Président : T.H. Debieche

Examineur : Dj. Rihia

Encadrant : S .Mahdid

Présenté par :

Kinoucha Nihad

Medroua Imene

Année Universitaire 2020-2021

Numéro d'ordre (bibliothèque) :.....

Remerciements

On remercie dieu le tout puissant de nous avoir donné la santé et la volonté d'entamer et de terminer ce mémoire.

Tout d'abord, ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu avoir le jour sans l'aide et l'encadrement de Mr Mahdid Souhil, on le remercie pour la qualité de son encadrement exceptionnel, pour sa patience, sa rigueur et sa disponibilité durant notre préparation de ce mémoire.

Nos remerciements vont aussi aux membres du jury Mr T.H. Debieche et Mr Dj. Rihia qui ont bien voulu accepter de juger ce modeste travail.

Enfin, on remercie tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail qu'ils trouvent ici l'expression de notre profonde gratitude et respect.

Dédicaces

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

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

À la femme qui a souffert sans me laisser souffrir et qui n'a épargné aucun effort pour me rendre heureuse : mon adorable mère Warda.

À mon frère Soheib et ma chère sœur Rania (future médecin) et qui n'ont pas cessé de me conseiller, encourager et soutenir tout au long de mes études. Que dieu les protège et leurs offre la chance et le bonheur.

À mon adorable petite sœur Fareh qui sait toujours comment procurer la joie et le bonheur pour toute la famille.

À celle qui porte le cœur d'amour et de douceur, à ma deuxième mère, ma très chère tante Abba.

À mes grands-parents, mes oncles et mes tantes. Que dieu leur donne une longue et joyeuse vie.

À mes chères cousines Meriem, Samira, Doufi et Dounia .

À mes collègues Lina, Naila, Ines et Samah .

Merci pour leurs amours et leurs encouragements.

Sans oublier mon binôme Imene pour son soutien moral, sa patience et sa compréhension tout au long de ce travail.

Dédie par Nihad

Dédicaces

A chaque fois qu'on achève une étape importante dans notre vie, on fait une pose pour regarder en arrière et se rappeler toutes ces personnes qui ont partagé avec nous tous les bons moments de notre existence, mais surtout les mauvais. Ces personnes qui nous ont aidés sans le leur dire, soutenus sans réserve, aimés sans compter.

Je dédie ce modeste mémoire qui est l'accomplissement de longues années d'études, en premier lieu :

À l'homme qui a éclairci mon chemin, à Mon chère Papa "KAMEL" rabi yerahmo" .

À La meilleure mère du monde que j'aime sans limite "SAMIRA", je souhaite seulement que dieu me le garde .Merci et merci et merci Maman.

À Mon soutien dans la vie mon seul frère "HAITEM" .

À Celle qui porte le cour d'amour et de douceur, à ma deuxième mère, très chère tante "SACIA" aussi ma tante "NAWEL".

À Mes grands-parents "AMAR et FATIHA rabi yerhamha".

À Toute la famille MEDROUA et SATAUH.

À ma chère Amie et Co-binôme NIHAD et sa famille KINOUCHA.

Je ne peux pas finir sans remercier mes chers amis "NESRINE et HADJAR".

À Mes sœurs de la résidence universitaire : SAMAH, OMAIMA, WISSAM KHADIDJA, HANAN, KHAWLA , INAS , LINA ,NAILA , pour tous les moments de joie et de peine qu'on a passée ensemble.

Sans oublier tous les collègues de notre promotion Hydrogéologie 2021.

Dédie par Imene

Résumé

La nappe alluvionnaire d'oued Nil (Wilaya de Jijel, Nord-Est Algérien), qui occupe une superficie de 59 km², représente une ressource d'ordre économique jugée prioritaire du fait qu'elle est utilisée dans les domaines d'irrigation et de consommation domestique des différentes populations habitants la région. L'aire de la nappe est occupée essentiellement par des zones agricoles caractérisées par une utilisation de plus en plus importante des engrais chimiques qui représentent, en plus des rejets des zones urbaines, un risque permanent pour la qualité des eaux souterraines. L'étude de la vulnérabilité à la pollution par les polluants inorganiques de cette nappe a été effectuée en appliquant les méthodes SINTACS (Civita, 1994) et REHESE (Rehese, 1977), avec l'aide des logiciels des systèmes d'information géographique.

Une comparaison statistique des cartes de vulnérabilité obtenues a été effectuée. Cette comparaison a montré une certaine dissemblance entre les résultats obtenus en utilisant les méthodes SINTACS et REHESE.

Mots clés : Vulnérabilité, pollution, nappe alluvionnaire, SINTACS, REHESE.

Abstract

The alluvial water table of Wadi Nil (Wilaya of Jijel, North-East of Algeria), which occupies an area of 59 km², represents an economic resource considered a priority because it is used in the fields of irrigation and domestic consumption of the different populations living in the region. The groundwater area is mainly occupied by agricultural areas characterized by an increasing use of chemical fertilizers which, in addition to discharges from urban areas, represent a permanent risk for the quality of groundwater. The study of the vulnerability to pollution by inorganic pollutants of this water table was carried out by applying the SINTACS (Civita, 1994) and REHESE (Rehese, 1977) methods, with the help of geographic information systems software.

A statistical comparison of the vulnerability maps obtained was carried out. This comparison showed a certain dissimilarity between the results obtained using the SINTACS and REHESE methods.

Keywords: Vulnerability, pollution, alluvial aquifer, SINTACS, REHESE.

ملخص

مثل منسوب المياه الجوفية لوادي النيل (ولاية جيجل ، شمال شرق الجزائر) ، الذي يحتل مساحة 59 كيلومتر مربع ، موردا اقتصاديا يعتبر أولوية لأنه يستخدم في مجالات الري والاستهلاك المنزلي لمختلف السكان الذين يعيشون في المنطقة.

تشغل منطقة المياه الجوفية بشكل أساسي مناطق زراعية تتميز بالاستخدام المتزايد للأسمدة الكيماوية والتي بالإضافة إلى التصريفات من المناطق الحضرية، تمثل خطراً دائماً على جودة المياه الجوفية. تم إجراء دراسة قابلية التعرض للتلوث من قبل الملوثات غير العضوية لمنسوب المياه من خلال تطبيق أساليب SINTACS (Civita, 1994) و REHESE (Rehese, 1977) ، بمساعدة برمجيات نظم المعلومات الجغرافية.

تم إجراء مقارنة إحصائية لخرائط الضعف التي تم الحصول عليها. أظهرت هذه المقارنة اختلافاً معيئاً بين النتائج التي تم الحصول عليها باستخدام طرق SINTACS و REHESE. **الكلمات المفتاحية:** الحساسية، التلوث، طبقة المياه الجوفية، SINTACS، REHESE.

Table des matières

Introduction	1
--------------------	---

Chapitre I :**Aperçu Bibliographique**

I.1. Vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution	3
I.2. Types de vulnérabilité.....	3
I.2.1. Vulnérabilité intrinsèque.....	3
I.2.1.1. Critères de la vulnérabilité intrinsèque	3
I.2.2. Vulnérabilité spécifique	4
I.2.2.1. Critères de la vulnérabilité spécifique.....	4
I.3. Cartographie de la vulnérabilité à la pollution.....	5
I.4. Méthode d'évaluation de la vulnérabilité	6
I.4.1 Méthodes de cartographie à index	6
I.4.2 Modèles de simulation	7
I.4.3. Méthodes statistiques	7
I.5. But d'une carte de vulnérabilité.....	8
I.6. Définition d'une pollution d'eau.....	8
I.7. Origines de la pollution.....	8
I.7.1. Origine domestique	8
I.7.2. Origine industrielle	8
I.7.3. Origine agricole	9
I.7.4. Origine urbaine et routière :	9
Conclusion.....	9

Chapitre II:**Les caractéristiques physico-chimiques de la plaine alluviale d'oued Nil**

II.1. Situation et présentation de la région de Jijel	12
II.1.1. Situation géographique de la wilaya de Jijel	12
II.1.2. Situation et présentation de la région d'étude :	12
II.2. Géomorphologie de la zone d'étude	13
II.3. Climat	14
II.4. Végétation.....	15
II.5. Réseau hydrographique	15
II.6. Aperçu géologique.....	16

II.6.1. Introduction	16
II.6.2. Géologique régionale.....	16
II.6.3. Géologique local.....	17
II.6.4 Aspect litho stratigraphique de la zone d'étude	17
II.6.4.1. Terrains sédimentaires	17
II.6.4.2. Terrains métamorphiques	18
II.6.5. Classifications des formations selon leur intérêt hydrogéologique	20
II.6.5.1. Terrain à faible perméabilité.....	20
II.6.5.2. Terrains à grande perméabilité	20
II.6.5.3. Terrains imperméables	21
II.6.6. Séismologie	21
II.7.Climatologie de la zone d'étude	22
II.7.1. Aperçu sur le climat de l'Algérie et de la zone d'étude	22
II.7.1.1. Climat de l'Algérie	22
II.7.1.2. Climat de la zone d'étude	23
II.7.2. Caractéristiques climatiques	23
II.7.2.1. Précipitation.....	23
II.7.2.2. Température.....	26
II.7.2.3. L'humidité	28
II.7.2.4. L'évaporation.....	29
II.7.3.Régime climatique.....	30
II.7.3.1. Diagramme Ombrothermique de Gaussen	30
II.7.3.2. Diagramme d'Emberger	31
II.7.3.3. Bilan hydrologique	32
II.7.3.4. Estimation de l'évapotranspiration	33
II.7.3.5. Détermination des apports liquides	37
II.8. hydrodynamique de la zone d'étude	38
II.8.1. Introduction	38
II.8.2. Inventaire des points d'eau	38
II.8.2. Etude piézométrique	39
II.8.2.1.Examen de la carte piézométrique.....	39
II.8.2.2. Etude des paramètres hydrodynamiques	41
II.9. Sources de pollution	43
II.9.1. Différents types de pollution dans la région d'étude.....	44

II.9.1.1.Pollution d'origine urbaine	44
II.9.1.2. Pollution d'origine agricole	45
II.9.1.3.Pollution d'origine industrielle	46
Conclusion.....	46

Chapitre III :

Matériels et Méthodes

Introduction	51
III.1. Présentation de la méthode SINTACS	51
III.1.1. Cote attribuée à chaque paramètre de la méthode SINTACS	52
III.1.1.1. Paramètre de la profondeur "S"	52
III.1.1.2. Paramètre de l'infiltration "I"	53
III.1.1.3. Paramètre de la zone non saturée "N"	53
III.1.1.4. Paramètre de la texture du sol "T"	53
III.1.1.5. Paramètre du type d'aquifère "A"	54
III.1.1.6. Paramètre de la conductivité hydrique "C"	54
III.1.1.7. Paramètre de la Topographie "T"	55
III.2. Système de cotation.....	55
III.3 Présentation de la méthode REHESE.....	56
III.3.1. Influence de la zone non saturée dans la méthode de REHESE	58
III.4. Outils d'évaluation de la vulnérabilité	58
III.4.1. Systèmes d'information géographique :.....	58
III.4.2. Présentation du logiciel Surfer (Golden Software)	59
Conclusion.....	59

Chapitre IV :

Résultat et Discussion

Introduction	62
IV.1. Interprétations des paramètres et réalisation des cartes thématiques de la méthode SINTACS	62
IV.1.1 Paramètre profondeur de la nappe « S »	62
VI.1.2. Infiltration « I »	65
IV.1.3. Paramètre de la zone non saturée « N »	67
IV.1.4.Texture de sol « T »	69
IV.1.5. Type d'aquifère « A »	71
IV.1.6. Conductivité hydrique « C »	73
IV.1.7.Pente « S ».....	75

IV.1.8. Calcul de l'indice SINTACS général.....	77
IV.2. Méthode de vulnérabilité de REHESE.....	79
IV.3. Comparaison entre les cartes de vulnérabilité obtenues par les méthodes SINTACS et REHESE.....	81
IV.4. Risque de contamination de la nappe.....	82
IV.4.1. Carte d'occupation du sol	83
IV.4.2. Carte de risque de contamination.....	83
IV.4.2.1. Zone à fort risque	83
IV.4.2.2. Zone à moyen risque	84
Conclusion.....	85
Conclusion et Recommandation.....	86
Références bibliographiques	88
Annexes	

Listes des figures

Chapitre I :

Aperçu Bibliographique

Fig. I.1. Paramètres intervenant dans l'évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines. 6

Chapitre II:

Les caractéristiques physico-chimiques de la plaine alluviale d'oued Nil

Fig. II.1. Localisation de la wilaya de Jijel.....	12
Fig. II.2. Situation géographique du BV et de la plaine alluviale d'oued Nil	13
Fig. II.3. Carte d'altitude des montagnes de la zone d'étude.	14
Fig. II.4. L'agriculture pratiquée dans la zone d'étude.....	15
Fig. II.5. Réseau hydrographique de la plaine alluviale d'oued Nil.....	16
Fig. II.6. Schéma structural de la chaîne alpine de méditerranée occidentale.....	17
Fig. II.7. Carte géologique de la zone d'étude.....	19
Fig. II.8. Zone sismique en Algérie	22
Fig. II.9. Carte pluviométrique de la wilaya de jijel (ANRH).....	24
Fig. II.10. Histogramme des précipitations moyennes mensuelles	24
Fig. II.11. Précipitations moyenne inter-annuelles de la station d'Achouat–Taher(1988-2015).....	25
Fig. II.12. Variations des précipitations moyennes saisonnières.....	26
Fig. II.13. Variation des températures moyennes mensuelles	27
Fig. II.14. Variation des températures moyennes annuelles (1988-2015).....	28
Fig. II.15. Humidité relative moyenne mensuelle(1991-2008)	29
Fig. II.16. L'évaporation moyenne mensuelle(1991-2008).....	30
Fig. II.17. Diagramme Ombrothermique à la station d'achouat-Taher (1988-2015).....	31
Fig. II.18. Diagramme d'Emberger	32
Fig. II.19. Carte d'inventaire des points d'eau (Avril2015)	39
Fig. II.20. Carte piézométrique de la plaine alluviale d'oued Nil (avril 2015)	40
Fig. II.21. Carte de perméabilité de la plaine alluviale d'Oued El Nil.....	41
Fig. II.22. Carte de la transmissivité dans la plaine alluviale d'oued Nil.....	42
Fig. II.23. Décharge sauvage dans la région de Chekfa	44
Fig. II.24. Agriculture sous serre dans la plaine alluviale d'oued Nil.....	46

Chapitre IV :**Résultat et Discussion**

Fig. IV.1. Réparation spatiale de la profondeur d'eau.....	64
Fig. IV.2. Répartition spatiale de la profondeur de l'eau assignée à leur cotes et poids.....	65
Fig. IV.3. Réparation spatiale d'infiltration efficace en mm/an.....	66
Fig. IV.4. Réparation spatiale d'infiltration efficace en mm/an assignée à leur cotes et poids.	67
Fig. IV.5. Réparation spatiale de la zone vadose.....	68
Fig. IV.6. Réparation spatiale de la zone vadose assignée à leur cotes et poids	69
Fig. IV.7. Réparation spatiale de la texture du sol (T)	70
Fig. IV.8. Réparation spatiale de la texture du sol assignée à leur cotes et poids	71
Fig. IV.9. Réparation spatiale du type d'aquifère (A)	72
Fig. IV.10. Réparation spatiale du type d'aquifère assignée à leur cotes et poids	73
Fig. IV.11. Réparation spatiale de la conductivité hydrique (C).....	74
Fig. IV.12. Réparation spatiale du type d'aquifère assignée à leur cotes et poids	75
Fig. IV.13. Réparation spatiale du type de la pente en %.....	76
Fig. IV.14. Réparation spatiale de la pente en % assignée à leur cotes et poids	77
Fig. IV.15. Carte de la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution de la plaine alluviale d'oued Nil par la méthode SINTACS.....	79
Fig. IV.16. Carte de la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution de la plaine alluviale d'oued Nil par la méthode de REHESE	81
Fig. IV.17. Histogramme des répartition spatiale des vulnérabilité pour les méthodes SINTACS et REHESE.....	82
Fig. IV.18. Carte d'occupation du sol de la plaine alluviale d'oued Nil.	83
Fig. IV.19. Carte de risque de contamination de la plaine alluviale d'oued Nil.	84

Listes des tableaux

Chapitre I :

Aperçu Bibliographique

Tab. I.1. Différents Méthodes d'évaluation de la vulnérabilité.....	7
---	---

Chapitre II:

Les caractéristiques physico-chimiques de la plaine alluviale d'oued Nil

Tab. II.1. Précipitation moyenne mensuelle à la station Achouat - Taher(1988 - 2015)	24
Tab. II.2. Précipitation interannuelle à la station Achouat - Taher (1988 - 2015)	25
Tab. II.3. Variation des précipitations moyennes mensuelles et saisonnière (1988-2015)	26
Tab. II.4. Températures moyennes mensuelles	27
Tab. II.5. Températures moyennes annuelles(1988-2015)	28
Tab. II.6. L'humidité moyenne mensuelle (1991-2008)	29
Tab. II.7. L'évaporation moyenne mensuelle (1991-2008).....	30
Tab. II.8. Valeurs moyennes mensuelles des précipitations et températures	30
Tab. II.9. Calcul de l'ETP par la formule de Thornthwaite.....	34
Tab. II.10. Bilan hydrique selon Thornthwaite à la station d'Achouat – Taher (1988 - 2015)..	35
Tab. II.11. Application de la formule de Turc.....	35
Tab. II.12. Calcul du R et I dans la plaine alluviale d'oued Nil.....	37
Tab. II.13. Calcul des apports liquides par la méthode de Samie.....	37
Tab. II.14. Calcul des apports liquides par la formule algérienne.....	37
Tab. II.15. Calcul des apports liquides parla méthode de Mallet-Gauthier.....	37
Tab. II.16. Calcul des apports liquides par la méthode de Turc	38
Tab. II.17. Décharges de la zone d'étude	45
Tab. II.18. Situation d'assainissement dans la plaine alluviale d'oued Nil.....	46

Chapitre III :

Matériels et Méthodes

Tab. III.1. Poids attribués aux paramètres SINTACS dans les différents scénarios de la méthode. (Hamza et Al, 2008).....	52
Tab. III.2. Paramètre de la profondeur "S"	52
Tab. III.3. Paramètre de l'infiltration "I"	53
Tab. III.4. Paramètre de la zone non saturée "N"	53
Tab. III.5. Paramètre de la texture du sol "T"	54

Tab. III.6. Paramètre de type d'aquifère "A".....	54
Tab. III.7. Paramètre de la conductivité hydrique "C"	55
Tab. III.8. Paramètre de la Topographie "T"	55
Tab. III.9. Catégories de vulnérabilité.....	56

Chapitre IV :

Résultat et Discussion

Tab. IV.1. Classification spécifiques (Cotes, et poids) pour le paramètre « S »	63
Tab. IV.2. Classification spécifiques (Cotes, et poids) pour le paramètre « I »	65
Tab. IV.3. Classification spécifiques (Cotes, et poids) pour le paramètre « N »	68
Tab. IV.4. Classification spécifiques (Cotes, et poids) pour le paramètre « T ».....	70
Tab. IV.5. Classification spécifiques (Cotes, et poids) pour le paramètre « A »	72
Tab. IV.6. Classification spécifiques (Cotes, et poids) pour le paramètre « C ».....	74
Tab. IV.7. Classification spécifiques (Cotes, et poids) pour le paramètre « S »	76
Tab. IV.8. Répartition spatial des degrés de vulnérabilité.....	77
Tab. IV.9. Comparaison entre les deux méthodes de vulnérabilité.....	82

Liste des symboles

ZNS : zone non saturée.

ANRH : Agence Nationale des Ressources Hydriques.

ONM : Office Nationale de Météorologie.

ETP : Evapotranspiration potentielle.

P : Précipitations.

T : Température.

H : humidité.

Introduction

Introduction

Les eaux souterraines représentent une importante ressource exploitée pour la consommation humaine et pour l'utilisation dans les domaines agricoles et industriels. Ces eaux sont souvent exposées à la contamination par des polluants de différentes natures (biologique, organique, chimique ou physique), à travers leur passage de la surface du sol vers l'aquifère.

L'augmentation exponentielle de la demande en eau met donc les potentialités hydriques de la région d'oued Nil en situation de surexploitation, aggravée par la dégradation de leur qualité par une pollution de plus en plus préoccupante : rejets incontrôlés d'eaux usées, domestiques et industrielles, avec une accélération de l'intrusion marine, etc....

La protection de la qualité des ressources en eau est devenue une priorité absolue des différents gouvernements ces dernières années en raison de leur rareté et de la multiplication des sources de pollution : rejets d'eaux usées (brutes), industrielles, décharges brutes, engrais chimiques,...etc.

La vulnérabilité est un terme introduit en hydrogéologie par Margat dans les années 60. Il est défini et utilisé de manière très diverse (Lallemand barres et Roux, 1989 ; Lallemand Barres, 1994; Gogu et Dassargues ,1998). Certains auteurs l'ont défini comme une propriété intrinsèque des aquifères ; d'autres estiment que la vulnérabilité est liée aux propriétés spécifiques du contaminant. Cependant, d'autres auteurs l'associent aux activités humaines et à la qualité agro-pédologique.

Les cartes de vulnérabilités constituent une base d'information pour l'évaluation des risques de pollution des eaux souterraines. La réalisation des premières cartes en France (Albinet et Margat ,1970) repose essentiellement sur la classification des sites en fonction des propriétés et de la géométrie des milieux aquifères.

Pour mieux comprendre la relation entre la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution et les conditions hydrologiques, géologiques et météorologiques locales des aquifères, plusieurs méthodes d'évaluation de la vulnérabilité ont été créées, DRASTIC (Aller et *al*, 1987), GOD (Foster, 1987) et SINTACS (Civita et De Maio, 1997).

Nombreux sont les auteurs qui ont œuvrés au monde dans ce thème, on citera (Margat, 1968 ; Albinet, 1970 ; Castany, 1982).

En Algérie, l'étude de la vulnérabilité de la pollution est réalisée par (Khemmoudj, 2009 ; Bouguetit et Benhamida ,2015).

Egalement dans la région de Jijel, plusieurs études de la vulnérabilité à la pollution ont été faites par (Boucenna, 2009 ; Boufekane, 2013).

L'objectif de cette étude est d'évaluer la vulnérabilité et le risque de pollution des ressources en eaux souterraines de l'aquifère de la plaine alluviale d'oued Nil de la wilaya de Jijel. Il est donc possible de définir les zones sensibles dans lesquelles une pollution peut affecter gravement une nappe qui constituera un important outil de prise de décision afin d'avoir une idée sur les moyens à employer, pour protéger la nappe.

Notre document est structuré comme suit :

- Introduction : Elle définira la problématique de la vulnérabilité des eaux souterraines.
- Chapitre I: Présentera une synthèse bibliographique sur les différentes méthodes traitant de la vulnérabilité des aquifères à la pollution (DRASTIC, SINTACS, REHESE et GALDIT ...).
- Chapitre II: Présentation de la zone d'étude sera consacré à une description géographique, géologique, climatique, et hydrodynamique.
- Chapitre III: Matériels et méthodes est consacré à la présentation détaillée des méthodes SINTACS et REHESE utilisés pour l'étude de la vulnérabilité des aquifères à la pollution. .
- Chapitre IV: Résultats et discussion constitue l'objectif principal de notre travail, il portera sur l'application des méthodes SINTACS et REHESE à l'évaluation de la vulnérabilité de la nappe alluviale d'oued Nil.
- Conclusion générale: Elle relatera l'ensemble des résultats obtenus.

Chapitre I :

Aperçu bibliographique

I.1. Vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution

Elle étudie les possibilités de propagation des polluants dans le sol, la vulnérabilité liée au risque de pollution est déterminée par l'accessibilité des substances polluantes qui s'infiltrent à partir de la surface du sol vers les différents aquifères (djoudar, 2003). Le concept de vulnérabilité de l'eau souterraine se définit comme la capacité d'un système hydrogéologique à transmettre un contaminant potentiel depuis la surface du sol jusqu'à atteindre la zone saturée, véhiculée par l'eau des précipitations qui s'infiltrer à la surface du sol, le contaminant percole ainsi à travers la zone non saturée (vadose) jusqu'à atteindre la zone saturée. Certains auteurs l'ont défini comme une propriété intrinsèque des aquifères, alors que d'autre estiment que la vulnérabilité est liée aux propriétés spécifiques du contaminant, d'autres auteurs l'associent aux activités humaines et à la qualité agropédologique des terrains à la surface. La vulnérabilité d'une nappe traduit la facilité avec laquelle elle peut être atteinte par une pollution provenant de la surface du sol. Selon une approche déterministe : Source-Transfert-Récepteur ; le module Source représente la répartition spatiale de la charge du contaminant à la surface du sol, le module Transfert représente le transport d'un contaminant depuis la source jusqu'au milieu récepteur, enfin le module Récepteur indique l'eau souterraine.

I.2. Types de vulnérabilité

I.2.1. Vulnérabilité intrinsèque

La vulnérabilité intrinsèque 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. La sensibilité intrinsèque d'un aquifère est en fonction des caractéristiques intrinsèques géologiques et hydrogéologiques du milieu. La vulnérabilité spécifique ou simplement la vulnérabilité d'un aquifère est définie en incluant l'occupation du sol et les caractéristiques d'un contaminant. En Europe, la vulnérabilité intrinsèque d'un aquifère est définie en fonction des paramètres hydrogéologiques.

I.2.1.1. Critères de la vulnérabilité intrinsèque

Ce sont les paramètres hydrogéologiques en fonction desquels la migration de la pollution peut être accélérée ou au contraire freinée :

a) Sol et zone non saturée

Elle contient de l'air, de l'eau de rétention et de l'eau gravitaire en transit, sa base est imprégnée d'eau provenant de la remontée capillaire à partir de la zone saturée. Le transit des eaux de surface permet l'alimentation de la zone non saturée mais également peut provoquer sa pollution. Cette zone est d'épaisseur variable, allant de quelques mètres à plusieurs centaines de mètres. La surface comporte

généralement de la végétation. En effet, l'épaisseur de la zone non saturée conditionne le temps de transfert d'un polluant jusqu'à la nappe et donc la possibilité de dégradation des micropolluants en cours de transfert (BRGM, 2005). En plus de l'épaisseur, la perméabilité et le degré de fissuration de la zone non saturée jouent un rôle important dans le transfert des polluants vers la nappe.

Le sol joue le rôle d'accumulateur grâce à ses propriétés d'adsorption et d'échange qui sont dues à la présence de colloïdes minéraux et organiques. Ainsi, le sol peut retenir des particules diverses d'un point de vue taille, charge électrique, structure, solubilité...etc. Le sol joue également un rôle d'épurateur biologique grâce à la microflore et microfaune actives qui assurent la dégradation de certains micropolluants (Livet, 2004).

b) Zone saturée

Le type de nappe, qu'elle soit libre, semi captive ou captive, joue un rôle prépondérant dans la vulnérabilité. En effet, l'absence d'horizon imperméable entre la surface et le toit d'une nappe libre lui confère un caractère plus vulnérable qu'une nappe captive protégée par des couches imperméables (Hamza, 2007). De plus, les paramètres hydrodynamiques conditionnent la dilution, la dégradation et la fixation des polluants dans une nappe. Parmi ces paramètres on peut citer la transmissivité (T), la perméabilité (K), le coefficient d'emménagement (S) et le gradient hydraulique (i). Ils déterminent essentiellement la vitesse de migration des polluants du sol vers la nappe. La vitesse de transfert est lente dans un aquifère poreux homogène, rapide en milieu karstique et au niveau des limites amont et aval. Ce transfert peut demander plusieurs années dans un aquifère alluvial et quelques jours dans un aquifère très fissuré.

I.2.2. Vulnérabilité spécifique

La vulnérabilité spécifique (zone à risque) est le terme utilisé pour définir la vulnérabilité d'une eau souterraine à un polluant particulier ou à un groupe de polluants. Elle prend en compte les propriétés des polluants et leurs relations avec les divers composants de la vulnérabilité intrinsèque. La vulnérabilité spécifique décrit les impacts potentiels dus à l'utilisation du sol et des contaminants présents. Parfois la charge de contaminant au sol est considérée comme un paramètre dans l'évolution de la vulnérabilité.

I.2.2.1. Critères de la vulnérabilité spécifique

Ce sont les paramètres qui déterminent les caractéristiques des polluants :

a) Nature du polluant

Le transfert du polluant à travers le sol et la zone non saturée, dépend d'une part de la vitesse et de la direction d'écoulement et d'autre part, de la nature du polluant selon ses différentes caractéristiques, comme la Solubilité, la viscosité et la densité.

b) Capacités dispersives et épuratoires des sols

En cas d'une pollution, les sols ont des propriétés épuratoires plus ou moins développées qui dépendent étroitement de la nature du polluant.

c) Intrusions marines

En cas de présence d'un biseau salé en équilibre avec une nappe d'eau souterraine, la salinisation de la nappe liée à une exploitation constitue une pollution potentielle.

d) Qualité des eaux du réseau hydrographique

La nature des eaux du réseau hydrographique peut affecter la qualité des eaux souterraines selon sa qualité, sa densité et le degré d'entretien...etc.

e) Typologie de l'occupation du sol

Il constitue un paramètre important dans l'évaluation de la vulnérabilité des nappes. En effet, certaines zones sont sujettes à des activités anthropiques apportant des modifications aux caractéristiques du milieu naturel à savoir : les activités agricoles, l'urbanisme, le développement industriel, touristique, ... etc.

f) Points sensibles

Certains sites comme les zones d'activités agricoles, de décharges, d'épandage de margines, augmentent significativement la vulnérabilité de la nappe.

I.3. Cartographie de la vulnérabilité à la pollution

La sensibilité d'une nappe à la pollution est une notion non mesurable dépendant des paramètres propres de la nappe, car elle est définie par rapport à une qui a déjà atteint la nappe, à partir de la zone non saturée ou d'un ouvrage d'eau souterraine (puits, forage, etc.). L'objectif d'une carte de vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines est de fournir le potentiel et le degré de risque de contamination, mais aussi le degré des conséquences possibles d'une contamination, de même que les éléments nécessaires, tant pour la prévention que pour les mesures mises en place à la suite d'une contamination. La cartographie de la vulnérabilité de l'aquifère permet une meilleure gestion de la nappe et des interventions rapides et appropriées en cas de pollution.

