

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي



BADJI MOKHTAR-ANNABA UNIVERSITY
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR-ANNABA

جامعة باجي مختار - عنابة

Année 2014

Faculté des Sciences de la Terre

Département de Géologie

Thèse

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de Doctorat en sciences
Option

Hydrogéologie

Par

ATTOUI Badra

**Etat de la vulnérabilité à la pollution
des eaux des grands réservoirs d'eaux
souterraines de la région de Annaba-
El-Tarf et identification des sites
d'enfouissement de déchets**

DIRECTEUR DE THESE : N. KHERICI Professeur (U.B.M. Annaba)

DEVANT LE JURY :

Président: DERRADJI El Fadel Pr. U. Badji Mokhtar Annaba

Examineurs:

ZOUINI Derradji

BAALI Fathi

DJIDEL Mohamed

MAOUI Ammar

Pr. U. Badji Mokhtar. Annaba

MC(A). U. Tebessa

MC(A) U. Kasdi Merbah. Ouargla

MC(A) U.08mai 45. Guelma

Remerciements

Avant tout, je remercie Dieu le tout puissant qui m'a donné le courage, la patience et la force pour réaliser ce travail.

Au terme de ce travail, je tiens à remercier vivement et profondément Monsieur le Professeur KHERICI. N qui m'a encadré durant plusieurs années, pour sa disponibilité et sa patience. Pour son aide, son soutien et ses idées scientifiques précieuses.

Je tiens également à remercier, Mr Derradj.E.F Professeur à l'université d'Annaba. De m'avoir fait l'honneur de présider le jury de thèse, ainsi que Mrs ,Zouini .D. Professeur à l'université d'Annaba, Baali .F maître de conférence à l'université Tebéssa, et Maoui. A maître de conférence à l'université de Guelma ,Djidel.M maître de conférence à l'université Ouargla trouvent mes vifs remerciements de juger ce travail.

Mes remerciements vont également à Mme Kadi .D la directrice générale du laboratoire de ADE Annaba, Sans oublier Mr Bouchebcheb du l'Agence nationale des ressources hydraulique (ANRH) d'Annaba,pour ses aides documentaires utiles, pour leurs accueils, et pour la mise à disposition de la bibliothèque et leurs archives des travaux réalisés dans la région.

Je profite de l'occasion pour remercier tous les gents de l'unité de CPNK Sonatrach SKIKDA , spécialement Mrs Chelirem .R chef laboratoire A.G , Bouguizi .N chef laboratoire métal, Chougui .K, chef service d'analyse centrales pour son aide précieuse dans le domaine de l'analyse d'eaux.

Je remercie spécialement Mr Khadraoui .S pour son aide et je lui exprime ici toute ma gratitude.

Je suis très reconnaissante à l'ensemble des collègues, tous les étudiants de département de géologie université d'Annaba.

Je remercie tous mes collègues et amies qui m'ont soutenue et m'ont encouragée pour accomplir ce travail

Si par mégarde, j'ai oublié quelqu'un, qu'il me pardonne et qu'il soit remercié pour tout.

C'est à ma famille que je dédie ce travail.

Badra

SOMMAIRE

| | |
|----------------------------------------------------------------|----|
| Liste des figures .. | |
| Liste des tableaux | |
| Résumé | |
| ملخص | |
| Abstract | |
| INTRODUCTION GENERALE | |
| CHAPITRE.I : Cadre général de la région d'étude : | 1 |
| I.1- Situation géographique | 1 |
| I.2- Caractéristiques géomorphologiques | 2 |
| * <i>Le complexe alluvial de la vallée de l'oued Kébir Est</i> | 2 |
| * <i>Les marécages et les lacs</i> | 2 |
| * <i>Les oueds :</i> | 3 |
| * <i>Les montagnes :</i> | 3 |
| □ <i>La plaine d'Annaba :</i> | 4 |
| □ <i>La plaine d'El Hadjar :</i> | 4 |
| □ <i>La plaine d'El Tarf :</i> | 4 |
| □ <i>La plaine alluviale de Bouteldja :</i> | 5 |
| □ <i>La plaine d'El Asfour :</i> | 5 |
| * <i>Les collines</i> | 5 |
| I.3- Le couvert végétal : | 5 |
| I.4-Aperçu Socio- économique : | 8 |
| I.4.1-La Population : | 8 |
| I.4.1.1- L'industrie : | 8 |
| I.4.1.2- L'Agriculture : | 8 |
| I.4.1.3-Tourisme : | 9 |
| I.4.1.4-La Pêche : | 9 |
| I.5-Conclusion | 9 |
| CHAPITRE.II : Cadre lithostratigraphique : | 10 |
| I.1-Cadre lithostratigraphique : | |
| II.1.1-Introduction : | 10 |
| II.1.2- Le Mésozoïque : | 10 |
| II.1.3- Le Cénozoïque : | 11 |
| a) <i>L'Eocène inférieur</i> | 11 |
| b) <i>L'Oligocène</i> | 11 |
| c) <i>Le Mio-Pliocène</i> | 11 |
| * <i>faciès fluviatil</i> | 11 |
| * <i>faciès marin (Plaisancien)</i> | 11 |
| * <i>faciès continental :</i> | 12 |
| d) L' Quaternaire : | 12 |
| <i>Quaternaire ancien (hautes terrasses) :</i> | 12 |
| <i>Quaternaire récent :</i> | 12 |
| ★ <i>La moyenne terrasse</i> | 12 |
| ★ <i>Basse terrasse</i> | 12 |
| <i>Quaternaire actuel :</i> | 12 |
| ★ <i>Les alluvions</i> | 12 |
| ★ <i>Le cordon dunaire</i> | 12 |

| | |
|--------------------------------------------------------------------------|----|
| II.2-Géologie et caractéristiques physico-chimiques des dunes : | 13 |
| CHAPITRE.III : Géométrie du système aquifère : | 15 |
| III-1/ Aquifère superficiel : | 16 |
| III.1.1/ La nappe des gneiss altérés : | 16 |
| III.1.2/ La nappe du cordon dunaire : | 16 |
| III.1.3/la nappe libre du massif dunaire : | 16 |
| III.1.4/La nappe des terrasses : | 18 |
| III.1.5/La nappe des alluvions récentes et actuelles : | 17 |
| III-2/ Aquifère profond : | 17 |
| III-2.1/ nappe des cipolins : | 17 |
| III-2.2/ La nappe profonde des graviers : | 17 |
| III-2.3/La nappe captive d'El-Tarf : | 18 |
| III-3-La carte piézométrique | 21 |
| III-3-1-Etablissement des cartes piézométriques : | 21 |
| III-3-1-1-La nappe profonde d'Annaba : | 21 |
| III-3-1-2-La Nappe Superficielle d'El-Hadjar : | 22 |
| III-3-1-3-Le massif dunaire de bouteldja : | 22 |
| III-3-1-4-La Nappe libre du Cordon Dunaire : | 24 |
| III-3-1-4-La Nappe d'El-Tarf : | 25 |
| III-4-Conclusion | 26 |
| CHAPITRE IV : Caractéristiques hydroclimatologiques | 27 |
| IV.1. Introduction : | 27 |
| IV.2. Climatologie de la zone d'étude : | 27 |
| IV.2.1. Les facteurs climatiques : | 27 |
| IV.2.1.1. Les précipitations : | 27 |
| * Les précipitations mensuelles : | 27 |
| IV.2.1.2 La Température : | 29 |
| IV.2.1.3. L'humidité : | 31 |
| IV.2.1.4. Le vent : | 32 |
| IV.3. Le bilan hydrique : | 32 |
| IV.3.1. Estimation de l'évapotranspiration potentielle et réelle : | 32 |
| III.3.1.1. Formule de Turc : | 32 |
| III.3.1.2. Formule de Coutagne: | 33 |
| III.3.1.3. Formule de Thornthwaite (bilan d'eau) : | 34 |
| IV.3.2 Le ruissellement : | 37 |
| IV.3.3 L'infiltration : | 37 |
| IV.4-Conclusion : | 40 |
| CHAPITRE.V : Vulnérabilité à la pollution | 41 |
| V.1-Introduction : | 41 |
| V.2-Objectif du travail : | 41 |
| V.3-Qualité des eaux souterraines de la région : | 41 |
| V.4-Application de méthodes d'estimation de la vulnérabilité : | 43 |
| V.4-1 .Méthode DRASTIC : | 43 |
| V.4-1-1.Description des paramètres et réalisation des cartes thématiques | 45 |
| V.4-1-1-1. Nappe d'Annaba : | 45 |
| a. Le paramètre "profondeur de l'eau (D)" | 45 |
| b. Le paramètre "Recharge nette (R)" | 46 |
| d. Le paramètre " Lithologie de l'aquifère (A)" | 47 |

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| d. Le paramètre "Nature du sol (S)" | 48 |
| e. Le paramètre Topographie (T) ou pente des terrains | 48 |
| f. Le paramètre " Zone non saturée (I)" | 49 |
| g. Le paramètre "Conductivité Hydraulique (C)" | 50 |
| h. Niveau de vulnérabilité de la nappe d'ANNABA selon DRASTIC | 51 |
| V.4-1-1-2. Le Massif Dunaire de Bouteldja : | 52 |
| a. Le paramètre "profondeur de l'eau (D)" | 53 |
| b. Le paramètre "Recharge nette (R)" | 53 |
| c. Le paramètre "Nature lithologique de l'aquifère (A)" | 54 |
| d. Le paramètre "Nature du sol (S)" | 55 |
| e. Le paramètre Topographie (T) ou pente des terrains | 56 |
| f. Le paramètre " Zone non saturée (I)" | 56 |
| g. Le paramètre "Conductivité hydraulique (C)" | 57 |
| h. Identification des classes de vulnérabilité à la pollution: | 58 |
| V.4-1-1-3. Le cordon dunaire d'Echatt : | 59 |
| a. Le paramètre "profondeur de l'eau (D) | 59 |
| b. Le paramètre "Recharge nette (R)" | 60 |
| c. Le paramètre "Nature lithologique de l'aquifère (A)" | 60 |
| d. Le paramètre "Nature du sol (S)" | 61 |
| e. Le paramètre Topographie (T) ou pente des terrains | 61 |
| f. Le paramètre " Zone non saturée (I)" | 62 |
| g. Le paramètre "Conductivité hydraulique (C)" | 62 |
| h. Interprétation de la carte de vulnérabilité à la pollution selon DRASTIC : | 63 |
| V.4-1-1-4. La Nappe d'El-Tarf : | 64 |
| a. Le paramètre "profondeur de l'eau (D)" | 64 |
| b. Le paramètre "Recharge nette (R)" | 64 |
| c. Le paramètre "Nature lithologique de l'aquifère (A)" | 65 |
| d. Le paramètre "Nature du sol (S)" | 66 |
| e. Le paramètre Topographie (T) ou pente des terrains | 66 |
| f. Le paramètre " Zone non saturée (I)" | 67 |
| g. Le paramètre "Conductivité hydraulique (C) | 68 |
| h. Interprétation de la carte de vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines de la nappe d'El Tarf selon DRASTIC : | 69 |
| V.4-2. Application de la méthode de « GOD » : | 70 |
| V.4-2-1-Description des paramètres et réalisation des cartes thématiques | 71 |
| V.4-2-1-1. Nappe d'Annaba : | 71 |
| a. Paramètre « G » type de l'aquifère : | 71 |
| b. Paramètre « O » Nature lithologique de la ZNS : | 72 |
| c. Paramètre « D » profondeur de la nappe : | 73 |
| d. Interprétation de la carte de vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines de la nappe d'Annaba selon GOD : | 74 |
| V.4-2-1-2. Le Massif Dunaire de Bouteldja : | 75 |
| a. Le paramètre "G " | 75 |
| b. Le paramètre "O" | 75 |
| c. Le paramètre "D" | 76 |
| d. Interprétation de la carte de vulnérabilité à la pollution des eaux, établie par la méthode GOD | 76 |
| V.4-2-1-3. La Nappe du Cordon Dunaire : | 78 |
| a. Le paramètre "G " | 78 |

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| b.Le paramètre ‘O’ | 79 |
| c.Le paramètre ‘D’ | 79 |
| d.Interprétation de la carte de vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines établie selon la méthode GOD | 80 |
| V.4-2-1-4.La Nappe de la plaine d’EL-Tarf : | 80 |
| a. Paramètre "G" type d’aquifère : | 80 |
| b.paramètre "O" nature lithologique de la ZNS : | 81 |
| c.paramètre "D" profondeur de la nappe : | 81 |
| d.Interprétation de la carte de vulnérabilité à la pollution des eaux selon la méthode de GOD : | 82 |
| V.4-3. Application de la méthode de vulnérabilité et risque de pollution (Khérici,2010) : | 83 |
| V.4-3-1- Réacteur sol -zone non saturée - nappe_: | 83 |
| V.4-3-2- Calcul du Pouvoir épurateur : | 85 |
| V.4-3-2-1-La nappe du massif dunaire : | 85 |
| V.4-3-2-2-Les nappes alluvionnaires d’Annaba-EL Tarf : | 89 |
| V.4-3-3-Méthode de détermination de la vulnérabilité et du risque de pollution des eaux (N.Kherici2008). | 90 |
| -Les facteurs naturels : | 91 |
| -Les facteurs anthropiques : | 91 |
| V.4-3-3-1-Classification des éléments organiques et minéraux : | 91 |
| V.4-3-2-1-1-L’indice de contamination Organique (ICO) : | 91 |
| -Classification des éléments organiques : | 91 |
| a- La DBO5 : | 91 |
| b_Nitrates (NO ₃) : | 92 |
| c-Nitrites (NO ₂) : | 93 |
| V.4-3-3-2-L’indice de contamination Minérale(ICM) : | 94 |
| -Classification des éléments minérales: | 94 |
| a- Le Chrome : | 94 |
| b- Le Plomb : | 95 |
| c- Le Manganèse : | 95 |
| d- Le Nickel : | 96 |
| e- L’Aluminium : | 96 |
| f- Le Fer Total : | 97 |
| V.4-4–Interprétation de la carte de Vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines : | 104 |
| V.4-4-1/Le massif dunaire : | 104 |
| V.4-4-2/La nappe libre d’El-Chatt : | 105 |
| V.4-4-3/La nappe superficielle : | 106 |
| V.4-4-4/La nappe profonde : | 108 |
| V.4-4-5/Relation nappe superficielle – nappe des graviers | 109 |
| V.4-4-6/Nappe de la plaine d’El-Tarf : | 110 |
| V.4-4-7/Recommandation : après l’application des différentes méthodes d’estimation | 113 |

| | |
|---------------------------------------------------|-----|
| de la vulnérabilité à la pollution | |
| V.4-5-Conclusion : | 114 |
| CHAPITRE.IV :Choix du Site d'enfouissement | |
| VI.1-Généralités | 115 |
| VI.2-Comment choisir un site : | 116 |
| VI.3- Caractéristique du premier Site : | 119 |
| VI.3.1-Climatologie : | 119 |
| VI.3.2- Géologie : | 119 |
| VI.3.3- Hydrogéologie : | 120 |
| VI.3.4- Aménagement de territoires : | 120 |
| VI.3.5- Recommandation : | 120 |
| VI.4- Caractéristique du deuxième Site: | 121 |
| VI.4.1- Climatologie : | 121 |
| VI.4.2- Géologie : | 121 |
| VI.4.3- Hydrogéologie : | 122 |
| VI.4.4-Aménagement de territoire : | 122 |
| VI.4.5- Recommandation : | 122 |
| VI.5- Caractéristique du troisième Site : | 122 |
| VI.5.1. Climatologie : | 122 |
| VI.5.2- Géologie : | 123 |
| VI.5.3- Hydrogéologie : | 123 |
| VI.5.4-Aménagement des territoires : | 123 |
| VI.5.5- Recommandation : | 124 |
| VI.6- Caractéristiques du quatrième Site | 124 |
| VI.6.1- Climatologie : | 124 |
| VI.6.2- Géologie : | 124 |
| VI.6.3- Hydrogéologie : | 125 |
| VI.6.4-Aménagement du territoire : | 125 |
| VI.6.5- Recommandation : | 125 |
| VI.7- Caractéristiques du cinquième site : | 125 |
| VI.7.1- Climatologie : | 125 |
| VI.7.2- Géologie : | 126 |
| VI.7.3- Hydrogéologie : | 126 |
| VI.7.4- Aménagement du territoire : | 126 |
| VI.7.5- Recommandation : | 127 |
| VI.8- Caractéristique du sixième site : | 127 |
| VI.8.1- Climatologie | 127 |
| VI.8.2- Géologie : | 127 |
| VI.8.3-Hydrogéologie : | 128 |
| VI.8.4-Aménagement du territoire : | 129 |
| VI.8.5- Recommandation : | 130 |
| VI.9-Caractéristiques du Septième site : | 130 |
| VI.9.1- Climatologie | 130 |
| VI.9.2- Géologie : | 130 |
| VI.9.3- Hydroéologie : | 130 |
| VI.9.4-Aménagement du territoire : | 130 |
| VI.9.5- Recommandation : | 133 |

| | |
|------------------------------------|-----|
| <i>VI.10-Conclusion :</i> | 133 |
| Conclusion Générale | 134 |
| Références Bibliographiques | |

| Liste des figures | page |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| Fig.1 : Réseau hydrographique dans la région d'Annaba-El-Tarf | 1 |
| Fig.2 : Les unités morphologiques dans la région de Annaba El-Tarf (Direction des forêts d'Annaba)Saadali B., 2007(modifié 2009) | 2 |
| Fig.3 : Carte du couvert végétal d'Annaba-El Tarf(Direction des forêts d'Annaba et Saadali .B.2007 (modifiée 2009) | 7 |
| Fig.4 : Carte géologique des plaines de la région de Annaba-El-Kala (d'après Strojexport, 1975, modifié, 2013). | 13 |
| Fig.5: Extension des différents aquifères dans les plaines de Annaba-EL-Kala (d'après Gaud, 1976, modifiée 2013). | 15 |
| Fig.6: Coupes Hydrogéologiques à travers la plaine d'Annaba (ANRH, 1976, modifiées 2009) | 19 |
| Fig.7 : Coupes Hydrogéologiques à travers la plaine et le massif dunaire de Bouteldja (ANRH, 1976, modifiées 2009). | 20 |
| Fig.8 :Coupe schématique Nord-ouest/Sud-est du système aquifère de la plaine d'El Tarf (tirée des résultats des études hydrogéologiques de la DHW d'El Tarf 1988/2008) modifiée 2013 | 21 |
| Fig.9 - Carte des isohypses de l'aquifère de la nappe des graviers (octobre 1996 ,in Hani 2003). | 22 |
| Fig.10: Carte piézométrique de la nappe superficielle (Mars,2006 ,in Hamzaoui2007) | 23 |
| Fig.11 : Carte piézométrique du massif dunaire de Bouteldja (année 1982, Kherici, 1985). | 23 |
| Fig.12:Carte piézométrique de la Nappe du Cordon Dunaire d'El-Chatt(Avril2003,Boumaïza) | 24 |
| Fig.13 : Carte piézométrique de la nappe alluviale d'El Tarf (Hautes eaux - Mai 2008/DHW El Tarf) | 25 |
| Fig. 14: Carte piézométrique de la nappe alluviale d'El Tarf (Basses eaux - Octobre 2008DHW El Tarf) | 25 |
| Fig.15 : Histogramme des précipitations moyennes mensuelles en mm (1990-2009) | 28 |
| Fig.16: Diagrammes pluviothermiques de station de Ain Assel(1990-2009) | 29 |
| Fig.17: Diagrammes pluviothermiques de station des Salines (1990-2009) | 30 |
| Fig.18: Diagrammes pluviothermiques de station de Pont Bouchet (1990-2009) | 30 |
| Fig.19: Diagrammes pluviothermiques de station de Bouteldja (1990-2009) | 31 |
| Fig.20: Diagrammes pluviothermiques de station de Remal El-Souk (1990-2009) | 31 |
| Fig.21 : Représentation graphique du bilan hydrique de Thornthwaite dans les Stations (Ain Assel, Les Salines, Pont Bouchet ,Bouteldja et Remal Souk (1990-2009) | 39 |
| Fig.18: Carte du paramètre "DEPTH" : profondeur de la nappe d'Annaba | 45 |
| Fig.19 : Carte du paramètre "R" : Recharge de la nappe d' Annaba. | 46 |
| Fig.20: Carte du paramètre "A" : Nature lithologique de l'aquifère d'Annaba | 47 |
| Fig.21: Carte du paramètre "S" : Nature lithologique de sol de la nappe d'Annaba | 48 |
| Fig.22: Carte du paramètre "T" pente de la nappe d'Annaba | 49 |
| Fig. 23: Carte du paramètre "I" impact de la zone non saturée de la nappe d'Annaba | 50 |
| Fig.24: Carte du paramètre "C" Conductivité hydraulique de la nappe d'Annaba | 51 |
| Fig.25 : Carte de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines de la nappe de la plaine d'Annaba d'après la méthode DRASTIC | 52 |
| Fig .26 : Répartition des degrés de vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines de la Plaine d'Annaba selon DRASTIC | 52 |