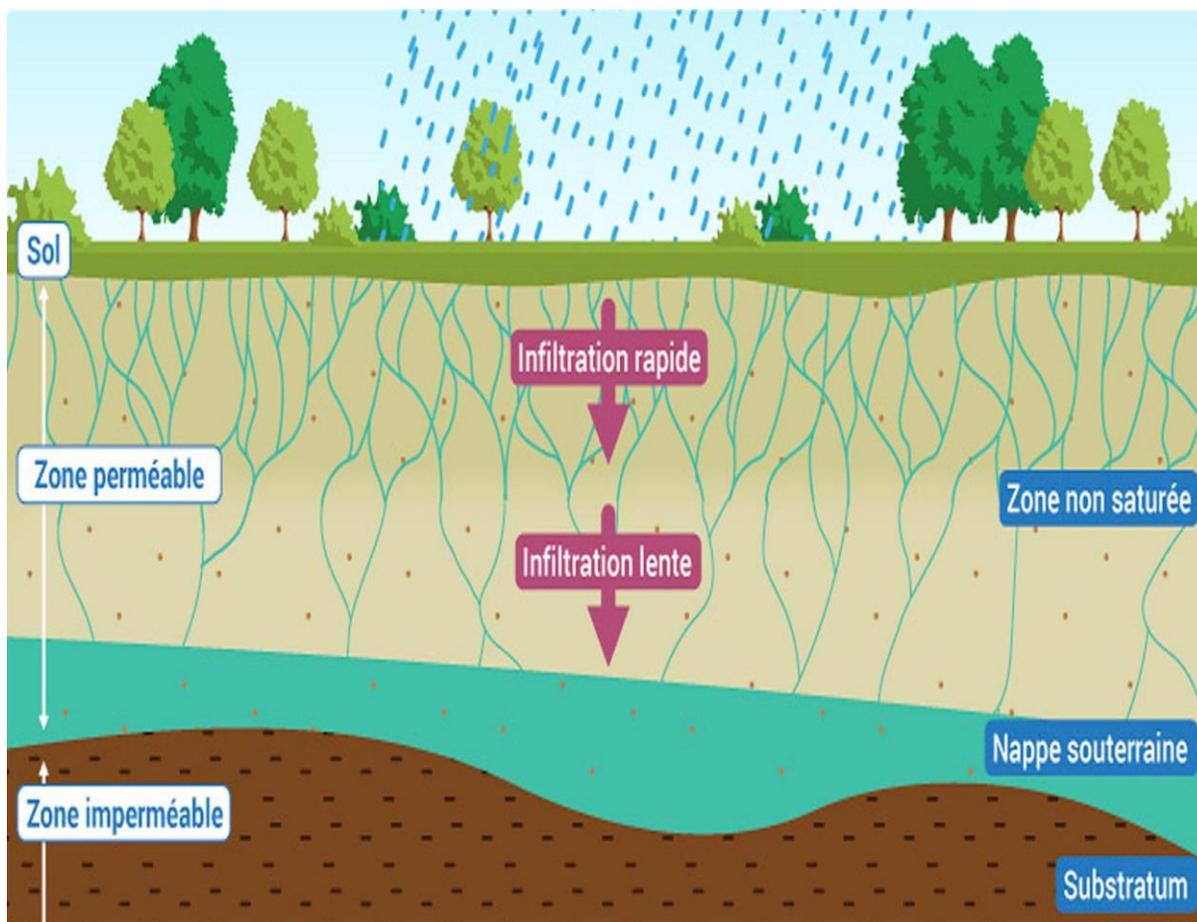


Fig. I.1. Paramètres intervenant dans l'évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines.

I.4. Méthode d'évaluation de la vulnérabilité

Les premières cartes de vulnérabilité furent élaborées par des chercheurs français au début des années 70 (Albinet et Margat, 1970). Elles ont été ensuite expérimentées dans d'autres pays du monde. Le principe de leur élaboration consistait à réaliser la synthèse de quelques paramètres ayant une influence majeure dans la vulnérabilité des aquifères. Depuis une vingtaine d'années, plusieurs méthodes ont été proposées et expérimentées, afin d'aboutir à une caractérisation simple et précise de la vulnérabilité. La littérature afférente au sujet montre l'existence de plusieurs méthodes d'évaluation et de cartographie de la vulnérabilité des nappes aux risques de pollution on peut citer :

I.4.1 Méthodes de cartographie à index

Basées sur la combinaison de cartes uni-critères (sol, géologie, profondeur de la nappe, perméabilité de la ZNS, ...), qui donnent un index numérique à chaque critère et leur attribuent un poids; ce sont des méthodes quantitatives.

I.4.2 Modèles de simulation

Utilisant des équations mathématiques afin de modéliser les processus qui régissent le transport des polluants; ces méthodes sont plus ou moins complexes, selon le type de transports ou la dimension que l'on prend en compte.

I.4.3. Méthodes statistiques

Se basent sur une variable dépendante de la concentration en polluants, fournissent des caractéristiques sur les probabilités de contamination de la zone d'étude.

Les deux dernières méthodes étant basées sur le transport de polluants, elles sont plutôt utilisées dans le cadre de la vulnérabilité spécifique. Les méthodes de cartographie à index sont les plus utilisées dans le cadre de la vulnérabilité intrinsèque.

Tab. I.1. Différents Méthodes d'évaluation de la vulnérabilité

Méthode	Auteur	Année	Nombre de paramètre	Les paramètres
DRASTIC	Aller et al	1987	07	D : Profondeur à la nappe/ R : recharge/ A : type d'aquifère/ S : type de sol/ T : la topographie/ I : impact de la zone vadose/ C : la conductivité hydraulique
GOD	Foster et al	1991	03	Le type de sol, les formations géologiques, la profondeur de la nappe.
SCAM 3	Vbra et Zaporozec	1996	04	Texture de l'horizon A de surface/ texture de l'horizon B du sous-sol/ pH de l'horizon de surface/ la profondeur du sol altéré/ classe de drainage de sol/ perméabilité des horizons du sous-sol/ contenu en matière organique.
EVARISK	Banton	1997	03	Texture de l'horizon a de surface/ Texture de l'horizon B du sous-sol/ pH de l'horizon de surface/ la profondeur du sol altéré/ classe de drainage de sol/ perméabilité des horizons du sous-sol/ contenu en matière organique.
EPIK	Zwahlen et al	1996	04	Le développement de l'EpiKarst/ l'épaisseur de la couverture protectrice/ les conditions d'infiltration et le développement du réseau Karstique.
RISKE	Petelet-Giraud et al	2000	05	La roche aquifère (R), les conditions d'infiltrations (I), la couverture protectrice ou le sol (S), la karstification (K), Epikarst (E).
SINTACS	Citivia	1990	07	Densité des réseaux d'écoulement/ Epaisseur de texture/ connexion aquifère/ eau de surface/ Recharge/ Zone non saturée/ Caractéristique hydraulique et topographie

I.5. But d'une carte de vulnérabilité

La carte de vulnérabilité a été dressée dans le but de montrer quelles sont, suivant les terrains rencontrés en surface (et plus précisément suivant les réservoirs dans les quels 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. (Albinet et Margat ,1970)

I.6. Définition d'une pollution d'eau

La pollution des eaux peut être définie comme une dégradation de celle-ci par les éléments qu'elle a accumulée suite à son utilisation. Ces éléments indésirables proviennent des rejets chimiques, provenant d'industries diverses et de lessivage des terrains traversés (Lounnas, 2009). Le problème de la pollution des eaux représente sans aucun doute l'un des aspects les plus inquiétants de la dégradation du milieu naturel (Ramade, 1998). Par ailleurs, l'eau est souillée de façon croissante par des matières minérales et organiques et même des micro-organismes dont certains sont pathogènes et donc dangereux pour la santé.

I.7. Origines de la pollution

I.7.1. Origine domestique

Dans le cas d'un assainissement collectif ou individuel défectueux, des substances indésirables contenues dans les eaux vannes et les eaux ménagères peuvent être transférées à la nappe (matières organiques, détergents, solvants, antibiotiques, microorganismes, etc.) Le cas se produit avec les puits perdus, l'assainissement individuel avec infiltration dans le sol mal conçue ou mal dimensionnée, les stations d'épuration urbaines surchargées, etc. Les ordures ménagères accumulées dans des décharges sauvages ou non mises à la norme (centre d'enfouissement technique) libèrent également des lixiviats riches en polluants.

I.7.2. Origine industrielle

Les polluants d'origine industrielle sont très variés selon le type d'activité: substance organiques banales, produits organiques de synthèse, hydrocarbures, sels minéraux, métaux lourds, etc. Les

pollutions sont exceptionnelles mais encore trop souvent chroniques (fuite de réservoirs, de canalisations, etc.) Un cas particulier est celui des exploitations minières. L'extraction des granulats en plaine alluviale met en contact l'eau de la nappe avec les polluants éventuels.

I.7.3. Origine agricole

La pollution est étendue dans l'espace et dans le temps; elle est chronique et concerne de grandes surfaces. En effet, les pratiques actuelles des cultures et de l'élevage influencent fortement le régime et la qualité des eaux. L'utilisation massive des engrais et des produits chimiques de traitement des plantes détruit la vie dans les rivières et rend impropres à la consommation humaine, et parfois animale, les eaux superficielles et souterraines. Le transfert des engrais et pesticides à la nappe se fait soit par infiltration sur l'ensemble de la surface cultivée, par rejet dans des puits perdus, des gouffres et des bétoires. La pratique de l'irrigation accélère le transfert. Les élevages intensifs de bovins et volailles produisent une grande quantité de déjections azotées qui doit être stockée en réservoirs étanches avant d'être utilisée comme engrais.

I.7.4. Origine urbaine et routière :

Les risques de pollution apparaissent à la construction des réseaux routiers puis à leur exploitation (salage en hiver, hydrocarbures, métaux lourds libérés par les véhicules, substances dangereuses échappées par accident, etc.) En ville, on trouve, en plus des polluants de la voirie, la contamination possible des nappes par les eaux usées (raccordement incomplet ou défectueux, mauvais état des réseaux, surcharge ou mauvais fonctionnement des stations d'épuration, en particulier absence de traitement), par les fuites de cuves de carburants (essence, fioul), par les cimetières. L'imperméabilisation des surfaces (routes, rues, parkings, toits) produit une forte quantité d'eau de ruissellement chargée en produits polluants divers (hydrocarbures, déjections d'animaux, etc.) Ces eaux pluviales polluées ne doivent en aucun cas être transférées à la nappe.

Conclusion

La prise en compte des risques devra nécessairement passer par la revalorisation des études de vulnérabilité comme base indispensable à la définition des objectifs pour une gestion territorialisée des risques.

Plusieurs méthodes ont été développées pour l'évaluation de la vulnérabilité des aquifères. Il s'agit des méthodes DRASTIC (Aller L., et al, 1987), GOD (Foster, S. 1987), AVI (Van D Stempvoort, et al, 1993), SINTACS (Civita, M. 1994), EPIK (Doerfliger. N and F. Zwahlen, 1997), (Doerfliger N,

et *al*, 1999), PI (Goldscheider, N. et *al*, 2000) et COP (J. M. Vias, et *al*, 2006). Pour une meilleure appréciation de cette vulnérabilité, deux méthodes seront adoptées au cours de cette étude pour attester de la robustesse des résultats obtenus et apprécier celle qui est la mieux adaptée aux aquifères, Il s'agit des méthodes REHESE qui est une méthode empirique pour l'évaluation du pouvoir épurateur des terrains, lors de transfert d'un polluant de la surface du sol jusqu'à la surface de la nappe par circulation verticale, puis en circulation horizontale au sein de la nappe et la méthode SINTACS du fait du nombre important de paramètres qu'elles utilisent, car selon (Evans. B.M and Myers W.R, 1990), un nombre important de paramètres pourrait limiter les erreurs sur les calculs. En plus du nombre de paramètres, la méthode SINTACS, est considérée comme l'une des méthodes les plus adaptée aux régions méditerranéennes, avec des résultats obtenus très intéressants un peu partout à travers le monde.

.

Chapitre II :

Présentation de la zone d'étude

II.1. Situation et présentation de la région de Jijel

II.1.1. Situation géographique de la wilaya de Jijel

Jijel est une wilaya côtière, située au Nord-Est de l'Algérie, elle est distante de 360Km de la capitale Alger. Elle est limitée au Nord par la mer Méditerranée, au Sud et au Sud-Est par la wilaya de Mila, au Sud -Ouest par la wilaya de Sétif et La wilaya de Skikda délimite la partie Est, tandis que la wilaya de Bejaia borde la partie Ouest. Elle s'étend sur une superficie de 2398 Km² avec 11dairas et 28 communes (ANRH, 2013).

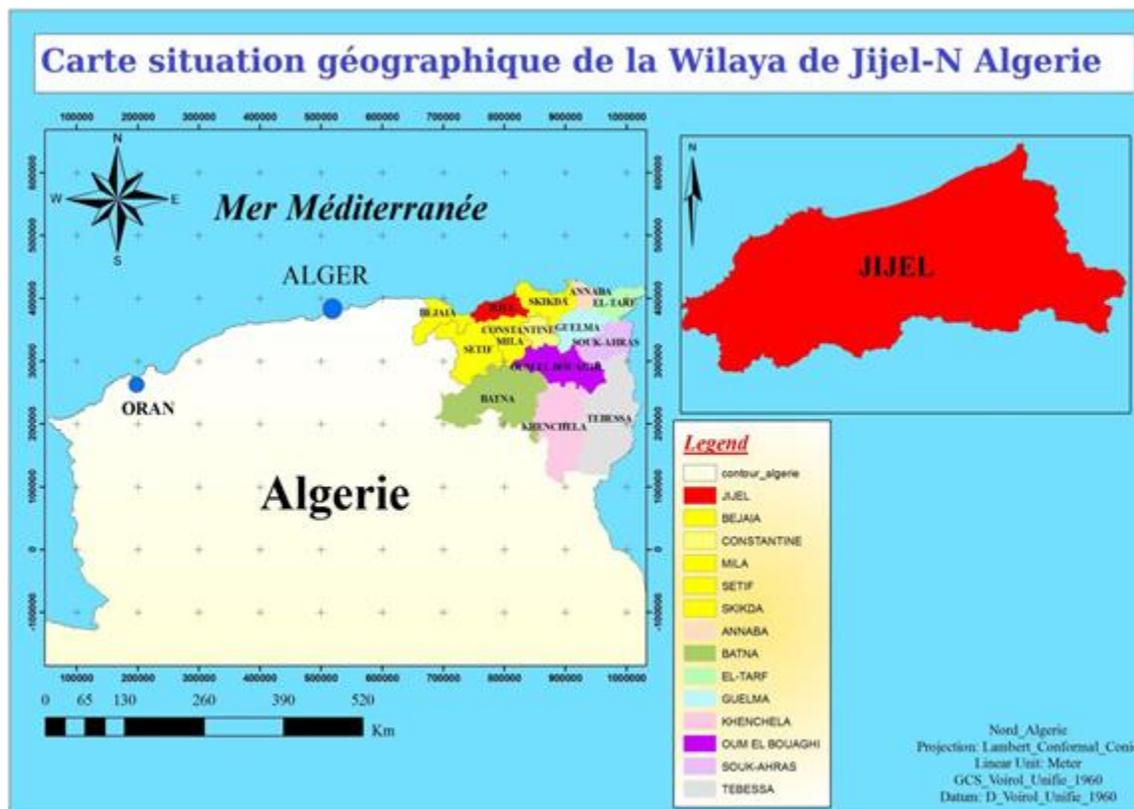


Fig. II.1. Localisation de la wilaya de Jijel (Kerdoud ,2017)

II.1.2. Situation et présentation de la région d'étude :

La zone d'étude correspond a la plaine alluviale d'oued Nil qui fait partie des bassin côtiers Constantinois (03), se caractérisant par une altitude de 486,58 m et une distance de l'ordre de 20 km du chef lieu de la wilaya.

Sa superficie est de 58 Km², elle est limitée au Nord par la mer Méditerranée, au Sud par les montagnes de la petite Kabylie, à l'Est par la commune de Chekfa, à l'Ouest par la Daïra de Taher.

Le bassin versant d'oued Nil d'une superficie de 303.24 Km² subdivisée en 2 sous bassin versant de 148 Km² et 120 Km².

Ce bassin est drainée par oued Nil et ses deux affluent qui sont oued Boukraa et oued Saayoud, avec un débit annuel estimée à 230 millions de mètres cubes (Balli et al., 2009).

Le bassin versant de l'oued Nil s'étend sur une vingtaine de kilomètres au Nord-Est de la ville, il occupe une superficie de 25.474 km², subdivisé en quatre sousplaines :

- La sous plaine d'oued Nil (15.856Km²),
- La sous plaine d'oued Saayoud (3.197Km²),
- La sous plaine d'oued Boukaraa (4.745 Km²),
- La sous plaine d'Oued Tassift (1.676 Km²).

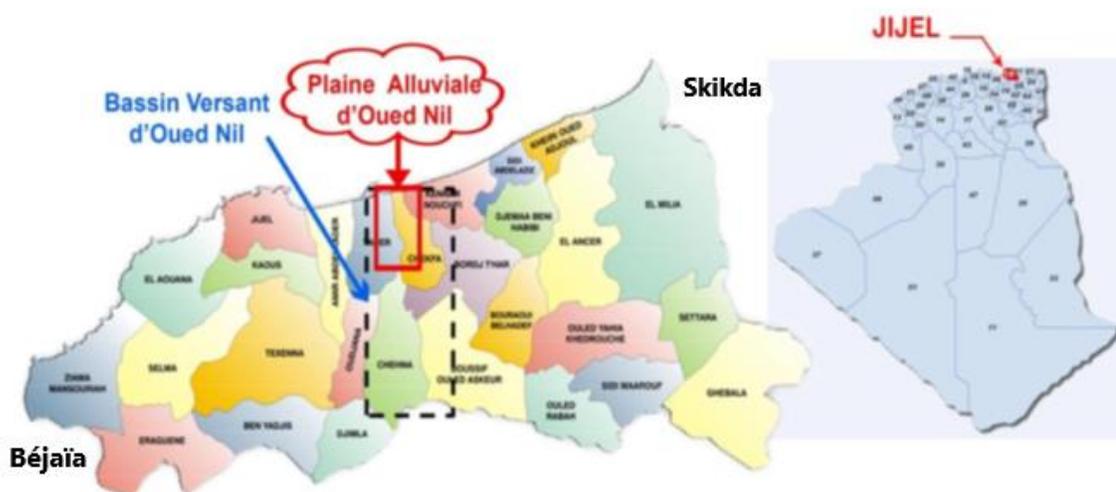


Fig. II.2. Situation Administrative du BV et de la plaine alluviale d'oued Nil

II.2. Géomorphologie de la zone d'étude

La plaine alluviale d'oued Nil est caractérisée par une assez faible pente, se caractérisant par un sens de l'écoulement superficiel.

La plaine est étagée par différents niveaux de terrasses quaternaire caractérisées par de nombreux petits ravins, ces derniers avec les dépressions fermés ou marécages sont engorgés par les fortes précipitations et par les venues d'eau des massifs montagneux qui se situent aux bordures de la plaine (Berkane, 2011) :

- Djebel El Kella (311 m).
- Seddet (956 m),
- Touzlant (921 m),
- Echla'la (843 m),
- Tazamt (851 m),
- El Medayene (791 m).

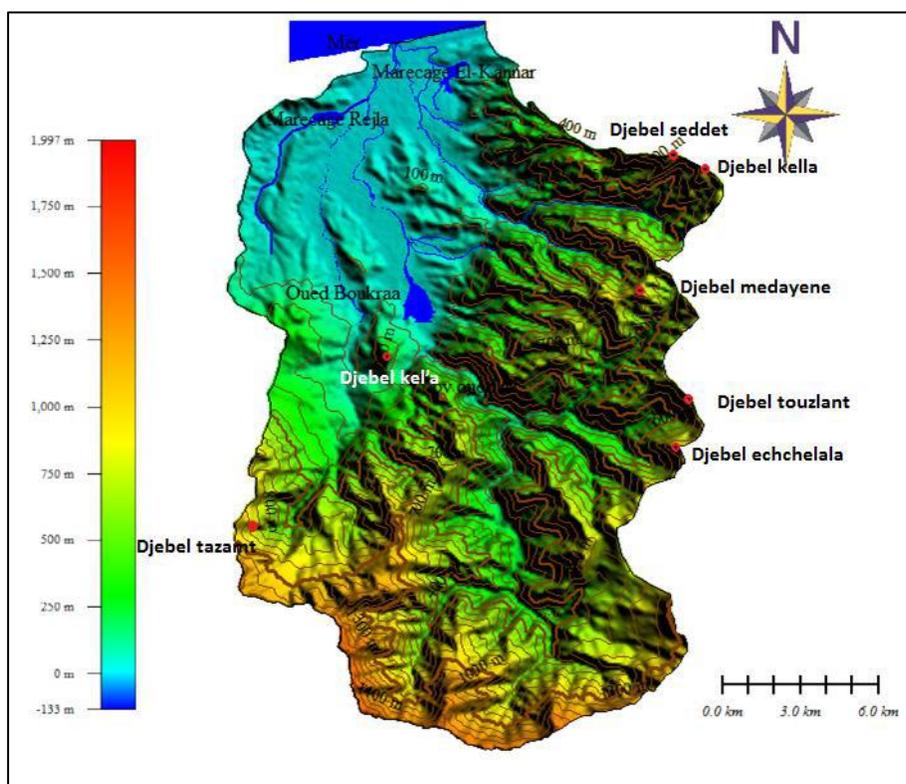


Fig. II.3. Carte d'altitude des montagnes de la zone d'étude.

II.3. Climat

La zone d'étude est influencée par le climat méditerranéen, caractérisé par l'alternance d'une saison sèche et d'une saison humide. Comme toutes les régions littorales algériennes, elle bénéficie d'un climat tempéré avec un hiver doux caractéristique des zones méditerranéennes au niveau de la plaine littorale, et frais ou froid au sud, notamment sur les hautes altitudes où les gelées sont fréquentes. Elle compte parmi les régions les plus arrosées d'Algérie, la pluviométrie étant de 967.08 mm/an (période 1991–2008), et la température minimale est de 16.9°C.

II.4. Végétation

Suite à l'importance de la lame d'eau reçue annuellement, la région développe en conséquence un couvert végétal assez dense qui se manifeste par des forêts abondantes de chêne-liège qui couvre les terrains, en amont sur les massifs et sur les piémonts, ainsi que des oliviers.

Les parties alluvionnaires de l'aval sont en général dénudées et servent à l'agriculture des serres là où les terres ne sont pas marécageuses. Cette végétation demeure menacée par l'érosion favorisant la dégradation du sol.



Fig. II.4. L'agriculture pratiquée dans la zone d'étude

II.5. Réseau hydrographique

Le Bassin versant d'oued Nil occupe une surface de 268 km². Son réseau hydrographique est très dense et englobe quatre sous bassins versants respectivement : oued Nil, oued Saayoud, oued Boukraa et oued Tassift.

Les lits de ces oueds ont une largeur de 10 à 35m et une profondeur de 2 à 4m (Bechkit,2005). Le débit annuel de l'oued Nil à l'embouchure est de 230 millions de mètres cube, il est l'un des oueds les plus importants de la région de Jijel (Lehtihet, 1983). En plus des oueds, on trouve aussi les marécages (marécage Rejla, marécage El Kannar).

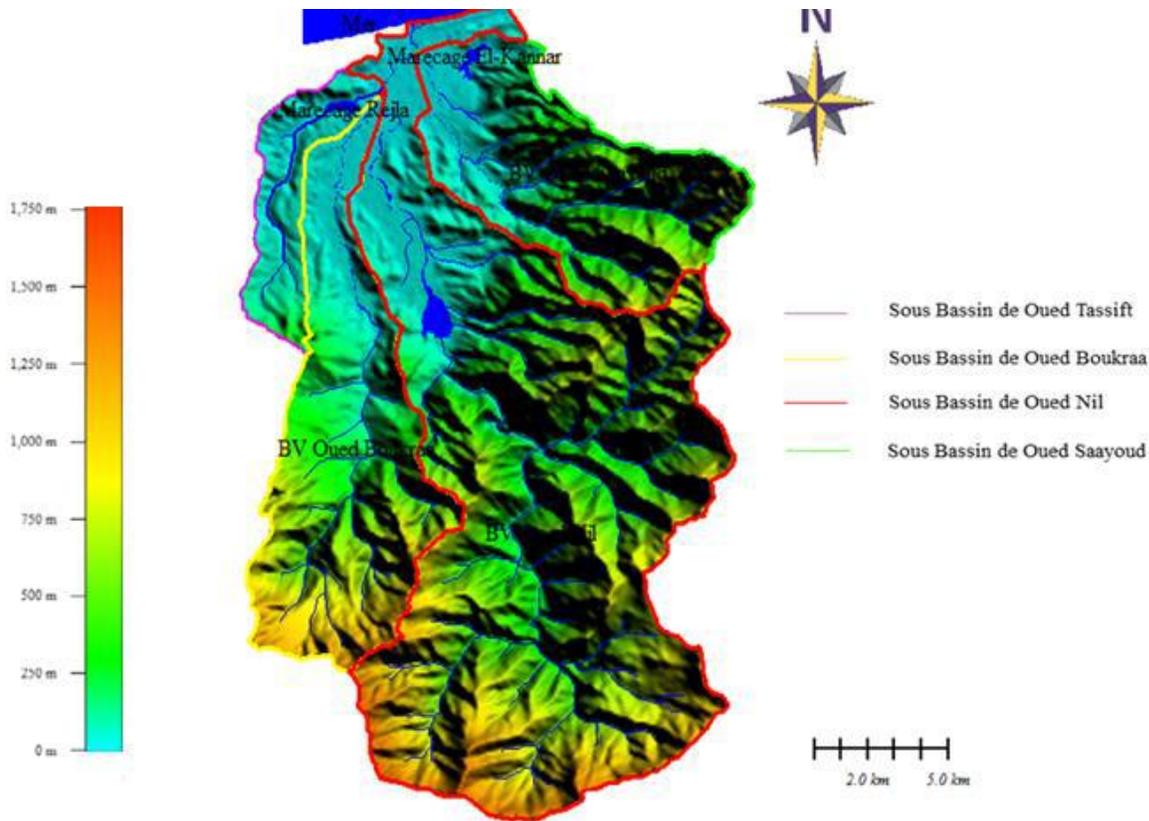


Fig. II.5. Réseau hydrographique de la plaine alluviale d'oued Nil

II.6. Aperçu géologique

II.6.1. Introduction

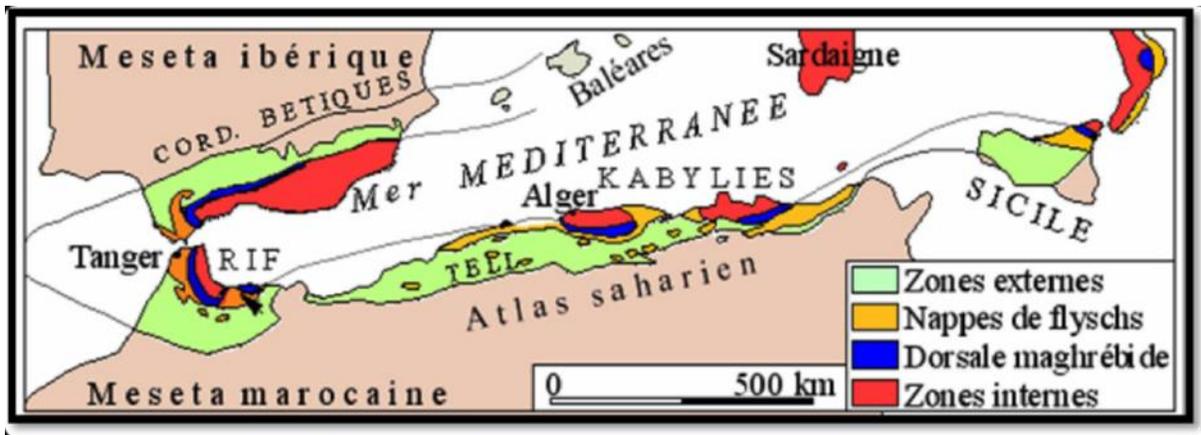
La géologie est un moyen d'investigation indispensable à l'hydrogéologie, par ce fait, elle permet l'identification des formations susceptibles d'être aquifère et de suivre leurs évolutions dans le temps et dans l'espace.

II.6.2. Géologique régionale

La géologie de l'Algérie du Nord est d'une grande complexité, elle est caractérisée par des mouvements orogéniques Hercyniens et Alpains. Le système géotectonique Alpin qui n'a pas encore achevé son évolution a donné naissance à une variété d'ensembles géologiques très individualisés. Ils se regroupent en trois domaines :

- Domaines internes : Le socle kabyle et sa couverture.
- Domaines médians : Le flysch interne et le flysch externe.
- Domaine externe : qui regroupent, le domaine Tellien, le domaine Néritique les séries Sud Sétifiennes et les séries de l'avant-pays Atlasique.

La quasi-totalité de la petite Kabylie est constituée par une couverture tertiaire formée par des sédiments littoraux déposés dans un bassin qui s'est individualisé durant le Néogène (Bassin Sahélien de Jijel) surmontant soit un vieux socle métamorphique (socle kabyle), soit des terrains Crétacé appartenant à des séries de type flysch (Berkane, 2011).



*Fig. II.6. Schéma structural de la chaîne alpine de méditerranée occidentale
(D'après Durand Delga, 1969)*

II.6.3. Géologique local

La plaine alluviale d'oued Nil consiste en un remplissage alluvionnaire d'une ancienne vallée creusée dans les marnes éocènes à l'Ouest (rive gauche d'oued Nil) et les terrains métamorphiques à l'Est (rive droite d'oued Saayoud). Sur ces alluvions se déposent déformations dunaires plus au moins récentes comme celle de Bazoul et d'El-Kennar.

II.6.4 Aspect litho stratigraphique de la zone d'étude

II.6.4.1. Terrains sédimentaires

a) Quaternaire

a.1. Alluvions Quaternaire (q)

Elles affleurent à l'Ouest de la plaine, Ce sont des terrasses anciennes des vallées généralement aquifères, constituées d'éléments grossiers (graviers, galets et conglomérats) qui sont très perméables avec une épaisseur variant de 30 à 50 m.

a.2. Alluvions marécageuse (a³) Elles affleurent au Nord de la plaine. On les trouve dans les dépressions fermées ou ghedirs constitués essentiellement d'éléments argilo-limoneux parfois sableux peu Perméables. L'épaisseur varie de 20 à 25m.

a.3. Alluvions récente (a²)

Sont constituées d'éléments grossiers: graviers, conglomérats et galets très Perméables. On les rencontre le long des oueds principaux, leur épaisseur est inférieure à 10 m.

a.4. Dunes ancienne (D)

Elles sont constituées de sables fins limoneux souvent consolidés. On les rencontre au Nord de la plaine avec une épaisseur de l'ordre de 25 m. Ces formations sont potentiellement aquifères.

a.5. Dunes actuelles (d)

Constituées essentiellement de sables fins souvent consolidés. On les rencontre à la bordure de la

b) Tertiaire**b.1. Paléogène**

Des formations gréseuses affleurent au Sud de la plaine. L'épaisseur varie de 500 à 1000 m. Ce sont surtout le :

b.1.1. Mauritanien (Eocène supérieur-Oligocène) (eb³⁻²)

Constitué essentiellement de grés.

b.1.2. Numidien (Eocène supérieur-Oligocène-Miocène inf.) (ea³⁻²)

C'est une formation de flysch comportant des alternances de grés avec une prédominance d'argiles, des marnes à la base et des grés au sommet.

b.2. Néogène**b.2.1. Miocène inférieur (Burdigalien) (m¹)**

Affleure dans la partie Ouest de la plaine. Constitué essentiellement par des marnes grises Parfois sableuses ou jaunâtres par oxydation, le facies très constant avec des intercalations des niveaux détritiques et de gros nodules calcaires jaunâtres. L'épaisseur varie de 200 à 300m.

b.2.2. Miocène moyen (Pontien) (m³)

Il apparait à l'affleurement dans le coté Est et Ouest d'oued Boukraa. Il est composé de Dépôts détritiques, cailloutis et argiles d'origine continentale. De bonne perméabilité et d'une épaisseur de 20 à 25 m.

b.2.3. Miocène supérieur marin (Sahélien) (m⁴)

Affleure au centre de la plaine et à l'Est d'oued Nil, il est constitué essentiellement par des marnes bleues.

II.6.4.2. Terrains métamorphiques

Ils constituent le socle Kabyle, d'âge paléozoïque avec :

a) Schiste - phyllade (x^y)

Argileux micacés ou satinés de teintes très variées, traversés de filons de Quartz laiteux s'intercalant de couches détritiques.

b) Calcaire métamorphique (cipolins)

De couleur blanc, gris ou bleuâtre, parfois micacé et pyriteux s'intercalant en bandes irrégulières ou en amas dans les schistes et les micaschistes.

c) Micaschistes et schiste micacé (x² B¹⁻³)

Ces formations sont riches en micas noirs et blancs.

d) Schiste granulitisés et gneiss (x² B¹⁻³)

Ce sont des gneiss schisteux résultant de l'injection des granulites dans les Micaschistes, parfois fortement kaolinisés.

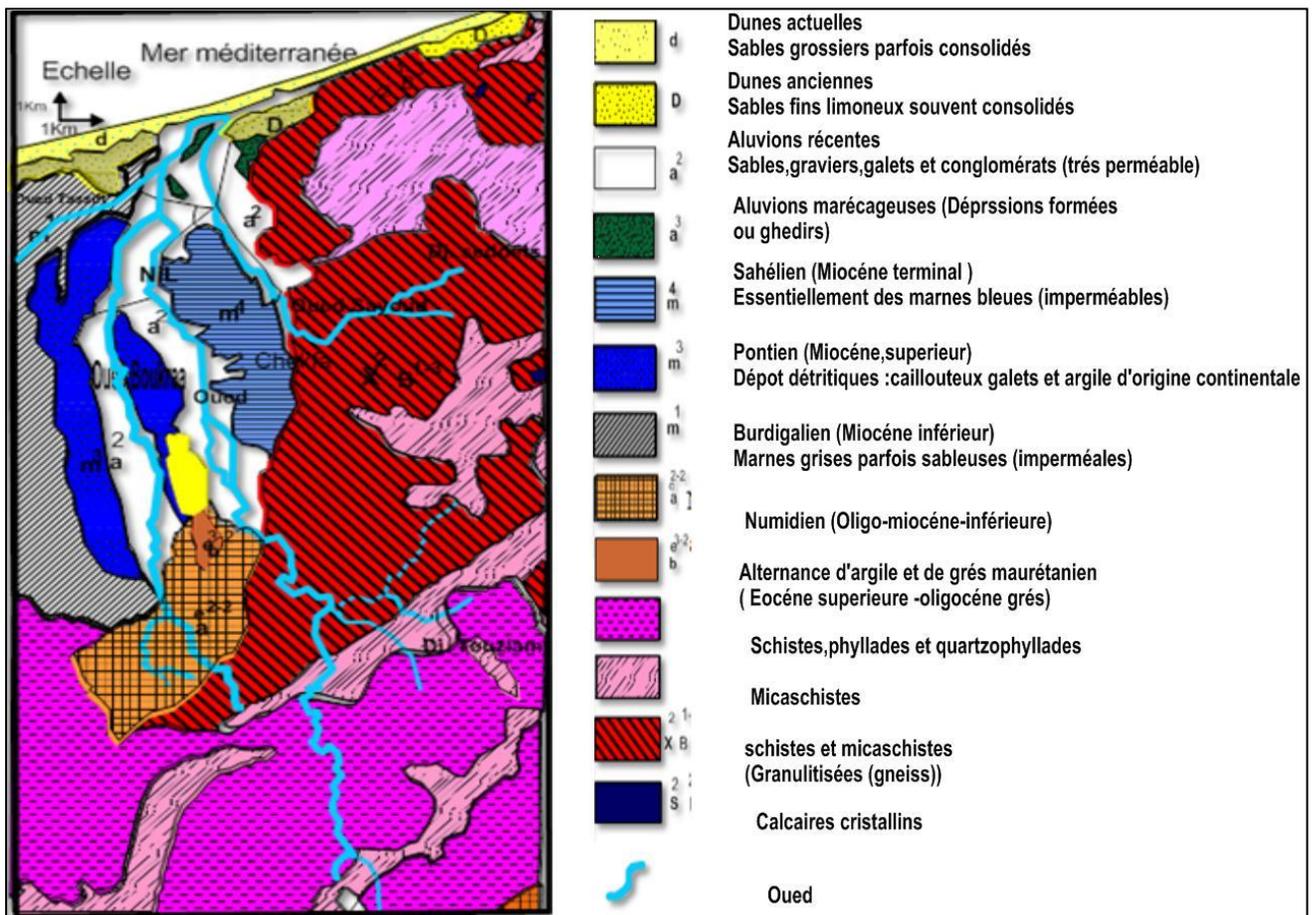


Fig. II.7. Carte géologique de la zone d'étude (Provenant de la carte géologique d'El-Milia N°29, Ehrmann F. 1926)

II.6.5. Classifications des formations selon leur intérêt hydrogéologique

En hydrogéologie, l'identification des formations et des structures géologiques permet la détermination des formations susceptibles ou non d'emmagasiner l'eau. En se basant sur les caractéristiques hydrodynamiques, l'extension des formations ainsi que leur aspect structural, les principales formations lithologiques du secteur d'étude peuvent être regroupées en deux grands ensembles :

II.6.5.1. Terrain à faible perméabilité

Ces terrains sont favorables au développement des aquifères poreux. Il s'agit des dunes, d'alluvions du Quaternaire et la formation du Miocène supérieur "Pontien".

a) Dunes

Elles sont généralement de faible perméabilité.

b) Dunes récentes

On les rencontre à la bordure de la mer. Elles sont constituées essentiellement de sables fins parfois consolidés.

c) Dunes anciennes

On les rencontre aussi au Nord de la plaine. Elles sont constituées essentiellement de sables fins limoneux souvent consolidés.

d) Quaternaire

Il est généralement de bonne perméabilité sauf la couverture argilo-limoneuse qui est peu perméable. Ce sont : les alluvions récentes, les alluvions marécageuses et les alluvions quaternaires.

e) Formations du Miocène moyen

Ce sont des dépôts détritiques d'origine continentale de bonne perméabilité (Lehtihet, 1983).

II.6.5.2. Terrains à grande perméabilité

Il s'agit essentiellement des terrains métamorphiques qui ont une perméabilité de fissure très faible. Les nombreuses sources qui s'y trouvent grâce à l'abondance des pluies ont un débit limité. Dans le socle métamorphique on distingue :

- ✓ Un complexe schistes-phyllades et quartz-phyllade.
- ✓ Micaschistes à biotites.
- ✓ Schistes et micas à biotites (Djellit, 1987).

II.6.5.3. Terrains imperméables

Il s'agit des :

- ✓ Formations du Miocène supérieur « le Sahélien ».
- ✓ Formations du Miocène inférieur « le Burdigalien » (Durand Delga, 1955).
- ✓ Formations gréseuses du Paléogène « Numidien et Maurétanie » (Vila, 1980).

La lithologie des terrains dominants dans l'espace du terrain d'étude est d'une perméabilité médiocre. En effet, les terrains du socle, essentiellement les schistes et les phyllades, ont une perméabilité de fissure très faible.

Quant aux terrains sédimentaires, la lithologie dominante est celle des marnes et des grés argileux des flysch. Ils sont imperméables et constituent de part et d'autre, selon leurs formations, des limites supérieures ou inférieures sauf les formations du « Pontien » qui sont constituées essentiellement de dépôts détritiques, cailloux et argiles, susceptibles d'être réservoir.

En ce qui concerne les terrains les plus récents, quaternaires, constitués essentiellement de trois niveaux de bonne perméabilité et de par leur position, ils constituent un réservoir important (Berkane, 2011).

II.6.6. Séismologie

L'Algérie est périodiquement soumise à des tremblements de terre localisés principalement sur la bande tellienne. L'Algérie participe pour un quart environ à l'activité sismique de la Méditerranée occidentale (environ 100 microséismes par mois). Cette intense sismicité est due principalement au rapprochement de la plaque Afrique par rapport à la plaque eurasienne, de l'ordre de quelques millimètres par an (environ 7 mm). C'est une sismicité à la fois diffuse et sans cohérence spatiale, mais surtout réputée superficielle avec une profondeur locale de l'hypocentre de l'ordre de 10 km; ce qui explique les effets dévastateurs malgré la modération des différentes secousses (séisme de Boumerdès du 21 mai 2003 de magnitude relativement modérée aux conséquences apocalyptiques dans la zone épiscopale). Elle est caractéristique des zones de collision où la sismicité est imputée à la déformation de la croûte lithosphérique supérieure qui génère des failles sismogènes. Plusieurs séismes de modéré à sévère ont eu lieu en Algérie durant ces dernières décennies, on peut citer : Constantine (27/10/1985), Chenoua, Tipasa (29/10/1989), Béni Chougrane, Mascara (18/8/1994), Aïn Benian (4/09/1996), Mila (6/8/2020).

Le zonage sismique du territoire algérien montre que la bande tellienne notamment dans sa frange littorale est soumise au degré d'aléas sismique le plus élevé. Le territoire national est divisé en cinq (5) zones de séismicité croissante, définies comme suits :

- Zone 0 : sismicité négligeable
- Zone I : sismicité faible
- Zone IIa et IIb : sismicité moyenne
- Zone III : sismicité élevée

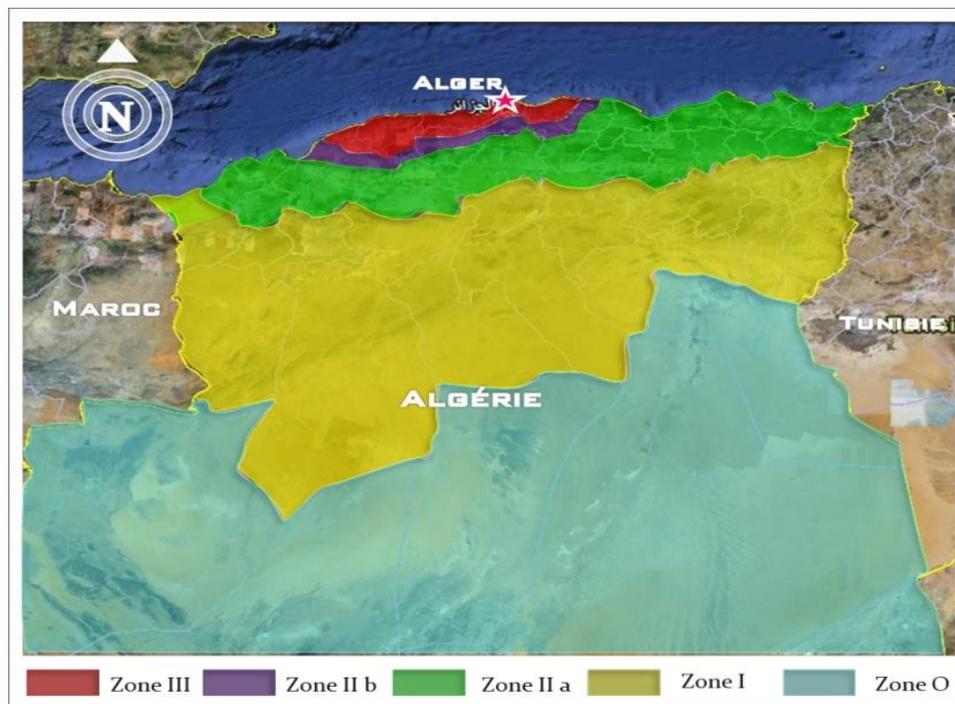


Fig. II.8. Zone sismique en Algérie (Boughazi ,2012)

II.7. Climatologie de la zone d'étude

II.7.1. Aperçu sur le climat de l'Algérie et de la zone d'étude

II.7.1.1. Climat de l'Algérie

Du Nord vers le Sud, le climat en Algérie est caractérisé par une grande variation surtout au niveau des températures et de précipitations et cela est confirmé par les différents types de couvert végétal d'une zone à l'autre. Le climat est de type méditerranéen sur toute la frange Nord qui englobe le littoral et l'Atlas tellien (étés chauds et secs, hivers humides et frais), semi-aride sur les hauts plateaux au centre du pays, et désertique dès que l'on franchit la chaîne de l'Atlas saharien. Les écarts de température dans une même journée peuvent être considérables, c'est le cas dans le Sahara où le

mercure peut osciller d'un extrême à l'autre en l'espace de quelques heures seulement (Berkane, 2011).

II.7.1.2. Climat de la zone d'étude

Comme toutes les régions du littoral algérien, la wilaya de Jijel est caractérisée par un climat méditerranéen pluvieux et doux en hiver, chaud et sec en été .Le maximum des températures sont atteint au mois d'Août avec 31,56°C et le minimum au mois de Janvier avec 6,52 °C. Elle est parmi les régions les plus arrosées d'Algérie (ONM, 2012). Ses importantes ressources hydriques ont essentiellement pour origine les précipitations fréquentes qui atteignent les 1105,7 mm/an (ONM, 2013).

II.7.2. Caractéristiques climatiques

Les conditions climatiques jouent le rôle principal pour déterminer le régime des cours d'eau .Elles sont utilisées pour définir les caractéristiques des eaux de surfaces .Parmi les facteurs hydro climatologiques étudiés, la pluviométrie demeure la plus importante ainsi que la température de l'air et d'autres facteurs secondaires tels que le vent, l'évaporation, l'humidité . . . etc.

II.7.2.1. Précipitation

Les précipitations sont l'élément le plus important, dans l'établissement du bilan hydrique parce qu'elles jouent un rôle primordial dans la pérennité de l'écoulement du réseau hydrographiques d'une région donnée, ainsi que dans l'alimentation de ses eaux souterraines. De plus, toute étude climatologique nécessite une analyse bien détaillée des précipitations, pour pouvoir déceler l'influence des différentes fluctuations pluviométriques ; mensuelles, saisonnières et interannuelles sur le régime des cours d'eaux et la recharge des nappes aquifères, qui lessive et dissout les éléments minéraux contenus dans les différentes formations rocheuses identifiées. Cette quantité de sels dissouts dans les eaux souterraines influencera leur composition chimique. La Wilaya de Jijel est caractérisée par une pluviométrie décroissante du Nord vers le Sud. Elle est assez élevée sur les monts de Texenna avec plus de 1200 mm/an, alors qu'au niveau des plaines les valeurs varient de 1000 à 1200 mm/an (Fig.II.9).

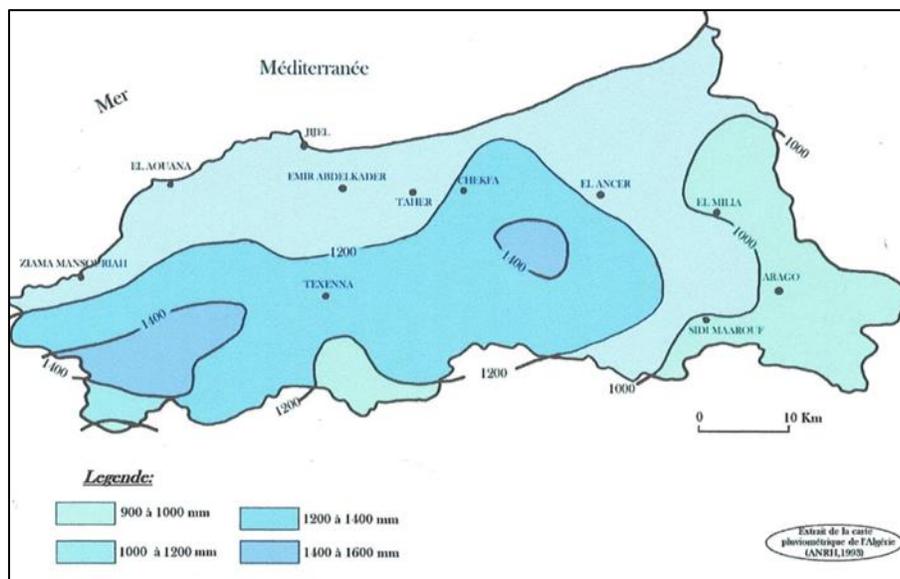


Fig. II.9. Carte pluviométrique de la wilaya de Jijel (ANRH)

a) Précipitations moyennes mensuelles

Les précipitations moyennes mensuelles (TabII.1) et (Fig II.10) indiquent clairement les mois de fortes précipitations des mois de faibles précipitations.

Tab. II.1. Précipitation moyenne mensuelle à la station Achouat - Taher(1988 - 2015)

Mois	Sep	oct	nov	déc	Jan	fév	mars	avr	mai	Jui	juil	aout
P (mm)	63,79	93,89	159,15	185,78	131,53	121,29	86,91	82,11	50,19	15,87	2,88	15,16

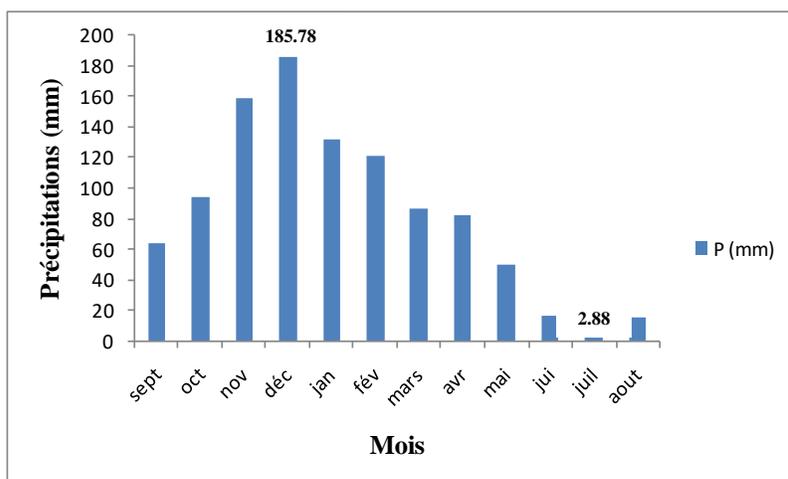


Fig. II.10. Histogramme des précipitations moyennes mensuelles

D'après le tab(II.1) et la fig(II.10), on constate que les précipitations atteignent leur maximum au mois de Décembre avec une valeur de (185.78mm) et le minimum est atteints au mois de Juillet qui est considéré comme le mois le plus sec de l'année avec (2.88 mm).

b) Précipitations moyennes annuelles

L'examen de la variation interannuelle des précipitations pour la période de 1988 à 2015 est donnée dans le (Tab II.2) et la (Fig II.11) ou l'on remarque que les hauteurs annuelles des précipitations pour les années considérées varie de 647.2 mm pour l'année 1996-1997 à 1429.4 mm pour l'année 2002-2003, le module pluviométrique interannuel est égal a 1016.52mm.

Tab. II.2. Précipitation interannuelle à la station Achouat - Taher (1988 - 2015)

Année	1988-1989	1989-1990	1990-1991	1991-1992	1992-1993	1993-1994	1994-1995	1995-1996	1996-1997
Précipitation (mm)	1091,6	731	1251	1106,6	979	757,8	1001,5	1107,8	647,2
Année	1997-1998	1998-1999	1999-2000	2000-2001	2001-2002	2002-2003	2003-2004	2004-2005	2005-2006
Précipitation (mm)	1129,8	1019	863,5	797,9	655	1429,4	1042,4	124,9	876,9
Année	2006-2007	2007-2008	2008-2009	2009-2010	2010-2011	2011-2012	2012-2013	2013-2014	2014-2015
Précipitation (mm)	813	1118,7	955	1008,4	1027,8	1389,5	1167,1	983	1253,45

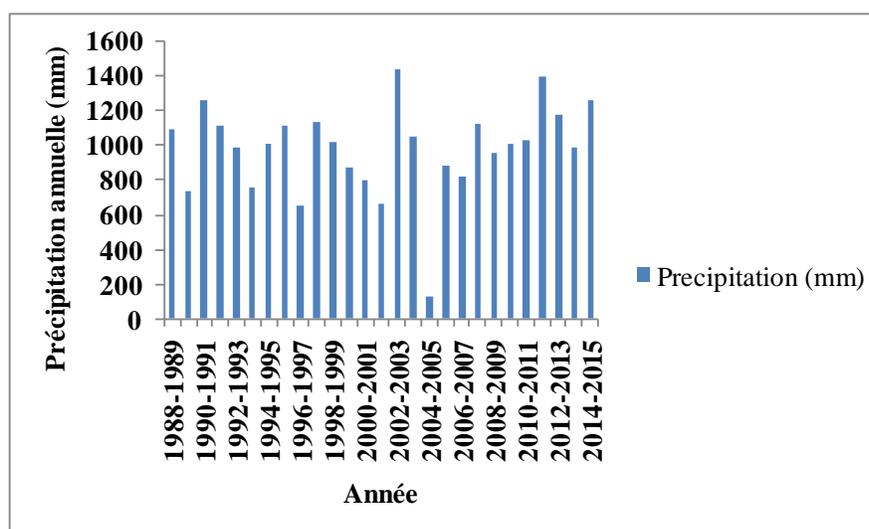


Fig. II.11. Précipitations moyenne inter-annuelles de la station d'Achouat – Taher(1988-2015)

c) Précipitations moyennes saisonnières

- L'examen des précipitations inter-saisonnière est donnée dans (tab.II.3) et (la fig.II.12) ci-dessous, nous montre une variabilité des précipitations maximale en hiver 438.6mm et minimale en été 33.91mm.
- L'analyse des données de précipitations saisonnières pour la région de la plaine alluviale d'oued Nil montre que :
 - Les précipitations en automne indiquent un pourcentage de 31%.
 - Les précipitations en hiver indiquent un pourcentage de 44%.
 - Les précipitations en printemps indiquent un pourcentage de 22%.
 - Les précipitations en été indiquent un pourcentage de 3%.

Tab. II.3. Variation des précipitations moyennes mensuelles et saisonnière (1988-2015)

	Automne			Hiver			Printemps			Eté			Somme
	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	
P (mm)	316.83			438.6			219.21			33.91			1008.55
P(%)	31			44			22			3			100

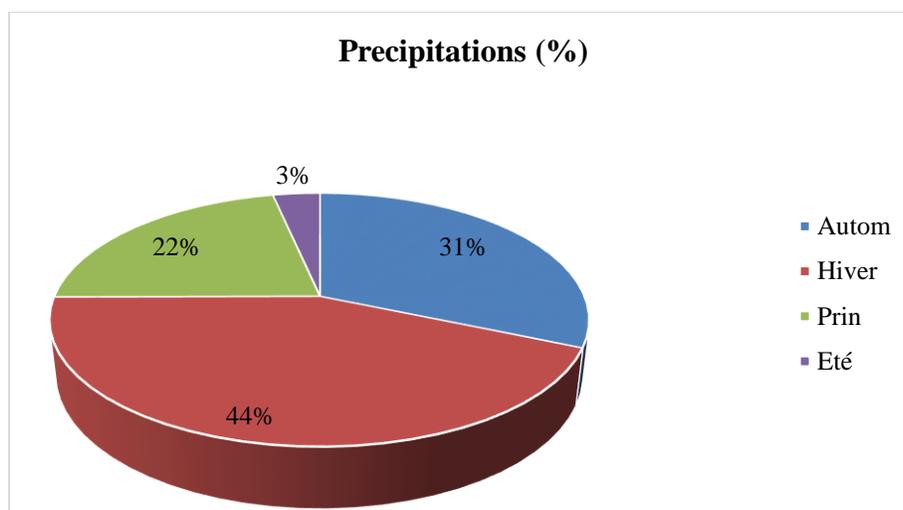


Fig. II.12. Variations des précipitations moyennes saisonnières

II.7.2.2. Température

La température est l'un des facteurs les plus importants du climat, elle influence les autres paramètres climatiques tels que l'évapotranspiration et le taux d'infiltration et le régime d'écoulement surfacique, ce qui le classe comme un paramètre essentiel dans le calcul du bilan hydrique.

a) Températures moyennes mensuelles

Le graphique de variation des températures moyennes annuelles (Tab II.4) et (Fig II.13) pour la période considérée de (1988 - 2015), démontre que la température moyenne la plus élevée a été enregistrée au mois d'Aout avec 25.35 C° et la température la plus faible pendant le mois de janvier avec 11.62 C°.

Tab. II.4. Températures moyennes mensuelles

saïson	Automne			Hiver			Printemps			Eté			
Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul	Aou	Moy
T(C°) max	26.2	22.8	19.8	15.3	14.4	13.9	15.2	17.8	20.8	24.9	27.7	28.6	20.61
T(C°) min	21.5	17.8	14.1	10.7	9	8.7	9	13.5	7.5	20.4	23	24.3	14.95
T(C°)	23.85	20.3	16.95	13	11.7	11.3	12.1	15.65	14.15	22.65	25.35	26.45	17.78
T(C°) moy	20.37			12			13.97			24.82			17.78

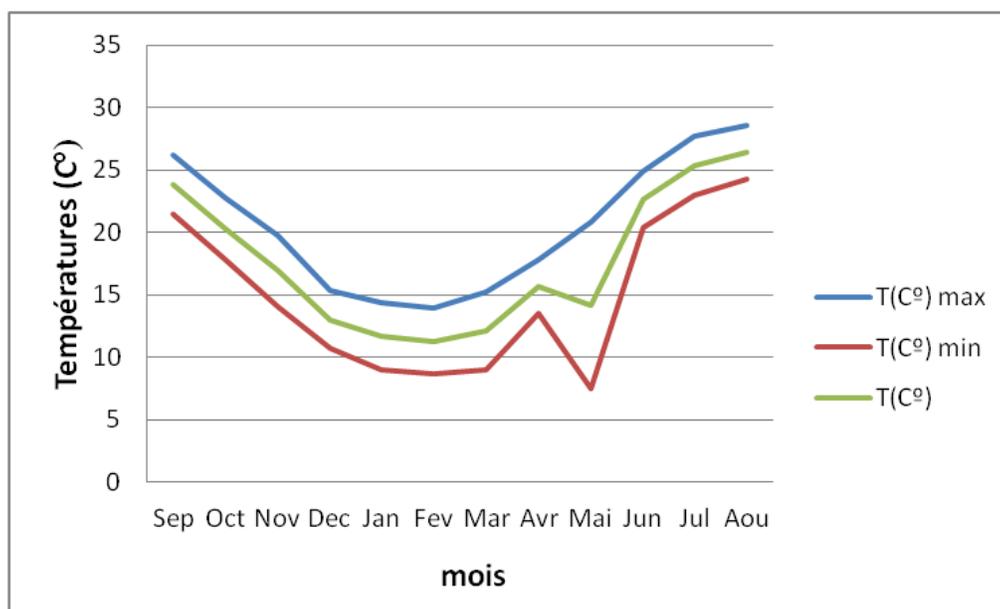


Fig. II.13. Variation des températures moyennes mensuelles

b) Températures moyennes annuelles

La variation des températures moyennes annuelles (Tab.II.5) et (Fig II.14) pour la période considérée (1988-2015), montre que l'année la plus froide est celle de 1991-1992 avec une moyenne de température de 15.25 C°, et la plus chaude est celle de 2014- 2015 avec une moyenne de 18.65C°.