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Fig.27: Carte du paramètre "DEPTH" : profondeur de la nappe du massif dunaire | 53 |
| Fig.28: Carte du paramètre "R" : Recharge de la nappe du massif dunaire | 54 |
| Fig.29: Carte du paramètre "A" : Nature lithologique de l'aquifère du massif dunaire | 55 |
| Fig.30: Carte du paramètre "S" : Nature lithologique de sol du massif dunaire | 55 |
| Fig.31: Carte du paramètre "T" pente du massif dunaire | 56 |
| Fig.32: Carte du paramètre "I" impact de la zone non saturée du massif dunaire | 57 |
| Fig.33: Carte du paramètre "C" Conductivité hydraulique du massif dunaire | 57 |
| Fig.34 : Carte de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines du massif dunaire de Bouteldja D'après la méthode DRASTIC | 59 |
| Fig.35: Répartition des degrés de vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines du Massif dunaire de Bouteldja selon DRASTIC | 59 |
| Fig.36: Carte du paramètre "D" Profondeur de la Nappe du Cordon Dunaire | 60 |
| Fig.37: Carte du paramètre "R" Recharge de la nappe du Cordon Dunaire | 60 |
| Fig.38: Carte du paramètre "A" : Nature lithologique de la nappe du Cordon Dunaire | 61 |
| Fig.39: Carte du paramètre "S" : Nature lithologique de sol de la nappe du Cordon Dunaire | 61 |
| Fig.40: Carte du paramètre "T" pente de la nappe du Cordon Dunaire | 62 |
| Fig.41: Carte du paramètre "I" impacte de la zone non saturée | 62 |
| Fig.42: Carte du paramètre "C" Conductivité hydraulique | 63 |
| Fig.43 : Carte de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines de la nappe du Cordon Dunaire par l'application de la méthode DRASTIC | |
| Fig.44: Carte du paramètre "D" Profondeur de la Nappe | 64 |
| Fig.45: Carte du paramètre "R" Recharge | 65 |
| Fig.46: Carte du paramètre "A" : Nature lithologique de l'aquifère | 66 |
| Fig.47: Carte du paramètre "S" : Nature lithologique de sol | 66 |
| Fig.48: Carte du paramètre "T" pente | 67 |
| Fig.49: Carte du paramètre "I" impacte de la zone non saturée | 68 |
| Fig.50: Carte du paramètre "C" Conductivité hydraulique | 69 |
| Fig.51: Carte de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines de la plaine d'El-Tarf par l'application de la méthode DRASTIC | 70 |
| Fig.52 : Répartition des degrés de vulnérabilité à la pollution des eaux de la plaine d'El -Tarf selon DRASTIC | 70 |
| Fig.53: Carte du paramètre "G" type d'aquifère de la plaine d'Annaba | 72 |
| Fig.54: Carte du paramètre "O" nature lithologique de la ZNS de la plaine d'Annaba | 72 |
| Fig.55: Carte du paramètre "D" profondeur de la nappe d'Annaba | 73 |
| Fig.56: Carte de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines de la plaine d'Annaba par l'application de la méthode de GOD | 74 |
| Fig.57 : Répartition du degré de vulnérabilité à la pollution des eaux de la plaine d'Annaba selon GOD | 74 |
| Fig.58: Carte du paramètre "G" type d'aquifère du massif dunaire | 75 |
| Fig.59: Carte du paramètre "O" nature lithologique de la ZNS | 76 |
| Fig.60: Carte du paramètre "D" profondeur de la nappe | 76 |
| Fig.61 : Carte de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines du massif dunaire par l'application de la méthode de GOD | 77 |
| Fig.62 : Répartition du degré de vulnérabilité à la pollution du Massif Dunaire de Bouteldja selon GOD | 78 |
| Fig.63: Carte du paramètre "G" type d'aquifère du cordon dunaire | 78 |
| Fig.64: Carte du paramètre "O" nature lithologique de la ZNS | 79 |
| Fig.65: Carte du paramètre "D" profondeur de la nappe | 80 |

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Fig.66 : Carte de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines du cordon d'El-Chatt dunaire selon la méthode GOD. | 80 |
| Fig.67: Carte du paramètre "G" type d'aquifère de la plaine d'El-Tarf | 81 |
| Fig.68: Carte du paramètre "O" nature lithologique de la ZNS | 81 |
| Fig.69 : Carte du paramètre "D" profondeur de la nappe | 82 |
| Figure.70 : Carte de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines de la nappe de la plaine d'El-Tarf selon la méthode de GOD. | 83 |
| Figure.71 : Répartition du degré de vulnérabilité à la pollution de la nappe d'El-Tarf selon GOD | 83 |
| Fig .72 : Abaque de détermination de zones vulnérabilités et de risque de pollution (N.Kherici, 2010) | 98 |
| Fig.73: Détermination des zones de la vulnérabilité et le risque de pollution (N. Khérici 2010) « nappe libre de massif dunaire ». | 99 |
| Fig.74: Détermination des zones de la vulnérabilité et le risque de pollution (N. Khérici 2010) « Nappe libre d'EL Chatt ». | 100 |
| Fig.75 : Détermination des zones de la vulnérabilité et le risque de pollution (N. Khérici 2010) « Nappe profonde de gravier ». | 101 |
| Fig.76:: Détermination des zones de la vulnérabilité et de risque de pollution (N.Khérici.2010) « nappe superficielle » | 102 |
| Fig.77: Détermination des zones de la vulnérabilité et le risque de pollution (N. Khérici2010) « Nappe de La plaine d'El-Tarf ». | 103 |
| Fig.78 Carte de vulnérabilité et de risque de pollution des eaux de la nappe du Massif dunaire de Bouteldja | 104 |
| Fig.79 : Répartition du degré de vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines du Massif Dunaire de Bouteldja selon la méthode de Khérici(2010) | 105 |
| Fig.80: Carte de vulnérabilité et de risque de pollution de la nappe libre du Cordon Dunaire d'EChatt | 105 |
| Fig.81 : Répartition du degré de vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines du Cordon Dunaire d'Echatt selon la méthode de Khérici(2010) | 106 |
| Fig. 82 : Carte de vulnérabilité et de risque de pollution des eaux de la nappe superficielle dans la région d'Annaba | 107 |
| Fig.83 :Répartition du degré de vulnérabilité à la pollution des eaux de la nappe superficielle selon la méthode de Khérici(2010) | 108 |
| Figure.84 : Carte de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines de la nappe de la plaine d'Annaba selon la méthode de (Khérici,2010). | 108 |
| Fig 85:Répartition du degré de vulnérabilité à la pollution de la nappe profonde d'Annaba selon la méthode de Khérici(2010) | 108 |
| Fig.86: carte représentative du phénomène de drainance entre les deux nappes | 109 |
| Figure.87 : Carte de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines de la nappe de la plaine d'El-Tarf selon la méthode de (Khérici,2010). | 110 |
| Fig.88:Répartition du degré de vulnérabilité à la pollution des eaux de la nappe d'El-Tarf selon la méthode de Khérici(2010) | 111 |
| Fig.89 :Carte de vulnérabilité à la pollution des eaux par la combinaison des deux méthodes DRASTIC et GOD (les plus pessimistes zones de vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines) | 111 |
| Fig .90: Carte de vulnérabilité à la pollution globale de la région Selon la méthode de vulnérabilité et risque de pollution (Khérici,2010) | 112 |
| Fig.91: Distribution de vulnérabilité à la pollution par la combinaison entre les deux méthodes DRASTIC et GOD en pourcentages | 112 |
| Fig.92 : Distribution des degrés de vulnérabilité Selon la méthode de vulnérabilité et | 112 |

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| risque de pollution (Khérici,2010) en pourcentages | |
| Fig.93 : Aménagement de territoire de la commune de Ben M'Hidi (d'après DUC El-Tarf) | 123 |
| Fig.94 : Carte de situation du centre d'enfouissement dans la commune de Zerizer | 126 |
| Fig.95 : Carte des aménagements de territoires dans la commune de Chihani (DUC ,W.El-Tarf.2014) | 129 |
| Fig.96 : localisation du site d'enfouissement de déchets dans la commune d'El-Matrouha | 131 |
| Fig.97 : carte des aménagements des territoires dans la région d'El Matrouha commune d'El-Tarf | 132 |
| Fig .98: Carte de répartition de sites étudiés | 137 |
| Fig .99: Carte d'aménagement de territoire dans la zone d'étude | 136 |

| Liste des tableaux | Page |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| Tabl.1 -Peuplements et formations forestières (Plan d'aménagement de la wilaya d'El Taref 2001). | 6 |
| Tabl.2 : Les déférentes formations forestières dans la wilaya d'Annaba (d'après la Direction des foret De wilaya d'Annaba 2007). | 7 |
| Tabl.3: Variations de la transmissivité selon la texture des alluvions d'après (N.Khérici.1993, DHW El-Tarf) | 17 |
| Tabl. 4 : Situations géographiques des stations étudiées | 27 |
| Tabl.5 : Température moyenne mensuelle (°C) à la station des salines (1990-2009) | 29 |
| Tabl.6 : Moyenne mensuelle de l'humidité relative à la station des Salines en %(1974-2009) | 32 |
| Tabl.7 : Moyenne mensuelle de la vitesse des vents en m/s à la station des Salines (1974-2009) | 32 |
| Tabl.8 : L'évapotranspiration réelle selon la formule de Turc | 33 |
| Tabl.9 : Résultats de l'ETR par la méthode de Coutagne dans les 5 stations (1990/2009) | 33 |
| Tabl.10: Bilan de l'eau selon C.W Thornthwaite, station de Ain Assel (1990-2009) | 34 |
| Tabl.11 : Bilan de l'eau selon C.W Thornthwaite, station des Salines (1990-2009) | 35 |
| Tabl.12 : Bilan de l'eau selon C.W Thornthwaite, station de Pont Bouchet (1990-2009) | 35 |
| Tabl.13 : Bilan de l'eau selon C.W Thornthwaite, station de Bouteldja(1990-2009) | 35 |
| Tabl. 14 : Bilan de l'eau selon C.W Thornthwaite, station de Remal El-Souk(1990-2009) | 36 |
| Tabl.15 : Valeurs de l'ETR d'après les trois méthodes | 36 |
| Tabl.16: Détermination du ruissellement dans les stations étudiées | 37 |
| Tabl.17: Estimation de l'infiltration en (mm) par la méthode de Thornthwaite | 38 |
| Tabl.18: Qualité des eaux souterraines dans la région d'étude d'après (ADE, Annaba ,Débièche 2002) | 42 |
| Tabl. 19 : Résumé des propriétés de chaque paramètre et son poids | 44 |
| Tabl.20 : Principales sources d'informations utilisées | 45 |
| Tabl.21 : Pouvoir épurateur du sol dans la couverture (zone non saturée) (Rehse 1977) | 85 |
| Tabl. 22: Pouvoir épurateur du sol dans l'aquifère (zone saturée) (Rehse 1977) | 84 |
| Tabl.23: Pouvoir épurateur des aquifères de fractures (Bolsenkotter 1984) | 85 |
| Tabl. 24 : Pouvoir épurateur dans le massif dunaire de Bouteldja (Khérici H.,2002 ; Attoui.B.2009). | 86 |
| Tabl. 25: Pouvoir épurateur dans les nappes alluvionnaires d'Annaba-El Tarf(Khérici H. 2002 , Attoui B. 2009) | 87-89- 90-90 |
| Tabl. 26 : Classification de la DBO5 d'après les normes de l'OMS | 92 |
| Tabl.27 : Classification des Nitrates d'après les normes de l'OMS | 93 |

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabl.28 : Classification des Nitrites D'après Les normes de L'OMS | 93 |
| Tabl.29: Classification du Chrome D'après Les normes de L'OMS | 94 |
| Tabl. 30 : Classification du Plomb D'après Les normes de L'OMS | 95 |
| Tabl. 31 : Classification du Manganèse D'après Les normes de L'OMS | 96 |
| Tableau 32 : Classification du Nickel D'après Les normes de L'OMS | 96 |
| Tabl.33 : Classification de l'Aluminium D'après Les normes de L'OMS | 97 |
| Tabl.34: Classification du Fer Total D'après Les normes de L'OMS | 97 |
| Tableau35 : Estimation du pourcentage de l'infiltration et le ruissellement | 113 |

Résumé

L'accroissement de la population et l'essor industriel et agricole entraînent des difficultés croissantes dans la sauvegarde du patrimoine naturel. En conséquence les ressources en eaux qui constituent un facteur primordial pour tout développement économique risquent d'être contaminées par les activités anthropiques. La situation est plus critique pour les pays à ressources en eaux potables limitées, comme le cas de l'Algérie.

L'objectif de cette étude est d'évaluer la vulnérabilité et le risque de pollution des ressources en eaux souterraines des aquifères de la région d'Annaba-El-Tarf et d'identifier les sites d'enfouissement des déchets domestiques et industriels pour une meilleure protection de ces ressources.

Pour mieux estimer la vulnérabilité à la pollution des eaux, trois méthodes sont adoptées durant cette étude, pour attester de la force des résultats obtenus et apprécier celle qui est la plus appropriée. Il s'agit des méthodes anciennes DRASTIC et GOD et la plus récente celle de KHERICI(2010). Les deux premières se présentent sous forme de systèmes de cotation numérique basée sur la considération des différents facteurs influençant le système hydrogéologique, où une note et un poids sont affectés et variant à chaque paramètre utilisé, tant que la troisième elle est basée sur la combinaison de deux critères : l'indice d'autoépuration et l'indice de contamination.

Les résultats montrent une répartition inégale des zones de vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines. En se basant sur les cas pessimistes, globalement à l'échelle des aquifères de la région d'Annaba El Tarf les zones à fortes, moyennes et faibles vulnérabilités occupent respectivement environ 10%, 31% et 60%. A cet effet et pour protéger durablement les ressources en eaux souterraines de la région contre toutes contaminations de surface ou souterraine, quatre sites d'enfouissement des déchets ont été identifiés.

Mots clés : Vulnérabilité et risque à la pollution, eaux souterraines ,DRASTIC, GOD, Khérici 2010, site d'enfouissement, Annaba-El Tarf.

Abstract

The population, industrial and agricultural growth result in increasing difficulties in the safeguarding of natural resources. Therefore water resources which is an essential factor for any economic development are risky to be contaminated by human activities. The situation is more critical for countries with limited resources, drinking water, as in the case of Algeria. The objective of this study is to assess the vulnerability and the risk of pollution of water resources underground aquifers Annaba El- Tarf region and identify landfills for domestic and industrial waste to better protection of these resources.

To better estimate the vulnerability of water pollution, three methods are adopted in this study to demonstrate the strength of the results and appreciate that which is most appropriate. These old methods DRASTIC and GOD and most recently of Kherici (2010). The two first methods are presented under the form of numerical quotation systems based on the consideration of the different factors influencing the hydrogeological system. These methods affect a note that varies at each used parameter and a weight, while the third is based on the combination of two criteria: the index of self-purification and the index of contamination.

The results show an unequal distribution of areas of vulnerability to groundwater pollution, Based on the pessimistic case, overall scale Aquifer Annaba El Tarf region areas with high, medium and low vulnerabilities occupy about 10%, 31% and 60% respectively. For this purpose and to durably protect the groundwater resources of the region cons any contamination of surface or groundwater, four landfill sites of waste were identified.

Keywords : Vulnerability and risk of pollution, groundwater, DRASTIC , GOD , Kherici 2010, landfill site , Annaba El Tarf .

ملخص

النمو السكاني الصناعي و الزراعي أدى إلى صعوبات متزايدة في الحفاظ على التراث الطبيعي. وبالتالي الموارد المائية التي هي عامل اساسى لأي تنمية اقتصادية من المحتمل أن تكون ملوثة من جراء الأنشطة البشرية. الوضع هو أكثر أهمية بالنسبة للبلدان ذات الموارد المحدودة لمياه الشرب , كما في حالة الجزائر.

الهدف من هذه الدراسة هو تقييم الضعف و خطر تلوث المياه الجوفية لمنطقة عنابة-الطارف و تحديد مواقع دفن النفايات المنزلية و الصناعية لحماية أفضل لهذه الموارد لتقدير أفضل للتعرض لتلوث المياه , في الدراسة الحالية اعتمدنا ثلاث طرق مختلفة لتشهد على قوة النتائج بالتالي نقدر الطريقة الأنسب . هذه الأساليب القديمة (DASTIC ; GOD) آخرها (خريسي 2010). تظهر الطريقتين الأوليتين في شكل نظام التسجيل الرقمي على أساس العوامل المختلفة التي تؤثر على نظام الهيدرولوجية حيث يتم تعيين درجة ووزن متعلقة بكل عامل و نستخدم الطريقة الثالثة التي تقوم على الجمع بين معيارين :مؤشر الاستيعابية و مؤشر التلوث .

تظهر نتائج التوزيع غير العادل لمناطق الضعف تلوث المياه الجوفية. استنادا إلى حالة التشاؤم , عموما على مستوى المياه الجوفية لمنطقة عنابة- الطارف وجود نقاط ضعف عالية و متوسطة و منخفضة تشغل على التوالي 60% , 31% , 10% لهذا الغرض و لحماية موارد المياه الجوفية في المنطقة ضد أي تلوث للمياه السطحية أو الجوفية بشكل دائم, تم تحديد أربعة مكبات للنفايات.

الكلمات الرئيسية: مخاطر التلوث , المياه الجوفية , مكبات النفايات , عنابة-الطارف , خريسي 2010 , DASTIC , GOD

INTRODUCTION GENERALE

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 différente nature: **biologique**: les bactéries, virus., **chimique** et organiques(chlorures, nitrates, métaux lourds pesticides, solvants divers) ou **physique** : radioactivité, à travers le sol jusqu'à la zone non saturée.

Malheureusement, comme dans la plupart des pays du monde, l'Algérie vit une crise sévère de son environnement en dépit du problème du tarissement de la ressource en eaux. La région d'Annaba-El Tarf a connu ces dernières décennies un développement industriel et agricole important qui peut induire une contamination des sols et de l'air et une dégradation de la qualité des eaux des oueds et des nappes

A cet égard la prévention contre la pollution des nappes constitue une étape importante à laquelle les scientifiques consentent de plus en plus d'effort, notamment en étudiant la vulnérabilité et le risque de pollution des eaux des nappes souterraines.

Dans ce contexte notre travail a pour le but d'évaluer la vulnérabilité et le risque de pollution des eaux des aquifères de la région d'Annaba-El-Tarf, qui est caractérisée par une activité agricole et industrielle intense, conjuguée à la demande croissante en eaux potables, d'où la nécessité d'identifier de nouveaux sites d'enfouissement.

Plusieurs méthodes ont été développées pour l'évaluation de la vulnérabilité des aquifères. Il s'agit des méthodes DRASTIC, GOD , SINTACS , EPIK,...dans notre travail seules les deux premières méthodes ont été adoptées et complétées par troisième (KHERICI)

Notre travail est structuré en six chapitres :

◆ Le premier chapitre est consacré à la situation géographique et le cadre général de la région d'étude.

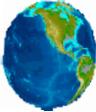
◆ Le deuxième chapitre traite le contexte géologique et structural qui caractérise la région d'étude.

◆ Le troisième chapitre concerne la géométrie du système aquifère et définition des différentes nappes rencontrées dans les systèmes aquifères de la région d'étude.

◆ Le quatrième chapitre définit l'étude des conditions climatologiques en se basant sur une synthèse du bilan hydrique relative aux stations pluviométriques évoquées dans la région d'étude.

◆ Le cinquième chapitre, constitue l'objectif principal de ce travail, consiste à évaluer la vulnérabilité et le risque à la pollution des nappes couvrant la région en appliquant les différentes méthodes d'estimation de la vulnérabilité (anciennes et récentes) connues à l'échelle mondiale en testant la validité de chaque méthode.

◆ Le sixième chapitre qui met en évidence les conditions nécessaires pour le choix des sites d'enfouissement.



Chapitre I:
Chapitre I:
Cadre Général
Cadre Général

I-Cadre général de la région d'étude :

I.1- Situation géographique : La région littorale d'Annaba–El Tarf est située dans l'extrême Nord-est algérien. De par sa position favorable et privilégiée, elle est ouverte à tous les milieux(**Fig.1**):

- La mer Méditerranée au Nord, lui conférant un espace littoral de plus de cent (100) km.
- Les plaines sub-littorales au Sud, notamment la grande plaine d'Annaba, et les plaines de Bou-Namoussa et de Kébir Est.
- La frontière tunisienne à l'Est, lien terrestre pour des échanges internationaux.
- Le lac Fetzara à l'Ouest.

Du point de vue géographique, cette région littorale est intégrée en totalité au grand domaine méditerranéen, ce qui caractérise son climat, son type de relief et sa végétation.

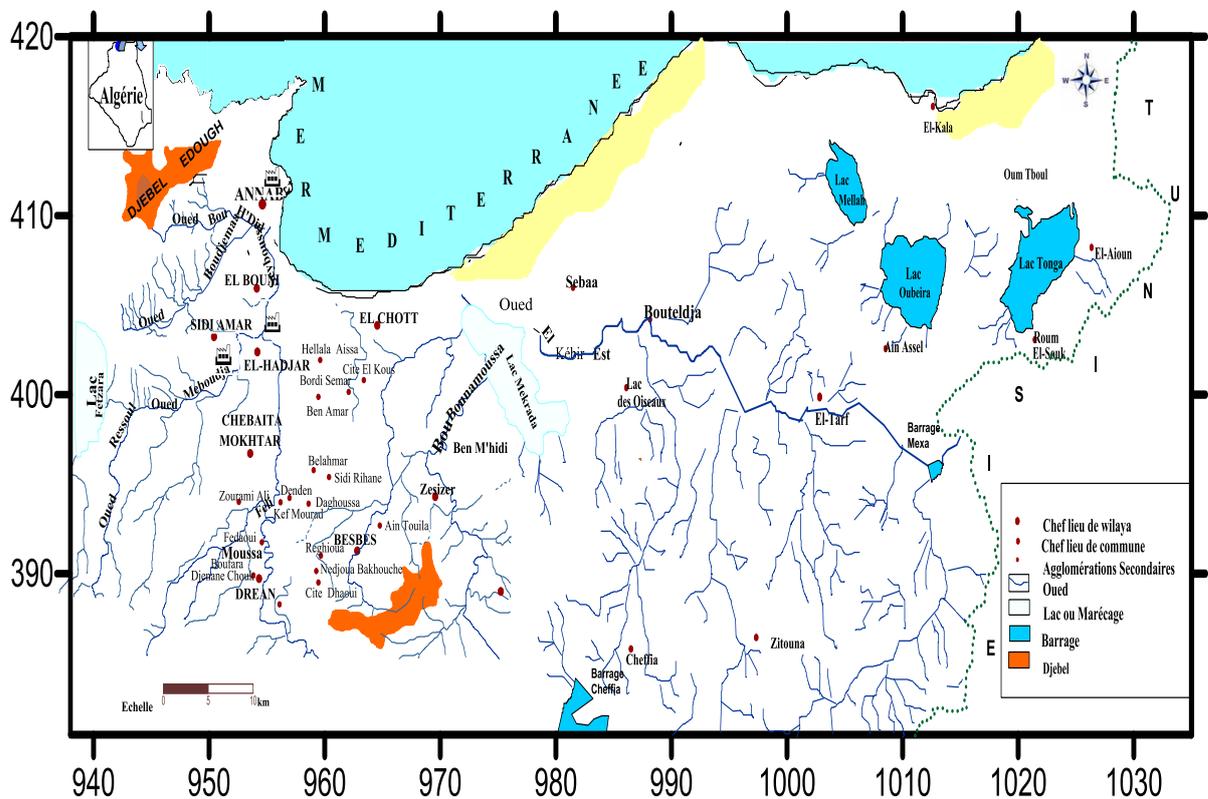


Fig.1 : Carte de situation et réseau hydrographique dans la région d'Annaba-El-Tarf

I.2- Caractéristiques géomorphologiques:

Les différentes unités géomorphologiques qui constituent la région d'étude sont:

✱ *Le complexe alluvial de la vallée de l'oued Kébir Est*, qui est caractérisé par une série de terrasses à faciès hétérogènes (sables, graviers, limons et surtout argiles).