Tab. II.5. Températures moyennes annuelles(1988-2015)

Année	1988-1989	1989-1990	1990-1991	1991-1992	1992-1993	1993-1994	1994-1995	1995-1996	1996-1997
T'(C°) moy-annuelle	16,68	17,51	16,61	15,25	16,41	17,01	17,63	17,71	17,43
Année	1997-1998	1998-1999	1999-2000	2000-2001	2001-2002	2002-2003	2003-2004	2004-2005	2005-2006
T'(C°) moy-annuelle	17,67	16,97	17,58	17,62	17,1	17,87	17,19	17,23	17,88
Année	2006-2007	2007-2008	2008-2009	2009-2010	2010-2011	2011-2012	2012-2013	2013-2014	2014-2015
T'(C°) moy-annuelle	18,25	17,17	17,73	17,9	18,2	17,8	17,5	18,12	18,65

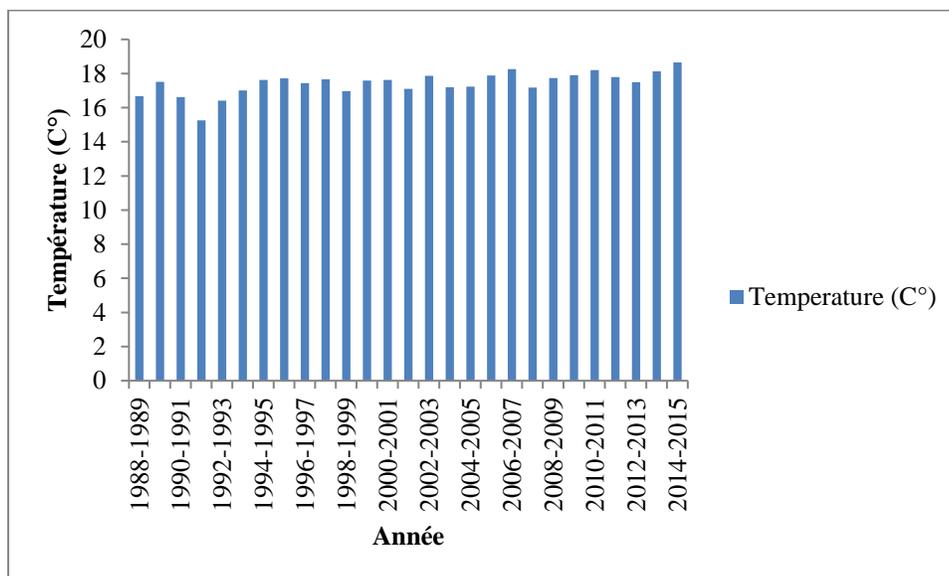


Fig. II.14. Variation des températures moyennes annuelles (1988-2015)

II.7.2.3. L'humidité

L'humidité relative de l'air montre l'état de l'atmosphère en expliquant s'il est plus ou moins proche de la condensation, elle correspond au rapport de la tension de vapeur réelle observée à la tension de vapeur saturante à la même température. Ce paramètre intervient comme coefficient de l'évapotranspiration lorsqu'il est inférieur à 50%.

a) L'humidité moyenne mensuelle

Les valeurs obtenues de l'humidité relative sont présentées dans le (TabII.6) et (FigII.15).

La région d'étude est caractérisé par une humidité élevé durant toute l'année, ou en peut dire que la variation de l'humidité est homogène avec des moyennes mensuelles varient entre 71.17 % observée au mois de mai et d'aout et 78.02 % observée au mois de janvier.

Tab. II.6. L'humidité moyenne mensuelle (1991-2008)

Mois	sep	oct	nov	déc	jan	fév	mars	avr	mai	juin	juill	aout
H moy (%)	77,67	77,5	76,56	77,5	78,06	77,61	76,56	75,72	71,17	74,22	72,28	71,17

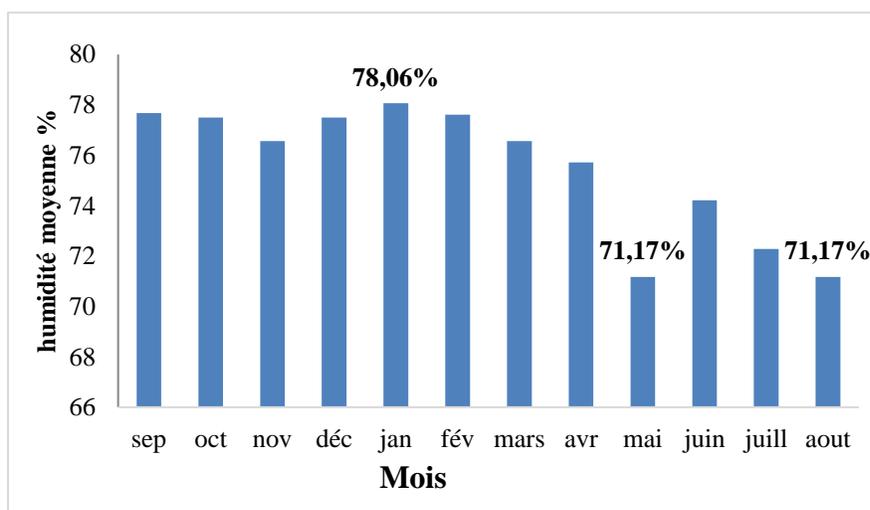


Fig. II.15. Humidité relative moyenne mensuelle(1991-2008)

II.7.2.4. L'évaporation

L'évaporation, est un processus physique de transformation d'un liquide en gaz.

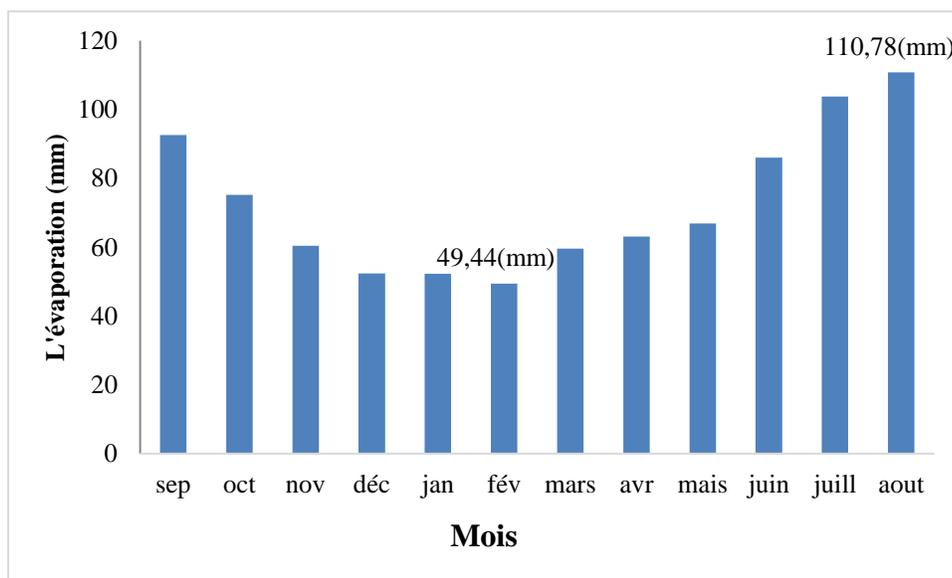
L'évaporation est la source de la création des masses nuageuses et constitue de ce fait, une phase essentielle du cycle d'eau, elle dépend de plusieurs paramètres qui sont difficiles à déterminer (Berkane, 2011).

a) L'évaporations moyennes mensuelles

L'évaporation est fonction de la température, dans notre zone d'étude, la valeur maximale est observée au mois d'aout avec 110.78mm, alors que la valeur minimale est de 49.44mm au mois de février.

Tab. II.7. L'évaporation moyenne mensuelle (1991-2008)

Mois	sep	oct	nov	déc	jan	fév	mars	avr	mais	juin	juill	aout
Evaporation moyenne mensuelle (mm)	92,61	75,17	60,39	52,39	52,28	49,44	59,61	63,06	66,89	86	103,78	110,78

**Fig. II.16.** L'évaporation moyenne mensuelle (1991-2008)

II.7.3. Régime climatique

II.7.3.1. Diagramme Ombrothermique de Gaussen

Ce diagramme résulte de la combinaison des deux paramètres climatiques : la température et les précipitations, il permet de déterminer la période sèche qui correspond selon la définition de Gaussen et bagnoles à la période pendant laquelle les précipitations totales du mois sont inférieures ou égale au double de la température du même mois ($p=2t$).

Tab. II.8. Valeurs moyennes mensuelles des précipitations et températures

Mois	sep	oct	nov	déc	jan	fév	mar	avr	mai	jun	juil	aou	année
P(mm)	63,79	93,89	159,15	185,78	131,53	121,29	86,91	82,11	50,19	15,87	2,88	15,16	1008,6
T(C°)	23,71	20,52	16,01	12,73	11,62	11,66	13,58	15,58	15,59	18,41	22,51	25,35	17,27

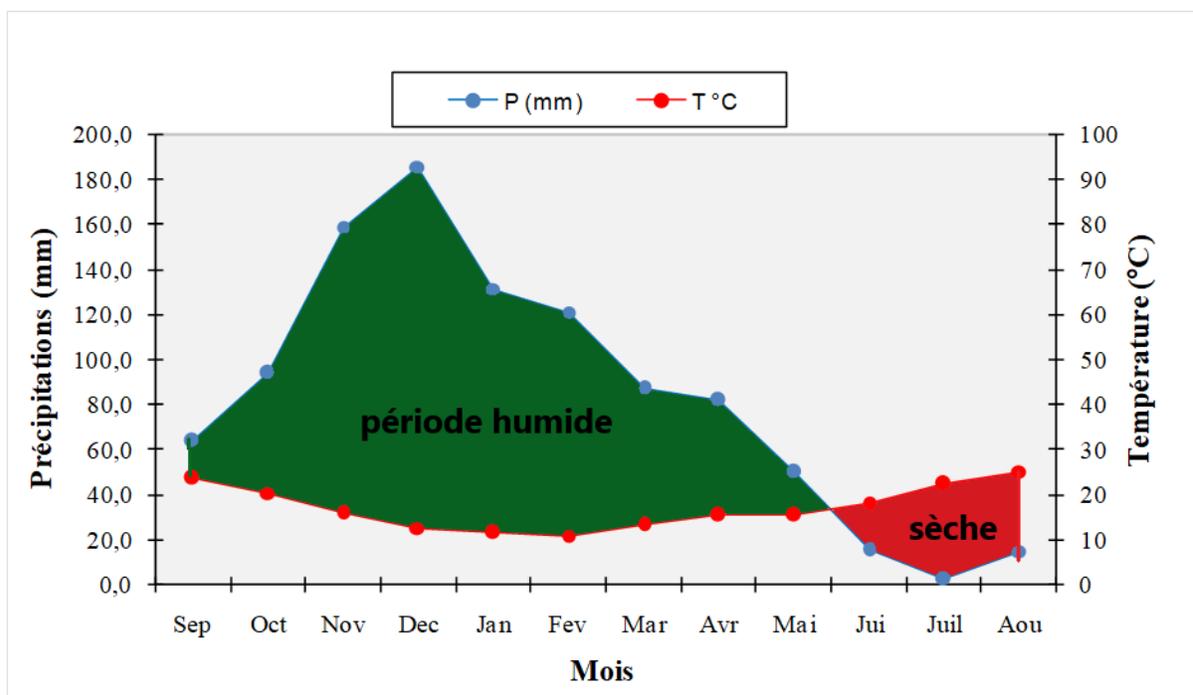


Fig. II.17. Diagramme Ombrothermique à la station d'achouat-Taher (1988-2015)

D'après le diagramme Ombrothermique on distingue deux périodes :

- La période sèche qui s'étale des derniers 15 jours du mois de février jusqu'à la fin de septembre avec une durée de 7 mois et 15 jours.
- La période humide qui s'étale de mois d'octobre jusqu'au premiers 15 jours du mois de février avec une durée de 4 mois et 15 jours.

II.7.3.2. Diagramme d'Emberger

Pour situer le climat de la région étudiée, on utilise le diagramme d'Emberger qui est un abaque comportant en ordonnée les valeurs du Q2 et en abscisses la température moyenne des minimas de la saison froide.

$$Q2 = 2000[P/(M^2 - m^2)]$$

Avec :

Q2 : quotient pluviométrique d'Emberger.

P : précipitations moyennes annuelles en (mm)

M² : moyenne des maxima du mois le plus chaud en degré absolu (°K)

m² : moyenne des minimas du mois le plus froid en degré absolu (°K)

Dans le cas de notre région d'étude :

$$M = 28.6 + 273,15 = 301.75^{\circ}\text{K}$$

$$m = 7.5 + 273.15 = 280.65^{\circ}\text{K}$$

$$P = 1008.55\text{mm}$$

$$Q2 = 2000[P/(M^2 - m^2)] = 164.1 \quad \text{et} \quad T = \frac{10.7+9+8.7}{3} = 9.46^{\circ}\text{C}$$

La valeur du quotient pluviométrique de la station d'Achouat-Taherest de 164.1 indiquant un régime humide.

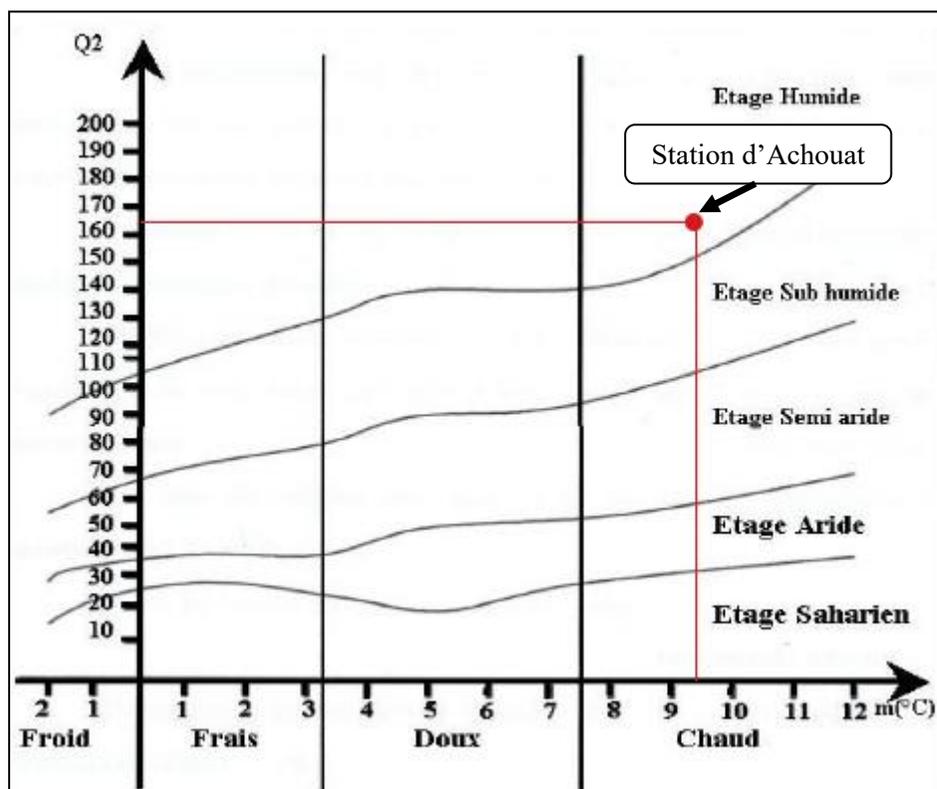


Fig. II.18. Diagramme d'Emberger

II.7.3.3. Bilan hydrologique

Le cycle de l'eau peut être analysé schématiquement selon les trois éléments suivants :

- Les précipitations,
- Le ruissellement ou écoulement de surface et l'écoulement souterrain,
- L'évaporation.

Dans chacune des phases on retrouve respectivement un transport d'eau, un emmagasinement temporaire et parfois un changement d'état.

L'estimation des quantités d'eau passant par chacune des étapes du cycle hydrologique peut donc se faire à l'aide d'une équation de bilan appelée "bilan hydrologique" qui représente le bilan des quantités d'eau entrant et sortant d'un système défini dans l'espace (entité naturellement générale)

et dans le temps, à savoir l'année hydrologique (période d'une année très souvent différente de l'année civile).

L'équation du bilan hydrique se fonde sur l'équation de continuité et peut s'exprimer comme suit, pour une période et un espace donnés :

$$P = ETR + R + I + W$$

Avec:

- P : précipitations (liquide et solide) (mm),
- ETR : évapotranspiration réelle en (mm),
- R : ruissellement de surface et écoulements souterrains (mm).
- I : l'infiltration en (mm),
- W : variation des réserves en mm qui peut être considéré comme négligeable.

II.7.3.4. Estimation de l'évapotranspiration

Elle a pour but de quantifier les pertes en eau par retour à l'atmosphère sous forme de vapeur d'eau ces pertes peuvent représenter l'évapotranspiration des eaux de surface, du sous-sol et par transpiration des végétaux.

Faute d'appareils de mesure, il existe des formules d'approximation que traduisent le phénomène sous forme analytique, parmi lesquelles : la formule de Thornthwaite (1948)

a) L'évapotranspiration potentielle (ETP)

a.1. Formule de Thornthwaite

Cette formule permet de calculer l'ETP mensuelle pour une durée théorique de 12 heures, elle s'écrit comme suit :

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

$$I = \sum i \text{ où } i = \left(\frac{T}{5} \right)^{1.514}, \quad a = \left(\frac{1.6}{100} \right) I + 0.5 \quad a = 1.79 \quad \longrightarrow \quad ETPc = ETP \cdot K$$

ETP: évapotranspiration potentielle non corrigée (mm) ;

t : température annuelle moyenne (C°) ;

I : indice thermique annuel ;

i : indice thermique mensuel ;

a : exposant ;

ETPc : Évapotranspiration potentielle corrigée (mm) ;

K: facteur de correction.

Tab. II.9. Calcul de l'ETP par la formule de Thornthwaite

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	Année
Pr	23,8	93,9	159,2	185,8	131,5	121,3	86,9	82,1	50,2	15,9	2,9	15,2	1009
T (C)	23,7	20,5	16	12,7	11,6	11,1	13,6	15,6	15,6	18,4	22,5	25,4	17,2
i	10,6	8,5	5,8	4,1	3,6	3,3	4,5	5,6	5,6	7,2	9,8	11,7	80,2
ETR	110,5	85,4	54,9	36,4	31	28,4	40,9	52,3	52,3	70,4	100,8	124,5	788
K	1,03	0,97	0,86	0,81	0,87	0,85	1,03	1,1	1,21	1,22	1,24	1,16	/
ETPc (mm)	113,9	82,9	47,2	29,5	26,9	24,1	42,1	57,5	63,3	85,9	124,9	144,5	843

D'après Thornthwaite un bilan hydrologique mensuel peut être établi par l'intégration des précipitations et de l'évapotranspiration potentielle (ETP). Cette méthode permet l'estimation, de chaque mois des paramètres suivants :

ETR : l'évapotranspiration réelle

Da : le déficit agricole [$Da = ETP - (P + RFU)$]

Ws : l'excédent, water surplus.

Pour cela il faut tout d'abord calculer la RFU (réserve facilement utilisable) contenue dans le sol.

Thornthwaite utilisait une valeur moyenne de RFU égale à 100mm.

Le principe de calcul est basé sur les cas suivants :

Si : $P > ETP \rightarrow ETP = ETR$, la quantité d'eau ($P - ETP$) alimente la RFU jusqu'au maximum, on va avoir un excédent sous forme de ruissèlement.

Si : $P < ETP$ et $RFU \neq 0 \rightarrow P + RFU > ETP = ETR$

$\rightarrow P + RFU < ETP$ $ETP = P +$ toute une partie de la RFU jusqu'à égaliser la valeur de l'ETP

Si $P = ETR$: les précipitations sont justes suffisantes pour alimenter le sol. Il n'y aura de W_a pour alimenter la RFU.

Si malgré l'apport de la RFU, l'ETR est toujours inférieure à l'ETP (ETP), il va avoir un déficit agricole (Da) exprimé ainsi : $Da = ETP - ETR$.

Tab. II.10. Bilan hydrique selon Thornthwaite à la station d'Achouat – Taher (1988 - 2015)

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	Année
Pr(mm)	63,8	93,9	159,2	185,8	131,5	121,3	86,9	82,1	50,2	15,9	2,9	15,2	1008,6
ETPc	113,9	82,9	47,2	29,5	26,9	24,1	42,1	57,5	63,3	85,9	124,9	144,5	842,7
P-ETP	-50,1	11	112	156,3	104,6	97,2	44,8	24,6	-13,1	-70	-122,1	-129,3	/
ETR	63,8	82,9	47,2	29,5	26,9	24,1	42,1	57,5	63,3	85,9	2,9	15,2	541,3
RFU	0	11	100	100	100	100	100	100	86,9	0	0	0	/
DEF	50,1	0	0	0	0	0	0		0	0	122,1	129,3	301,4
WS	0	0	12	156,3	104,6	97,2	44,8	24,6	0	0	0	0	439,5

Après l'établissement de ce bilan on a pu tirer les conclusions suivantes :

Les précipitations deviennent supérieures à l'évapotranspiration potentielle (E.T.P) du mois d'octobre jusqu'au mois d'avril.

La RFU est à son maximum de 100 mm du mois de Novembre jusqu'à la fin d'Avril. La RFU commence à diminuer au début du mois de mai, pour s'épuiser et devenir nulle de juin à septembre, le déficit agricole enregistré est de 301.4mm, c'est la période déficitaire, ou on doit recourir d'avantage à l'irrigation.

b) L'évapotranspiration réelle (ETR)

b.1. Formule de Turc

M. Turc a établi la formule suivante :

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \frac{P^2}{L^2}}}, \quad L = 300 + 25t + 0.005 t^3$$

P : pluie moyenne annuelle (mm);

L : paramètre de température (mm);

t: température moyenne annuelle (C°).

Tab. II.11. Application de la formule de Turc

P (mm)	T(C°)	L (mm)	ETR (mm)
1008.6	17.27	989.29	730.83

b.2. Détermination du ruissellement et l'infiltration

Le ruissellement de surface constitue la part de la pluie qui n'est pas retournée à l'atmosphère par évaporation ou qui n'a pas été absorbée par le sol, et qui ne s'accumule pas à la surface mais qui s'écoule sur la surface du sol par de petites rigoles jusqu'à atteindre le réseau naturel de drainage du bassin. La lame d'eau ruisselée dépend de l'intensité et de la hauteur des averses, de la succession des pluies, de l'état d'humidité et de la structure de l'horizon superficiel du sol avant l'averse, du couvert végétale, de la pente et de la rugosité de la surface du sol. L'influence de tous ces facteurs fait que le ruissellement est très difficile à estimer avec précision.

On a la formule suivante : $P = ETR + R + I$

Où

P : précipitation moyenne annuelle (mm);

ETR : évapotranspiration réelle (mm);

R : ruissellement (mm);

I : infiltration (mm).

✓ Le ruissellement est calculé par la formule de Tixeront-Berkaloff :

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

R : Ruissellement en (mm);

P : Précipitations moyennes annuelles en (mm);

ETP : évapotranspiration potentielle d'après Thornthwaite en (mm).

Cette formule est discutable car elle ne tient pas compte de la nature de sol, de la couverture végétal ... etc. (Lehtihet, 1983).

Et dans le cas où la précipitation est supérieure à 600mm nous utiliseront la formule de RAUMONTCHOK pour estimer le ruissellement :

$$R = P^3/3 \quad \longrightarrow \quad (1008.60)^3/3 = 324.007 \text{ mm}$$

✓ L'infiltration (I) est calculée par la formule suivante :

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

Tab. II.12. Calcul du R et I dans la plaine alluviale d'oued Nil

	P	ETP	ETR	R	I
mm	1008.60	842.7	541.3	324	143.3
%	100	83.55	53.66	47.74	14.20

L'ensemble de La lame d'eau ruisselé et infiltré est égal à 467.3mm et représente 46.33% des précipitations moyennes annuelles tombées sur le bassin d'oued Nil. Ces valeurs obtenues reste à vérifier, en tenant compte de: la lithologie du terrain, la topographie, le climat et la végétation caractérise la région.

II.7.3.5. Détermination des apports liquides

Les apports liquides (A) ou les ruissellements superficiels (Rs) des eaux peuvent être estimés par différent formules empiriques (la formule de Samie, la formule Algérienne, la formule de Mallet-Gauthier, et la formule de Turc).

$$A = Le \cdot S \cdot 10^{-3} \text{ (Hm}^3\text{/an)}$$

a) La formule de Samie

$$Le = Pa^2(293 - 2.2\sqrt{S})$$

Le : lame d'eau ruisselée (mm/an) ;

Pa: Pluie moyenne annuelle (m) ;

S : superficie du sous bassin versant (Km²).

Tab. II.13. Calcul des apports liquides par la méthode de Samie

Pa(m)	S(Km²)	Le (mm/an)	A (Hm³/an)
1	303.24	254.69	77.23

b) La formule algérienne

$$Le = Pa (1 - 10^{-2}) 10^3$$

$$K = 0.18 - 0.01 \log S$$

Tab. II.14. Calcul des apports liquides par la formule algérienne

Pa (m)	S (km²)	Le (mm/ an)	K	A (Hm³/an)
1	303.24	310	0.16	94

c) La formule de Mallet- Gauthier

$$Le = 0.6 Pa (1-10^{-0.36^2})10^3$$

Tab. II.15. Calcul des apports liquides parla méthode de Mallet-Gauthier

Pa (m)	S (km ²)	Le (mm/an)	A (Hm ³ /an)
1	303.24	342	103.7

d) La formule de Turc

$$Le = Pa \frac{Pa}{\sqrt{(0.9 + \frac{Pa^2}{L^2})}}$$

$$L = 300 + 25T + 0.05T^3$$

Où :

L : coefficient de température (mm);

T : température moyenne annuelle (°C).

Tab. II.16. Calcul des apports liquides par la méthode de Turc

P (mm)	T (°C)	L (mm)	Le (mm/an)	S (km ²)	A (Hm ³)
1008.60	17.27	988.54	282.98	303.24	85.81

- Si nous comparons les résultats des quatre méthodes utilisées pour le calcul des apports liquides, nous trouverons que la valeur maximale des apports liquides est donnée par la méthode de Mallet-Gauthier (103.7Hm³/an) alors que la valeur minimale est donnée par la méthode de Samie (77.23Hm³/an).

II.8. hydrodynamique de la zone d'étude**II.8.1. Introduction**

Selon les résultats des études effectuées sur l'aquifère de la plaine alluviale d'oued Nil (les formations dunaires, les alluvions Quaternaire et le Pontien « Miocène moyen »), dans cette étude hydrogéologique on s'intéresse à :

- Suivre l'évolution spatio-temporelle des niveaux piézométriques;
- Déterminer les caractéristiques hydrodynamique de l'aquifère;
- Classer l'aquifère suivant sa perméabilité.

II.8.2. Inventaire des points d'eau

La plaine d'oued Nil recouvre une grande superficie, et afin d'obtenir la meilleure carte piézométrique possible, on a recensé 22 puits et 8 forages répartis à travers la plaine lors de la campagne piézométrique d'avril 2015.

Les forages réalisés au niveau d'oued Nil sont actuellement destinés principalement à l'irrigation alors que d'autres sont en arrêt à cause du problème de différents problèmes de pollution. La profondeur de ces forages varie du Sud vers le Nord et de l'Est à l'Ouest. Au Sud la profondeur est de 50 à 54 m, au Nord elle varie de 65 à 79 m, alors que dans la partie Est, le long d'Oued Saayoud, la profondeur varie de 35 à 50 m.

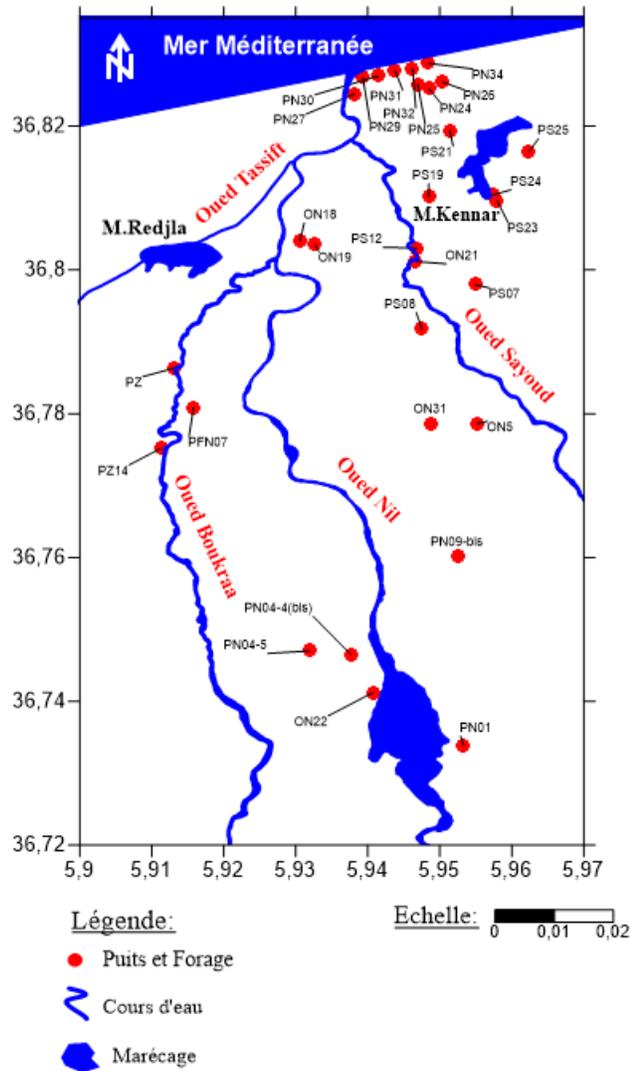


Fig. II.19. Carte d'inventaire des points d'eau (Avril 2015)

II.8.2. Etude piézométrique

II.8.2.1. Examen de la carte piézométrique

L'allure générale de la carte piézométrique obtenue lors de la campagne d'avril 2015, montre que l'écoulement souterrain des eaux de la nappe alluviale d'Oued Nil est présenté par des lignes de courant dont les deux sens principaux sont SE-NW et S-N.

Le fonctionnement des filets de courant permet de distinguer trois zones hydrogéologiques :

- **La Zone NE** : présente un resserrement des courbes aux abords de marécage d'EL Kennar, avec un gradient hydraulique fort, indiquent un écoulement rapide due à la pente. Le marécage d'El Kannar reçoit des apports d'eau du coté Est et alimente la nappe dans la partie Nord.
- **La Zone NW** : caractérisé par un écoulement faible de direction S-N, le marécage d'El Redjla reçoit des apports d'eau du coté Sud et alimente la nappe dans la partie Nord.
- **La Zone Sud** : elle montre qu'oued Nil et oued Boukraa sont alimenté par la nappe avec un écoulement de direction S-N, l'alimentation de la plaine se fait principalement par les différents monts entourent la plaine.

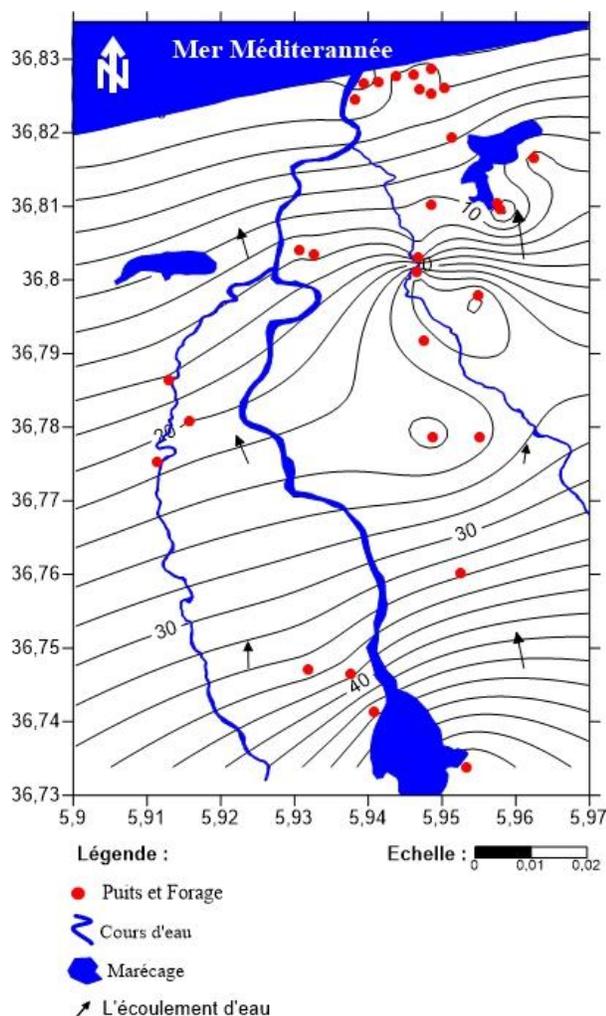


Fig. II.20. Carte piézométrique de la plaine alluviale d'oued Nil (avril 2015)

II.8.2.2. Etude des paramètres hydrodynamiques

a) Perméabilité

La carte de la perméabilité (Figure II.21) représente les valeurs qui sont mesurées à partir de 18 forages répartis dans la plaine alluviale d'oued Nil.

Les grandes valeurs observées de la perméabilité varient entre 1.7310^{-3} à 2.710^{-3} m/s dans la zone d'oued Nil se trouvant dans la carte de la partie Sud et Est de la plaine, cela est dû à l'existence de gravier fin à grossier, galets et sable (les formations perméables) représenté par les deux forages ON2 et ON13.

Les valeurs moyenne de perméabilité qui varient de 1.7310^{-3} à 8.510^{-4} m/s sont observées dans la partie Sud et Est, due à l'existence des formations semi perméable comme l'argile grise légèrement graveleuse, Gravier et sables très fins schisteux, Silts et sables très fins évoqué au forage ON23.

Les valeurs faibles de la perméabilité varient entre $3.5 \cdot 10^{-4}$ à $2.77 \cdot 10^{-4}$ m/s, causée par les formations semi perméable et imperméable comme dans le cas des forages ON12, ON14.

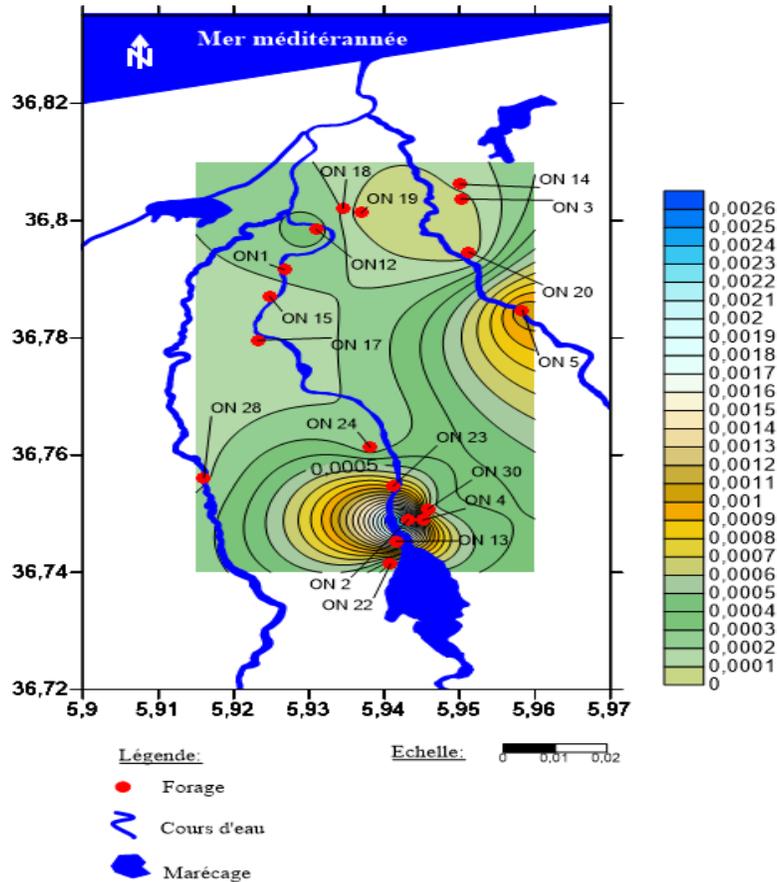


Fig. II.21. Carte de perméabilité de la plaine alluviale d'Oued El Nil

b) Transmissivité (T)

La figure (II.22) représente la carte des changements des valeurs de transmissivité dans la plaine alluviale d'oued Nil à partir des mesures faites dans 18 forages.

Les valeurs élevées sont observées dans la partie Sud varient entre $7.94 \cdot 10^{-2}$ à $6.02 \cdot 10^{-2}$ m²/s due à l'existence d'une grande épaisseur d'aquifère et des formations géologiques perméable, comme le montre les forages ON13 et ON2 qui contiennent des graviers grossiers et moyens, sables gros et moyens.

Les moyennes et faibles valeurs sont observées sur le reste de la plaine, elles sont dues à la nature lithologique des terrains. Les forages ON14 et ON12 indiquent de faible transmissivité avec des valeurs varient de $9.70 \cdot 10^{-3}$ à $2.77 \cdot 10^{-3}$ m²/s et le forage ON23 représentent la transmissivité moyenne avec une valeur égal à $3.66 \cdot 10^{-2}$ m²/s.

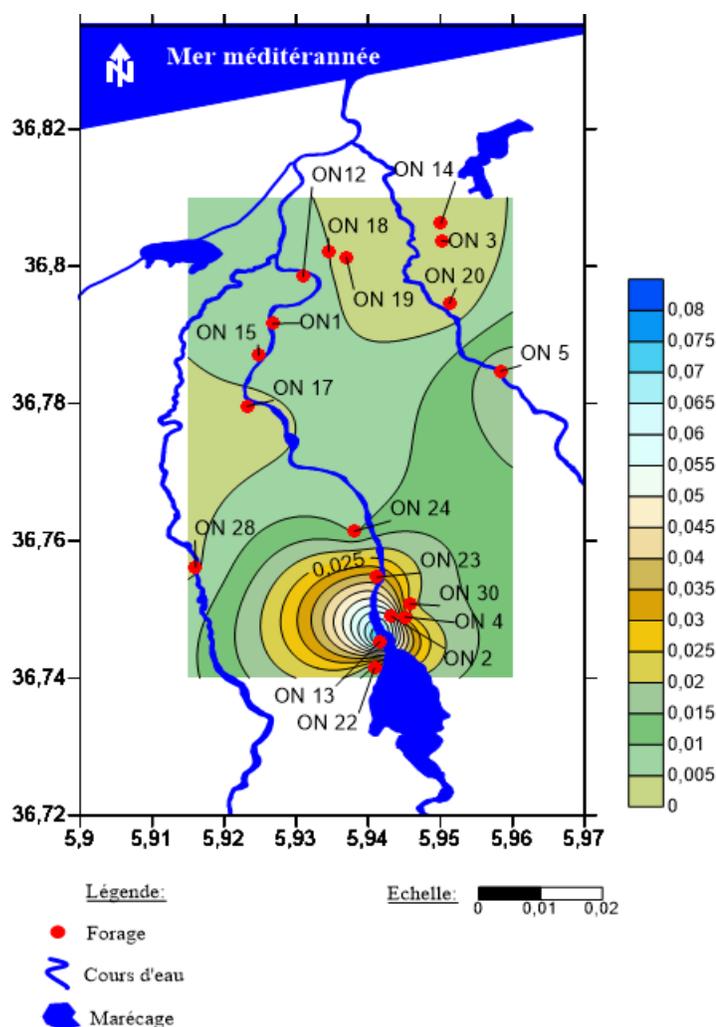


Fig. II.22. Carte de la transmissivité dans la plaine alluviale d'oued Nil

II.9. Sources de pollution

La qualité des eaux souterraine devient plus en plus dégradé actuellement, les cours d'eau de la région étudiée reçoivent en permanence les rejets urbains et industriels chargés d'éléments chimiques et organiques, souvent toxiques. La contamination peut provenir de diverses sources qui sont nombreuses et d'autant plus difficile à cerner leur nature, leur intensité, leur effets sont changeants dans le temps, comme dans l'espace.

La wilaya de Jijel est marquée au même titre que les autres wilayas du littoral par une forte concentration des populations et des activités sur la frange littorale. Elle a connu ces dernières décennies un important exode des populations des zones montagneuses marginalisées, sous développées et perturbées le par les conditions sécuritaires qu'a vécues pays ces dernières années, occasionnant ainsi une disparité dans l'occupation spatiale dans la mesure ou l'arrière pays dévitalisé

souffre d'un enclavement et un sous équipement, alors que les neufs communes côtières qui occupent 32 % (774,66) m² de la superficie de la wilaya (2398,69 km²) concentrent la quasi-totalité des équipement structurants et activités.

L'extension démesurée et non contrôlée de l'urbanisation au niveau des villes côtières a largement entamé l'équilibre fragile du système urbain hérité de la période coloniale, conséquence d'un important flux migratoire des populations d'origine rural fuyant l'insécurité. Cette situation a conduit à la dégradation du cadre bâti, une gestion déficiente de la collecte des déchets ménagers, des différents réseaux (AEP, Assainissement et Voiries) ainsi que l'apparition de certains fléaux sociaux touchant particulièrement la masse juvénile.

II.9.1. Différents types de pollution dans la région d'étude

II.9.1.1. Pollution d'origine urbaine

a) Décharge sauvage

Elle sont répertoriées dans de nombreux endroits, principalement sur les axes routiers et les abords des oueds et les terrains agricoles, leurs déchets sont constituées de matière organique et plastique, produits ferreux,...ect, dégageant des odeurs nauséabondes à cause de la mauvaise collecte des différents déchets dans la plus parts des centre urbains lié à l'inadaptation des moyens humains, matériels, financiers, techniques et organisationnels mis en œuvre par des collectivités locales et a une urbanisation anarchique et le manque de civisme des citoyens ce qui représente un sérieux problème qui dure depuis plusieurs années affectant la santé et le cadre de vie des citoyens (fig II.23) et (tab II.17).



Fig. II.23. Décharge sauvage dans la région de Chekfa

Tab. II.17. Décharges de la zone d'étude

Daira	Commune	Nombre de décharge	Superficie/Ha
Chekfa	Chekfa	1	3.74
Taher	Taher	1	4.135
Djimaar	Chekfa	1	/
Bazoul	Taher	1	/

b) Eaux usées

Notre zone d'étude est traversée par un réseau hydrographique important, mais celui-ci est actuellement le réceptacle des eaux usées des différents centres urbains qui s'y trouvent ou les eaux usées sont déversées directement dans les différents oueds, ou l'on constate un taux de raccordement au réseau d'assainissement moyen et l'absence de station d'épuration (tabII.18).

Tab. II.18. Situation d'assainissement dans la plaine alluviale d'oued Nil

Localité	Situation d'assainissement	Stations d'épurations	Destination finale	Débit journalier (m ³ /j)
Chekfa	Le réseau est partiellement assainies, avec risque d'aboutissement vers des fosses	Non existante	Tous les rejets débouchent sans traitement dans oued Saayoud.	2141
Taher	C'est un réseau moyennement fonctionnel à cause de l'inexistence d'un grand réseau commun et son incapacité à contenir tous le débit généré par la ville et son extension.	Non existante	Tous les rejets débouchent sans traitement dans oued Boukraa.	12300
Djimaar	Le réseau est moyennement assainies, avec risque d'aboutissement vers des fosses.	En projet	Tous les rejets débouchent sans traitement dans oued Nil.	/
El Kennar	Le réseau est moyennement assainies, avec risque d'aboutissement vers des fosses	Non existante	Tous les rejets débouchent sans traitement dans oued Nil.	1333

II.9.1.2. Pollution d'origine agricole

La région d'étude est caractérisée par des plans d'eau facile à atteindre, des niveaux piézométriques très proches de la surface et des sols généralement très fertiles ce qui favorise l'activité agricole génèrent l'usage prolongé des engrais et pesticides qui conduisent à une augmentation des teneurs en éléments nutritifs dans les cours d'eaux par lessivage des terres. Les cultures sous-serre contribuent aussi à la dégradation de l'environnement par la prolifération des déchets plastiques, par ailleurs, plusieurs huileries implantées près des oueds déversent leurs eaux usées (margines) dans ces cours d'eaux.



Fig. II.24. Agriculture sous serre dans la plaine alluviale d'oued Nil

II.9.1.3. Pollution d'origine industrielle

Pratiquement, la totalité de l'activité industrielle est localisée près de la bande littorale, quelques petites unités (poulailler, abattoir) se trouvent à l'intérieur du tissu urbain causant ainsi des nuisances à l'environnement urbain et aux populations à travers le déversement de fumier et fientes dans les différents oueds.

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons mis en évidence la situation géographique de la zone d'étude et son cadre naturel (relief, réseau hydrographique, climat, et couvert végétal.....).

La Wilaya de Jijel se caractérise par un climat méditerranéen de type subhumide à humide, avec un été chaud et un hiver doux et humide, elle l'est l'une des régions les plus arrosées d'Algérie.

La géologie de la zone d'étude est le siège d'une topographie ancienne dont les dépressions ont été recouvertes par des alluvions récentes et des Terrasses anciennes (formations quaternaires).

La nappe se localise dans les alluvions constituées de sables et des graviers. Ces alluvions reposent sur un substratum formé par les marnes grises d'âge Burdigalien.

Le bilan hydrique de cette zone d'étude montre une évapotranspiration potentielle calculée selon la méthode de Thornthwaite est de 842.7mm, un ruissèlement égale à $R = 324$ mm et une infiltration calculée égale a $I = 143.3$ mm.

La zone d'étude est soumise à une intensité séismique qualifiée de moyenne à forte.

Le sens de l'écoulement des eaux souterraines est principalement de direction Sud-Est vers le Nord-Ouest.

Les valeurs de perméabilité K les plus élevée sont observées au Sud de la plaine du coté d'oued Nil avec des valeurs de l'ordre de 10^{-3} m/s, alors que les valeurs les plus faibles sont de l'ordre de 10^{-4} m/s causée par les formations imperméables et semi perméables dans la partie aval de la plaine. La perméabilité définie dans notre étude indique que notre aquifère est de bonne perméabilité.

La transmissivité (T) est de l'ordre de 10^{-3} m/s dans toute la plaine et atteint des valeurs de l'ordre de 10^{-2} m/s au Sud de la plaine où les alluvions sont les plus grossiers.

Chapitre III :
Matériels et méthodes

Introduction

La présente étude a pour objectif, de déterminer quelle méthode s'avère la plus efficace pour l'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque. Est d'évaluer la vulnérabilité et le risque de pollution des ressources en eaux souterraines dans l'aquifères de la plaine alluviale d'oued Nil. Il est donc possible de définir les zones sensibles dans lesquelles une pollution peut affecter gravement une nappe et cela nous permettra d'avoir une idée des différents moyens à employer, afin de protéger et préserver les ressources en eaux de notre région d'étude.

Les méthodes utilisées sont celle de SINTACS et de REHESE. Le choix de la méthode SINTACS se justifie par le fait qu'elle est une version italienne de la méthode DRASTIC adapté aux conditions méditerranéennes de notre région d'étude avec de très bons résultats obtenus lors de son application a travers le monde (Mustafa A.K et al, 2006), (Mejia J.A et al, 2007). Quand à la méthode REHESE, Bien que beaucoup moins appliquée, est une méthode empirique pour l'évaluation du pouvoir épurateur des terrains, lors de transfert d'un polluant de la surface du sol jusqu'à la surface de la nappe.

III.1. Présentation de la méthode SINTACS

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

S : profondeur de la nappe

I : infiltration

N : zone non saturée

T : texture de sol

A : type d'aquifère

C : conductivité

S : topographie du sol

La spécificité de cette méthode par rapport à la méthode DRASTIC est qu'elle propose cinq scénarios différents de vulnérabilité : Les scénarios « impact normal » et « impact sévère », scénarios relatifs aux aquifères constitués par des sédiments non consolidés, localisés dans des aires à sols épais, avec une profondeur du plan d'eau qui n'est pas très élevée. Les zones relatives au premier scénario correspondent aux régions où les transformations sont rares, avec existence ou non de terres cultivées

et une utilisation très faible de pesticides, de fertilisants et d'irrigation, et aux périmètres urbains très dispersés, tandis que les zones relatives au deuxième scénario correspondent aux régions où l'occupation des sols est intensive, avec des terres cultivées à forte utilisation de pesticides, de fertilisants et d'irrigation, aux implantations industrielles et urbaines denses, aux dépôts liquides et solides de déchets. Les trois autres scénarios sont le scénario « drainage important à partir d'un réseau superficiel », relatif aux aires où il y a une forte infiltration vers l'aquifère à partir d'un réseau superficiel d'eau, le scénario « terrain très karstifié », concernant les aires caractérisées par une forte karstification, le scénario « terrain fissuré », correspondant aux zones caractérisées par une forte fracturation. Les poids attribués aux différents paramètres dans les versions SINTACS sont présentés dans le Tableau III.1.

Tab. III.1. Poids attribués aux paramètres SINTACS dans les différents scénarios de la méthode (Hamza et Al, 2008)

Scénario paramètre	Impact Normal	Impact Sévère	Drainage important	Karst	Terrains fissurés
S	5	5	4	2	3
I	4	5	4	5	3
N	5	4	4	1	3
T	4	5	2	3	4
A	3	3	5	5	4
C	3	2	5	5	5
S	2	2	2	5	4

III.1.1. Cote attribuée à chaque paramètre de la méthode SINTACS

III.1.1.1. Paramètre de la profondeur "S"

Ce paramètre est déterminant dans le contrôle du transfert et de l'atténuation du polluant dans la zone saturée.

Tab. III.2. Paramètre de la profondeur "S"

Profondeur des nappes "S"	
Intervalles	Côte
0 – 1.3	10
1.3 – 2.6	09
2.6 – 3.9	08
3.9 – 5.6	07
5.6 – 8.2	06
8.2 – 10.8	05
10.8 – 16.5	04
16.5 – 24.3	03
24.3 – 41.47	02
41.47 - 100	01

III.1.1.2. Paramètre de l'infiltration "I"

Le paramètre principale responsable de la réalimentation des nappes, et correspond ainsi au transfert du polluant de la surface du sol vers le milieu aquifère.

Tab. III.3. Paramètre de l'infiltration "I"

Infiltration "I"	
Intervalles	Côte
0 – 30	01
31 – 50	02
50 – 80	03
81 – 100	04
101 – 120	05
121 – 150	06
151 – 180	07
181 – 210	08
211 – 250	09
251 - 300	10

III.1.1.3. Paramètre de la zone non saturée "N"

C'est la zone non saturée de l'aquifère qui est le siège des processus de biodégradation, de filtration, de précipitation, de volatilisation, de dispersion et d'atténuation du polluant.

Tab. III.4. Paramètre de la zone non saturée "N"

Zone non saturée "N"	
Nature de la zone	Côte
Dépôt alluviale grossier	8 - 9
Calcaire Karstique	9 - 10
Dolomie fracturée (fissurée)	4 - 7
Moyen a fin alluvion	6 - 8
Calcaire fracturé	6 - 9
Complexe sableux	7 - 8
Grés - conglomérats	4 - 9
Roches plutonique fissurée	2 - 4
Séquence turbidique fissurée	5 - 8
Roche volcanique fissurée	8 - 10

III.1.1.4. Paramètre de la texture du sol "T"

L'attribution d'une cote standardisée pour le type de sol repose essentiellement sur la granulométrie. Une cote élevée reflétant des conditions de haute vulnérabilité est attribuée aux sols caractérisés par les particules grossières.

Tab. III.5. Paramètre de la texture du sol "T"

Texture du sol "T"	
Nature du sol	Côte
Sol a faible épaisseur ou absent	9.8 - 10
Gravier pur	9.7 - 10
Sable pur	8.9 – 9.5
Sol sableux	8 – 8.5
Schiste sableux	6.2 - 7
Sableux terreux	5.5 - 6
Limon – schiste - sable	4.5 – 5.2
Sol limoneux	3.5 – 4.2
Limono - terreux	3 - 4
Limoneux argileux	6 - 8

III.1.1.5. Paramètre du type d'aquifère "A"

Le milieu aquifère représente la zone saturée du sol, il est responsable dans le stockage des eaux d'infiltrations et son rôle dans l'atténuation du polluant dépend de la nature lithologique des formations qui le constitue.

Tab. III.6. Paramètre de type d'aquifère "A"

Type d'aquifère "A"	
Nature d'aquifère	Côte
Alluvion grossier	8 - 9
Karstique	9 - 10
Dolomie fracture	4 – 7
Alluvion d'un amont	6 – 8
Sable complexe	7 - 9
Grés, conglomérat	4 - 9
Flyschs (séquence turbidique)	5 – 8
Marne, argile	1 – 3

III.1.1.6. Paramètre de la conductivité hydrique "C"

C'est l'aptitude d'un milieu aquifère à permettre la circulation de l'eau sous l'effet d'un gradient hydraulique. Elle est en relation étroite avec la granulométrie, le degré de fracturation de milieu et avec les caractéristiques d'écoulement dans la nappe (débit, vitesse et gradient hydraulique).

Tab. III.7. Paramètre de la conductivité hydrique "C"

Conductivité hydrique "C"	
Rang	Côte
Gravier	10
Conglomérat	6 - 9
Grés	4 - 7
Sol marneux	2 - 4
Sol terreux	2 - 3

III.1.1.7. Paramètre de la Topographie "T"

La variation de la pente des terrains contrôle la possibilité d'infiltration des polluants. L'hypothèse faite ici est que plus la pente est faible, plus il y a d'infiltration et plus la zone est vulnérable.

Tab. III.8. Paramètre de la Topographie "T"

Topographie "T" en (%)	
Intervalles	Côte
0 - 5	10
6 - 10	8
11 - 20	5
21 - 30	3
> 100	1

III.2. Système de cotation

L'indice SINTACS est basé sur l'évolution des 7 paramètres suscités. Chaque paramètre est assigné d'un poids relatif fixe dont la valeur, compris entre 1 et 5, correspond à son importance dans le processus d'atténuation des substances contaminantes. Un paramètre prépondérant se voit assigner un poids de 5 alors qu'un paramètre ayant moins d'impact sur le devenir d'un contaminant est assigné d'un poids de 2 (Tableau III.1). Une cote 1 correspond aux conditions de moindre vulnérabilité alors qu'une cote de 10 reflète les conditions les plus propices à la contamination. Un indice SINTACS partiel propre à chaque paramètre est alors déduit en multipliant sa cote par son poids relatif.

Indice partiel = poids * cote

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

Indice SINTACS général est le suivant :

$$IS = (Sc.Sp) + (Ic.Ip) + (Nc.Np) + (Tc.Tp) + (Ac.Ap) + (Cc.Cp) + (Sc.Sp)$$

D'où :

S, I, N, T, A, C, S : Paramètres,

c : Cote du paramètre considéré,

Sc : Est la cote du paramètre S et Sp est son poids.

II.2.3. Interprétation de l'indice SINTACS

L'appréciation de l'indice SINTACS, n'est possible que par l'analyse comparative entre différents sites. A cet effet, un système de représentation offrant à l'utilisateur une visualisation immédiate du degré de vulnérabilité. Le principe de cette représentation regroupe les indices de vulnérabilité en quatre (4) classes.

Tab. III.9. Catégories de vulnérabilité

Degré de vulnérabilité	Indice de vulnérabilité
Faible	< 106
Moyen	106 - 186
Elevé	187 - 210
Très élevé	> 210

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

III.3 Présentation de la méthode REHESE

L'écoulement est le vecteur principal de la migration des substances de la surface vers la nappe.

La détermination de la zone d'appel et du temps de transfert permettant de définir la distance parcourue par un polluant pour atteindre le pompage.

Afin d'éviter la propagation d'une pollution en direction des nappes, le calcul du pouvoir épurateur du sol (surtout de la zone non saturée) identifie la distance parcourue par le polluant avant d'atteindre la nappe.

W.REHESE a proposé en 1977 une méthode empirique pour l'évaluation du pouvoir épurateur des terrains, lors de transfert d'un polluant de la surface du sol jusqu'à la surface de la nappe par circulation verticale, puis en circulation horizontale au sein de la nappe.

Le pouvoir épurateur permet de mettre en place des périmètres de protection.

Le périmètre de protection rapproché peut être défini en fonction des critères suivants :

- Des caractéristiques de l'aquifère et de l'écoulement souterrain.
- Des débits d'exploitation maximum des forages.

Toutefois, REHESE considère que l'épuration est variable selon les milieux traversés et

Proportionnelle à la distance parcourue.

Les différentes catégories de sol pouvant être rencontrées ont été classées en fonction de la granulométrie. L'auteur a défini les épaisseurs de sol nécessaire, en condition non saturée, pour une épuration des eaux polluées. De même pour quatre (04) catégories de constituants de l'aquifère ; il détermine une longueur de trajet, en fonction de la vitesse effective nécessaire pour compléter cette épuration.

Chaque catégorie de matériau est affectée d'un index.

- $I = 1/H$ avec :

i : indice de terrain.

H : épaisseur en mètre du terrain nécessaire pour une autoépuration.

Le pouvoir épurateur du terrain est calculé par la formule :

- $M_x = (M_d + M_r)$

M_x : pouvoir épurateur sur la totalité du terrain.

M_d : pouvoir épurateur sur le trajet vertical (zone non saturée de la nappe).

M_r : pouvoir épurateur sur le trajet horizontal (zone saturée de la nappe).

L'épuration est totale pour $M_x = 1$.

- $M_d = h_1 i_1 + h_2 i_2 + h_3 i_3 + \dots + h_n i_n$ d'ou :

$h_1, h_2 \dots h_n$: épaisseur des différentes catégories des terrains traversés.

- Si $M_d > 1$: cela signifie que l'épuration est totale dans les couches de couverture, et que le Périmètre de protection rapproché n'est pas nécessaire à calculer selon REHESE.

- Si $M_d < 1$: cela signifie que la dépollution n'est pas totale, elle doit se poursuivre dans l'aquifère lors du transfert horizontal.

Soit : $M_r = 1 - M_d$ d'où

M_r : le pouvoir épurateur dans l'aquifère.

La distance L à parcourir horizontalement pour une épuration totale sera :

- $L = M_r / I_a$

I_a : index correspondant au milieu aquifère.

L : correspondant à la limite de la zone de protection rapprochée.

S'il n'existe pas de couverture, toute l'épuration doit se faire horizontalement ; M_r doit être égale à 1.

- $L = 1 / I_a$ terrain sans couverture.
- $L = (1 - M_d) / I_a$

I_a : dépend de la vitesse réelle de la nappe.

Selon la formule de Darcy :

- la vitesse $V = Q / S = K.I$ (m/j).

La vitesse réelle = $K.I. / m_e$ (m/j).

Pour une nappe libre m_e = Coefficient d'emménagement ou porosité efficace.

Une fois la vitesse déterminée on détermine la donc L.

Pour le calcul du pouvoir épurateur du sol (graviers fins à moyen) de la région dans la zone de couverture on utilise un indice $i = 0.04$ et dans la zone aquifère (zone saturée) l'index I_a varie de 0.00084 à 0.0032 en fonction de la vitesse effective selon les tableaux de REHESE (1977).

III.3.1. Influence de la zone non saturée dans la méthode de REHESE

La zone non saturée ou d'aération est importante pour la nappe souterraine et peut être subdivisée en fonction des teneurs en eau qui croissent vers le bas en trois sous-zones :

- Une zone d'évapotranspiration à la surface : cette partie du sol est soumise à des variations importantes des teneurs en eau provoquées par l'infiltration et l'évapotranspiration. Sa profondeur est variable suivant le type de sol et le climat.
- Une zone de transition où la teneur en eau est voisine de la capacité de rétention.
- au-dessus du niveau de la nappe se trouve une zone pratiquement saturée à 100% où la pression de l'eau est inférieure à la pression atmosphérique, la saturation du terrain se fait par ascension capillaire. Cette zone est appelée frange capillaire. Il peut y avoir une certaine quantité d'air piégée dans cette zone ; la saturation est légèrement inférieure à 100%. Cette zone joue un rôle important dans l'équilibre hydrique du sol car l'eau qui s'écoule doit s'infiltrer à travers cette zone pour se rendre à la zone de saturation, ainsi, l'étendue et la qualité de la nappe souterraine peuvent être affectée par l'état de la zone vadose dans une zone d'alimentation. L'établissement d'une carte de la hauteur de la zone vadose (H) est basé sur les données des niveaux piézométriques (H_p) effectué durant la période d'avril 2015 sur une trentaine d'ouvrages (forages et puits) destinés à l'irrigation ou à l'alimentation en eau potable dans la plaine alluviale d'oued Nil. La zone non saturée est donc mesurée par la différence entre l'altitude du sol Z et la profondeur du niveau de la nappe.