✱ *Les marécages et les lacs* où leur présence est liée aux différentes phases d'assèchement des zones lacustres de l'Algérie orientale durant le Quaternaire.

Ils sont dus principalement à la réduction progressive des surfaces lacustres avec un remplissage alluvionnaire intensif des zones avales, de nombreux oueds tributaires du bassin, comblés surtout au niveau des dépressions internes par les transports solides.

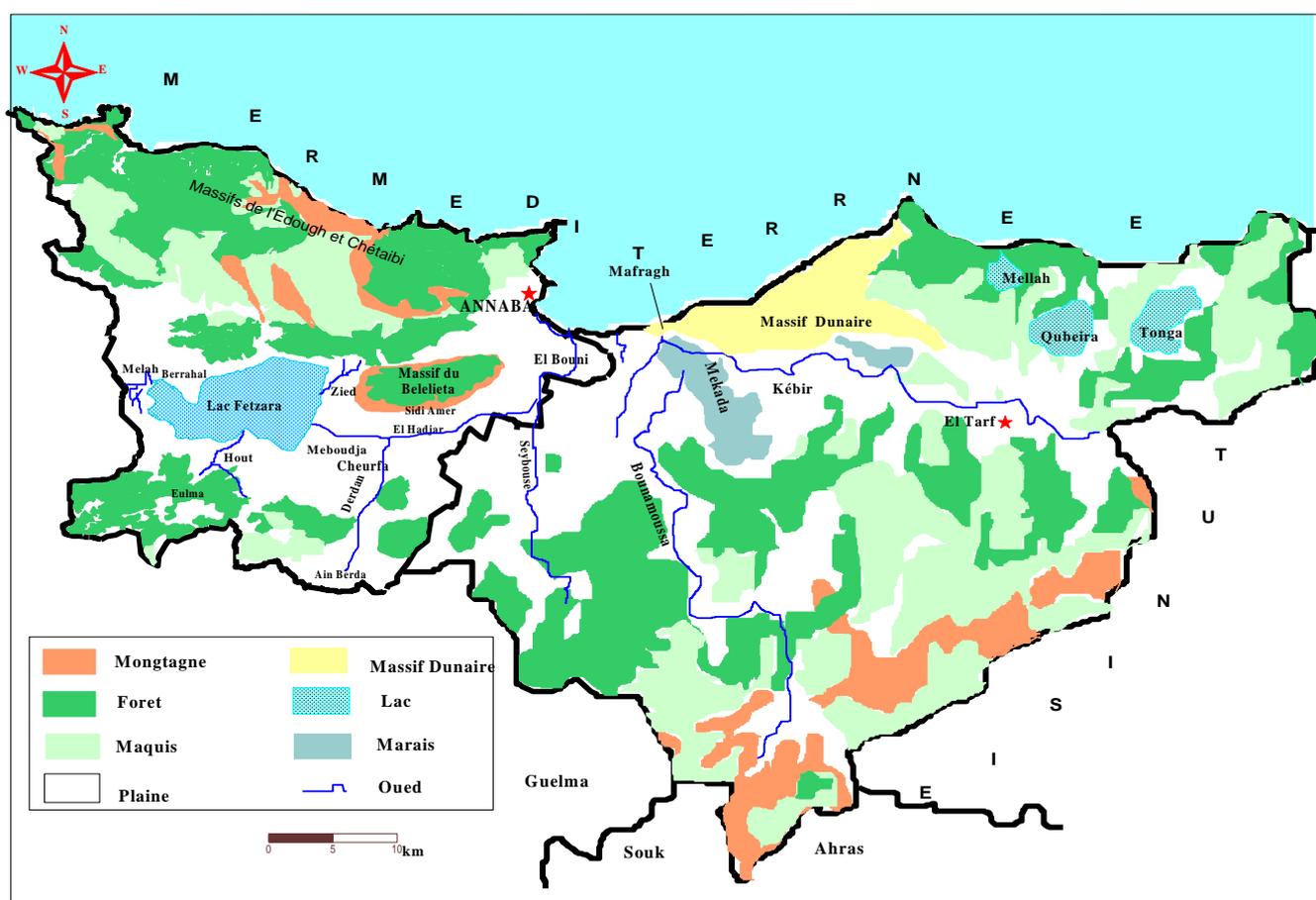


Fig.2 : Les unités morphologiques dans la région de Annaba El-Tarf (Direction des forêts d'Annaba)Saadali B., 2007(modifié 2009)

Les marécages de Mekada Mohacène et le lac des oiseaux (**Fig.2**), développés dans la basse vallée du Kébir Est, forment un delta pratiquement commun.

La dépression de Fetzara :

A l'Ouest la dépression du lac Fetzara est séparée de la plaine de Guerbes par les petits massifs de BouMaiza et Berrahel. Tous deux forment un arc de cercle séparant le massif de l'Edough

du Tell nord Guelmien. La bordure nord correspond à la retombée du massif de l'Edough et Belilieta.

Le lac est couvert de jonc et de phragmite. Son fond est formé par de limon qui reposent sur une argile compacte molle d'une épaisseur allant de 0 à 40 m.

Le lac Fetzara qui est alimenté par trois principaux Oueds : l'Oued Mellah à l'Ouest, Oued Zied à l'Est et Oued El Hout au Sud occupe une superficie de 13000 Hectares. Actuellement les eaux du lac Fetzara joignent la mer par l'intermédiaire du canal de dessèchement en passant par l'Oued Meboudja, puis l'Oued Seybouse (**Fig.2**).

✳ *Les oueds* : principalement se trouvent Bounamoussa au Sud Est et Kébir Est à l'Est (**Fig.2**), ces deux grands cours d'eau rejoignent la mer à l'embouchure sous le nom de la Mafragh. L'Oued Seybouse est le deuxième oued en Algérie, il draine un vaste bassin d'une superficie de 6471 km² avec un débit annuel de l'ordre de 441 millions de m³. Depuis les hautes plaines de Sellawa et de Heracta, l'oued Seybouse s'écoule dans une vallée de direction sud-nord. Il résulte de la confluence de l'oued Charef et l'Oued Bouhamdane dans la région de Guelma, passant par Chihani et la plaine d'Annaba où l'écoulement devient régulier et lent et recevant l'Oued Meboudja avant de se jeter finalement dans la Méditerranée. *L'Oued Meboudja* :

constitue le collecteur intermédiaire entre le lac Fetzara et l'oued Seybouse, il draine une superficie de 203 km² avec un faible débit par rapport à celui de l'oued Seybouse.

✳ *Les montagnes* : les montagnes de la Chaffia surplombent la partie aval du bassin, formant une barrière Est-Ouest. Leurs altitudes avoisinent les 450 m, avec la présence de massifs de 700 à 900 m d'altitude (djebel Bled Gherfie 996 m) à l'Ouest). Les monts de la Cheffia sont caractérisés par les grès de la nappe Numidienne constituant le principal affleurement (**Fig.2**), et au Nord le massif de l'Edough est le principal massif qui caractérise la région d'Annaba. De plus de 1008 m, il s'élève brusquement au-dessus des autres reliefs qui l'entourent. Sa masse principale de direction N55°-E, présente une ligne de crête longue de 26 km qui débute depuis le lac de Fetzara au sud et s'élève progressivement jusqu'au point culminant (1008 m) à Kef Sebaa pour redescendre ensuite depuis Seraidi vers Cap de Garde au Nord.

Au sud, ce massif est flanqué par le Djbel Boukantas (511 m) et Belilieta (287 m) et se prolonge vers Annaba par le petit massif de Boukhadra (156 m).

Le Tell Nord Guelmien : limitant les plaines sublittorales au Sud, le Tell nord Guelmien est caractérisé par une allure dissymétrique. Le versant nord présente une altitude modeste et descend lentement vers la dépression du lac Fetzara où naissent une série de glacis quaternaire étagés et emboîtés (**Marre, 1987**). Tandis que le versant sud est caractérisé par de fortes pentes et une ligne de crête qui constitue une ligne de partage des eaux de part et d'autre pour les affluents de l'oued Seybouse au sud et l'oued Kébir Ouest au nord.

□ *La plaine d'Annaba* : C'est la plaine drainée par les deux oueds, le Seybouse au Sud et le Bounamoussa au Nord, elle se situe au centre d'un synclinaurium limité par le massif de l'Edough au Nord et la chaîne numidienne au Sud. On y distingue trois secteurs:

- La basse plaine dans laquelle s'encaisse l'oued Seybouse, dans les bordures on peut observer les glacis et le littoral où quelques formations quaternaires sont visibles.
- Dans la partie inclinée et légèrement bombée où la Seybouse entaille son lit, on constate deux terrasses, la basse terrasse sablo-limoneuse qui constitue le niveau général de la plaine d'Annaba et la très basse terrasse qui existe seulement dans la région de Dréan.
- La basse terrasse sableuse de l'oued Seybouse, dont l'altitude est de 5 à 6 m vient buter contre un cordon dunaire de sables blancs et haut d'environ 10 m qui naît derrière le port. A l'Est et à l'Ouest cette basse terrasse disparaît pour laisser place à des dépressions de 2 m d'altitude et aux formations argileuses noires et hydro morphes (marais de Boukhmira près de l'aéroport Annaba–les salines).

□ *La plaine d'El Hadjar* : présente une forme inclinée vers la mer et occupe la partie-est du fond de la cuvette du lac Fetzara et se prolonge par la plaine d'Annaba. La liaison entre le lac et la plaine d'El Hadjar se fait par l'oued Meboudja.

□ *La plaine d'El Tarf* : Son extension est de l'ordre de 70 km², elle est limitée par :

- Au Nord par la mer méditerranée, le plongement du massif de Bouteldja et l'affleurement des grès numidiens.
- Au Sud par le mont de la Chaffia.
- A l'Ouest par la plaine alluviale de Bouteldja.
- A l'Est par le plongement des grès numidiens et du lac Oubaira.

Elle est caractérisée par les figures caractéristiques suivantes :

- Hautes, Moyennes et Basses terrasses constituées de cailloux, sables, galets et argiles.
- Les lacs Oubeira, Mellah, Tonga.
- Vallée d'Oued Kébir-Est qui siège dans la plaine d'El-Tarf.

□ *La plaine alluviale de Bouteldja :*

Sa superficie est de l'ordre de 110 km² limitée :

- Au Nord par le massif dunaire de Bouteldja.
- Au Sud par les monts de la Chaffia.
- A l'Ouest par la plaine d'El-Tarf, caractérisée par la forme géomorphologique de la vallée d'Oued Kébir Est et du lac des oiseaux.

□ *La plaine d'El Asfour :*

Elle forme une cuvette d'une superficie égale 50 km², elle est limitée :

- Au Nord par la plaine d'Annaba
- Au Sud , à l'Ouest et à l'Est par le Mont de chaffia.

On peut cité Oued Bounamoussa qui traverse la plaine du Sud vers le Nord et les terrasses qui forme le lit de cet oued

✱ *Les collines* qui sont développées à la limite des plaines, au niveau des terrasses déprimées. Au Nord–Est de Bouteldja ; elles sont représentées par le Hadjar Siah et Djebel Bourdim avec des altitudes respectives de 175 et 177 m.

Elles sont dominées par un faciès argilo - gréseux Numidiens qui forment une limite étanche à la formation sous jacente (Mouchara, 2004), dans la wilaya d'Annaba les collines et les piémonts, occupent 25,82 % de la superficie totale de la wilaya, soit 365 km².

I.3- Le couvert végétal :

La couverture végétale (Fig.3) est représentée par une dominance des peuplements forestiers qui occupent une superficie de l'ordre de 167777 ha représentant 60 % de la superficie de la wilaya d'El Tarf (D'après le plan d'aménagement de la wilaya d'El Tarf, 2001). Cette étendue de végétation abrite des espèces floristiques où on compte entre 600 et 700 espèces, où 63 %

de ce patrimoine est représenté par divers peuplements, et 37% seulement sont constitués de maquis couvrant les bas fond inter dunaire et à la surface des dunes au Nord - Ouest de la région (Sedrati, 2006).

D'après le tableau (N°-1-), les peuplements naturels, à savoir le chêne liège et le chêne zen occupent 40% de la superficie forestière, recouvrant les reliefs gréseux et une partie des dunes quaternaires, par contre les espèces introduites par divers reboisements (Eucalyptus, Pin maritime et les Oléastres) occupent une part de 20%.

En plus des diverses dégradations par les incendies et les pâturages illicites, ce patrimoine subit des impacts de négligence dus à l'introduction des espèces exogènes.

Tableau.1. -Peuplements et formations forestières (Plan d'aménagement de la wilaya d'El Taref 2001).

| Espèce | Superficie en (ha) | Participation en (%) |
|-----------------|---------------------|----------------------|
| - Chêne liège | 59563 | 35.5 |
| - Chêne zeen | 6492 | 3.86 |
| - Eucalyptus | 13047 | 7.78 |
| - Peuplier | 1278 | 0.76 |
| - Pin maritime | 18542 | 11.05 |
| - Oléastres | 1024 | 0.61 |
| - Aulune | 730 | 0.43 |
| -Maquis | 62173 | 37.06 |
| - Autre espèces | 850 | 0.51 |
| - Clairière | 40780 | 2.44 |
| total | 167777 | 100% |

-Sur la rive occidentale de l'Oued Bourdim la destruction (pour utilisation du bois) des espèces autochtones, puis les incendies d'une partie de l'aulnaie, installe ce dernier en situation de faiblesse face à l'Eucalyptus (mis en place dans les années 70).

- Le Pinus pinastre a ses incidences dans les dunes : absence de sous bois, acidification des sols, et la difficile percolation des eaux dans un sol sans véritable humus).

Tabl.2 : Les différentes formations forestières dans la wilaya d'Annaba (d'après la Direction des foret De wilaya d'Annaba 2007).

| Espèce | Superficie en (Ha) | Participation en (%) |
|-------------------|--------------------|----------------------|
| Chêne Liège | 39447.9 | 53% |
| Chêne Zeen | 5954.4 | 8% |
| Pin maritime | 3721.5 | 5% |
| ChêneLiège-Chêne | 5210.1 | 7% |
| Zeen | 6698.7 | 9% |
| Eucalyptus | 13397.4 | 18% |
| Eucalyptus-Acacia | | |
| Total | 74430 | 100% |

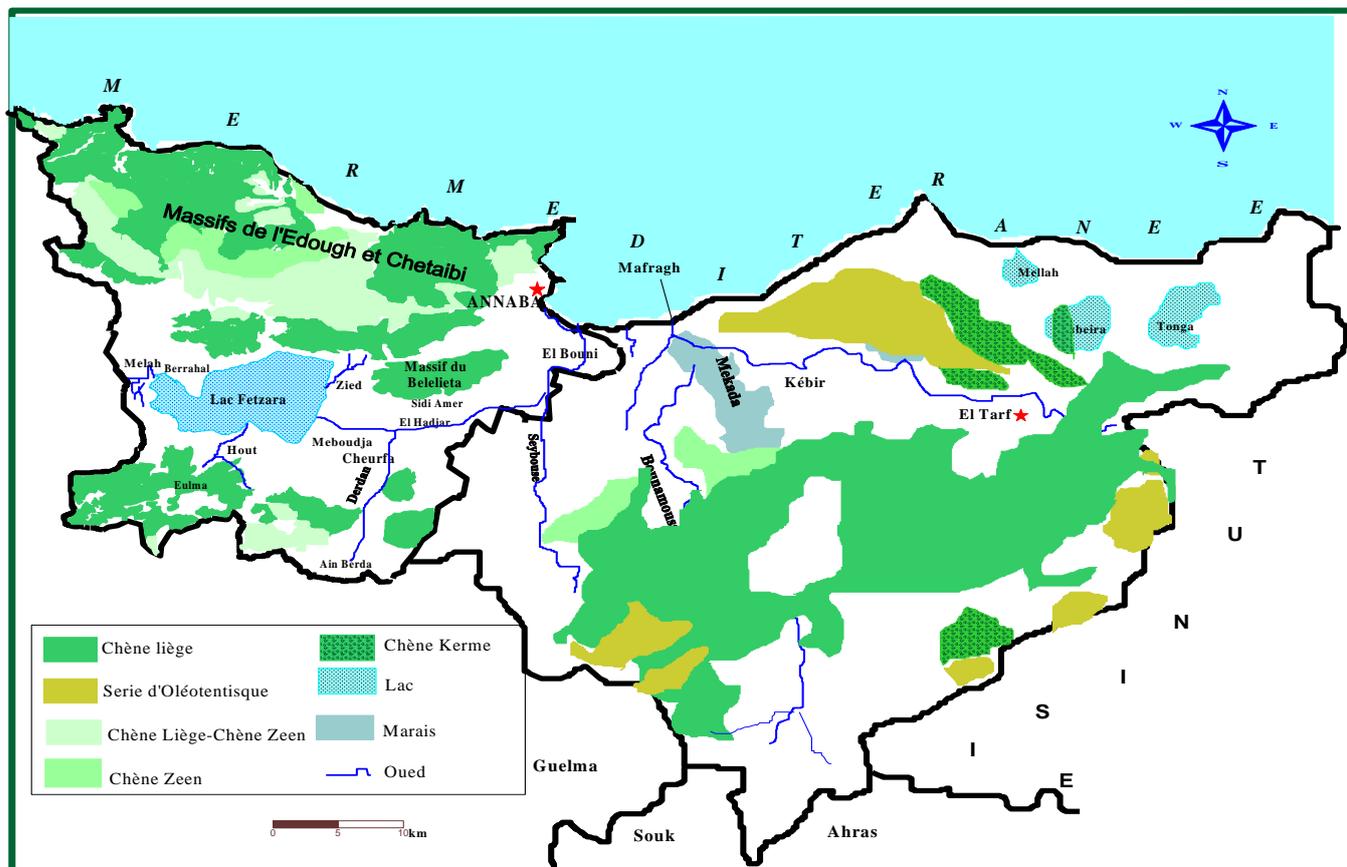


Fig.3 : Carte du couvert végétal d'Annaba-El Tarf(Direction des forêts d'Annaba et Saadali .B.2007 (modifiée 2009)

Du point de vue des essences forestières les formations de Chêne sont largement dominantes, occupant plus de la moitié des superficies cartographiées

Le Chêne Zeen n'occupe que 8% et le Pin maritime 5%, les autres essences forestières (Eucalyptus, Acacias) sont des essences de reboisements.

I.4-Aperçu Socio- économique :

I.4.1-La Population :

La population de la région d'étude au même titre que le reste du territoire algérien se situe au Nord du pays.

On marque une population relativement dense de l'ordre de 555.485 habitants(2003) concernant la wilaya d'Annaba et de l'ordre de 401716 habitants celle de la wilaya d'El Tarf, concentrée surtout dans les agglomérations d'Annaba ville, El Hadjar, Sidi Amar, et El Bouni...etc., et El-Tarf, Besbes, Dréan....etc. pour la wilaya d'El Tarf.

La répartition de la population est due à la présence des différents pôles dans la région d'étude qui sont :

I.4.1.1- L'industrie :

L'activité industrielle dans la région est très développée dominée par un pôle très important à l'échelle nationale et internationale, surtout le complexe de Sider situé dans la région d'El Hadjar, la zone industrielle entre El-Hadjar et El-Bouni et la zone industrielle le long du port d'Annaba ville (Asmidal, Naftal,...), vers la wilaya d'El Tarf se localisent des petites et moyennes unités industrielles agroalimentaires caractérisées par le concentré de tomate.

I.4.1.2- L'Agriculture :

La région d'étude par sa vocation agricole et ses conditions pédoclimatiques est un important pôle agricole dans l'Est algérien :

✳ La plaine de Bounamoussa : caractérisée par des cultures maraîchères, industrielles, fourragères et agricoles ainsi que l'élevage de bovins.

✳ Les terres de l'arrière pays où dominant la céréaliculture associée à l'élevage de bovin.

En outre il y a lieu l'émergence de labels, tel que le concentré de tomate, les vignobles des coteaux de Bouteldja et du périmètre de Bounamoussa, il y a aussi le melon de Bouteldja et du périmètre de Bounamoussa, et la dinde de Ramel Souk.

Ainsi dans la plaine de la Seybouse et principalement la plaine d'El-Hadjar vers El-Karma et Lahraycha , il existe une activité intense agricole (Tomate....etc.).

I.4.1.3-Tourisme :

L'activité du tourisme est bien distinguée dans la région d'El Tarf grâce à ses zones humides telles que le lac Mellah, Oubaira, Tonga, lac des oiseaux, le marais de la Mekhada, le parc national d'El-Kala, les vestiges romains de Bougous, les sources thermales de Hammam Sidi Trad , un écosystème forestier et une très riche faune et flore.

Dans la wilaya d'Annaba le secteur touristique est bien développé car la wilaya est caractérisée par des montagnes affleurant la mer et les vestiges romains d'Hippone...etc.. On peut également citer la présence dans les deux wilayas, d'un certains nombre de complexes touristiques, des campings, centres de vacances...).

I.4.1.4-La Pêche :

L'activité de pêche sportive et touristique à la fois, est très prisée dans la région (littoral marin, espaces lacustres, oueds, barrages...etc.).

I.5-Conclusion : La région d'étude est située à l'Extrême Nord Est algérien, comporte différentes formations géomorphologiques (Montagnes, lacs, Oueds, et plaines) où la population est concentré surtout près des activités industrielles et agricoles.