III.4. Outils d'évaluation de la vulnérabilité

III.4.1. Systèmes d'information géographique

Un système d'information géographique (SIG) est par définition un système permettant de stocker, de consulter, de traiter et d'afficher de l'information géographique. Les SIG doivent répondre aux besoins des décideurs en matière de gestion et d'aménagement des territoires (Saidi, 2011).

Le concept SIG englobe les logiciels, données, matériels et les savoir-faire liés à l'utilisation de ces derniers alors qu'un logiciel SIG est un ensemble de fonctionnalités utiles à l'exploitation d'un SIG,

parmi ces logiciels, on peut citer des logiciels libres (AccuGlobe, Google Earth ...) ainsi que des logiciels à propriété privée (ArcGis, Mapinfo, Surfer, ...ect).

III.4.2. Présentation du logiciel Surfer (Golden Software)

Selon (Alami; 2011) le logiciel Surfer conçu par Golden Software, permet de réaliser des cartes à partir d'un modèle numérique de terrain (MNT) en coordonnées Lambert 93. Le logiciel permet de créer des grilles qui vont interpoler des données irrégulières des différents 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. Surfer contient plusieurs options cartographiques qui permettent de produire une carte représentant le mieux possible les données utilisées. La carte peut être améliorée en affichant les points de données, en combinant plusieurs cartes ou en ajoutant des dessins ou des annotations. La variété de méthodes d'interpolation disponibles permet différentes interprétations des données et de choisir la méthode la plus appropriée aux besoins de l'utilisateur.

Les fichiers de grilles eux-mêmes peuvent être édités, combinés, filtrés, coupés et transformés mathématiquement. (Belli et al .2009).

Conclusion

La vulnérabilité des eaux souterraines est définie en partant d'une évaluation qualitative des mécanismes de transfert d'un polluant qui repose sur une conceptualisation multicouche du milieu traversé.

La méthode SINTACS développée par Civita (1994) considère sept paramètres pour l'estimation de la vulnérabilité des eaux souterraines, à savoir ; la profondeur de la nappe (S), infiltration (I), zone non saturée (N), texture de sol (S), type d'aquifère (A), conductivité (C), topographie du sol (S).

La méthode REHESE (1977) est une méthode empirique, elle évalue le pouvoir épurateur des différents terrains, lors du transfert d'un polluant de la surface du sol jusqu'à la surface de la nappe.

Résultats et discussion

Introduction

L'objectif de notre travail est la discussion et la comparaison entre deux méthodes de vulnérabilité qui sont les méthodes SINTACS et REHESE a travers l'utilisation des différentes bases de données existantes caractérisent plusieurs paramètres du site d'étude et les systèmes d'informations géographiques (SIG) dans le but d'établir des cartes représentent les différents niveaux de vulnérabilité des eaux souterraines, ou elles peuvent être utilisé a différentes échelles, selon les objectifs demandés et les précisions souhaités.

IV.1. Interprétations des paramètres et réalisation des cartes thématiques de la méthode SINTACS

IV.1.1 Paramètre profondeur de la nappe « S »

La profondeur de la nappe est un paramètre très important dans la méthode SINTACS d'où l'attribution d'un poids de 5, selon notre étude, la profondeur variée de 0 jusqu'au 38m ou elle a été classée en 8 intervalle (Tableau IV.1).

- Les profondeurs qui varient de 0 à 1.3m ont les retrouves au centre a l'Est et l'Ouest de la plaine représentent 22.58% de la superficie totale de la plaine ce qui correspond à 15.2 Km² avec un sub-indice (Poids*Cote) égal a 50, indiquant une très capacité extrêmement élevée d'infiltration des polluants qui peuvent atteindre rapidement les eaux souterraines, due aux faible profondeurs.
- Les profondeurs qui varient de 1.3 à 2.6m se retrouves essentiellement au Sud de la plaine englobant le village de Chekfa, le centre et le Nord de la plaine représentent 32.26% de la superficie totale de la plaine ce qui correspond à 21.71Km² avec un sub-indice (Poid*Cote) égal a 45, signifiant une très importante capacité d'infiltration des polluants pouvant atteindre rapidement les eaux souterraines.
- Les profondeurs qui varient de 2.6 à 3.9m se retrouves essentiellement au Sud, centre et Nord de la plaine représentent 23.96% de la superficie totale de la plaine ce qui correspond à 16.12Km² avec un sub-indice (Poids*Cote) égal a 40, indiquant une capacité élevée d'infiltration des polluants pouvant atteindre rapidement les eaux souterraines.
- Les profondeurs qui varient de 3.9 à 5.6m se retrouves essentiellement au Sud, et au centre de la plaine représentent 10.57% de la superficie totale de la plaine ce qui correspond à 7.11Km² avec un sub-indice (Poids*Cote) égal a 35, indiquant une importante capacité d'infiltration des polluants pouvant atteindre rapidement les eaux souterraines.
- Les profondeurs qui varient de 5.6 à 8.2m se retrouves essentiellement au Sud, et centre de la plaine représentent 4.94% de la superficie totale de la plaine ce qui correspond à 3.33Km² avec

un sub-indice (Poids*Cote) égal a 30, indiquant une capacité moyennement élevée d'infiltration des polluants.

- Les profondeurs qui varient de 10.8 à 16.5m se retrouves essentiellement au Sud, et centre de la plaine représentent 4.5% de la superficie totale de la plaine ce qui correspond à 3.02Km² avec un sub-indice (Poid*Cote) égal a 20, indiquant une capacité moyenne de pollution de la nappe aquifère.
- Les profondeurs qui varient de 16.5 à 24.3m se localise au centre de la plaine représentent 0.9% de la superficie totale de la plaine ce qui correspond à 0.6Km² avec un sub-indice (Poid*Cote) égal a 15, indiquant une faible capacité d'infiltration des polluants pouvant atteindre rapidement les eaux souterraines.
- Les profondeurs qui varient de 24.3 à 41.47m se retrouves essentiellement au centre de la plaine près du village de Djimar représentent 0.29% de la superficie totale de la plaine ce qui correspond à 0.2Km² avec un sub-indice (Poids*Cote) égal a 10, indiquant une très faible capacité de dégradation des vu la grande profondeur et le temps mis par le polluant pour atteindre les niveaux d'eau.

Tab. IV.1. Classification spécifiques (Cotes, et poids) pour le paramètre « S »

Intervalle(m)	Cote	Poids	Indice	Surface (km²)	Superficie%
24.3-41.47	2	5	10	0,2	0.29
16.5-24.3	3	5	15	0,6	0.9
10.8-16.5	4	5	20	3,02	4.5
5.6-8.2	6	5	30	3,33	4.94
3.9-5.6	7	5	35	7,11	10.57
2.6-3.9	8	5	40	16,125	23.96
1.3-2.6	9	5	45	21,71	32.26
0-1.3	10	5	50	15,2	22.58

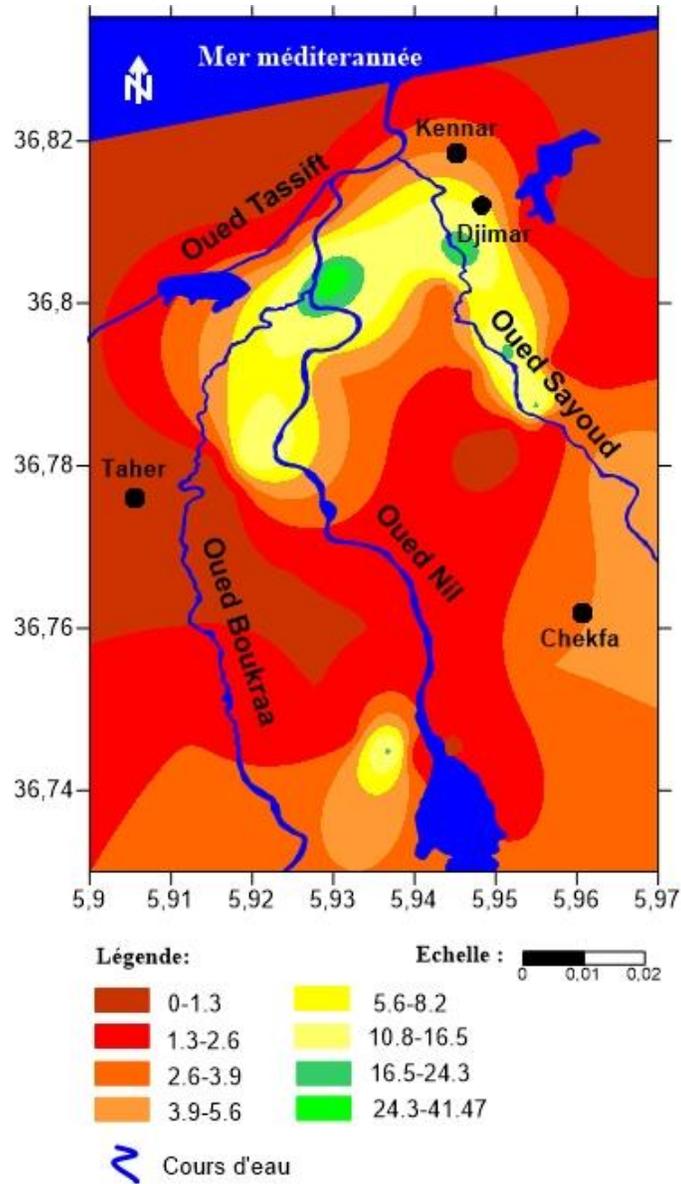


Fig. IV.1. Répartition spatiale de la profondeur d'eau

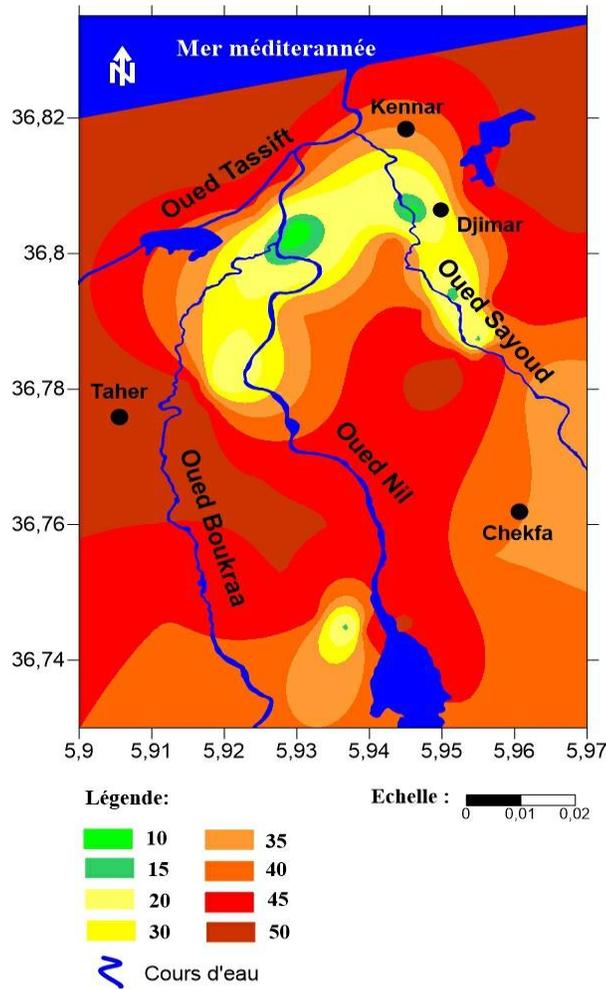


Fig. IV.2. Répartition spatiale de la profondeur de l'eau assignée à leur cotes et poids

VI.1.2. Infiltration « I »

L'infiltration joue un rôle important dans le transfert de la lame d'eau depuis la surface du sol jusqu'à l'aquifère sous-jacent. Pour l'estimation de ce paramètre dans la nappe alluviale d'oued Nil, nous avons utilisé les résultats du bilan hydrique établis par Thornthwaite.

Selon l'analyse de la carte de la répartition de l'infiltration, la valeur de l'infiltration est de 143.3 mm/ans et un sub-indice de 30 (figure IV.3 et IV.4), ce qui correspond à 100% de la superficie totale de la plaine pour une surface de 67.29Km² (tableau IV.2)

Tab. IV.2. Classification spécifiques (Cotes, et poids) pour le paramètre « I »

Intervalle	Cote	Poids	Indice	Surface(Km ²)	Superficies%
121-150	6	5	30	67.29	100

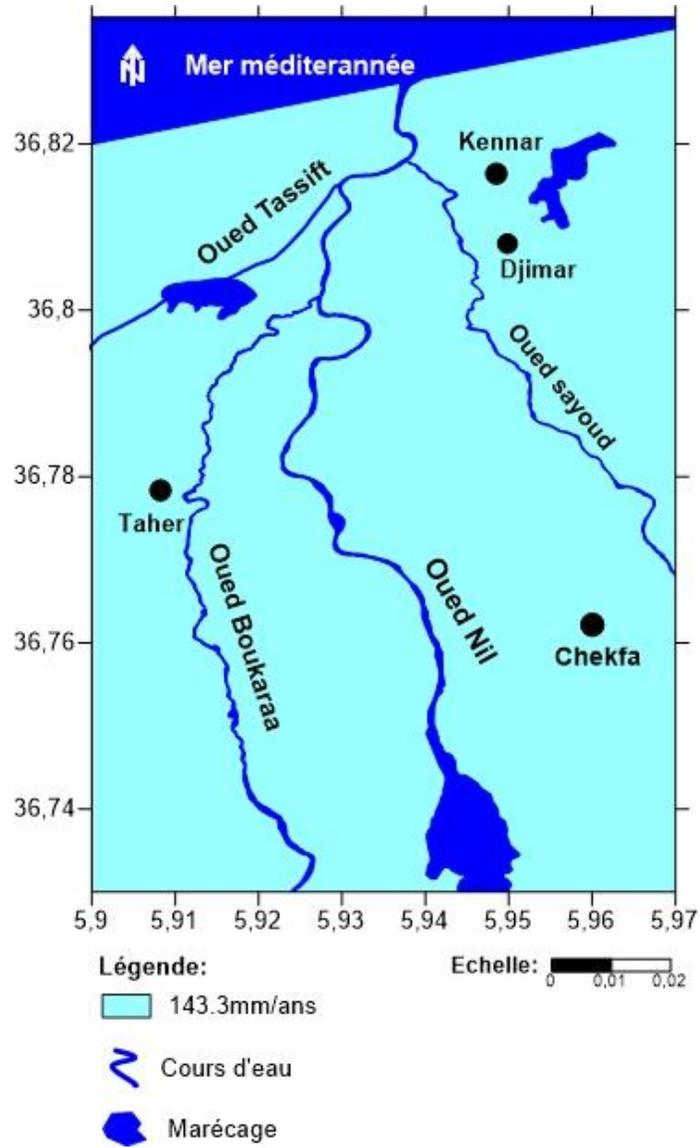


Fig. IV.3. Répartition spatiale d'infiltration efficace en mm/an

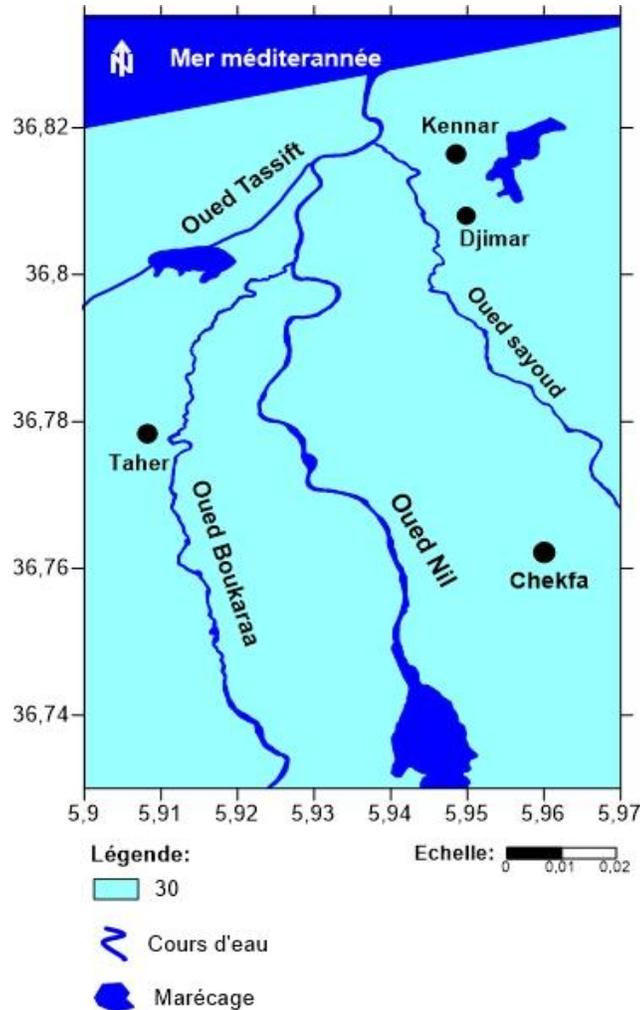


Fig. IV.4. Répartition spatiale d'infiltration efficace en mm/an assignée à leur cotes et poids

IV.1.3. Paramètre de la zone non saturée « N »

L'impact de la zone non saturée est considéré comme étant un paramètre très important par la méthode SINTACS. La description du matériel constituant la zone non saturée, a été réalisée grâce aux logs stratigraphique des différents forages captant l'aquifère, ou la nature et l'épaisseur de la zone comprise entre la surface du sol et l'aquifère, contrôlent la vulnérabilité à la pollution des aquifères. Un classement de 4 entités lithologiques est généré. (Tableau IV.3)

- La première zone est caractérisée par les argiles et limons et argile limoneux localisé essentiellement au centre de la plaine alluviale d'oued Nil cette entité lithologique représente 1.53% de la superficie total pour une surface de 1.03 Km², son sub-indice est de 8.
- La deuxième zone correspond à des argiles graveleuses et argiles sableuses, essentiellement a l'Est (Djimar) et le Sud-Ouest de la plaine, cette entité a une attribution d'un sub-indice de 12, elle représente 38.12% de la superficie total pour une surface de 25.65 Km².

- La troisième zone qui est le gravier argileux couvre le centre, le Sud (Chekfa) et le Nord (El Kennar) de la plaine avec un sub-indice de 28 et qui représente 27.94% de la superficie totale de la plaine pour une surface de 18.8 Km².
- La quatrième zone représentée par le sable argileux couvre le centre, l'Ouest (Taher) et le Nord-Ouest de la plaine avec un sub-indice de 32 et qui représente 32,41% de la superficie totale de la plaine pour une surface de 21.81 Km².

Tab. IV.3. Classification spécifiques (Cotes, et poids) pour le paramètre « N »

Nature de la zone	Score	Poids	N " zone non saturé"	Surface (km ²)	Superficie (%)
argile et limon et argile limons	2	4	8	1,03	1,53
argile graveleuse et argile sableux	3		12	25,65	38,12
graviers argileux	7		28	18,8	27,94
sable argileux	8		32	21,81	32,41

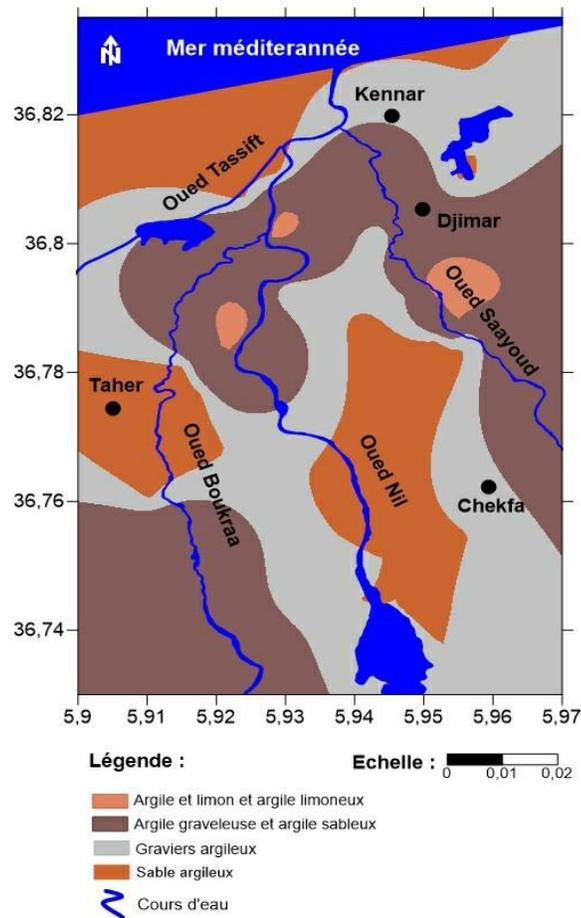


Fig. IV.5. Répartition spatiale de la zone vadose

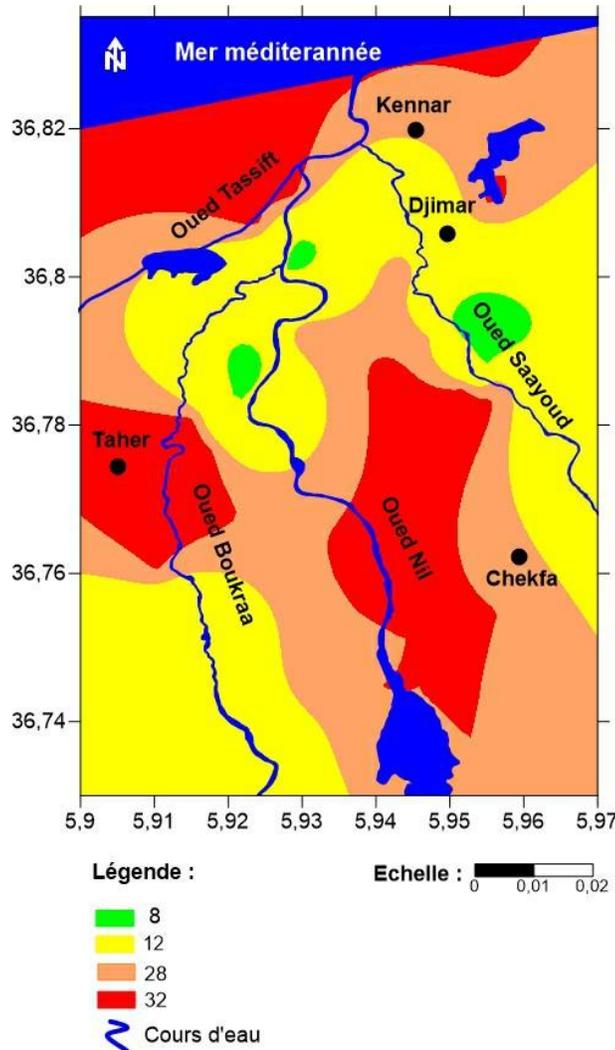


Fig. IV.6. Répartition spatiale de la zone vadose assignée à leur cotes et poids

IV.1.4. Texture de sol « T »

Ce paramètre joue un rôle très efficacement sur la capacité de ralentir et/ou de retenir la vitesse des polluants à travers le système hydrogéologique. Il est très important dans l'estimation de la vulnérabilité. Après analyse des différents logs stratigraphiques le sol de la plaine alluviale d'oued Nil, nous avons pu faire ressortir deux classes ou types de sols (Tableau IV.4) qui sont :

- Un sol limoneux terreux avec un sub-indice de 20 représentent 80.67% de la superficie d'étude pour une surface de 54.286 Km², essentiellement au centre, Nord et ouest de la plaine.
- Un sol Sableux terreux avec un sub-indice de 30 représentent 19.32% de la superficie d'étude pour une surface de 13.004 Km², localisé au Nord-Est et Sud-Est de la plaine.

Tab. IV.4. Classification spécifiques (Cotes, et poids) pour le paramètre « T »

Nature de sol	Score	Poids	T " texture de la zone"	Surface (km ²)	Superficie (%)
Limono terreux	4	5	20	54.286	80.67
Sable terreux	6		30	13.004	19.32

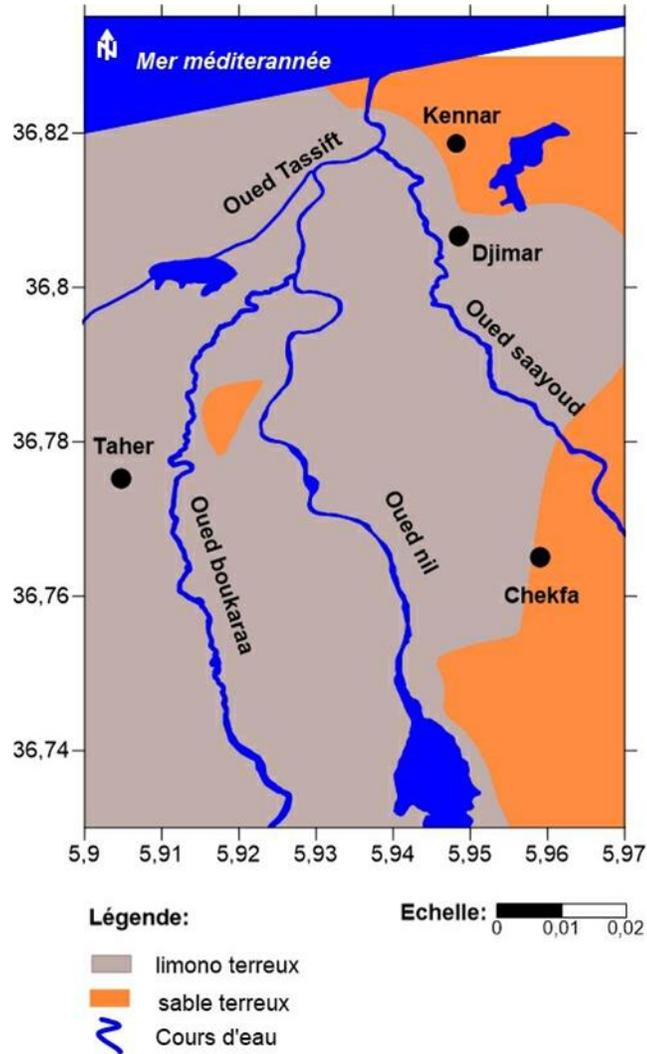


Fig. IV.7. Répartition spatiale de la texture du sol (T)

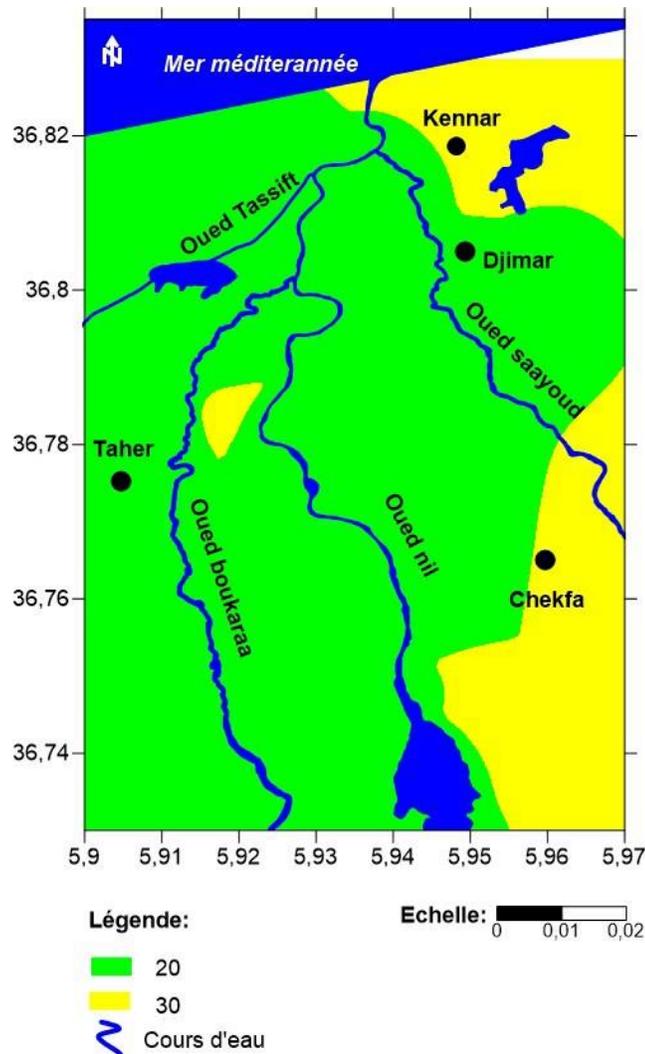


Fig. IV.8. Répartition spatiale de la texture du sol assignée à leur cotes et poids

IV.1.5. Type d'aquifère « A »

Le calcul de l'indice partiel pour ce paramètre a fait sortir 02 zones importantes (Tableau IV.5) qui sont :

- Le sable complexe avec un sub-indice de 24 occupent 6.2% de la superficie total de la plaine pour une surface de 4.17Km² se trouvent au nord de la plaine alluviale d'oued Nil et représentent le massif dunaire.
- Les alluvions grossières avec un sub-indice de 27 ils occupent la majeure partie de la superficie de la plaine 93.8% pour une surface de 63.11Km².

Tab. IV.5. Classification spécifiques (Cotes, et poids) pour le paramètre « A »

Type d'aquifère	Score	Poids	Indice	Surface (km ²)	Superficie (%)
Sable complexe	8	3	24	4,171	6.2
Alluvion grossier	9		27	63,119	93.8

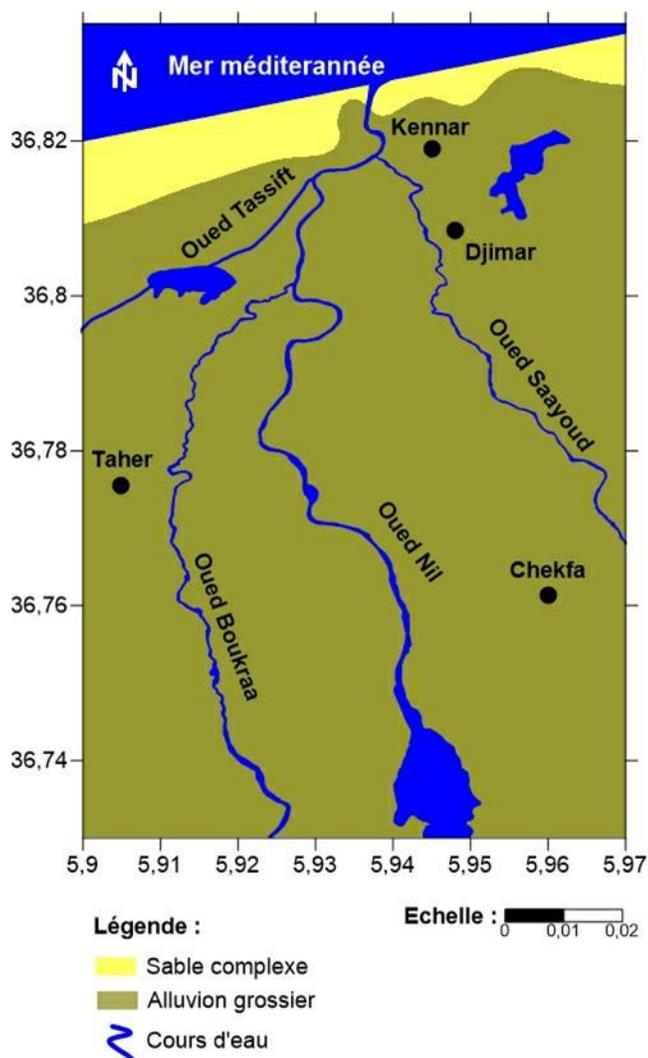


Fig. IV.9. Répartition spatiale du type d'aquifère (A)

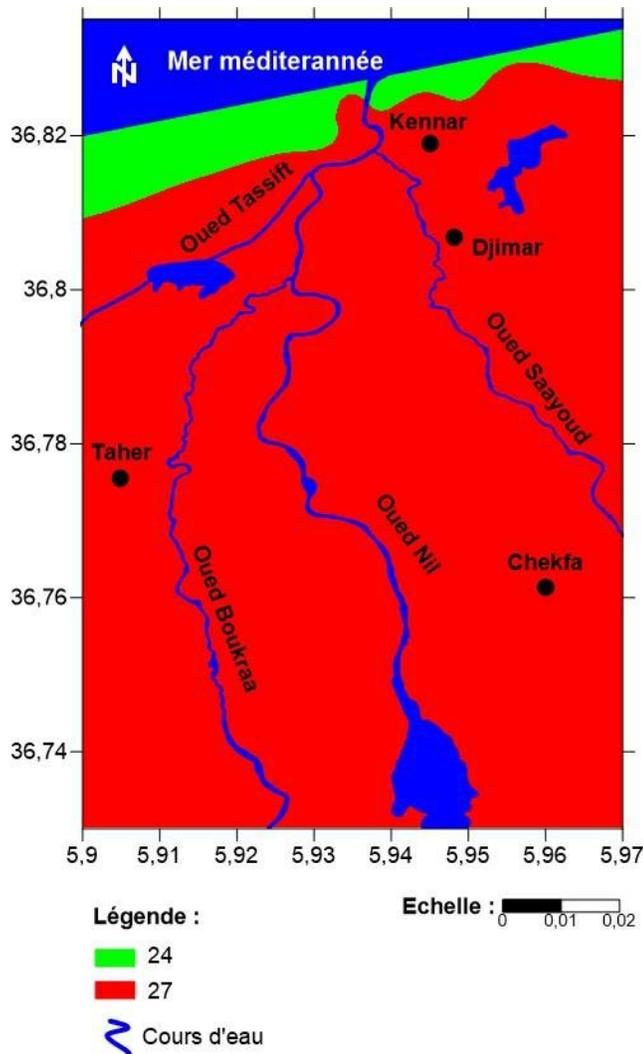


Fig. IV.10. Répartition spatiale du type d'aquifère assignée à leur cotes et poids

IV.1.6. Conductivité hydrique « C »

Ce paramètre est évalué à partir des résultats des interprétations des essais de pompages réalisés sur les différents forages repartis à travers la plaine. Ces valeurs de perméabilités varient selon la nature lithologique de l'aquifère, ce qui nous a permis de distinguer deux zones de conductivité hydrique dans la zone d'étude (Tableau IV.6) qui sont :

- Une zone constituée de gravier au Sud-Ouest de la plaine caractérisé par un sub-indice de 20 qui représente 12.07% de la superficie total de la plaine pour une surface de 8.123 Km².
- Une zone constituée de conglomérat occupent l'essentiel de la plaine caractérisé par un Sub - indice de 18 qui représente 87.92% de la superficie total de la plaine pour une surface de 59.167 Km².

Tab. IV.6. Classification spécifiques (Cotes, et poids) pour le paramètre « C »

Range	Score	Poids	Indice	Surface (km ²)	Superficie (%)
Gravier	10	2	20	8.123	12.07
Conglomérat	9		18	59.167	87.92

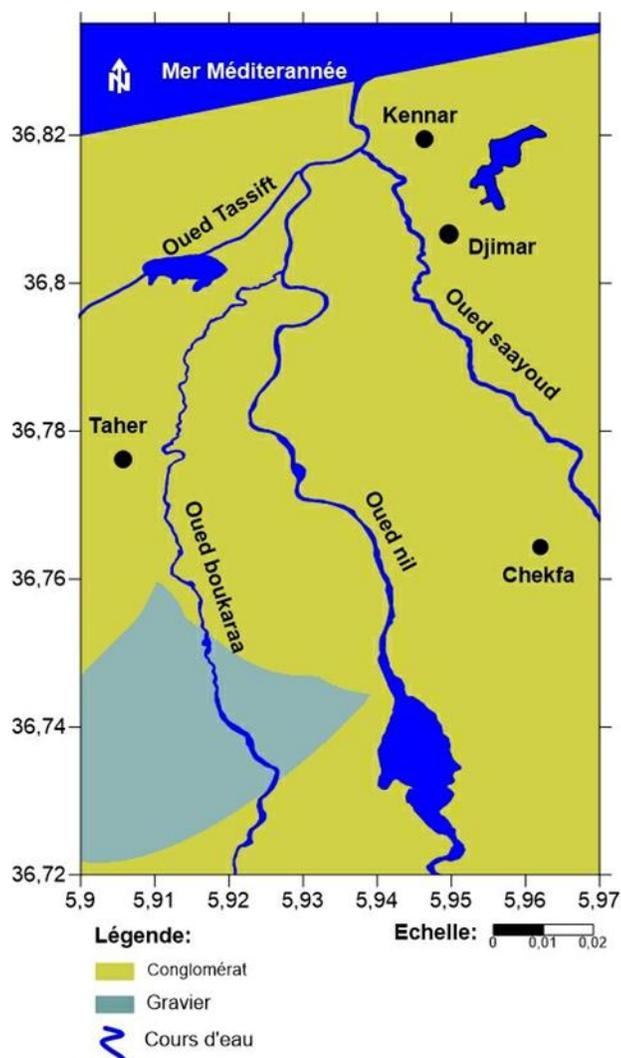


Fig. IV.11. Répartition spatiale de la conductivité hydrique (C)

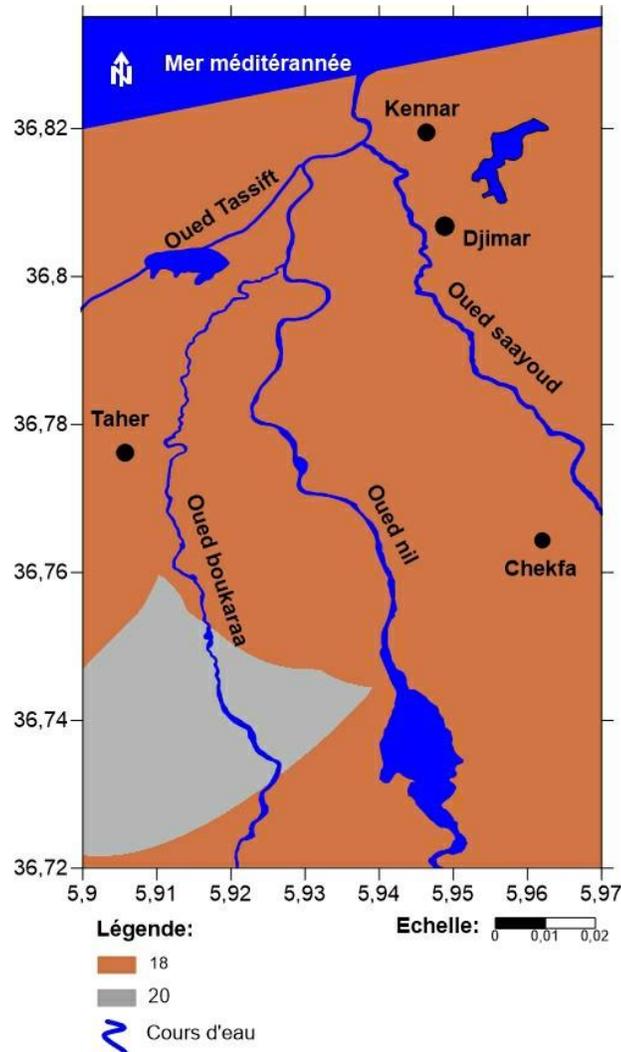


Fig. IV.12. Répartition spatiale du type d'aquifère assignée à leur cotes et poids

IV.1.7. Pente « S »

Le degré d'une pente déterminera la puissance d'infiltration des eaux de ruissellement, plus la pente est importante, plus le ruissèlement est fort et inversement, plus la pente est douce plus un polluant aura tendance à stagner et s'infiltrer dans la nappe.

La pente a été attribuée par le poids 2 le plus bas dans le modèle SINTACS, dans notre zone d'étude la pente varie entre 0 à 15%, la carte de pente a été classée en 3 classes (tableau IV.7) qui sont :

- La classe de (0 à 5) avec un sub-indice égal à 10 qui se trouve au Sud-Est de la plaine alluviale d'oued Nil, ou elle représente 8.41% de la superficie total qui correspond à une surface de 5.66Km².
- La classe de (6 à 10) avec un sub-indice égal à 16 localisé principalement au centre de la plaine alluviale d'oued Nil, ou elle représente 49.77% de la superficie total ce qui correspond a une surface de 33.49Km².

- La classe de (11 à 20) avec un sub-indice égal à 20 qui se trouve au Nord et Nord-Ouest de la plaine alluviale d'oued Nil, ou elle représente 41.82% de la superficie total qui correspond à une surface de 28.13Km².

Tab. IV.7. Classification spécifiques (Cotes, et poids) pour le paramètre « S »

Intervalles	Score	Poids	Indice	Surface (km ²)	Superficie(%)
0-5	10	2	20	5,662	8,41
6-10	8		16	33,49	49,77
11-20	5		10	28,138	41,82

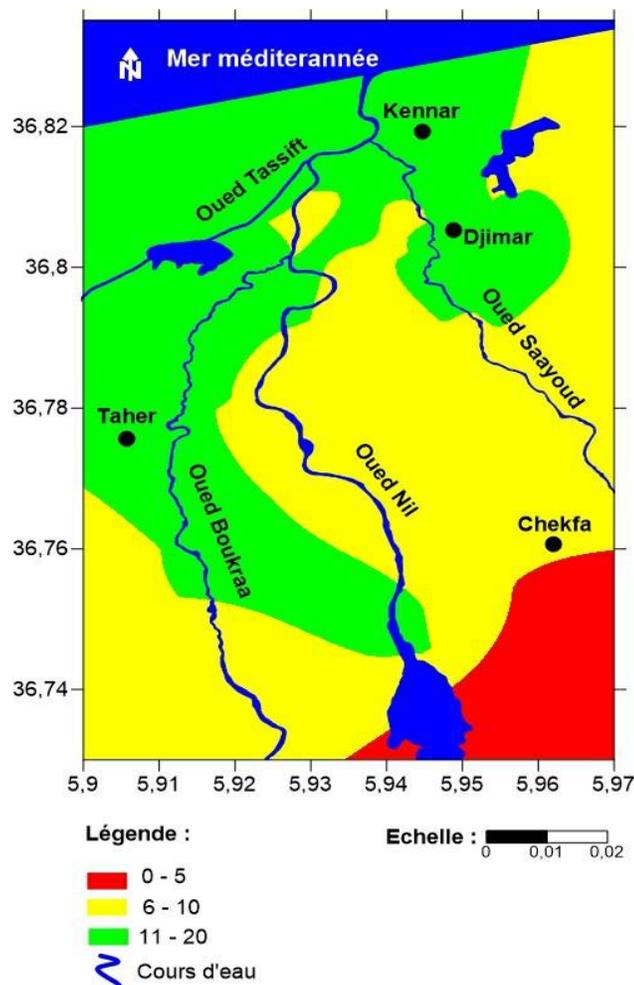


Fig. IV.13. Répartition spatiale du type de la pente en %

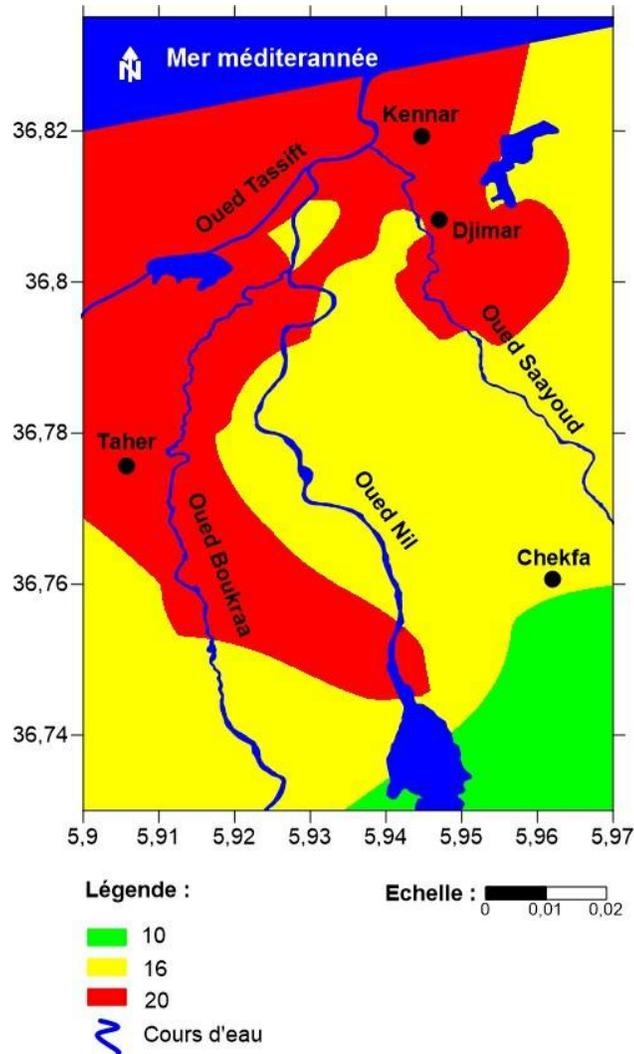


Fig. IV.14. Répartition spatiale de la pente en % assignée à leur cotes et poids

IV.1.8. Calcul de l'indice SINTACS général

La superposition des sept cartes thématiques, nous a permis de tracer la carte finale de Vulnérabilité (Tableau IV.8)

$$I_s = (S_c.S_p) + (I_c.I_p) + (N_c.N_p) + (T_c.T_p) + (A_c.A_p) + (C_c.C_p) + (S_c.S_p)$$

Tab. IV.8. Répartition spatiale des degrés de vulnérabilité

Indice de vulnérabilité	Degré de vulnérabilité	Surface (km ²)	Superficie (%)
106 - 186	Moyenne	59,31	88,14
187 - 210	Elevée	7,98	11,86

L'analyse du tableau ci-dessus nous a permis de caractériser deux classes selon leur degré de vulnérabilité.

La majeure partie de la plaine alluviale d'oued Nil est caractérisée par un degré de vulnérabilité moyenne couvrant presque la plaine et qui représente 88.14% de la superficie totale pour une surface égale à 59.31 Km², elle se caractérise par un type d'aquifère constituée d'alluvions et de gravier et un type de sol limoneux-terreux et sableux-terreux, avec une profondeur d'eau qui varie entre 0 et 10 mètres. La classe de vulnérabilité élevée se localise tout le long du littoral de la région d'étude aussi à l'Est et au Sud de la plaine alluviale d'oued Nil, elle couvre 11.86% de la superficie de la plaine pour une surface égale à 7.98Km², elle coïncide dans les secteurs où le type de sol est constitué de sables très perméables présentant une menace réelle sur la qualité des ressources des eaux souterraines. Toutefois, L'importance du paramètre type de sol dans l'évaluation de la vulnérabilité à la pollution a été soulignée par (Mejia et al, 2007), en plus de la profondeur d'eau qui a déjà été soulignée par (Babiker et al, 2005) ou elle très faible dans ce secteur varient de 0 à 1 mètre (0.42m pour le forage ON42). En effet, la présence d'un sol très perméable associée à une faible profondeur de la nappe et à une forte recharge donnerait des conditions propices à l'augmentation de l'indice de vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines.

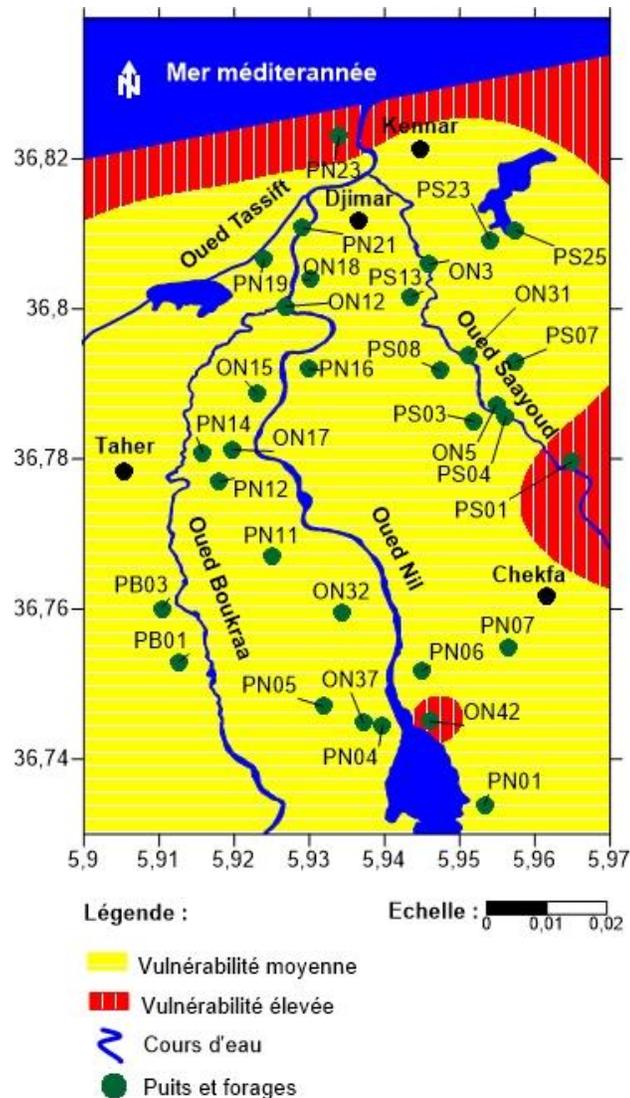


Fig. IV.15. Carte de la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution de la plaine alluviale d'oued Nil par la méthode SINTACS

IV.2. Méthode de vulnérabilité de REHESE

Il est évident que la protection de la nappe sera d'autant meilleure que le sol et la zone non saturée soient épais, que la granulométrie est fine, que la vitesse de percolation de l'eau dans la nappe soit faible, en revanche, ce type de nappe une fois contaminé par un polluant le sera pour une longue durée. L'élaboration de la carte de vulnérabilité (sensibilité) des aquifères à la pollution s'impose à cause de leur utilisation dans la prévention et la protection des eaux souterraines. En effet, ces cartes permettent de localiser les zones sensibles à la pollution, (l'évaluation des risques de pollution des nappes) et aident à la mise en place d'aménagements spéciaux et de périmètres de protection des eaux souterraines captées.

La nappe d'eau de la plaine d'oued Nil est exploitée à l'alimentation en eau potable et l'irrigation des terres agricoles.

Sur la base des facteurs comme la topographie, la zone non saturée, la capacité d'infiltration, la densité de population, l'occupation du sol...etc. Nous avons élaboré une carte de vulnérabilité à la pollution les eaux de la nappe au niveau de la plaine d'oued Nil. Celle-ci met en évidence certaines zones susceptibles d'être affectées par la pollution, suivant le degré d'aptitude.

A ce titre son élaboration a pris en compte plusieurs démarches, en intégrant les paramètres cités, l'étude de la vulnérabilité a été améliorée par le calcul du pouvoir épurateur du sol sur le trajet vertical (M_d) ou on obtient ainsi deux zones (figure IV.16) :

$M_d < 1$: zone à forte vulnérabilité

$M_d > 1$: zone à faible vulnérabilité

- **Terrains à forte vulnérabilité**

Occupant le centre de la plaine le long d'oued Nil et se prolonge du Sud vers la mer au Nord, elle couvre une superficie de 64.39% qui représente une surface de 43.33Km². La lithologie de cette zone est constituée des formations dunaires sableuse dans la partie Nord et des alluvions perméable au Sud dans la partie OÙ le pouvoir épurateur du sol sur le trajet vertical M_d est inférieur à 1 donc l'autoépuration n'est pas totale elle doit se poursuivre dans la couche aquifère (la zone saturée). Cette zone est la plus accessible à la pollution avec un risque de contamination élevé.

- **Terrains à faible vulnérabilité**

Se localisent à l'Est de la plaine d'oued Nil, elle s'étend sur une superficie de 35.60% qui représente 23.95Km². La lithologie est constituée d'alluvions anciens et des terrains métamorphiques pour cela le pouvoir épurateur du sol sur le trajet vertical M_d est supérieur à 1, donc l'autoépuration est totale dans la couche de couverture. Ainsi, une éventuelle pollution sera affaiblie ou bien éliminée avant d'atteindre la surface piézométrique.

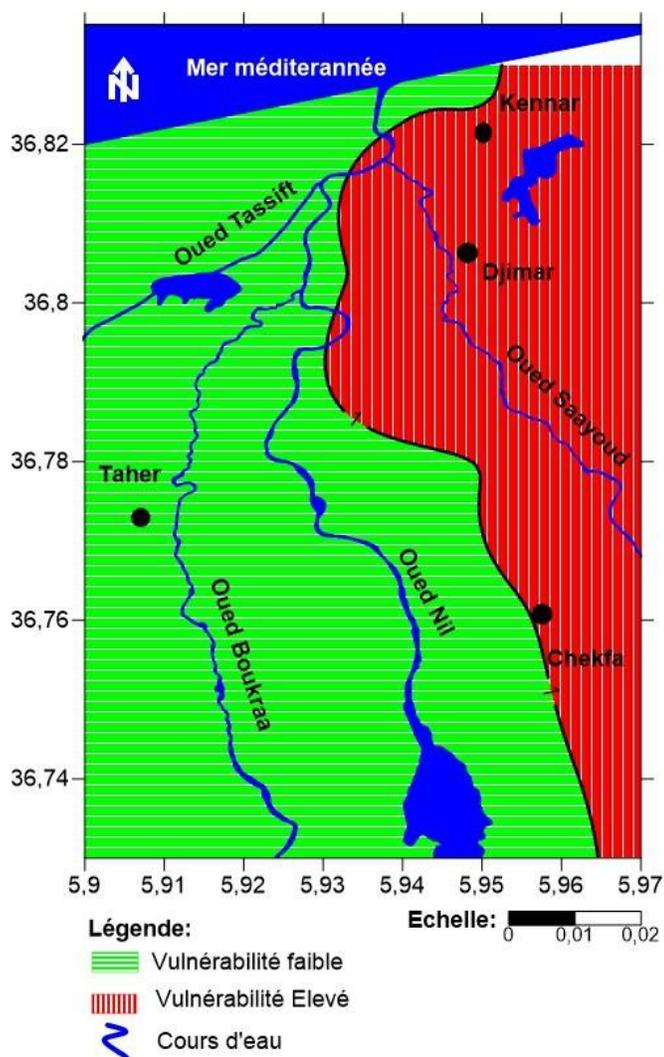


Fig. IV.16. Carte de la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution de la plaine alluviale d'oued Nil par la méthode de REHESE

IV.3. Comparaison entre les cartes de vulnérabilité obtenues par les méthodes SINTACS et REHESE

En comparant entre les deux cartes de vulnérabilité, on peut très clairement constater un changement des degrés de vulnérabilité, avec une variation spatiale qui diffère dans chaque méthode, avec le degré de vulnérabilité élevée qu'on retrouve dans les deux méthodes, alors que le degré de vulnérabilité faible existe dans la méthode de REHESE et celui élevé dans la méthode SINTACS.

Tab. IV.9. Comparaison entre les deux méthodes de vulnérabilité

Degré de vulnérabilité	SINTACS (%) de répartition spatiale	REHESE (%) de répartition spatiale
Faible	/	64.39
Moyen	88.14	/
Elevée	11.86	35.60

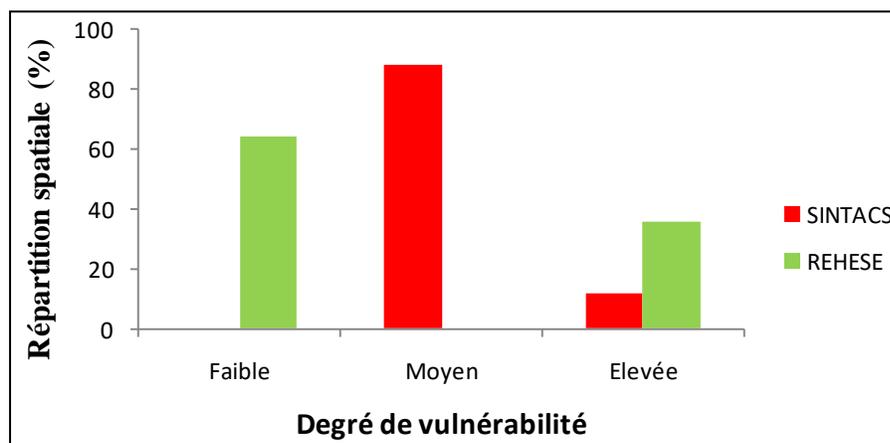


Fig. IV.17. Histogramme des répartitions spatiales des vulnérabilités pour les méthodes SINTACS et REHESE

La comparaison de la répartition spatiale des vulnérabilités dans les deux cartes, nous remarquons que les résultats des deux méthodes sont divergents ou le degré de vulnérabilité moyen (88.14%) est dominant dans la carte établie par la méthode SINTACS, alors que le degré de vulnérabilité faible (64.39%) domine la carte de vulnérabilité établie par la méthode REHESE.

La présence du degré de vulnérabilité élevée dans les deux méthodes est justifiée par la présence de faible profondeur des eaux souterraines, ainsi que la nature sableuse et graveleuse des formations aquifères se caractérisent par une conductivité hydraulique élevée qui favorise le transfert du polluant de la surface vers la nappe.

IV.4. Risque de contamination de la nappe

L'établissement de la carte de risque à la pollution est issu de la combinaison de plusieurs facteurs qui sont :

- La carte de vulnérabilité établie par la méthode SINTACS ;
- La position des différentes zones agricoles, urbaines et industrielles sur le site ;
- Densité des axes routiers dans la zone d'étude.

IV.4.1. Carte d'occupation du sol

La carte de l'occupation du sol de la plaine d'oued Nil (figure IV.18) montre la position des différentes zones urbaines et agricoles avec l'absence des zones industrielles, ainsi que la densité des axes routiers.

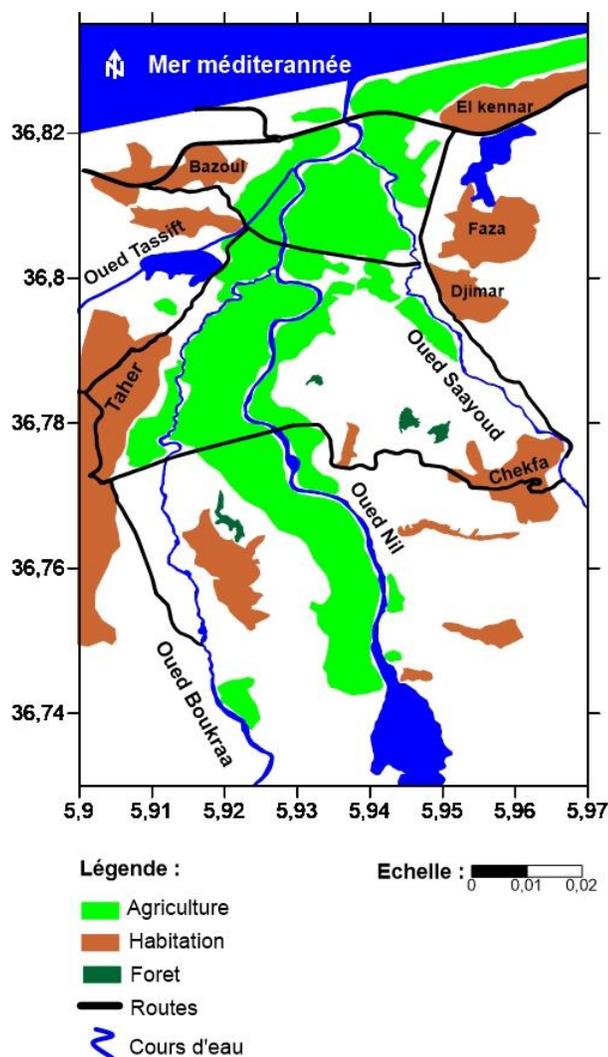


Fig. IV.18. Carte d'occupation du sol de la plaine alluviale d'oued Nil.