Chapitre II: Cadre Géologique
et Structural
et Structural

II.1-Cadre lithostratigraphique :

II.1.1-Introduction :

La Région d'Annaba El-Tarf a fait l'objet de plusieurs études géologiques, dont celle de L. Joleaud (1936), J. Hilly (1936), J. M. Vila (1980), J. C. Lahondère (1987). Ces études montrent l'existence de deux types de terrains, l'un sédimentaire et l'autre métamorphique (**Fig. 4**).

L'échelle stratigraphique de ces terrains se répartit du Paléozoïque au Quaternaire :
Le socle du Primaire : affleure à l'Ouest dans le massif de Dj. Edough, Belelieta et Bouhamra,

constitué par des roches cristallophylliennes (des micaschistes qui ceignent des gneiss d'après **Hilly, 1962 ; Caby, 1992 ; Ahmed-Said, 1993** (in **Hani 2003**) ces roches se superposent en trois séries :

- Série inférieure, représentée par des gneiss riches en biotite et sillimanite d'une épaisseur moyenne de 70 m, cette formation constitue le cœur de l'anticlinal du massif de l'Edough ;
- Série intermédiaire, caractérisée par des schistes et des micaschistes riches en biotite, muscovite et du grenat et parfois avec des feldspaths souvent visibles à l'œil nu. Cette série contient des marbres qui s'intercalent dans les formations des micaschistes sous forme de skarns ;
- Série supérieure, constituée par un ensemble de gneiss ocellés, schistes satinés, micaschistes grenats et amphibolites. (**Débièche, 2002**).

Les accidents tectoniques connus jusqu'à ce jour dans le massif de l'Edough permettent de déceler deux familles d'accidents :

- une première famille, dont l'orientation est NW-SE. La direction la plus fréquente de ces accidents varie de N 120° E à N 150°E.
- la seconde famille, qui semble être conjuguée à la première, est dirigée NE-SW. (**Hani, 2003**)

Ces trois séries du point de vue hydrogéologique sont peu importantes, sauf pour le gneiss altéré ou le cipolin fissuré qui peuvent constituer le siège d'une nappe d'eau souterraine

II.1.2- Le Mésozoïque :

Affleure en dehors de la région d'étude, dans la partie sud, au niveau de la région de Guelma et Bouchegouf, 20-50 km au sud de la zone d'étude. Les trois systèmes sont constitués par :

- Le Trias, formé par une association de dolomies, calcaires dolomitiques et de gypse ;
- Le Jurassique, représenté par des dolomies noires et des schistes calcareux ;
- Le Crétacé comporte des calcaires dolomitiques riches en foraminifères et des débris de Rudistes (**Débièche,2002**).

Seul le Crétacé supérieur (Sénonien) est représenté dans la région, il occupe presque la totalité des monts de la Cheffia. Il est caractérisé par un faciès schisteux plus au moins argileux. Parfois il s'agit aussi d'un passage de calcaires avec alternance de marnes ou de microbrèches épais de 5 à 10 cm. D'après la répartition de quelques forages de reconnaissance dans la cuvette de la Cheffia réalisés dans le cadre d'une étude géologique au droit de l'emplacement du barrage et de la galerie d'amenée, ont recoupé ces faciès.(**Hani,2003**).

II.1.3- Le Cénozoïque :

Présente une épaisseur importante dans la zone d'étude avec trois systèmes :

a) L'Eocène inférieur représenté par une série transgressive formée par des calcaires massifs à faciès épinéritique ;

b) L'Oligocène qui comporte des niveaux d'argiles numidiennes rencontrées dans toute la partie sud de la région d'étude (monts de la Cheffia), au Sud-Est de Bouteldja et dans les djebels Koursi, Bourdim et Oum El-Agareb. Ce faciès argileux, de couleur verdâtre, brunâtre ou bleu sombre, comprend parfois des intercalations de lentilles gréseuses pouvant aller d'un cm à 30 cm d'épaisseur. Localement, quartziteux et renfermant parfois de petits nodules de pyrite, l'ensemble des formations peut atteindre plus de 100m d'épaisseur. Ces argiles, formant la base de la série numidienne, ont été datées de l'Oligocène moyen à supérieur (**Lahondère, 1987**). Au-dessus de ces formations argileuses viennent se superposer les grès numidiens en position allochtone d'âge aquitainien (**Rouvier in Ramdani, 1996**), à grains hétérométriques allant du grain grossier au grain fin. Ces grès, épais de près de 150m, sont bien représentés au sud de la région d'étude, à l'Est dans le djebel Bourdim et au Nord-Est dans le djebel Koursi. Ils ceinturent les formations alluvionnaires et surtout dunaires(**Hani,2003**).

c) Le Mio-Pliocène représenté par les faciès suivants :

* *faciès fluvial* ; bien développé dans la plaine d'Annaba, il est formé essentiellement de galets, de sables et d'argiles le long des Oueds ;

* *faciès marin (Plaisancien)* ; caractérisé par des marnes bleues avec des intercalations calcaires ;

* *faciès continental* : est lié aux dépôts des fosses d'effondrement. En effet, la prospection par sismique réflexion a mis en évidence l'existence de deux fosses (**SONATRACH, 1969 ; Strojexport, 1975**) :

- la fosse de Ben-Ahmed, orientée S-N,
- la fosse de Ben-M'hidi, orientée SW-NE.

Ces deux fosses sont séparées par le haut fond de Daroussa (ou élévation de Daroussa), cet effondrement s'est produit au cours du Mio-Pliocène. Ces dépôts forment une série continentale argilo-sableuse avec des lits de conglomérats constituant le réservoir de la nappe captive des plaines de Annaba-El-Tarf (**Hani,2003**).

d) L' Quaternaire :

Les formations dunaires et alluvionnaires d'âge quaternaire constituent la roche réservoir du système aquifère de Annaba-El-Tarf. On y distingue :

- *Quaternaire ancien (hautes terrasses)* : correspond à la nappe superficielle dont le matériau est composé de sables, d'argiles, de graviers et de conglomérats de petite taille dominant cette formation(**Khérici,1993 in Hani,2003**).

- *Quaternaire récent* : correspond à la basse et à la moyenne terrasse.

★ La moyenne terrasse est représentée par des terrasses alluvionnaires des oueds, correspond aussi à la terre cultivable (terre, argile, sable).

★ Basse terrasse est formée par des alluvions du niveau des eaux actuelles des oueds. Ces terrasses sont plus limoneuses que sableuses et sont parsemées de marécages.

- *Quaternaire actuel* :

★ Les alluvions sont représentées par des dépôts du lit actuel de l'Oued, généralement de matériaux variés, argiles, sables et des cailloux, résultant de l'érosion des formations traversées par l'Oued.

★ Le cordon dunaire représenté par un massif constitué essentiellement de sable d'origine marine. Il affleure largement entre le village de Chatt et la ville d'El-Kala .(**Hani,2003**).

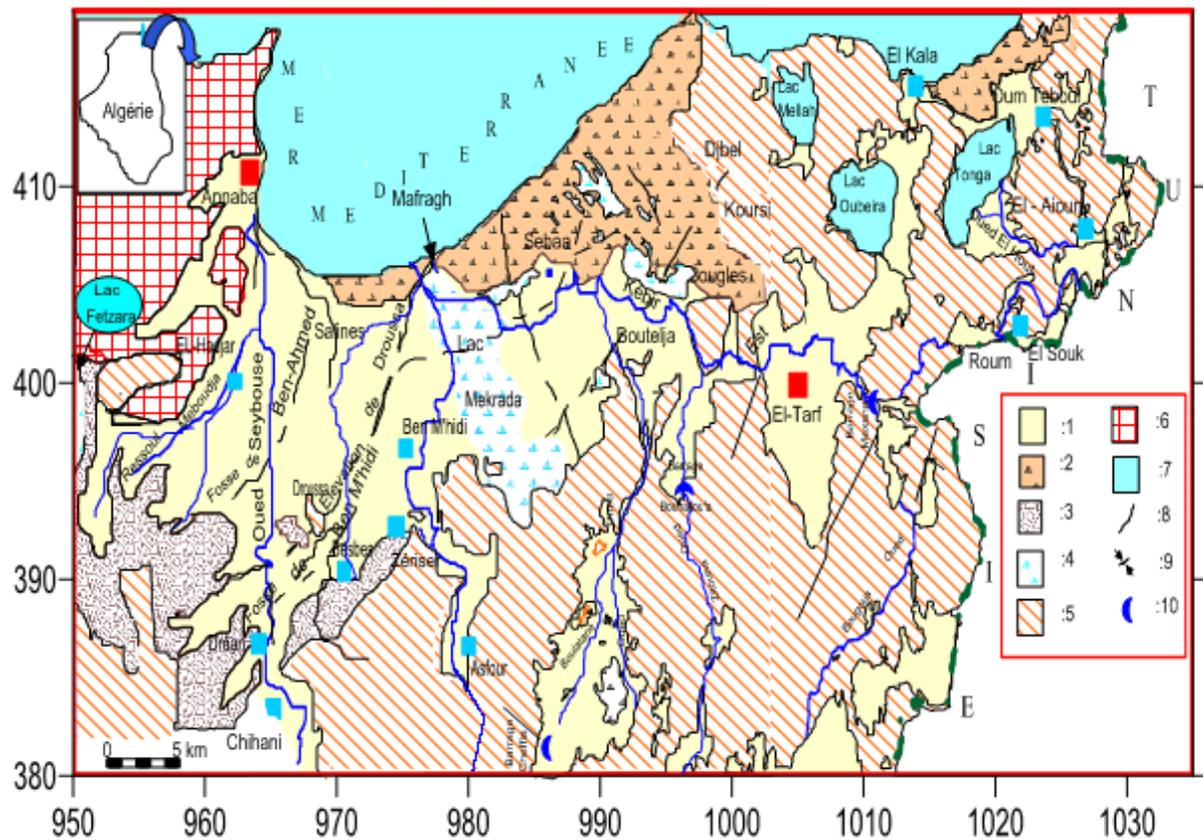


Fig.4 : Carte géologique des plaines de la région de Annaba-El-Kala (d’après Strojectport, 1975, modifié, 2013).

Légende : 1 : Alluvions récentes et actuelles ; 2 : Dunes ; 3 : Alluvions anciennes ; 4 : Marécage ou lac ; 5 : Grés et argile numidiens ; 6 : Formations métamorphiques ; 7 : Lac ; 8 : Faille ; 9 : Axe des fosses ; 10 : barrages.

II.2-Géologie et caractéristiques physico-chimiques des dunes :

A l’origine les massifs argilo-gréseux numidiens et gneissiques furent intensément érodés. Une grande quantité du matériel détritique fut charriée vers la mer puis dégradée en sable. Les éléments furent ensuite déplacés essentiellement par les vents vers l’intérieur et se répartissent uniformément dans les dépressions formant ainsi un matelas dunaire. Les niveaux d’argile en feuillets provenant directement du massif numidien, s’intercalent dans les niveaux sableux.

L’état pur, le sable renferme 80 à 90% de silice provenant de la lapidation des grès numidiens et des formations métamorphiques. C’est ce qui se dégage de la carte géologique

et structurale établie par Vila (1980) qui montre un lambeau du socle de l'Edough au Nord de Bouteldja. Le sable est donc siliceux, fin et le plus souvent mélangé avec des minéraux tels que le quartz irrégulièrement consolidé par du CaCO₃ jaune ou rougeâtre, de tourmaline et de magnétite. Le

sable renferme une proportion plus au moins forte d'argile. Il devient très argileux au pied de la chaîne numidienne. La présence de fer oxyde donne au sable sa coloration rouge, brune ou jaune (source de Bouglès). (Derradji, 2004 in Hani, 2003).

Les travaux réalisés dans la région (Khérici, 1985 ; Ramdani, 1996) permettent de distinguer :

- Des sables blancs ou jaunes clairs généralement perméables, situés au centre du massif dunaire.
- Des sables plus perméables que les précédents.
- Des sables dont les grains sont enrobés d'une fine pellicule d'argile et de ce fait moins perméables que les bancs localisés surtout en bordure des reliefs gréseux.
- Des sables rouges, localisés à l'Ouest et au Sud-ouest, plus perméables que les précédents.
- Des vases sablo-limoneuses déposées au fond des marigots "nechaas" de couleur noire en relation avec la décomposition des végétaux.

Les analyses granulométriques effectuées dans le massif dunaire montrent une granulométrie fine à moyenne dont 75 à 85% de grains ont un diamètre de 0.15 à 0.5 mm. Les essais de perméabilité effectués par Soletanche (in Ramdani, 1996) dans la région de Bouglès sur quelques sondages montrent que les sables rouges à fraction argileuse sont caractérisés par une perméabilité de 10⁻⁶ m/s. Par contre les sables jaunes foncés ont une perméabilité de l'ordre de 10⁻⁴ m/s et constituent donc un très bon réservoir aquifère. (Hani, 2003).

Chapitre III:



La Géométrie des aquifères

III-Géométrie du système aquifère :

Après avoir fait la connaissance de la nature géologique des différentes formations qui constituent le réservoir du système aquifère de Annaba-El-Tarf, nous décrivons ci-dessous les différentes formations aquifères et nous tenterons d'appréhender la géométrie des principales nappes exploitées par de nombreux ouvrages de captage.

Les formations du système aquifère sont constituées de sédiments Mio-pliocènes et quaternaires des deux fosses (Ben Ahmed, Ben M'Hidi). Le remplissage de ces fosses (Ben Ahmed, Ben M'Hidi) s'est effectué de manière hétérogène, formant une alternance d'argiles sableuses, de sables, de graviers et de travertins, où l'on distingue 8 réservoirs d'importance inégale (Gaud, 1976 ,in Hani 2003) (Fig.5):

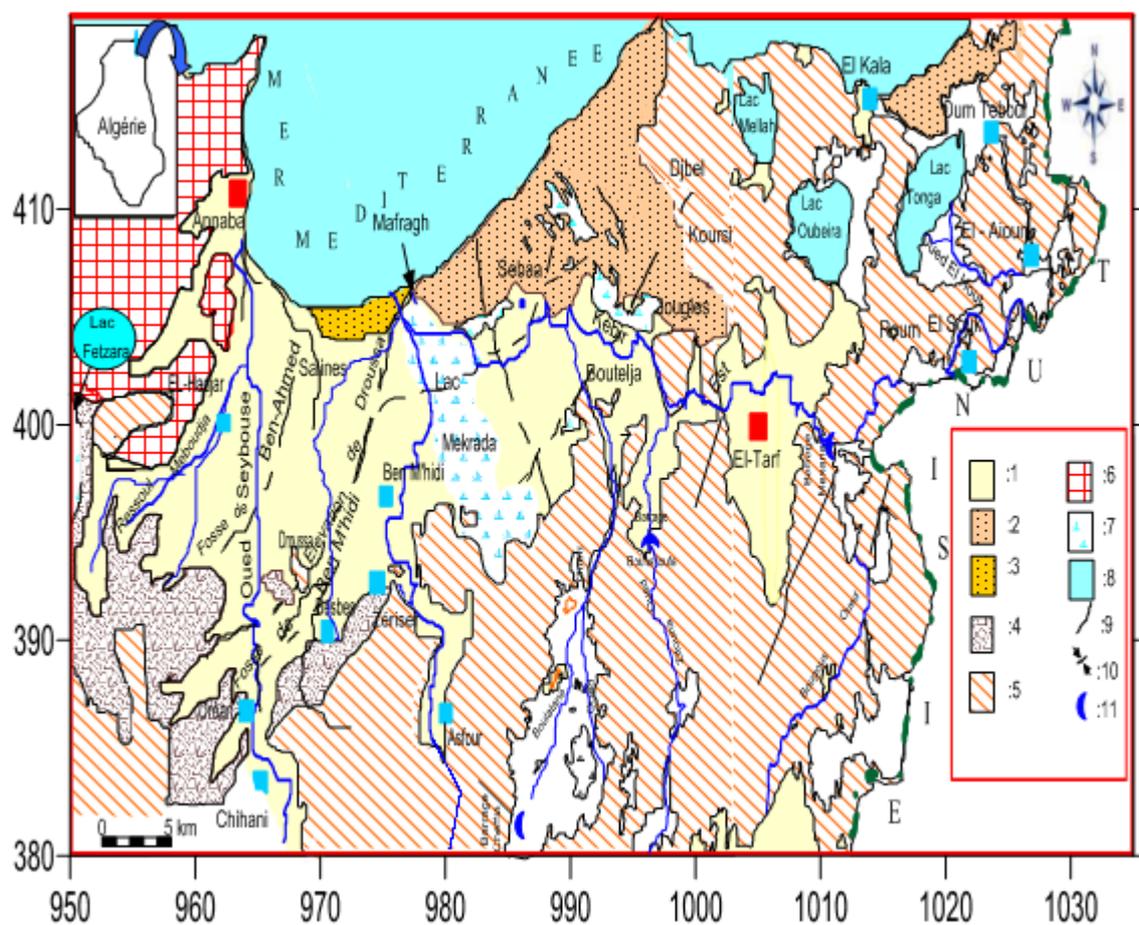


Fig.5: Extension des différents aquifères dans les plaines de Annaba-EL-Kala (d'après Gaud, 1976, modifiée 2013).

1 : Nappe des formations superficielles ; 2 : Nappe des sables du massif dunaire; 3 : Nappe des sables du cordon dunaire ; 4 : Nappe des alluvions de haut niveau ; 5 : Grès et argiles du Numidien ; 6 : Formations métamorphiques (nappe des cipolins) ; 7 :Marrécages ; 8 : Lacs ; 9 :Failles ; 10 : Fosses. ;11 :Barrages.

III-1/ Aquifère superficiel : d'après (N.Khérici.1993)

Selon la variation horizontale des faciès lithologiques, l'aquifère superficiel englobe 5 nappes : la nappe des gneiss altérés, la nappe du massif dunaire, la nappe du cordon dunaire, la nappe des calloutis de terrasse et la nappe des alluvions récentes et actuelles

III.1.1/ La nappe des gneiss altérés :

Alimentée par les eaux de pluie, elle se localise dans la région Nord Ouest, sur le flanc Est des massifs métamorphiques de Bouhamra et de Bellelita, où son épaisseur moyenne, le débit moyen des captages et la perméabilité des roches sont respectivement de l'ordre de 15m, de 2l/s et de 10^{-6} à 10^{-5} m/s (**Khérici,1993**).

Elle est captée par des puits et des forages et utilisée pour divers usages (industrie, élevage, alimentation humaine).

III.1.2/ La nappe du cordon dunaire :

C'est une nappe limitée sur une bande littorale de 0.5 à 2 km de largeur, contenue dans des sables dunaires éoliens, ces sables proviennent de la destruction progressive des grès du numidien, à l'état pur le sable siliceux renferme 80 à 90% de silice, il est blanc ou jaune clair, fin, meuble et homogène (80% des grains ont un diamètre de 0.3 à 0.5mm), souvent accompagné de différents minéraux (CaO, MgO, Al₂O₃). Cette nappe est alimentée directement par les eaux de pluie, vu la bonne porosité efficace des sables de l'ordre de 10% (**B.Gand 1976**).

L'épaisseur moyenne oscille entre 5 et 18m et la perméabilité entre 10^{-4} et 10^{-3} m/s. Elle est exploitée uniquement par des puits à des usages domestiques en particulier pour l'alimentation en eau potable et l'élevage (**Khérici,1993**).

III.1.3/la nappe libre du massif dunaire :

Le long du littoral, un énorme massif dunaire s'amplifie de l'Ouest vers l'Est, il prend alors une orientation NW – SE conforme aux vents dominants. Le massif dunaire de Bouteldja est essentiellement constitué de sables éoliens qui forment une nappe libre, avec des épaisseurs comprises entre 20 et 120 m et l'existence d'intercalations des lentilles argileuses qui correspondent à d'anciens fonds de marais. La nappe libre du massif repose sur un substratum argilo – gréseux imperméable à semi perméable (**Fig.7**). Elle est alimentée par les précipitations atmosphériques, le ruissellement à partir des pentes favorables des formations numidiennes et en fin les affluents de l'oued El Kébir Est (**Khérici,1993**).

III.1.4/La nappe des terrasses :

Localisée au sud de la région, dans des cailloutis et galets. D'après B.Gaud (1976) la transmissivité de cette nappe est faible variant de 10^{-5} à 10^{-4} m²/s. Etant donnée ses faibles potentialités hydrauliques, cette nappe n'est exploitée que par des puits destinés à l'agriculture et à l'alimentation de petites localités (Khérici,1993).

III.1.5/La nappe des alluvions récentes et actuelles :

Cette nappe couvre la majorité de la plaine d'Annaba et la plaine d'El-Tarf , elle est contenue par des alluvions récentes et actuelles à texture argilo-sableuse, argilo-limoneuse ou sablo-argileuse avec quelques lentilles de sables de porosité efficace de l'ordre de 2% (B.Gand 1976) et l'épaisseur moyenne de 10m, tandis que la transmissivité varie de 10^{-6} à 10^{-3} m²/s selon la texture des alluvions comme indiqué ci-dessous (Khérici,1993)

Tabl.3: Variations de la transmissivité selon la texture des alluvions d'après (N.Khérici.1993, DHW El-Tarf)

| | texture | T m ² /s |
|----------|------------------|------------------------------------------|
| Annaba | Sablo-argileuse | 10^{-4} à 10^{-3} |
| | Limono-argileuse | 10^{-6} à 10^{-3} |
| | Argileuse | 7.10^{-8} à 7.10^{-6} |
| EL-Taref | Sablo-argileuse | $1,5 \cdot 10^{-3}$ et $5 \cdot 10^{-3}$ |

I11-2/ Aquifère profond :

Globalement on note deux nappes d'importance très inégale: nappe des cipolins et nappe des graviers.

III-2.1/ nappe des cipolins :

Elle est contenue dans des cipolins fissurés localisée au Nord ouest dans les massifs de Bouhamra .et du Belleilita profonde.de 12 à 80 m, les débits d'exploitation des forages sont de l'ordre de 15l/s et les transmissivités varient entre 5.10^{-5} et 10^{-3} m²/s (Khérici,1993).

III-2.2/ La nappe profonde des graviers :

Elle se situe au dessous de l'aquifère superficiel s'étendant sur toute la superficie de la plaine. Elle est contenue dans des graviers sables et galets plio-quaternaires et encaissée dans le bassin d'effondrement, son toit est perméable, semi perméable à imperméable formé de sables argileux, d'argiles sableuses ou d'argiles. A travers ce toit intervient localement le phénomène de drainance. Dans la zone centrale l'épaisseur de l'horizon aquifère est variable selon les zones. Elle varie de 2 à 70m d'Ouest en Est et du Sud vers le Nord. Ainsi alors que

les valeurs de transmissivités sont parfois assez élevées celles du coefficient d'emmagasinement (S) sont parfois très faible de l'ordre de 10^{-4} dans les zones où la nappe est captive et atteignent 10^{-2} dans les zones où elle est libre. Cette variation des coefficients S s'explique par le fait que dans la nappe libre le volume d'eau libre est du au drainage par gravité. Par contre quand elle est captive (**Fig.6**), il ne s'agit plus de vidange partielle des vides, mais d'un double mécanisme lié à la faible compressibilité de l'eau et du matériau aquifère, donc la nappe reste toujours saturée tant qu'elle est captive (**Khérici,1993**).

III-2.3/La nappe captive d'El-Tarf :

Cette nappe a été mis en évidence par l'établissement des coupes hydrogéologiques dans les différentes directions en se basant sur les données fournies par les fiches de forages (fiches des forages effectuées entre 1988 et 1990 par la DHW El Tarf); ce qui a permet la détermination d'une nappe captive, de plus en plus étendue d'Est à l'Ouest en direction de l'écoulement des eaux d'oued Kébir Est, avec un substratum marneux, et un toit argileux d'épaisseur importante de 15 à 20 m en moyenne(**Fig8**), cette nappe s'incline progressivement vers l'Est avec une pente qui devient plus accentuée vers la nappe dunaire de Bouteldja vers le Nord-est(**Hamzaoui,2011**).

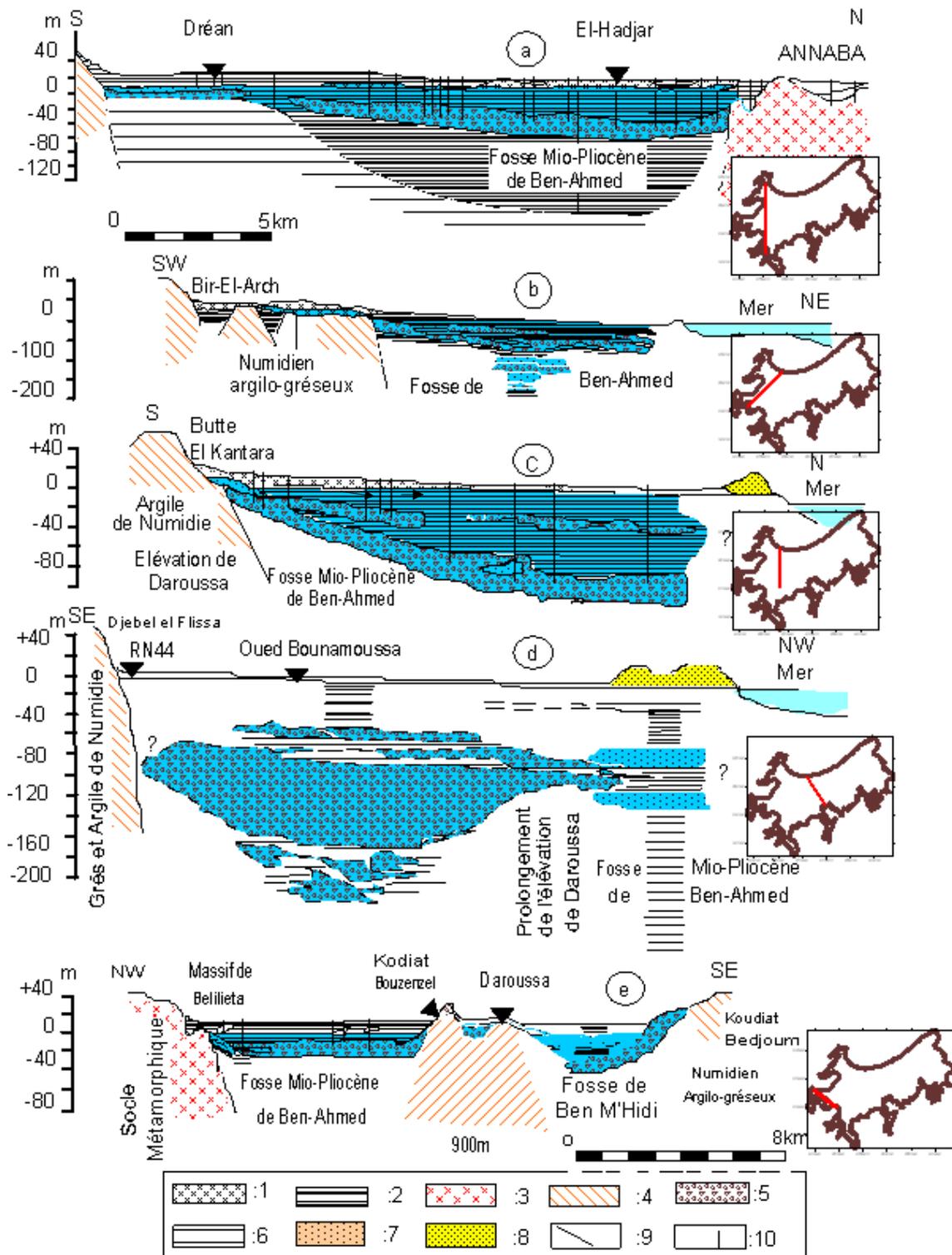


Fig.6: Coupes Hydrogéologiques à travers la plaine d'Annaba (ANRH, 1976, modifiées 2009).

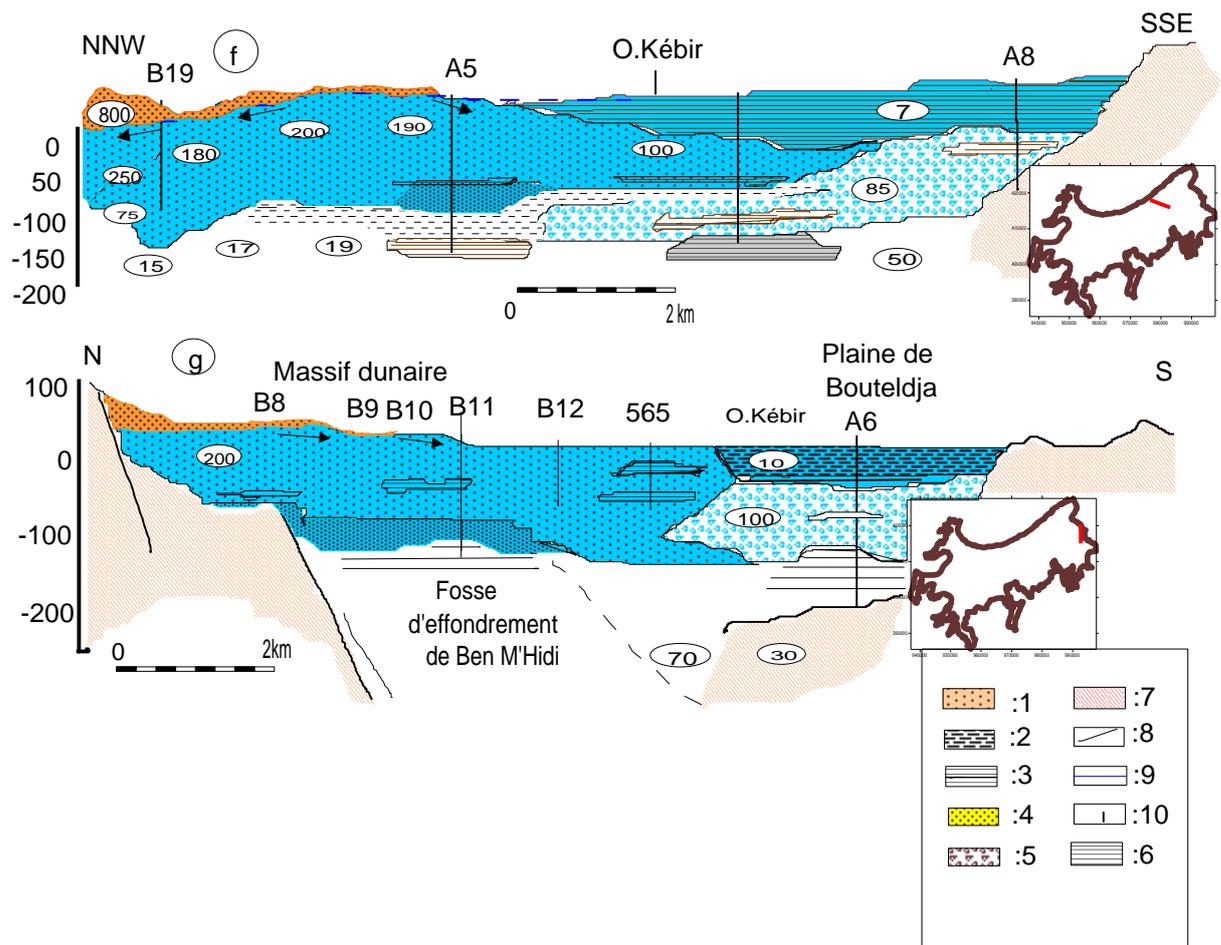


Fig.7 : Coupes Hydrogéologiques à travers la plaine et le massif dunaire de Bouteldja (ANRH, 1976, modifiées 2009). 1 : Sables dunaires ; 2 : Argiles grises (couverture de la nappe des graviers) ; 3 : Sable très argileux ; 4 : Lentille argileuse ; 5 : Gravieres et galets ; 6 : Argiles grises (substratum de la nappe des graviers) ; 7 : Numidien argilo-gréseux ; 8 : Faille et faille présumée ; 9 : Niveau piézométrique ; 10 : Forage ; 11 : Sondage électrique ; 12 : Résistivité (Ohm.m).

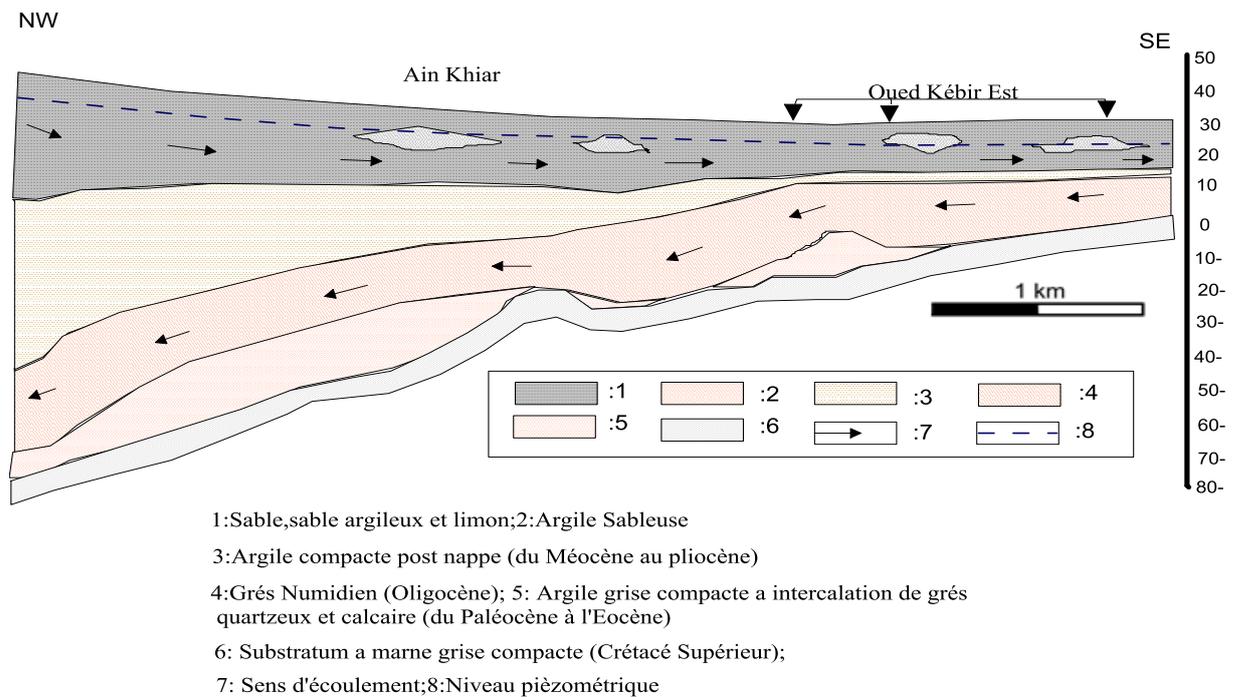


Fig.8 :Coupe schématique Nord-ouest/Sud-est du système aquifère de la plaine d'El Tarf(tirée des résultats des études hydrogéologiques de la DHW d'El Tarf 1988/2008) modifiée 2013

III-3-La carte piézométrique

La piézométrie joue un rôle déterminant quant à la connaissance des écoulements souterrains,. Elle permet de déterminer la profondeur de la nappe, le sens et la vitesse d'écoulement, le gradient hydraulique, les conditions aux limites d'une nappe. Ainsi que les zones d'alimentation et d'accumulation des eaux souterraines.

III-3-1-Etablissement des cartes piézométriques :

III-3-1-1-La nappe profonde d'Annaba :

Le système aquifère composé de la nappe des graviers et de la nappe superficielle; est marqué par un écoulement orienté Sud - Nord avec une dépression piézométrique autour du champ de captage des Salines (**Fig. 9**). L'alimentation de la nappe s'effectue principalement par l'infiltration des eaux de pluie. Cependant, la forte sollicitation de cet ensemble aquifère a entraîné une baisse très sensible des niveaux et l'apparition de zones de dépression. De petits apports d'eau souterraine peuvent avoir lieu à partir des matériaux limitant la plaine ; cependant l'écoulement superficiel du réseau hydrographique du bassin versant est l'apport le plus important après l'apport météorique.(**Hani,2003**).

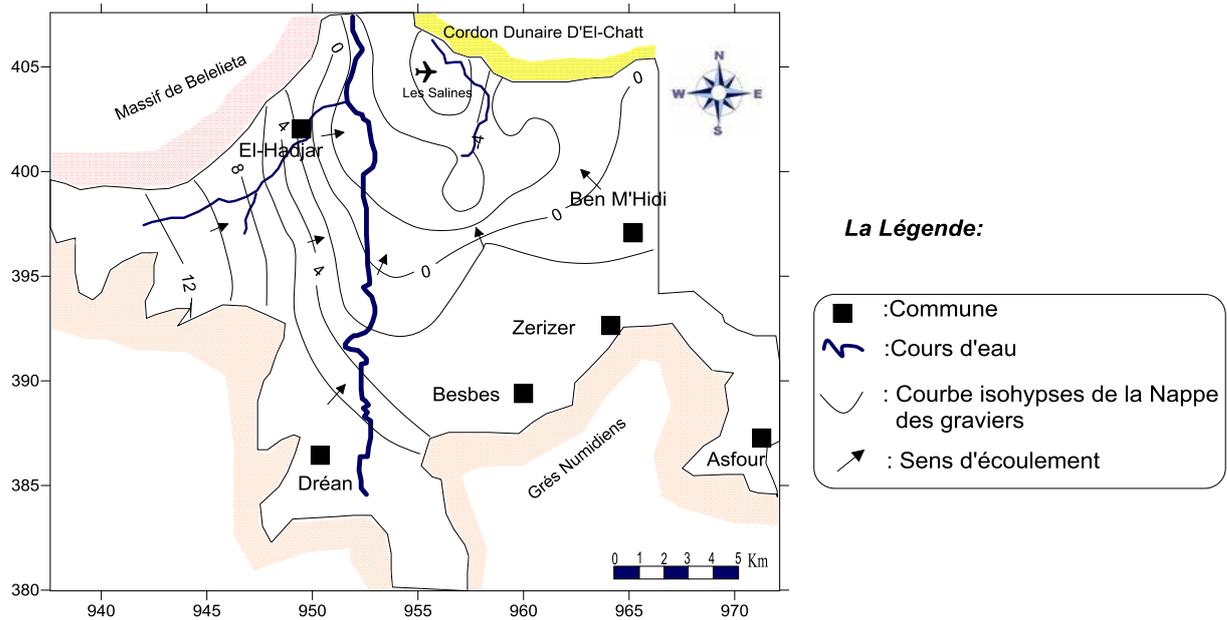


Fig.9 - Carte des isohypses de l'aquifère de la nappe des graviers (octobre 1996 ,in Hani 2003).

III-3-1-2-La Nappe Superficielle d'El-Hadjar :

La nappe superficielle d'Annaba : Les cartes piézométriques sont les documents de base de l'analyse et de la schématisation des fonctions conductrices du réservoir et du comportement hydrodynamique de l'aquifère ainsi que la connaissance des conditions aux limites.

Dix campagnes piézométriques ont été réalisées dans la région. On s'intéressera à celles qui se rapportent au mois d'août 2005 (période des basses eaux) et au mois de mai 2006 (période des hautes eaux). L'examen des deux cartes piézométriques révèle les mêmes constatations donc les mêmes caractéristiques, ceci nous amène à se contenter de l'interprétation d'une seule carte (mai 2006) (**Fig.10**).

Les courbes piézométriques sont fermées et serrées dans la partie amont de l'oued Meboudja, traduisant une zone de protubérance due à un apport latéral à partir du socle métamorphique. Le gradient hydraulique y est de l'ordre de $5 \cdot 10^{-2}$, il marque un écoulement rapide dû à la pente. Vers la partie aval de l'oued ainsi que vers le centre de la plaine, les courbes deviennent ouvertes et espacées. Le gradient hydraulique y est de $8 \cdot 10^{-4}$. (**Hamzaoui, 2007**).

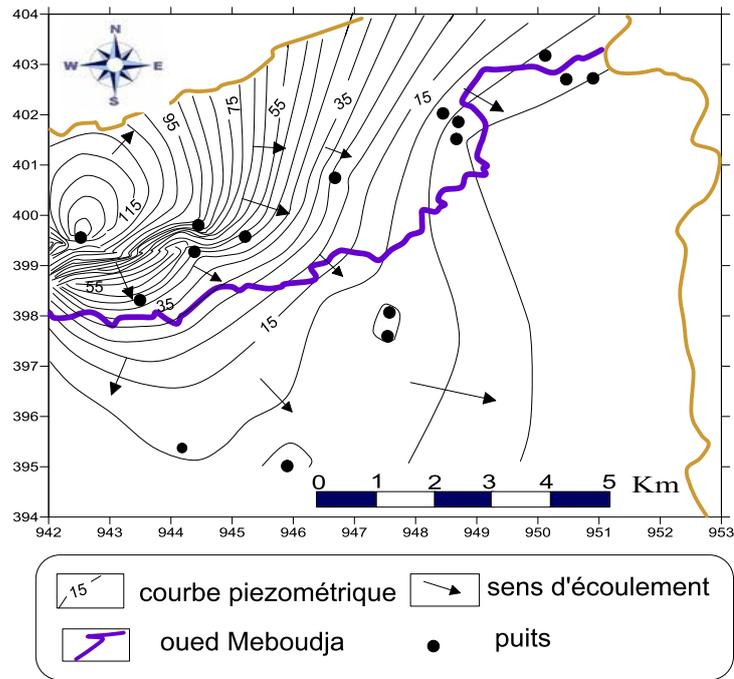


Fig.10: Carte piézométrique de la nappe superficielle (Mars,2006 ,in Hamzaoui2007)

III-3-1-3-Le massif dunaire de bouteldja :

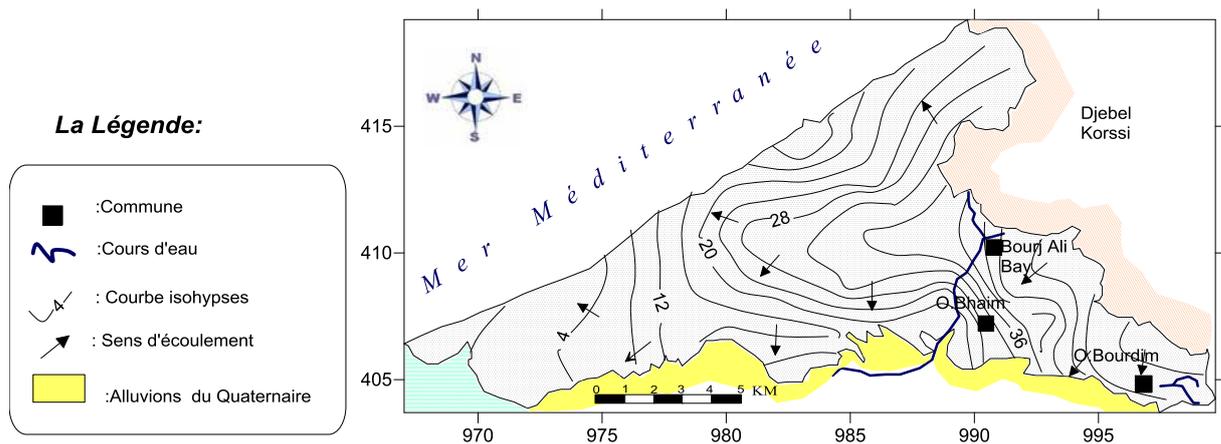


Fig.11 : Carte piézométrique du massif dunaire de Bouteldja (année 1982, Kherici, 1985).

Les points d'eaux que nous disposons pour établir la carte piézométrique (année 2006) sont concentrés dans des agglomérations rurales, ce qui ne permet pas d'avoir une idée claire sur l'écoulement de l'eau souterraine et donc ne permet pas de faire des extrapolations fiables.

C'est pour cette cause nous nous sommes basés sur des données de forage faites en 1982 (**Kherici, 1985**) pour établir la carte piézométrique compréhensible.

L'allure des courbes piézométriques (**Fig.11**) est caractérisée par deux axes de drainage où l'écoulement suit la topographie du terrain.

La carte piézométrique montre que l'écoulement souterrain prend deux sens, un écoulement qui se dirige au Nord vers la mer et un second écoulement qui se dirige au Sud vers la nappe captive des graviers de la plaine d'El Kébir Est et les marécages de Mekada. Quand les courbes piézométriques sont plus serrées, le gradient hydraulique est plus fort. Dans la partie Sud, Sud – Est et précisément dans la région d'oued El B'haim et Bou Glès les courbes sont plus serrées et qui traduit un très fort gradient.