IV.4.2. Carte de risque de contamination

Deux degrés de risque de pollution se sont distingués :

IV.4.2.1. Zone à fort risque

On la retrouve surtout la partie Nord et Sud de la plaine d'oued Nil

Elle est caractérisée par :

- La présence des axes routiers important.
- L'implantation importante des sites urbains (Chekfa, Kennar, Bazoul),
- Une activité agricole intense représentée par la culture sous serre,

- Le caractère hautement perméable des terrains constitués principalement de sable dunaire,
- Des profondeurs d'eau proche de la surface du sol (0 à 1 mètre).

IV.4.2.2. Zone à moyen risque

La profondeur du niveau piézométrique est plus importante par rapport à la zone à fort risque, mais les rejets permanents des agglomérations urbaines avoisinantes qui avec le temps et la présence des différentes cultures sous serre peuvent provoquer un risque de pollution qui aura un impact sur l'environnement et la santé des populations habitant la région.

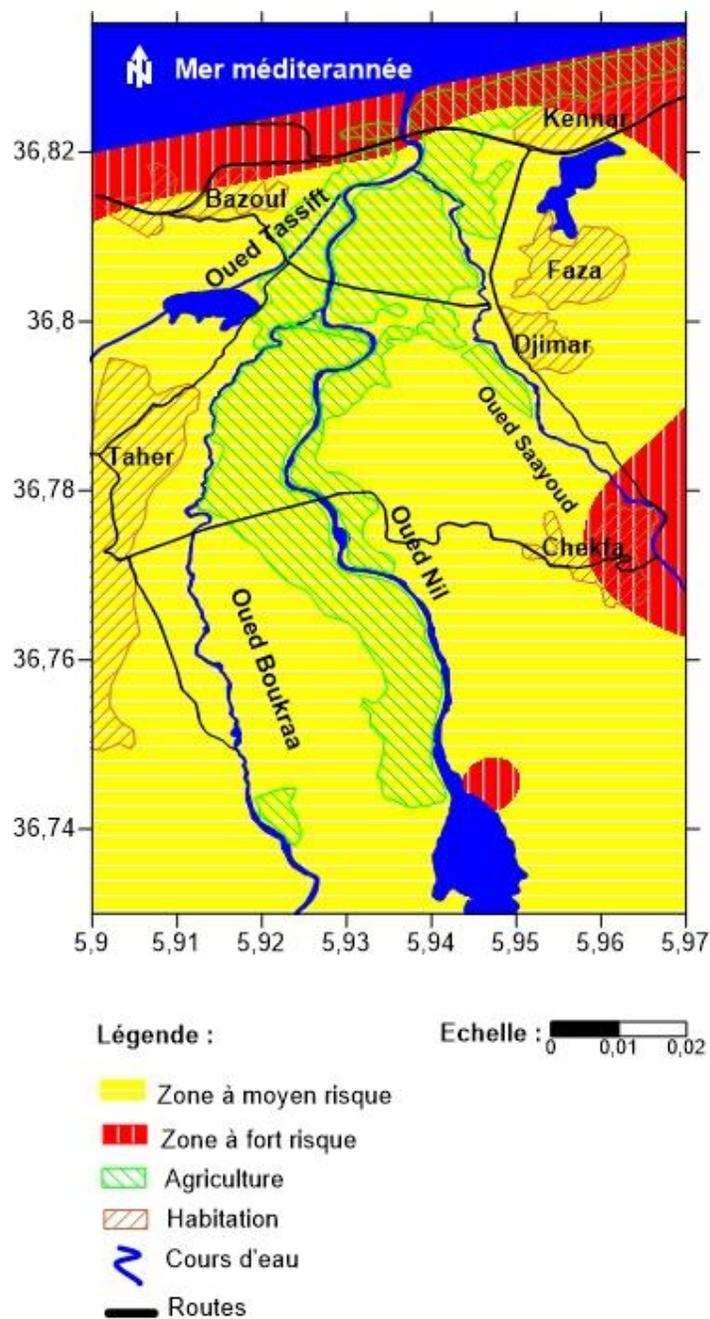


Fig. IV.19. Carte de risque de contamination de la plaine alluviale d'oued Nil.

Conclusion

La cartographie de vulnérabilité par la méthode SINTACS de la nappe alluviale d'oued Nil a révélé deux zones de vulnérabilités différentes. La zone à moyenne vulnérabilité occupe la majeure partie de la plaine alluviale d'oued Nil avec 88.14% de la superficie de la plaine alors que la zone à forte vulnérabilité occupe tout le long du littoral de la région d'étude aussi à l'Est et au Sud de la plaine et elle représente 11.86% de cette dernière.

La vulnérabilité par la méthode de REHESE nous indique des degrés de vulnérabilités différents par rapport à la méthode SINTACS avec une vulnérabilité faible couvrant 64.39 % et une vulnérabilité élevée occupant 35.60%.

La combinaison de la carte de vulnérabilité et la carte de l'occupation du sol font ressortir deux zones de risque. La zone à fort risque occupe la partie Nord et Sud de la plaine d'oued Nil nécessitant une zone de protection et des moyens de protection appropriés.

Conclusion et Recommandation

Conclusion et Recommandation

La cartographie de la vulnérabilité et des risques de pollution des eaux souterraines est une méthodologie qui est devenue nécessaire afin d'assurer une bonne gestion des ressources en eau en relation avec les diverses activités humaines (agricole, industriel,etc.).

Le but de cette étude était d'évaluer la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines de la plaine alluviale d'oued Nil à partir de deux méthodes (SINTACS et REHESE) qui utilise les méthodes des systèmes d'informations géographiques et d'analyse afin d'établir des cartes thématiques, avec évaluation de leurs variables et paramètres.

La nappe alluviale d'oued Nil qui se trouve à une distance de 20 Km au Nord-Est du chef-lieu de la wilaya de Jijel, couvre une superficie de 59 Km², avec un remplissage quaternaire reposant sur un substratum marneux d'âge Miocène. Cette nappe joue un rôle essentiel dans le développement socio-économique et l'alimentation en eau potable des populations et l'irrigation des différentes cultures agricoles qui caractérisent la région.

L'application de la méthode SINTACS qui est une adaptation de la méthode DRASTIC aux conditions méditerranéennes, nous montre la présence de deux zones de vulnérabilité. La zone de vulnérabilité moyenne qui occupe la majeure partie de la plaine et qui représente 88.14 % de la surface totale de la plaine, et la zone a vulnérabilité élevée qui couvre principalement la bande littorale, et une partie du Sud-Est de la plaine près du village de Chekfa avec 11.86 % de la surface de la plaine.

La méthode de REHESE nous indique des résultats différents avec la présence d'une zone a vulnérabilité faible couvrant l'Ouest de la plaine, elle occupe 64.39% de surface de la plaine et une zone de vulnérabilité a l'Est qui occupe 35.60% de la surface de la plaine alluviale d'oued Nil.

La réalisation des cartes de vulnérabilité avec l'aide des systèmes d'information géographique (SIG), représente l'un des meilleurs outils qui permet aux décideurs d'avoir un aperçu des plus précis sur la zone d'étude, afin de mieux gérer les problèmes liés à la ressource en eaux en termes de quantité et de qualité. Il permet de combiner, d'actualiser et d'analyser plusieurs informations sur un même support, et aidé à l'aménagement des sites urbain et ruraux et limiter les risques de pollution qu'elles soient chroniques ou accidentelles.

Dans le but de diminuer le risque lié à la pollution, on peut énoncer un certain nombre de suggestions relatives aux précautions qu'il faudra prendre en considération qui sont :

- Validation des cartes de vulnérabilité par des analyses bactériologiques et minéralogiques,
- Éviter les rejets à ciel ouvert et l'installation des stations d'épurations des eaux et réparer le réseau d'assainissement de la région,
- Renforcement des moyens matériels et humains de collecte en fonction de la croissance de la population,
- Éviter les décharges anarchiques et sauvages, et l'installation des clôtures autour avec création de centre de tri.
- Un contrôle et analyses chimiques des eaux de surface et souterraines.
- Sensibiliser les citoyens et les estivants à protéger l'environnement.
- Installation des panneaux d'interdiction de rejets des déchets tout le long des routes.
- Établissement de contravention coercitive contre toute personne ou entité polluantes.

Références Bibliographiques

Références Bibliographiques

- **Alami S**, (2011). Tutoriel d'utilisation de surfer 9. Institut de recherche pour le développement (IRD). Fort de France. 23p
- **Albinet M**, (1970). Pollution des eaux souterraines. BRGM. Service d'hydrogéologie.
- **Albinet M, Margat J**, (1970). Cartographie de la vulnérabilité à la pollution des nappes 152p
- **Aller L, Bennett T, Lehr J H, Petty R.J, Hackett G**, (1987). DRASTIC a standardised system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic settings. EPA, AdA. Oklahoma. 622 p.
- **ANRH**, (2013). Agence national des ressources hydrauliques de la wilaya de Jijel.
- **B.R.G.M**, (1985). Etude par modèle mathématique de la nappe d'Annaba-Bouteldja, 78p.
- **Babiker and all**, (2005). "A GIS based DRASTIC model for assessing aquifer vulnerability in Kakamigahara Heights, Gifu Prefecture, central Japan." Science of the Total Environment 345 (2005). 127– 140.
- **Bechkite M**, (2005). Etude hydrogéologique de la plaine alluviale d'oued El Nil, mémoire d'ingénieur d'état en géologie, université des frères Mentouri-Constantine. 181p.
- **Belli et al**, (2009). Stress oxydant induit par la Co exposition au plomb et au cadmium. deux contaminants des eaux souterraines d'oued Nil (Jijel-Algérie). Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science. vol. 23, n° 3. 2010. p289-301.
- **Berkane S**, (2011). Contribution à l'étude hydrogéologique et hydrochimique de la plaine alluviale d'oued El Nil, mémoire d'ingénieur d'état en géologie, université de frères Mentouri Constantine, 16 p.
- **Boucenna S**, (2009). Cartographie par les différentes méthodes de vulnérabilité à la pollution d'une nappe côtière cas de la plaine alluviale de l'oued DJENDJEN (Jijel, Nord-Est Algérien), mémoire de magister, université de Badji Mokhtar Annaba, 133p.
- **Boufekane M, Saighi O**, (2013). Assessment of groundwater pollution by nitrates using intrinsic vulnerability methods: A case study of the Nil valley groundwater (Jijel, North-East Algeria). AJEST vol 7. (10), pp 949-960.
- **Boughazi kh** ,(2012). Risque sismique et urbanisation regard croisé sur la ville d'Alger , mémoire magistère, 285P.
- **Bouguetit K, Benhamida N**, (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 faculté des sciences appliquées, université Kasdi Merbah Ouargla.
- **Castany**, (1982). Principes et méthodes de l'hydrogéologie. Dunod, Paris. 105p.
- **Civita M V**, (1995). A methodology for delineation and design of spring protection area system. Publ. No. 159 de GNDICI-CNR, Task unit 4.1.
- **Djellit H**, (1987). Evolution tectono-métamorphique du socle Kabyle et la polarité de mise en place des nappes de flysch en petite Kabylie occidentale (Algérie). Université de Paris- Sud Centre d'Orsay.206 p.
- **Djoudar D, Hallal D**, (2003). Vulnérabilité et protection des régions côtières. Application aux alluvions de la Mitidja Orientale, mémoire de magistère, IST/USTHB/Alger .180p.

- **Doerfliger N et al**, (1999). Montée du niveau marin induite par le changement climatique conséquence sur l'intrusion saline sans les aquifères côtiers en Métropole .BRGM/RP-60829-Fr-Rapport final.301p.
- **Doerfliger N and Zwahlen F**, (1998). "Groundwater vulnerability mapping in karstic regions (EPIK): application to Groundwater Protection Zones". Swiss Agency for the Environment, Forests and Landscape (SAEFL), Bern, Switzerland, DOI10.1007/s11270-007-9433-x.
- **Doerfliger N, Jeannin. P. Y and Zwahlen F.Z**, (1997). "Water vulnerability assessment in karst environments. a new method of defining protection areas using a multi-attribute approach and GIS tools (EPIK method)". *EnvGeol* 39(2).165–176.
- **Duran Delga M**, (1955). Etude géologique de l'Ouest de l'Ouest de la chaîne numidique. *Bull. Serv. Carte géol. Alg.*, 2^e sér.n° 24.
- **Durand Delga M**, (1969). Mise au point sur la structure du N-E de la Berbérie. *Pub. Serv. Carte Géol. Algérie*, Alger, Nelle Série, 39, pp. 89-131.
- **Ehrmann F**, (1926). Carte géologique d'El-Milia N°29.
- **Evans B M, Myers W. L**, (1990). "A GIS-based approach to evaluating regional groundwater pollution potential with DRASTIC". *Journal of Soil and Water Conservation* 29:242–245.
- **Foster S**, (1987). Fundamental concepts in aquifervulnerability, pollution riskandprotectionstrategy. In: Van Duijvenbooden, W. and Van Waegeningh, h.(eds). *Vulnerability of Soil and Groundwater to Pollution*. TNO Committee on HydrologicalResearch, The Hague.pp. 69–86.
- **Gogu R, Dassargues A**, (1998). A short review on groundwater vulnerability assessment, Basic statements for use in the framework of the cost 620 action. Workshop 18-20 mai. Université de Neuchâtel.
- **Goldscheider. N. and Klute M S H**, (2000). The PI Method - a GIS-based approach to mapping groundwater vulnerability with special consideration of karst aquifers. *Zeitschriftfürange wandte Geologie* 46, 3, 157 – 166 p.
- **Guerrachi M et Bouchekkouf K**, (2011). Etude hydrochimique des eaux superficielles et souterraines de la plaine alluviale d'Oued Nil. Université de Jijel.78p (mémoire de master en eau et environnement).
- **Hamza M H, Added A, Francésb A, Rodríguez R**, (2007). Validity of the vulnerability methods DRASTIC, SINTACS and SI applied to the study of nitrate pollution in the phreatic aquifer of Metline–Ras Jebel–RafRaf (Northeastern Tunisia); *Geosciences de surface (Hydrologie–Hydrogéologie)*. Volume 339. Pages 493–505.
- **Khemmoudje 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 (Wilaya de Sétif). Thèse de doctorat en sciences de la terre, université de Badji Mokhtar Annaba.
- **Lallemend-Barres A, Roux J C**, (1989). Guide méthodologique d'établissement des périmètres de protection des captages d'eau souterraine destinée à la consommation humaine. BRGM manuels et méthode n° 19.
- **Lallemend-Barres A**, (1994). Normalisation des critères d'établissement des cartes de vulnérabilité aux pollutions. Etude documentaire préliminaire. R37928. BRGM.
- **Lehtihet A.M**, (1983). Étude hydrogéologique de la plaine alluviale de l'Oued Nil (Région de Jijel), mémoire d'Ingénieur. USTHB Alger.67 p.

- **Livet M**, (2004). Vulnérabilité des ressources en eau et prospection des captages pour l'alimentation en eau potable. Revue française des laboratoires N°364.8p.
- **Lounnas A**, (2009). Amélioration des procédés de clarification des eaux de la station Hamadi-Kroma de Skikda, mémoire de magister, université de Skikda.92p.
- **Margat**, (1968). Vulnérabilité des nappes d'eau souterraine à la pollution (Groundwater vulnerability to contamination) (in French). Base de la cartographie. Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM). Orléans, France, 12p.
- **Medjani F**, (2007). Ressources en eau, vulnérabilité et développement durable dans la plaine de Skikda, université Badji Mokhtar Annaba. 87p.
- **Mejia J A, Rodriguez R, Armienta A, Mata E and Fiorucci A**, (2007). Aquifer Vulnerability Zoning an Indicator of Atmospheric Pollutants Input, Vanadium in the Salamanca Aquifer, Mexico. Water Air Soil Pollut185. pp 95–100.
- **Mustafa A.K, A. El-Naqa and H. Nezar**, (2006). "Vulnerability mapping of shallow groundwater aquifer using SINTACS model in the Jordan Valley area." Jordan Environ Geol (2006) 50: 651–667. DOI 10.1007/s00254-006-0239-8.
- **O.N.M.** Office National Météorologique (Achouat-Jijel)
- **Ramade F**, (1998). Dictionnaire encyclopédique de la science de l'eau, paris.786 p.
- **Sadoun L**, (2013). Etude hydrologique et hydrodynamique de la basse plaine alluviale d'oued Nil, mémoire de master en eau et environnement, université de Jijel .89p.
- **Saidi S**, (2011). Contribution des approches paramétriques, cartographiques et statistiques à l'étude de la vulnérabilité du système aquifère phréatique de Mahdia (Tunisie orientale), thèse de doctorat. Faculté des sciences de Sfax, département des sciences de la terre(Tunisie). 255p.
- **Vias J M, et al**, (2006). "Proposed method for groundwater vulnerability mapping in carbonate (karstic) aquifers: the COP method. Application in two pilot sites in southern Spain" Hydrogeol J 14:912–925.
- **Vila J. M**, (1980). La chaîne Alpine d'Algérie orientale et des confins Algéro-Tunisiens

Les sites internet consultés :

<http://Denv-jijel.DZ>

ANNEXES

ANNEXE 1

Données des précipitations à la Station Achouat - Taher (1988 - 2015).

/	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jun	Jui	Aoû	Sep	Oct	Nov	Dec
1988	85	128	70,4	65,6	42,2	18,4	0	0	134,1	2,3	184,6	284,6
1989	112,6	92	67,2	178,4	9,3	8,5	9,2	8,8	52,2	26,7	148,5	124
1990	120,1	0	54,1	87,2	74,1	8,5	6,2	29,4	0,9	107,4	251,2	411,2
1991	115,4	139,6	126,2	42,2	50,5	3,3	0	3,1	40,5	220,6	98,1	67,5
1992	122,9	56	201,4	165,5	98,3	26,1	9,5	0,2	11,5	121,9	60,3	319,3
1993	107,9	113,7	66,7	103,7	66,5	7,5	0	0	32,7	84,3	126,1	158
1994	107,1	141,9	0	92,4	14,5	0	0,3	0,5	93,3	122,9	5	371,6
1995	173,3	37,4	104,1	56,5	5,6	20,6	1,7	9,5	58,5	72,3	96,1	94,6
1996	102,1	313,1	122,4	128,8	60,9	45,1	3,2	10,7	45,1	129,7	110	128,1
1997	58	12,9	12,2	82,2	28,6	27,2	5,8	7,4	110,7	196,5	188,1	121,4
1998	42,3	142,9	67,5	106,1	130,1	3,8	0	20,4	94,3	51,5	339,3	151,8
1999	163,2	97	62,1	42,7	5,9	4	1,6	5,6	27	23,9	250,8	247,7
2000	108,6	42,4	17	33,2	95,3	13,5	1,4	2,7	25,7	89,8	117,8	84,6
2001	247,7	110,9	14,2	50,7	50,3	3,7	0	2,5	38,8	1,1	125,2	142,4
2002	71,8	66,3	37,6	49,7	15,3	4,4	16,2	86,2	49,5	103	182	407,3
2003	333,1	115	30,7	130	70,9	0,8	7,1	0	128,4	76	82	220,5
2004	137,2	83,3	75,2	96,6	81,2	56,4	1,3	4,3	75,8	34,8	267,1	158,8
2005	262,1	212,6	85,5	121,8	4,8	0	1,2	18,4	56,4	21,4	134,5	171,6
2006	178,2	165,5	54,9	24,1	32,7	2,8	0	34,8	45,3	37,9	39,6	215,4
2007	12,3	74,5	268,5	70,6	14,4	26,4	3,3	4,8	70,8	142,9	291,4	211,3
2008	34,3	27,4	172,1	18,8	144,7	3,7	0	1,3	86,7	30,8	109,8	145,9
2009	207,9	85,9	78,2	183,8	14,4	0,3	0,5	10,8	172,3	68,1	154,9	139,6
2010	121,4	60,2	105,4	52,5	81	49,5	2,1	1,4	53	218,5	195,9	110,3
2011	78,6	143,5	89,8	69,7	33,4	27	8,1	0	14,7	247,1	134,5	160
2012	64,9	368,5	95,9	189,4	3,1	0,6	0,4	110,9	105,6	162,8	82,6	81,4
2013	210,3	211,6	81,2	41,9	144,6	0,6	1,6	42,9	48,5	54,2	349,9	125,2
2014	133,7	85,1	154	13,1	7,1	13,9	0,2	4,1	24,9	49	182,9	338,1
2015	170,95	268,98	119	2	25,75	68	0	3,87	89	131,75	148	9,7

Données des températures à la station Achouat -Taher (1988 - 2015).

/	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jun	Jui	Août	Sep	Oct	Nov	Dec
1988	12,9	10,7	12,6	15	18,1	21,5	24,7	25,9	21,5	20,7	15,8	11,1
1989	10,3	11,8	13,8	14,9	17,3	21,1	25,2	26,2	23,5	19,7	16,4	15,3
1990	11,5	13,2	13,9	14,3	18,3	22,1	24,5	24,3	25,4	20,9	15,7	10,7
1991	10,5	10,6	14,4	13,5	15,2	21,2	24,7	25,8	24,6	19,6	14,1	11,2
1992	9,8	11	12,3	14,3	7,5	20,4	23	24,9	23,7	18,5	15,1	12,2
1993	9,6	10,7	12,1	14,6	18,7	21,6	23,8	25,4	22,5	19,8	14,5	12,1
1994	11,9	12,2	13,6	13,9	19,2	22	25,5	28,6	24,9	20,5	16,9	12,6
1995	11,8	13,4	13,1	14,1	19,2	22,4	25,1	26,1	22,8	20,4	16,8	15
1996	14,4	11,5	13,8	15,7	18,1	21,7	24,7	25,6	21,5	17,8	16,1	14,3
1997	13,5	12,2	12,9	15,4	19,8	23,9	24,4	25,8	24	20,3	16,5	13,7
1998	12,5	12,3	13,5	15,8	18,2	22,9	24,7	25,4	23,7	17,8	14,4	11,4
1999	11,6	10,4	13,6	15	20,4	23,3	25,1	27,8	24,8	22,9	14,7	12,2
2000	9,5	11,9	13,6	16,3	19,7	21,9	25,9	26,6	23,5	19,4	15,4	13,4
2001	12,5	11,2	17	15,2	18	23,4	24,9	26,1	22,9	22,6	15,1	10,7
2002	10,7	11,7	14	15,1	18,4	22,4	24,5	25	22,8	19,5	16,7	13,9
2003	11,6	11	13,7	16	18,4	25,3	27,7	28,3	24	21,1	16,1	12
2004	11,4	12,3	13,6	14,9	17,2	21,7	24,8	26,7	24,1	22	14	12,8
2005	9	9,2	13	16	19,8	23,5	26,2	25,5	23,7	21	15,7	11,8
2006	10,9	11,3	14,2	17,8	20,8	23,4	26,1	25,4	23,4	22,1	17,9	13,6
2007	12,3	13,9	13,2	16,7	19,8	22,8	25,1	26,8	23,5	20	14,9	12,3
2008	12,4	13,1	9	16,6	18,9	22,3	25,9	26	24,2	20,3	15	11,9
2009	11,9	11,6	13,2	15,2	20,8	23,6	27,4	27	23,4	20,1	16,5	14,7
2010	12,5	13,9	14,4	16,4	18	21,5	25,5	25,5	23,3	20,1	19,8	13,2
2011	11,9	11,8	14,4	17,2	19,6	22,5	26,4	26,3	24,4	20,5	17	13,1
2012	11,5	8,7	13,9	16,3	19,2	24,9	26,4	27,9	23,1	21,1	17,1	13
2013	11,9	10,5	15,2	16,4	18,1	20,9	25,2	25,4	23,7	22,8	15,4	12,5
2014	13,3	13,6	13,4	17,1	18,9	23,2	25,5	26,3	26,2	22,2	18,8	13,1
2015	12	11	15	17	20	22,9	27	27	25	21	16	12,9

Données d'humidité relative à la station Achouat -Taher (1991 - 2008).

Année	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
1991	77	77	77	77	77	77	73	71	76	79	80	78
1992	83	85	82	81	84	78	81	74	76	79	82	78
1993	81	77	76	77	76	77	76	77	78	76	80	83
1994	83	77	81	68	76	70	69	65	70	79	77	80
1995	75	70	75	77	72	76	72	69	72	73	69	75
1996	72	75	76	76	119	77	69	73	114	77	74	74
1997	72	83	77	74	77	73	74	71	74	76	77	75
1998	78	82	75	76	82	75	74	76	88	77	80	79
1999	81	79	75	75	73	73	70	70	74	67	80	81
2000	80	77	78	71	81	81	69	69	77	74	77	72
2001	77	77	73	77	79	67	73	71	77	71	77	78
2002	78	77	75	76	73	76	75	76	74	73	71	76
2003	78	75	75	79	80	69	68	67	79	76	75	80
2004	80	78	79	76	78	78	75	71	73	69	82	77
2005	80	77	79	76	76	73	69	68	71	77	74	77
2006	73	76	73	74	79	66	70	71	70	73	70	77
2007	80	81	74	80	72	75	73	70	75	80	76	77
2008	77	74	78	73	82	75	71	72	80	76	77	78

ANNEXE 2

Les points d'eau.

Nom	X	Y	N.P
PZ14	5,911281833	36,77520792	21,32
PZ	5,913029472	36,78632772	16,28
ON22	5,940742444	36,74124306	45,67
ON19	5,932676056	36,80351714	13,35
ON18	5,930583972	36,80407806	13,57
ON5	5,955155667	36,77867304	23,17
ON31	5,94875977	36,77867304	21,25
ON21	5,94657	36,801186	26,01
PFN07	5,915795417	36,78081533	20,02
PN01	5,953306611	36,73385919	56,06
PN04-4(bis)	5,937594	36,746563	37,32
PN04-5	5,931860639	36,74701089	35,1
PN09-bis	5,952448036	36,7601715	33,63
PN24	5,948451167	36,82524444	2,14
PN25	5,946927583	36,82580769	2,23
PN26	5,950376944	36,82612639	1,92
PN27	5,938179	36,824477	0,4
PN29	5,939313	36,826753	-0,3
PN30	5,941407	36,826966	0,05
PN31	5,943786	36,8277175	2,9
PN32	5,946222	36,827984	3,11
PN34	5,948428	36,828741	2,59
PS07	5,954935	36,79794789	28,32
PS08	5,947495472	36,79176186	25,16
PS12	5,94677775	36,80302619	12,74
PS19	5,948477028	36,81018717	10,83
PS21	5,951362583	36,81941003	5,7
PS23	5,957944333	36,80966653	4,49
PS24	5,957455111	36,81047036	9,58
PS25	5,962407306	36,81649661	12,87

Les données de perméabilités (k).

Nom du forage	X	Y	Coefficient de permeabilité (m/s)
ON1	5,92672	36,79162	2,46E-04
ON 2	5,9432	36,749	2,70E-03
ON 3	5,95018	36,8037	6,65E-05
ON 4	5,9451	36,7489	1,20E-03
ON 5	5,95836	36,7847	1,10E-03
ON12	5,93096	36,7985	3,50E-04
ON 13	5,94159	36,7453	1,73E-03
ON 14	5,95006	36,8062	1,32E-04
ON 15	5,92482	36,787	1,34E-04
ON 17	5,92317	36,7796	1,32E-04
ON 18	5,93452	36,8021	1,90E-04
ON 19	5,93696	36,8013	2,36E-05
ON 20	5,95126	36,7946	2,30E-05
ON 22	5,94084	36,74144	2,77E-04
ON 23	5,9412	36,7547	8,50E-04
ON 24	5,93811	36,7614	2,17E-04
ON 28	5,91604	36,7561	1,80E-04
ON 30	5,9458	36,7508	5,9000E-04

Les données de Transmissivité .

Nom du forage	X	Y	Transmissivité (m ² /s)
ON1	5,92672	36,79162	6,00E-03
ON 2	5,9432	36,749	6,01E-02
ON 3	5,95018	36,8037	1,33E-03
ON 4	5,9451	36,7489	2,87E-02
ON 5	5,95836	36,7847	1,90E-02
ON12	5,93096	36,7985	9,70E-03
ON 13	5,94159	36,7453	7,94E-02
ON 14	5,95006	36,8062	2,77E-03
ON 15	5,92482	36,787	8,42E-03
ON 17	5,92317	36,7796	3,22E-03
ON 18	5,93452	36,8021	5,40E-03
ON 19	5,93696	36,8013	1,25E-03
ON 20	5,95126	36,7946	9,26E-04
ON 22	5,94084	36,74144	1,22E-02
ON 23	5,9412	36,7547	3,66E-02
ON 24	5,93811	36,7614	9,15E-03
ON 28	5,91604	36,7561	4,26E-03
ON 30	5,9458	36,7508	2,24E-02

ANNEXE 3

Les données de vulnérabilité d'Oued El Nil (1988-2015) (REHSES).

Nom	X	Y	Md
PZ14	5,9112818	36,775208	0,874
PZ	5,9130295	36,786328	0,874
ON22	5,9407424	36,741243	0,665
ON19	5,9326761	36,803517	0,874
ON18	5,930584	36,804078	0,4
ON5	5,9551557	36,778673	3,575
ON31	5,94875977	36,778673	0,522
ON21	5,94657	36,801186	6,119
PFN07	5,9157954	36,780815	0,874
PN01	5,9533066	36,733859	0,522
PN04-4(bis)	5,937594	36,746563	0,665
PN04-5	5,9318606	36,747011	0,665
PN09-bis	5,952448	36,760172	0,522
PN24	5,9484512	36,825244	0,4
PN25	5,9469276	36,825808	0,4
PN26	5,9503769	36,826126	0,4
PN27	5,938179	36,824477	0,4
PN29	5,939313	36,826753	0,4
PN30	5,941407	36,826966	0,4
PN31	5,943786	36,827718	0,4
PN32	5,946222	36,827984	0,4
PN34	5,948428	36,828741	0,4
PS06	5,9520838	36,794228	6,119
PS07	5,954935	36,797948	6,119
PS08	5,9474955	36,791762	3,575
PS12	5,9467778	36,803026	6,119
PS19	5,948477	36,810187	6,119
PS21	5,9513626	36,81941	6,119
PS23	5,9579443	36,809667	6,119
PS24	5,9574551	36,81047	6,119
PS25	5,9624073	36,816497	6,119