Ce resserrement est dû essentiellement à la réduction de la surface d'écoulement. Par contre, dans la partie Nord – Ouest du massif dunaire de Bouteldja, les courbes iso pièzes sont plus espacées et qui traduisent un faible gradient(**Saadali ,2007**).

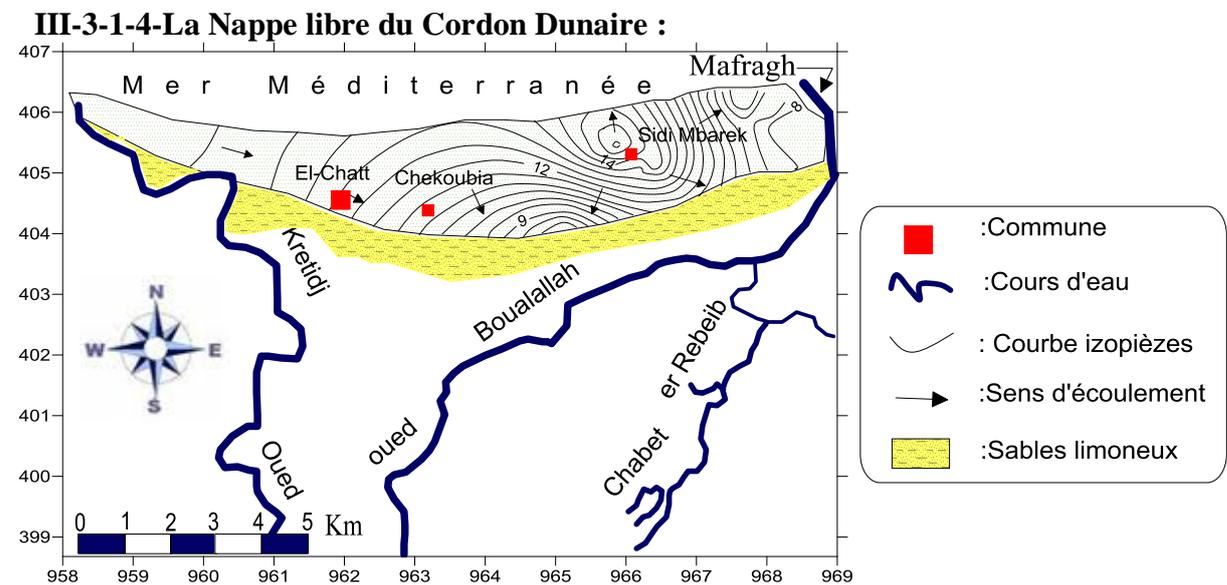


Fig.12:Carte piézométrique de la Nappe du Cordon Dunaire d'El-Chatt(Avril2003,Boumaiza)

La Carte piézométrique obtenue (hautes eaux Avril 2003) nous a permis de distinguer les zones suivantes :

La partie Nord-Est :

Au niveau de cette zone les courbes isopièzes sont serrées indiquant un écoulement rapide où le gradient hydraulique est de l'ordre de 3.10^{-3} .

Les lignes de courant sont orientées vers l'oued c'est à dire l'écoulement se dirige en direction d'oued Mafragh(Fig.12).

La zone Centrale :

Dans cette zone, on remarque que les courbes sont concaves indiquant une surexploitation, ces dernières sont relativement espacées, identifiant un écoulement faible et un gradient hydraulique plus au moins fort.

III-3-1-4-La Nappe d'El-Tarf :

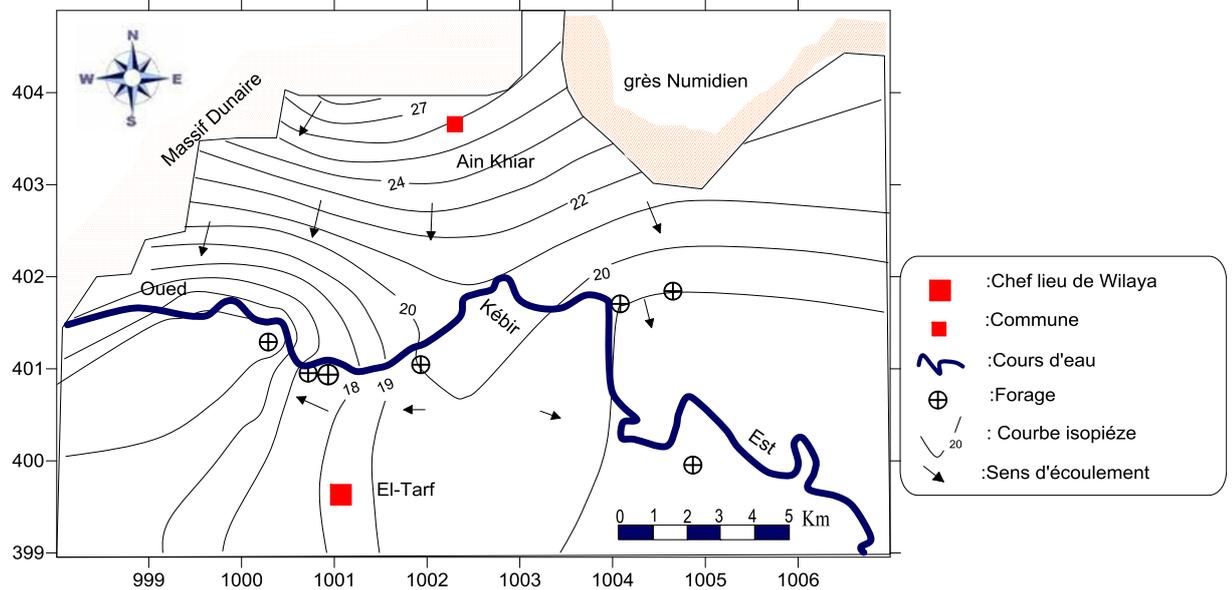


Fig.13 : Carte piézométrique de la nappe alluviale d'El Tarf (Hautes eaux - Mai 2008) DHW El Tarf)

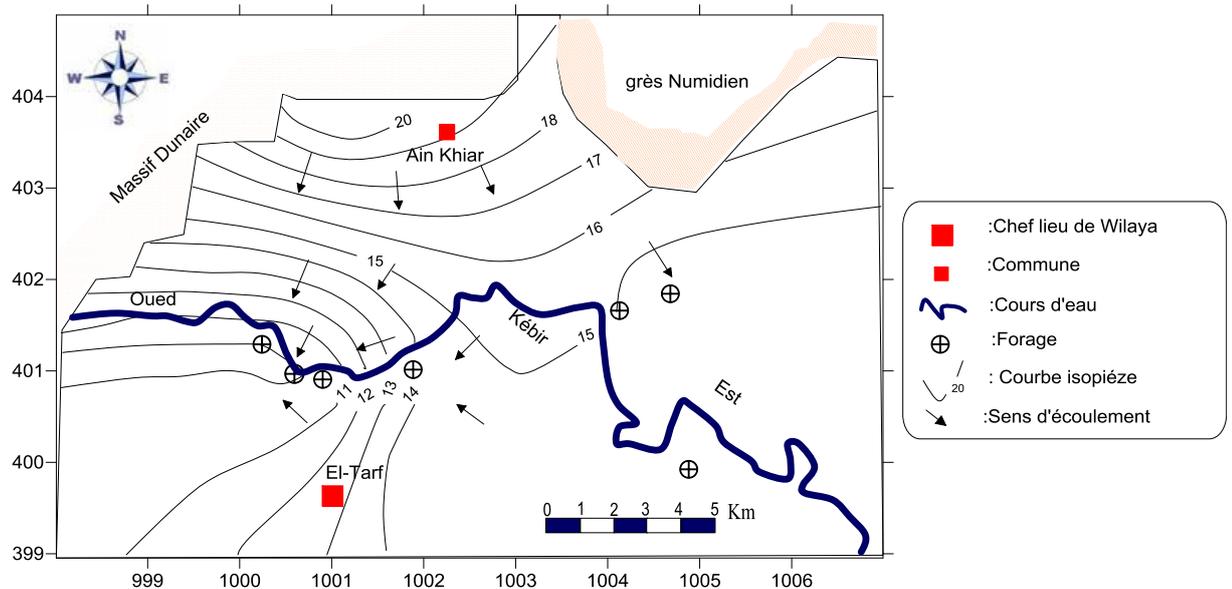


Fig. 14: Carte piézométrique de la nappe alluviale d'El Tarf (Basses eaux - Octobre 2008) DHW El Tarf)

L'examen des deux cartes piézométriques (**Fig 13,14**) (haute eaux-Mai 2008/basses eaux- Octobre 2008) effectuées à partir des études de la direction hydrauliques de la wilaya d'El Tarf sur la piézométrie de la nappe superficielle (alluviale d'El Tarf) montre que l'écoulement des eaux souterraines se fait généralement vers le Oued pendant les deux période ce qui signifie que la nappe draine l'oued (la répartition des forage au long du oued Kébir) .

III-4-Conclusion

Les plaines de Annaba-El-Tarf sont constituées par des sédiments mio-plio- quaternaires qui comportent plusieurs horizons aquifères. Ces formations sont très variées tant par la dimension des grains que par la géométrie des couches conférant aux matériaux des propriétés hydrauliques différentes dans l'espace. Dans ce remplissage hétérogène on distingue 3 principales nappes; la nappe superficielle contenue dans les argiles sableuses, la nappe des graviers et la nappe des sables du massif dunaire de Bouteldja et le cordon dunaire ces deux dernières constitue la bordure Est du système.

Ces quatre nappes sont largement exploitées par de nombreux ouvrages de captage destinés à l'alimentation des populations et pour répondre aux besoins de l'industrie et de l'agriculture.



Chapitre IV:



Caractéristiques Hydroclimatologiques

IV.1. Introduction :

Pour mieux comprendre l'état des réserves des eaux souterraines et de surface, l'étude des conditions climatiques et des caractéristiques hydrodynamiques demeure indispensable.

IV.2. Climatologie de la zone d'étude :

Comptant parmi les régions les plus arrosées de l'Algérie, la zone d'étude est soumise à un climat méditerranéen caractérisé par un hiver doux et humide et un été chaud et sec, dont le régime dépend principalement de la précipitation et de la température. Parmi les stations pluviométriques implantées dans la région d'étude, on s'est limité aux données pluviométriques des cinq stations : Ain Assel, les Salines, Pont Bouchet, Remal El-Souk, Pont Bouchet et Bouteldja, du fait de leur répartition dans la zone d'étude. Les données s'étalent sur la période allant de 1990 jusqu'à 2009 (**Tabl.4**).

Tabl. 4 : Situations géographiques des stations étudiées

| LES STATION D'OBSERVATION | X (KM) | Y (KM) | Z (M) | PERIODE D'OBSERVATION |
|--------------------------------------|---------------|---------------|--------------|----------------------------------|
| Les Salines | 955.80 | 403.8 | 3 | 1990-2009 |
| Ain EL Assel | 1005.65 | 400.05 | 35 | 1990-2009 |
| Pont Bouchet | 950.25 | 402.80 | 6 | 1990-2009 |
| Remal EL-Souk | 1020.70 | 402.90 | 150 | 1990-2009 |
| Bouteldja | 991.10 | 401.55 | 20 | 1990-2009 |

IV.2.1. Les facteurs climatiques :

IV.2.1.1. Les précipitations :

Constituants un facteur essentiel qui caractérise le climat d'une région, elles jouent un rôle prépondérant dans le comportement hydraulique des cours d'eau et dans l'alimentation éventuelle des nappes souterraines.

* Les précipitations mensuelles :

Sur une période d'observation qui s'étale sur plus de 19 ans .

Les précipitations moyennes mensuelles dans les cinq stations sont représentées sur les histogrammes (**Fig. 15**). Ces histogrammes, donnent un aperçu sur les variations mensuelles et pluriannuelles des précipitations dans la région d'étude. Décembre est le mois le plus pluvieux au niveau des cinq stations où on a enregistré une moyenne de l'ordre de 147.65 mm à la station de Ain Assel, 122.26 mm ,122.82mm, 112.77mm respectivement

pour les stations des Salines, Bouteldja , Rmal Souk et 93.02 mm pour la celle de Pont Bouchet. Tandis que le mois de juillet est le mois le moins pluvieux auquel on note une moyenne pour les cinq stations variant entre 1.47 et 3.21mm.

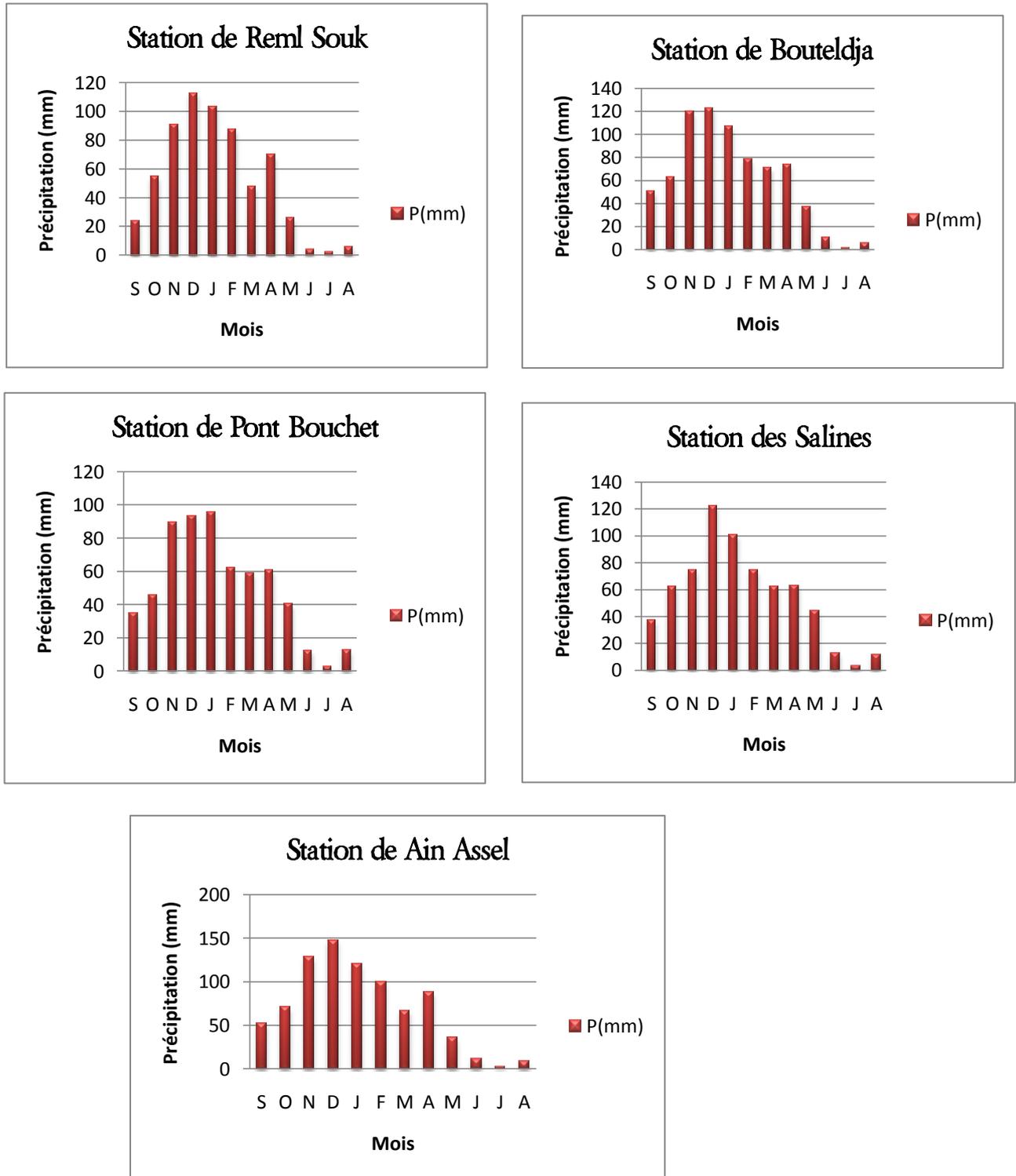


Fig.15 : Histogramme des précipitations moyennes mensuelles en mm (1990-2009)

IV.2.1.2 La Température :

Les températures constituent l'autre élément majeur conditionnant le climat d'une région.

Elles permettent d'étudier l'évapotranspiration et le déficit d'écoulement et interviennent dans le développement du rythme biologique des végétaux et facilitent l'établissement du bilan hydrique.

Les seules données fiables des températures moyennes mensuelles sont enregistrées dans la station des Salines (**Tabl.5**), elles constituent une référence crédible utilisable pour les autres stations.

Tabl.5 : Température moyenne mensuelle (°C) à la station des salines (1990-2009)

| Mois | S | O | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Station | | | | | | | | | | | | |
| Les Salines | 22.71 | 19.86 | 15.33 | 12.97 | 11.10 | 11.40 | 13.13 | 15.21 | 18.76 | 22.61 | 25.08 | 26.05 |

A partir du tableau 5 on constate une variation des températures moyennes mensuelles au cours de l'année, cette variation est bien représentée dans les courbes pluviothermiques (**Fig16.17.18.19.20**) des différentes stations. On remarque que le mois le plus froid est janvier avec une température moyenne mensuelle de l'ordre de 11.10°C alors que le mois le plus chaud et août avec une température moyenne mensuelle avoisinant 26.05°C.

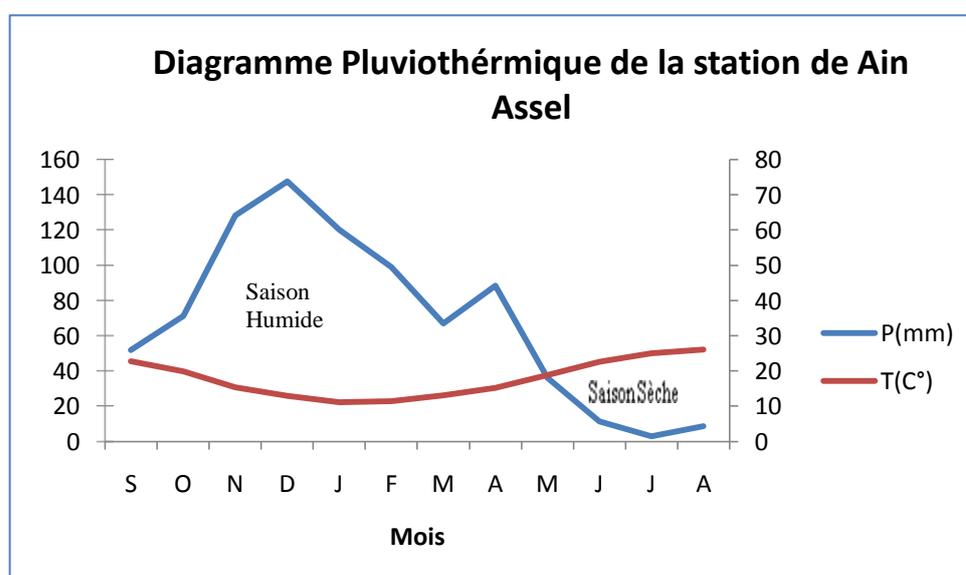


Fig.16: Diagrammes pluviothermiques de station de Ain Assel(1990-2009)

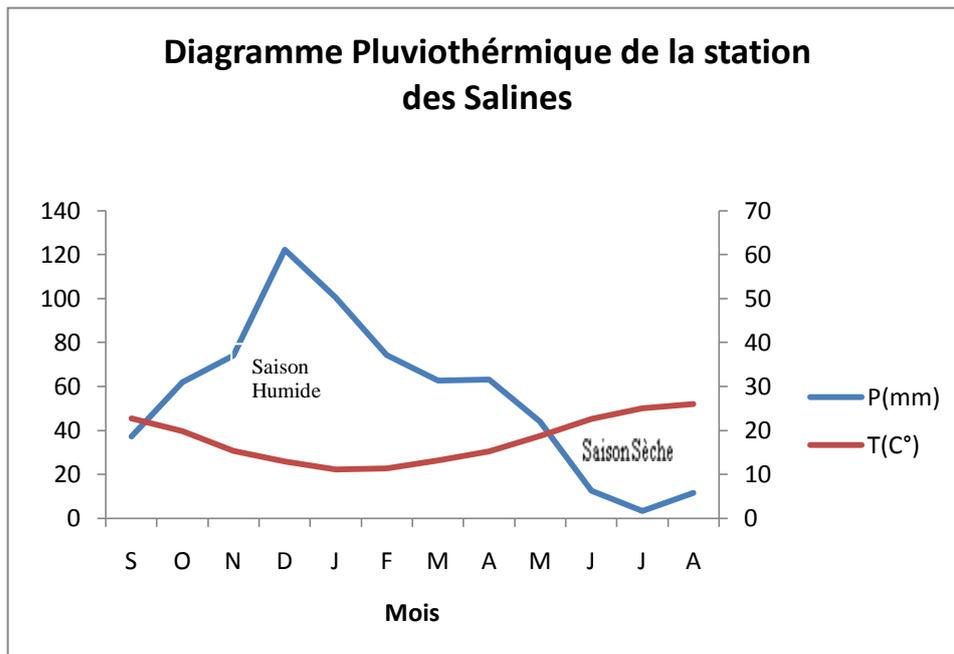


Fig.17: Diagrammes pluviothermiques de station des Salines (1990-2009)

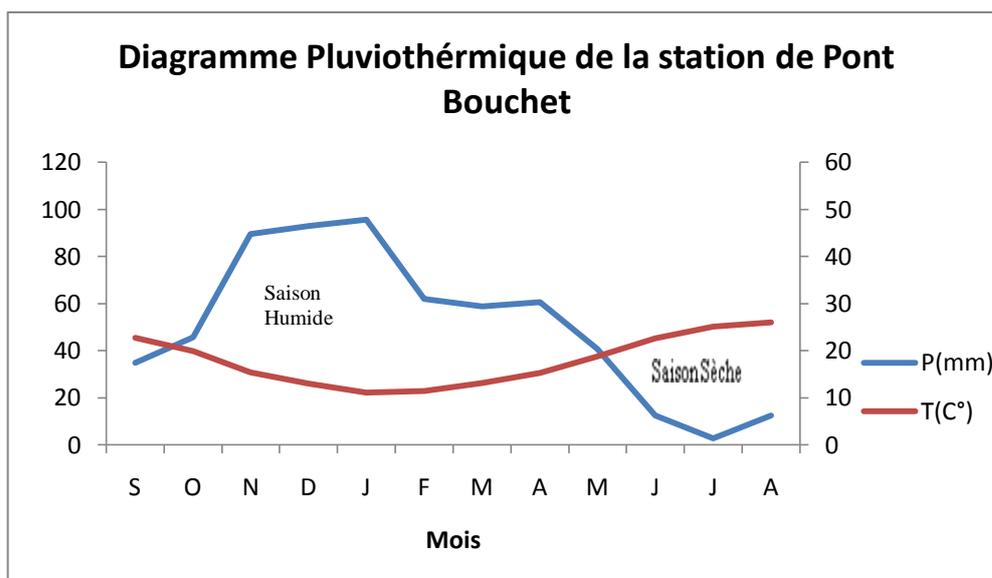


Fig.18: Diagrammes pluviothermiques de station de Pont Bouchet (1990-2009)

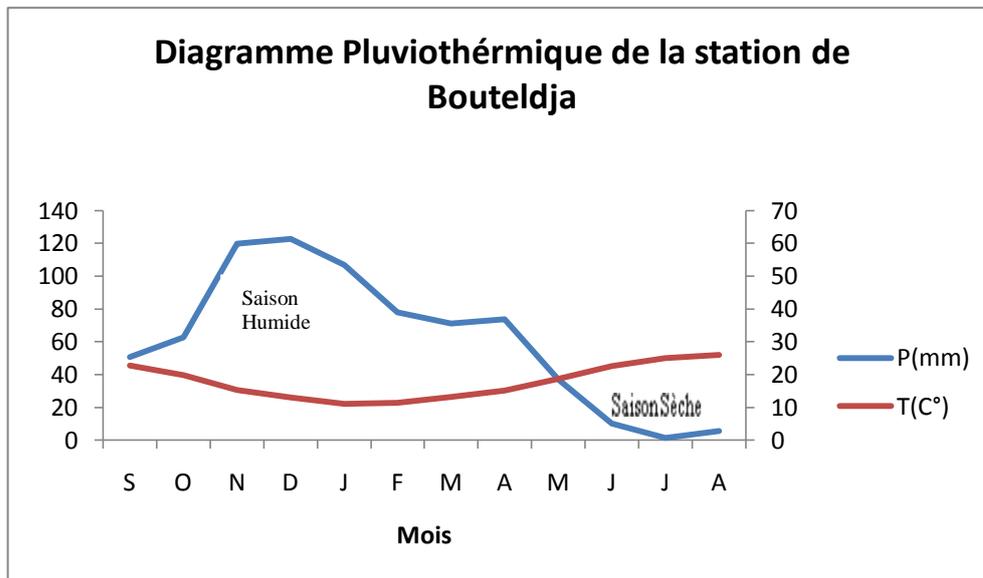


Fig.19: Diagrammes pluviothermiques de station de Bouteldja (1990-2009)

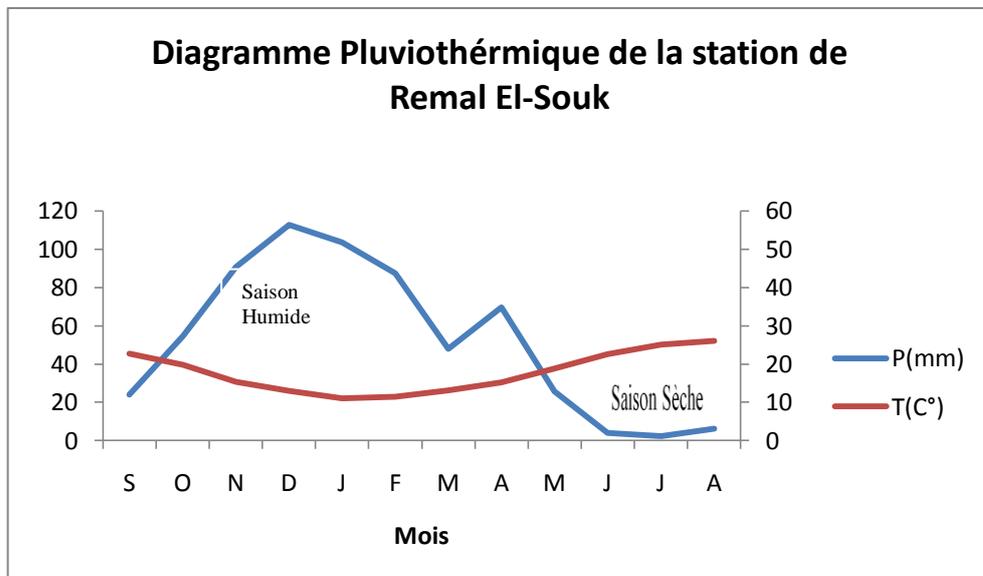


Fig.20: Diagrammes pluviothermiques de station de Remal El-Souk (1990-2009)

A partir de diagrammes pluviométriques des différentes stations, on constate que l'année hydrologique de la zone d'étude est caractérisée par deux saisons bien distinctes :

L'une humide, s'étale du mois de septembre jusqu'au mois de mai, et l'autre saison sèche s'étale du mois de juin au mois d'août.

IV.2.1.3. L'humidité :

L'humidité relative de l'air correspond au rapport de la tension de vapeur réelle observée à la

tension de vapeur saturante à la même température. Les moyennes mensuelles de l'humidité relative varient de 75.07% en hiver (au mois de janvier) à 78.21% en été (au mois de juillet), (Tab.6).

Tabl.6 : Moyenne mensuelle de l'humidité relative à la station des Salines en %(1974-2009)

| Mois | S | O | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A |
|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Moyenne | 78.80 | 78.57 | 76.76 | 76.68 | 75.07 | 72.11 | 69.66 | 71.21 | 72.74 | 74.91 | 78.21 | 77.30 |

IV.2.1.4. Le vent :

Les vents ont un effet important sur les phénomènes d'évaporation de précipitation et à un degré moindre sur les températures. La région d'étude est prédominée par des vents de direction NW-SE et leur vitesse moyenne est de l'ordre de 3. m/s (Tab.7).

Tabl.7 : Moyenne mensuelle de la vitesse des vents en m/s à la station des Salines (1974-2009)

| Mois | S | O | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A |
|---------|-----|------|------|------|------|-----|------|------|------|------|-----|-----|
| Moyenne | 3.6 | 2.52 | 2.50 | 3.09 | 3.17 | 3.5 | 3.49 | 3.49 | 3.16 | 2.92 | 3.3 | 3.3 |

IV.3. Le bilan hydrique :

IV.3.1. Estimation de l'évapotranspiration potentielle et réelle :

L'évapotranspiration est la quantité d'eau évaporée à partir du sol, des surfaces d'eau libres et celle transpirée par les végétaux.

VI.3.1.1. Formule de Turc :

Cette formule consiste à évaluer directement l'évapotranspiration réelle à partir de la hauteur moyenne de la pluie et de la température moyenne annuelle.

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \frac{P^2}{L^2}}}$$

$$L = 300 + 25T + 0.05T^3 \quad (2)$$

ETR : Evapotranspiration réelle annuelle en mm

P : Précipitation moyenne annuelle en mm

L : pouvoir évaporant, est une limite vers laquelle tend l'ETR lorsque le P devient grand

T : température moyenne annuelle en °C

Tabl.8 : L'évapotranspiration réelle selon la formule de Turc

| Paramètres | P(mm) | ETR(mm) |
|-----------------|--------|---------|
| Stations | | |
| Ain Assel | 816.71 | 658.63 |
| Les Salines | 657.56 | 576.80 |
| Remal Souk | 549,00 | 407,28 |
| Bouteldja | 610,50 | 458,15 |
| Pont Bouchet | 582.29 | 529.35 |

VI.3.1.2. Formule de Coutagne:

$$ETR = P - \lambda P^2$$

Cette formule n'est valable que si la quantité des précipitations répond à la condition suivante : $1/8 \lambda < P < 2 \lambda$

$$\lambda = 1 / (0.8 + 0.14 t)$$

ETR : Evapotranspiration réelle annuelle en mm

P : Précipitation moyenne annuelle en mm.

T : température moyenne annuelle en °C

Tabl.9 : Résultats de l'ETR par la méthode de Coutagne dans les 5 stations (1990/2009)

| Paramètres | P(m) | λ | ETR (mm/an) |
|-----------------|---------|-----------|-------------|
| Stations | | | |
| Ain Assel | 0.81671 | 0.30 | 616.60 |
| Remal Souk | 0.65756 | 0.30 | 527.84 |
| Les Salines | 0.58229 | 0.30 | 480.57 |
| Bouteldja | 0.62847 | 0.30 | 511.39 |
| Pont Bouchet | 0.73993 | 0.30 | 575.68 |

VI.3.1.3. Formule de Thornthwaite (bilan d'eau) :

Cette méthode est basée sur la notion de **RFU** (réserve en eau dans le sol facilement utilisable par les plantes). Dans les conditions de la région on admet une **RFU** égale à 100 mm comme valeur maximale. Outre que les données pluviométriques et la température, cette méthode introduit le coefficient thermique **K** et l'indice de température mensuel **i** pour l'estimation de l' **ETR** selon la relation suivante :

$$i = (t/5)^{1.5}$$

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

Et $a = 1.6/100I + 0.5$

Avec :

t : Température moyenne annuelle ° C

i :Indice thermique mensuel

I : Somme des indices mensuels

ETP : Evapotranspiration potentiel mensuelle en mm

K : terme correctif dépend de la durée d'insolation

Les résultats de calculs effectués selon cette méthode sont reportés dans les tableaux **10,11 12,13 et 14.**

Tabl.10: Bilan de l'eau selon C.W Thornthwaite, station de Ain Assel (1990-2009)

| | S | O | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | Total |
|---------|--------|-------|------------|--------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|------------|------------|
| P(mm) | 51,87 | 71,03 | 128,4 0 | 147,65 | 120,0 7 | 98,9 7 | 66,8 6 | 88,3 8 | 36,0 9 | 11,32 | 02,84 | 08,70 | 832,1 8 |
| T(C°) | 22,71 | 19,86 | 15,33 | 12,97 | 11,1 | 11,4 | 13,1 3 | 15,2 1 | 18,7 6 | 22,61 | 25,08 | 26,05 | - |
| i | 09,7 | 09,94 | 05,4 | 04,2 | 03,31 | 03,4 | 04,3 | 05,3 | 07,3 | 09,62 | 11,32 | 11,9 | 85,6 |
| k | 01,05 | 00,91 | 00,75 | 00,7 | 00,73 | 00,7 8 | 01,0 2 | 01,1 5 | 01,3 2 | 01,33 | 01,33 | 01,24 | - |
| ETP(mm) | 104,16 | 70,25 | 35,67 | 24,36 | 18,98 | 21,3 2 | 36,3 2 | 53,9 1 | 91,6 | 130,8 5 | 158,8 5 | 158,9 9 | 905,2 6 |
| ETR(mm) | 51,87 | 70,25 | 35,67 | 24,36 | 18,98 | 21,3 2 | 36,3 2 | 53,9 1 | 91,6 | 55,81 | 02,84 | 08,7 | 471,6 3 |
| RFU(mm) | 00,00 | 00,78 | 93,51 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 44,4 9 | 00,00 | 00,00 | 00,00 | - |
| EXC(mm) | 00,00 | 00,00 | 00,00 | 116,02 | 101,0 9 | 77,6 5 | 30,5 4 | 34,4 7 | 00,0 0 | 00,00 | 00,00 | 00,00 | - |
| DA(mm) | 52,29 | 00,00 | 00,00 | 00,00 | 00,00 | 00,0 0 | 00,0 0 | 00,0 0 | 00,0 0 | 75,04 | 156,0 1 | 150,2 9 | 433,6 3 |

Tabl.11 : Bilan de l'eau selon C.W Thornthwaite, station des Salines (1990-2009)

| | S | O | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | Total |
|---------|--------|-------|-------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|
| P(mm) | 37,16 | 61,86 | 74,02 | 122,26 | 100,45 | 74,21 | 62,61 | 63,05 | 44,1 | 12,6 | 3,21 | 11,65 | 667,18 |
| T(C°) | 22,71 | 19,86 | 15,33 | 12,97 | 11,1 | 11,4 | 13,13 | 15,21 | 18,76 | 22,61 | 25,08 | 26,05 | |
| i | 9,7 | 9,94 | 5,4 | 4,2 | 3,31 | 3,4 | 4,3 | 5,3 | 7,3 | 9,62 | 11,32 | 11,9 | 85,6 |
| k | 1,05 | 0,91 | 0,75 | 0,7 | 0,73 | 0,78 | 1,02 | 1,15 | 1,32 | 1,33 | 1,33 | 1,24 | |
| ETP(mm) | 104,16 | 70,25 | 35,67 | 24,36 | 18,98 | 21,32 | 36,32 | 53,91 | 91,6 | 130,85 | 158,85 | 158,99 | 905,26 |
| ETR(mm) | 37,16 | 61,86 | 35,67 | 24,36 | 18,98 | 21,32 | 36,32 | 53,91 | 91,6 | 65,1 | 3,21 | 11,65 | 461,14 |
| RFU(mm) | 0,00 | 0,00 | 38,35 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 44,49 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | |
| EXC(mm) | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 35,28 | 81,06 | 52,45 | 25,64 | 8,34 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | |
| DA(mm) | 67 | 8,39 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 65,75 | 155,64 | 147,34 | 444,12 |

Tabl.12 : Bilan de l'eau selon C.W Thornthwaite, station de Pont Bouchet (1990-2009)

| | S | O | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | Total |
|---------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|
| P(mm) | 34,93 | 45,74 | 89,5 | 93,02 | 95,71 | 62,05 | 58,7 | 60,54 | 40,66 | 12,37 | 2,82 | 12,45 | 608,49 |
| T(C°) | 22,71 | 19,86 | 15,33 | 12,97 | 11,1 | 11,4 | 13,13 | 15,21 | 18,76 | 22,61 | 25,08 | 26,05 | 0 |
| i | 9,7 | 7,94 | 5,4 | 4,2 | 3,31 | 3,4 | 4,3 | 5,3 | 7,3 | 9,62 | 11,23 | 11,9 | 85,6 |
| k | 1,05 | 0,91 | 0,75 | 0,7 | 0,73 | 0,78 | 1,02 | 1,15 | 1,32 | 1,33 | 1,33 | 1,24 | |
| ETP(mm) | 104,16 | 70,25 | 35,67 | 24,36 | 18,98 | 21,32 | 36,32 | 53,91 | 91,6 | 130,85 | 158,85 | 158,99 | 905,26 |
| ETR(mm) | 34,93 | 45,74 | 35,67 | 24,36 | 18,98 | 21,32 | 36,32 | 53,91 | 91,6 | 63,31 | 2,82 | 12,45 | 441,41 |
| RFU(mm) | 0,00 | 0,00 | 53,83 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 50,94 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | |
| EXC(mm) | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 68,66 | 76,73 | 40,73 | 22,38 | 6,63 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | |
| DA(mm) | 69,23 | 24,51 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 67,54 | 156,03 | 146,54 | 463,85 |

Tabl.13 : Bilan de l'eau selon C.W Thornthwaite, station de Bouteldja(1990-2009)

| | S | O | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | Total |
|---------|--------|-------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|
| P(mm) | 50,65 | 62,75 | 119,82 | 122,82 | 106,98 | 78,1 | 71,15 | 73,79 | 37,11 | 10,09 | 1,47 | 5,52 | 739,93 |
| T(C°) | 22,71 | 19,86 | 15,33 | 12,97 | 11,1 | 11,4 | 13,13 | 15,21 | 18,76 | 22,61 | 25,08 | 26,05 | |
| i | 9,7 | 7,94 | 5,4 | 4,2 | 3,31 | 3,4 | 4,3 | 5,3 | 7,3 | 9,62 | 11,23 | 11,9 | 85,6 |
| k | 1,05 | 0,91 | 0,75 | 0,7 | 0,73 | 0,78 | 1,02 | 1,15 | 1,32 | 1,33 | 1,33 | 1,24 | |
| ETP(mm) | 104,16 | 70,25 | 35,67 | 24,36 | 18,98 | 21,32 | 36,32 | 53,91 | 91,6 | 130,85 | 158,85 | 158,99 | 905,26 |
| ETR(mm) | 50,65 | 62,75 | 35,67 | 24,36 | 18,98 | 21,32 | 36,32 | 53,91 | 91,6 | 55,6 | 1,47 | 5,52 | 458,15 |
| RFU(mm) | 0,00 | 0,00 | 84,15 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 45,51 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | |
| EXC(mm) | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 82,61 | 88 | 56,78 | 34,83 | 19,88 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | |
| DA(mm) | 53,51 | 7,5 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 75,25 | 157,38 | 153,47 | 447,11 |

Tabl. 14 : Bilan de l'eau selon C.W Thornthwaite, station de Remal El-Souk(1990-2009)

| | S | O | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | Total |
|---------|--------|-------|-------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|
| P(mm) | 24,01 | 54,66 | 90,63 | 112,77 | 103,48 | 87,47 | 47,84 | 69,56 | 25,79 | 3,88 | 2,28 | 6,1 | 628,47 |
| T(C°) | 22,71 | 19,86 | 15,33 | 24,36 | 11,1 | 11,4 | 13,13 | 15,21 | 18,76 | 22,61 | 25,08 | 26,05 | |
| i | 9,7 | 7,94 | 5,4 | 4,2 | 3,31 | 3,4 | 4,3 | 5,3 | 7,3 | 9,62 | 11,23 | 11,9 | 85,6 |
| k | 1,05 | 0,91 | 0,75 | 0,7 | 0,73 | 0,78 | 1,02 | 1,15 | 1,32 | 1,33 | 1,33 | 1,24 | |
| ETP(mm) | 104,16 | 70,25 | 35,67 | 24,36 | 18,98 | 21,32 | 36,32 | 53,91 | 91,6 | 130,85 | 158,85 | 158,99 | 905,26 |
| ETR(mm) | 24,01 | 54,66 | 35,67 | 24,36 | 18,98 | 21,32 | 36,32 | 53,91 | 91,6 | 38,07 | 2,28 | 6,1 | 407,28 |
| RFU(mm) | 0,00 | 0,00 | 54,96 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 34,19 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | |
| EXC(mm) | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 43,37 | 84,5 | 66,15 | 11,52 | 15,65 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | |
| DA(mm) | 80,15 | 15,59 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 92,78 | 156,57 | 152,89 | 497,98 |

Ainsi, on remarque que la réserve en eau du sol RFU dans les trois stations, commence à se reconstituer à partir du mois de novembre, pour atteindre son maximum 100 mm à partir de décembre jusqu'à avril, période pendant laquelle apparaît un excédent qui va se traduire en écoulement ou une infiltration qui alimente les nappes. A partir du mois de mai (**Fig. 21**) la réserve commence à s'épuiser jusqu'au mois de juin où elle devient nulle, période qui traduit un déficit agricole, et la nécessité d'irriguer...

A partir du tableau comparatif de l'évapotranspiration réelle calculée par les différentes Méthodes (Turc, Coutagne, Thornthwaite) (**Tabl.15**), on remarque que les valeurs sont assez proches avec une moyenne de 581.15 mm/an pour la station de Ain Assel, 527.65 mm/an pour les Salines et 484.73 mm/an pour celle de Pont Bouchet et 526.68 mm , 510.65 mm respectivement pour la station de Bouteldja et Remal Souk.

Tabl.15 : Valeurs de l'ETR d'après les trois méthodes

| Méthodes | L'évapotranspiration réelle (mm/an) | | |
|---------------|-------------------------------------|----------|--------------|
| | Turc | Coutagne | Thornthwaite |
| Stations | | | |
| Ain Assel | 658.63 | 616.60 | 468.22 |
| Les Salines | 576.80 | 527.84 | 478.32 |
| Pont Bouchet | 529.35 | 480.57 | 444.29 |
| Bouteldja | 610.50 | 511.39 | 458.15 |
| Remal El-Souk | 549.00 | 575.68 | 407.28 |

IV.3.2 Le ruissellement :

Le ruissellement de surface est la quantité d'eau au cours d'une précipitation, échappée à l'infiltration et à l'évaporation.

Le coefficient de ruissellement R a été estimé avec la formule de Tixeront-Berkaloff

$$R = P^3/3(ETP)^2 \quad \text{quand : } P < 600 \text{ mm.}$$

$$R = P^3/3 \quad \text{quand : } P > 600 \text{ mm.}$$

Avec :

R : ruissellement en mm.

P : précipitation moyenne mensuelle en mm.

ETP : évapotranspiration potentielle.

Les résultats de ruissellement calculé à partir de cette formule sont représentés dans le tableau suivant :

Tabl.16: Détermination du ruissellement dans les stations étudiées

| Stations | Ain Assel | Les Salines | Pont Bouchet | Bouteldja | Remal El-Souk |
|------------|-----------|-------------|--------------|-----------|---------------|
| Paramètres | | | | | |
| P (mm) | 832.18 | 667.18 | 608.49 | 739.93 | 628.47 |
| R (mm) | 192.10 | 98.99 | 75.09 | 135.03 | 82.74 |

IV.3.3 L'infiltration :

L'infiltration est un paramètre très important dans le bilan hydrique, est définie comme étant le mouvement de l'eau dans un sol en passant par la surface, elle dépend de plusieurs facteurs, les plus importants sont :

- ❖ La nature du sol.
- ❖ La perméabilité et la porosité du terrain
- ❖ La couverture végétale.
- ❖ L'intensité de la pluie
- ❖ Topographie du terrain

Elle peut être calculée par la formule du bilan globale :

$$P = R + I + ETR$$

Donc : $I = P - R - ETR$.

Avec :

R : ruissellement en mm.

P : Précipitations moyennes annuelles en mm.

I : Infiltration en mm.

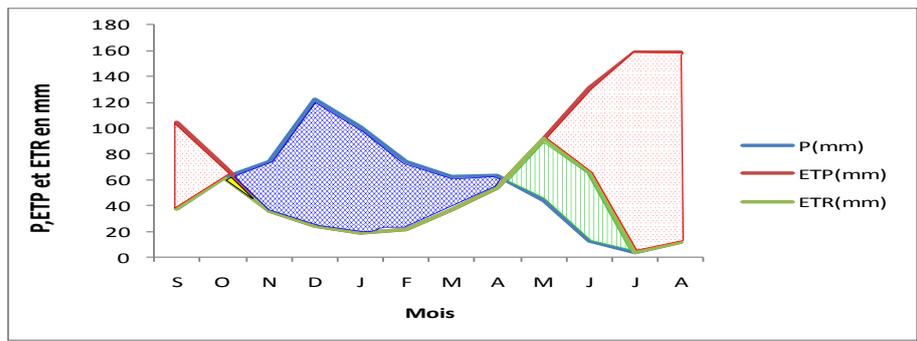
Si $I > 0$: Les entrées sont supérieures aux sorties.

Si $I < 0$: Les entrées sont inférieures aux sorties.

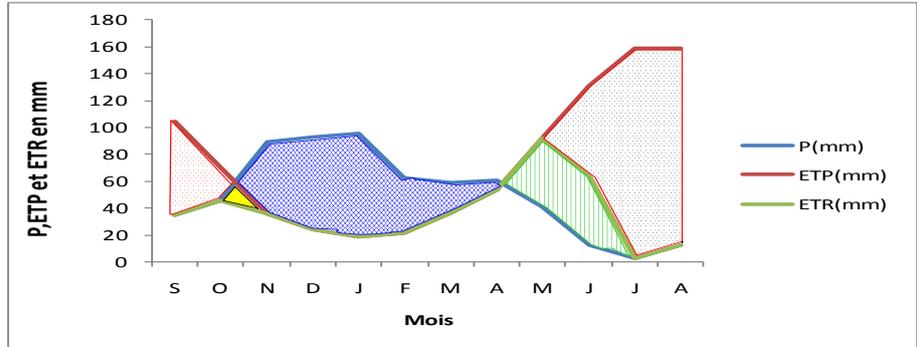
Les résultats de l'infiltration sont notés dans le tableau suivant :

Tabl.17: Estimation de l'infiltration en (mm) par la méthode de Thornthwaite

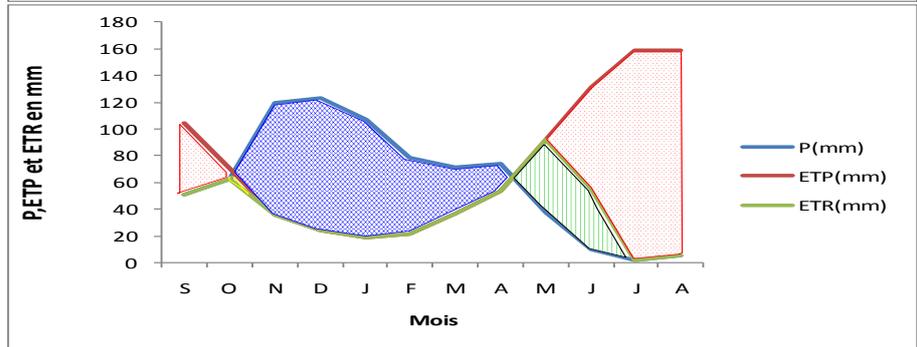
| Paramètres | P(mm) | ETR (mm) | R(mm) | I(mm) |
|--------------|--------|----------|--------|--------|
| Stations | | | | |
| Ain Assel | 832.18 | 471.63 | 192.10 | 168.45 |
| Les Salines | 667.18 | 461.14 | 98.99 | 107.05 |
| Pont Bouchet | 608.49 | 441.41 | 75.09 | 91.95 |
| Bouteldja | 739.93 | 458.15 | 135.03 | 146.75 |
| Rmal El-Souk | 628.47 | 407.28 | 82.74 | 138.45 |



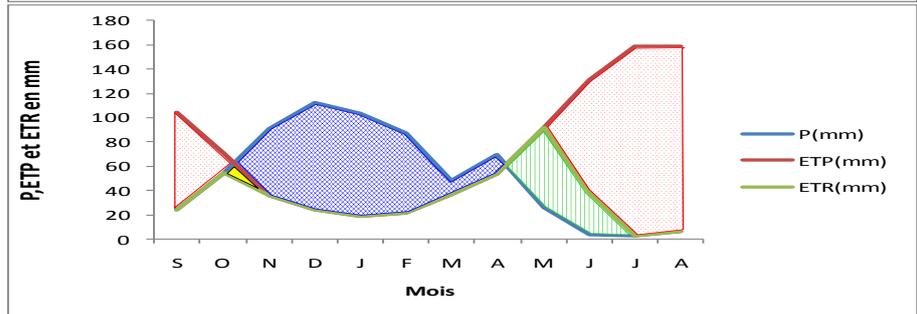
Station de Ain Assel



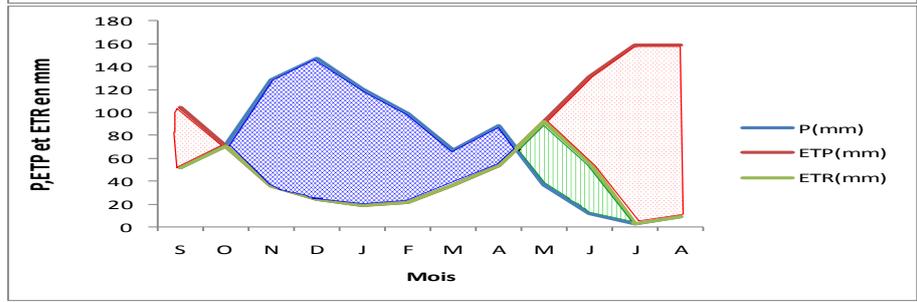
Station des Salines



*Station de Pont
Bouchet*



Station de Bouteldja



*Station de Remal
Souk*

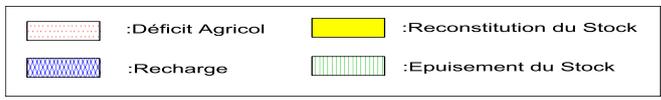


Fig.21 : Représentation graphique du bilan hydrique de Thornthwaite dans les Stations (Ain Assel, Les Salines, Pont Bouchet ,Bouteldja et Remal Souk (1990-2009)

IV.4-Conclusion :

La région d'étude compte parmi les régions les plus arrosées de l'Algérie. Elle est soumise à un climat méditerranéen, doux et humide en hiver et chaud et sec en été. La moyenne annuelle des précipitations varie entre 608.49mm et 832.18 mm sous une température moyenne annuelle de l'ordre de 17.15°C.

La réserve en eau RFU, commence à se reconstituer à partir du mois de novembre, pour atteindre son maximum de 100 mm à partir du mois de décembre jusqu'au mois d'avril, période pendant laquelle apparaît un excédent de l'ordre de 359.77 mm, 202.77 mm et 215.13 mm ,282.1mm,221.19mm respectivement pour les stations de Ain Assel, les Salines, Pont Bouchet, Bouteldja et Remal El Souk. A partir du mois de mai, la RFU commence à s'épuiser jusqu'au mois de juin où elle devient nulle, période qui traduit un déficit agricole.

Les valeurs de ruissellement et celle de l'infiltration déduites à partir de l'équation du bilan hydrique de Thornthwaite donnent respectivement 192.10mm et 168.45mm pour la station de Ain Assel, 98.99mm et 107.05mm pour les Salines, et 75.09mm et 91.95mm pour Pont Bouchet.82.74mm et 138.45mm pour Remal Souk et 135.03 mm et 146.75 pour celle de Bouteldja.



Chapitre V:
Chapitre V:
Vulnérabilité à la
Pollution

V.1-Introduction :

L'eau qui s'infiltré dans le sol subit invariablement un certain nombre de changement physiques, chimiques ou biologiques, qui affectent sa composition. Ces modifications sont fonction de la nature des terrains traversés, de la durée du transit mais aussi de la composition initiale de l'eau, particulièrement lorsque cette eau est polluée. Pendant le transport du polluant à travers les couches superficielles, il subit une migration verticale (zone saturée) vers la nappe puis une migration horizontale suivant le sens d'écoulement. Ainsi la zone non saturée joue un rôle dans la filtration et la rétention de certaines substances. Cette action est bien marquée lorsque la granulométrie est faible et l'épaisseur de la zone non saturée est importante et la vitesse de percolation de l'eau dans la nappe est faible, d'où le rôle protecteur de cette zone qui fait un obstacle contre la migration de polluants vers l'aquifère (zone saturée).

V.2-Objectif du travail :

Plusieurs méthodes (plus d'une vingtaine) de caractérisation de la vulnérabilité des nappes à la pollution sont citées dans la littérature internationale. Ces méthodes sont plus ou moins complexes et plus ou moins précises. L'objet du présent travail est l'évaluation de la vulnérabilité et le risque de pollution dans le système aquifère d'Annaba El-Tarf en utilisant les résultats de trois méthodes DASTIC, GOD et KHERICI. Les deux premières se présentent sous forme de systèmes de cotation numérique, basés sur la considération des différents facteurs influençant le système hydrogéologique. Ces méthodes affectent une note et un poids variant à chaque paramètre utilisé. La troisième plus récente (KHERICI, 2010) considère la combinaison de deux critères basée sur les facteurs naturels (épaisseur de la zone non saturée, faciès géologique, degré d'autoépuration) et les causes de vulnérabilité à la pollution des nappes (facteurs anthropiques) provoquées par l'homme. Les prélèvements ont été effectués sur les eaux de forages et de puits domestiques pendant une période de plus de 29ans.

V.3-Qualité des eaux souterraines de la région :

Les eaux souterraines, constituent une ressource de qualité généralement meilleure à celle des eaux de surface, grâce à la protection naturelle des couches du sol sus-jacentes et aux pouvoir filtrant des terrains. Elles permettent des échanges physico-chimiques avec le milieu réservoir en provoquant un retard de la matière polluante par sa destruction ou par sa

fixation (**Bousnoubra, 2002**). De point de vu qualité les nappes sableuses (d'origine éolienne) du massif dunaire de Bouteldja et du cordon dunaire, malgré leur proximité de la mer, leurs eaux restent de très bonne qualité chimique, présentant généralement des teneurs en sels dissous inférieures aux normes de l'ordre de 150mg/l, où on enregistre des teneurs inférieures à 70mg/l pour les chlorures et les bicarbonates, inférieures à 10mg/l pour les Ca^{++} et Mg^{++} , K^+ , et des valeurs de Na^+ inférieures à 30mg/l. les valeurs en nitrates et nitrites sont très faibles ne présentant actuellement pas un risque de pollution. Cependant le faciès chimique est généralement chloruré-sodique pour lequel la pluie et l'évapotranspiration semblent jouer un rôle prépondérant dans la dilution et la concentration en sels dissous. Par contre les nappes superficielles (Annaba et El-Tarf) et profonde d'Annaba présentent une qualité d'eau dégradée surtout dans la partie de Dréan où les concentrations en chlorures dépassent largement les normes (entre 700-900mg/l), le faciès chimique reste toujours chloruré-sodique (origine géologique: due à l'effet du phénomène de régression et transgression de la mer méditerranée dans cette région pendant le Miocène) les valeurs du calcium dépassent les 100mg/l, par contre les teneurs en sodium sont très élevées de l'ordre de 400mg/l au niveau de s Salines et de Dréan. Les teneurs en Nitrates sont généralement moyennes au niveau de la région de Dréan et les Salines, faibles au niveau de la plaine de El-Tarf, mais elles sont relativement élevées et dépassent des fois les normes dans la nappe superficielle d'Annaba.

Tabl.18: Qualité des eaux souterraines dans la région d'étude d'après (ADE, Annaba, Débièche 2002)

| | Paramètre /Normes OMS (mg /l) | Ca^{++} 200 | Mg^+ 150 | K^+ 20 | Na^+ 200 | SO_4^- 250 | Cl^- 250 | HCO_3^- / | NO_2 0.2 | NO_3 50 | R sec 1000 | pH6.5- 8.5 | Qualité de l'eau |
|---------------------------|-------------------------------|------------------|---------------|-------------|---------------|-----------------|---------------|----------------|---------------|--------------|---------------|---------------|---------------------|
| BO UT EL DJ A | Source Bourdim | 8.02 | 4.86 | <3 | 22.8 5 | <20 | 32.2 9 | 15.23 | <0.04 | 2.68 | 84 | 6.52 | Très Bonne |
| | Forage Righia | 6.41 | 2.43 | <3 | 28.4 | <20 | 34.0 | 14.43 | <0.04 | 4.74 | 51 | 6.54 | Très Bonne |
| | Forage AinKhiar | 3.21 | 3.89 | <3 | 20.7 5 | <20 | 28.3 6 | 26.96 | <0.04 | 4.19 | 50 | 7.16 | Très Bonne |
| | Forage Borjali Bay | 8.02 | 5.83 | <3 | 33.3 | <20 | 45.6 | 15.23 | <0.04 | 2.92 | 132 | 7.13 | Très Bonne |
| E- CH AT T | Puits | 108 | 6.24 | 5 | 112 | 88 | 71 | 488 | <0.04 | 9.01 | / | 7.34 | Très Bonne |
| | Source El-Kous | 8.01 | 7.2 9 | <3 | 132 | <20 | 31.9 | 20.25 | <0.02 | 6.28 | / | 7.02 | Très Bonne |
| | Puits | 80 | 9.6 | 6 | 124 | 122 | 159. 6 | 756.4 | <0.04 | 5.47 | / | 7.21 | Très Bonne |
| EL TA RF | F1 EL-Tarf | 24.35 | 5.95 | 2.14 | 36.9 | 68.8 | 68.7 8 | 47.7 | <0.04 | 2.63 | 209 | 6.95 | Bonne |
| | F2 | 71.34 | 16.0 | <3 | 70.6 | 38.4 | 54.4 | 190.9 | <0.04 | 2.2 | 306 | 7.92 | Bonne |
| DR EA N | Dréan Kef Mourad | 384.77 | 106. 94 | 8.43 | 556 | 422. 4 | 943. 05 | 646.6 | <0.04 | 25.9 3 | 2923 | 7.36 | Médiocre |
| | FORAGE - 5 K.DREAN | 320.64 | 87.5 | 6.76 | 418 | 403. 2 | 730. 33 | 573.4 | <0.04 | 23.2 5 | 2415 | 7.01 | Médiocre |
| | Forage Mechmach2 | 134 | 59.3 | 3 | 162 | 124 | 337. 5 | 108.5 8 | <0.04 | <2.2 | 1219 | 7.64 | Médiocre |
| | Forage Sidi Bouzide | 112.22 | 43.7 5 | <3 | 169. 7 | 134. 4 | 362. 13 | 307.4 4 | <0.04 | 60.6 6 | 1045 | 7.1 | Médiocre |

| | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------------|--------------------|--------|-----------|------|------------|------------|-------------|------------|-------|-----------|------|------|----------|
| BE SB ES | Belahmar | 160.32 | 58.3 3 | <3 | 190. 00 | 326. 40 | 283. 62 | 603.5 3 | <0.04 | 1.39 | 912 | 7.42 | |
| | Daghousa | 160.32 | 61.2 5 | 3 | 198. 00 | 124. 80 | 294. 26 | 510.9 3 | <0.04 | 17.3 8 | 749 | 7.5 | Médiocre |
| AS FO UR | Forage Maiz Bachir | 128.25 | 39.8 6 | <3 | 98.5 | 38.4 | 106. 36 | 607.8 | 0.07 | 9.96 | 500 | 7.12 | Médiocre |
| | Forage Centre | 152.3 | 42.7 7 | <3 | 101 | 48 | 136. 14 | 527.5 | <0.04 | <2.2 | 690 | 7.28 | Médiocre |
| LE S SA LI NE S | Les Salines F6 | 200.4 | 70.9 7 | 5.01 | 419. 5 | 255. 36 | 744. 51 | 409.9 2 | <0.04 | 1.1 | 1981 | 7.41 | Médiocre |
| | Les Salines F8 | 160.35 | 58.7 | 4.06 | 399. 5 | 138. 24 | 550. 34 | 435.7 8 | <0.04 | 1.1 | 1558 | 7.22 | Médiocre |
| | Les Salines F13 | 147.49 | 44.7 2 | 3.73 | 263 | 151. 68 | 371. 55 | 426.0 2 | <0.04 | 2.81 | 594 | 7.36 | Médiocre |
| | Les Salines F15 | 314.23 | 71.9 4 | 4.7 | 417 | 220. 8 | 118 9.87 | 390.1 5 | <0.04 | 4.23 | 2599 | 7.2 | Médiocre |
| AN NA BA | SF1 | 191 | 48 | 4.25 | 332 | 207 | 500 | 371 | 0.1 | 0 | / | 7.16 | Médiocre |
| | SF2 | 261 | 60. 5 | 11.3 | 361 | 342 | 490 | 429 | 0.07 | 9 | / | 6.98 | Médiocre |
| | SF3 | 372 | 105 | 1.86 | 375 | 233 | 884 | 293 | 0.07 | 70 | / | 7.27 | Médiocre |
| | SF4 | 140.5 | 47 | 2.35 | 190 | 88 | 369 | 356 | 0.07 | 10 | / | 7.22 | Médiocre |
| EL HA DJ AR | SP3 | 448 | 133 | 1.8 | 249 | 321 | 713 | 488 | 0.07 | 7 | / | 7.15 | Médiocre |
| | SP12 | 188 | 32 | 33 | 170 | 148 | 167 | 398 | 0.03 | 34 | / | 7.54 | Médiocre |
| | SP13 | 286 | 28 | 39 | 65.5 | 348 | 70 | 332 | 0.20 | 34 | / | 7.37 | Médiocre |
| | HP1 | 180 | 47 | 4 | 207 | 105 | 237 | 342 | 0.10 | 11 | / | 7.16 | Médiocre |

V.4-Application de méthodes d'estimation de la vulnérabilité :

V.4-1 .Méthode DRASTIC :

Cette méthode cartographique de cotation de systèmes paramétriques a été mise au point par l'EPA (**Environmental Protection Agency, 1985**), ainsi que par **Aller et al. (1987)** aux Etats-

Unis. Elle a pour but d'estimer le potentiel de pollution des eaux souterraines (**Schnebelen et al. 2002**). Elle permet aussi de déterminer l'indice de la vulnérabilité intrinsèque applicable aux conditions hydrogéologiques rencontrées aux Etats-Unis. Elle a été ensuite modifiée dans le but d'être utilisée dans différentes régions du monde (**Ibe eta/. 2001**).

Cette méthode comporte sept paramètres, l'ensemble des premières lettres de chaque paramètre constitue le nom de la méthode. Pour chacun des paramètres DRASTIC, une cote est attribuée sur une échelle entière allant de 1 (le moins important) à 10 (le plus important). Ainsi, chaque paramètre qui a une cote basse implique que la nappe concernée n'est pas vulnérable à la pollution et inversement. L'échelle étant entière, c'est-à-dire discrète, il est donc naturel que les valeurs obtenues pour chacun des paramètres soient regroupées en classes ayant chacune un nombre unique.

Il s'agit donc de désigner une valeur numérique à chaque paramètre de 1 à 5 qui correspondra au poids et qui augmente selon l'importance du paramètre dans l'estimation de

la vulnérabilité, c'est-à-dire, selon son influence sur la vulnérabilité de la nappe. Ensuite, ces cartes sont superposées pour produire une couche résultante où sera calculé l'indice de la vulnérabilité DRASTIC (ID).

Les cartes superposées devront évidemment avoir les mêmes caractéristiques cartographiques, soit un même système de projection, les mêmes unités de longueur, la même étendue géographique ainsi que la même résolution, car tous les calculs se feront sous format matriciel.

Tabl. 19 : Résumé des propriétés de chaque paramètre et son poids

| Symbole | Paramètre | | Poids |
|----------|--------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| D | Profondeur de l'eau | Plus cette profondeur est élevée, plus le contaminant met du temps pour atteindre la surface piézométrique | 5 |
| R | Recharge nette | Véhicule principal du transport du contaminant. Plus cette recharge est grande, plus le risque de contamination est élevé | 4 |
| A | Lithologie de l'aquifère | Caractérisé par la granulométrie des terrains saturés. Plus la granulométrie est fine, plus le piégeage du polluant est grand. | 3 |
| S | Sol | Plus le sol est riche en argile, plus l'absorption des métaux lourds est importante, et plus la protection des eaux souterraines est grande. | 2 |
| T | Topographie | Plus la pente des terrains est grande, plus le ruissellement des eaux est important et par conséquent la contamination des eaux souterraines est faible. | 1 |
| I | Zone non saturée | Son impact est déterminé à partir de la texture des terrains. La percolation du polluant jusqu'à la surface piézométrique est d'autant plus grande que cette texture est favorable (graviers, sables grossiers). | 5 |
| C | Perméabilité | Plus ce paramètre est grand, plus le transfert du polluant est rapide. | 3 |

Après avoir défini les différentes classes pour chacun des paramètres déjà cités, il est alors possible de calculer l'indice de la vulnérabilité DRASTIC (ID). Il s'agit de la somme des couches DRASTIC obtenue pour chacun des sept paramètres, pondérés par les coefficients respectifs de ces derniers selon la formule suivante:

$$ID = DpDc + RpRc + ApAc + SpSc + TpTc + Iplc + CpCc$$

A titre d'exemple le paramètre D représente la profondeur de la nappe d'eau; le Dp est le poids des paramètres DRASTIC; enfin le Dc est la cote paramétrique des paramètres DRASTIC.

Tabl.20 : Principales sources d'informations utilisées

| Paramètres | Principales sources d'information |
|-------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Profondeur de l'eau | Carte piézométrique : basée sur les données des niveaux piézométriques (Hp) les plus pessimistes que possible durant plus d'une vingtaine d'année (1982-2012). Profils géo-électriques (STROJEXPORT PRAGUE, 1975) de la plaine de Bouteldja |
| Recharge nette | Etude hydrogéologique (Khérici ,1982 ,1993) Bilan hydrique (stations : des salines,Pont Bouchet, Bouteldja ,kef merad, Ben M'Hidi, Ain Assel,) |
| Milieu aquifère et zone non saturée | Coupes de forages Etude des cartes géologiques Etude géophysique |
| Topographie | Cartes topographiques |
| Nature du sol | Cartes géologiques et topographiques |
| Conductivité hydraulique | Carte de transmissivité Coupes de forages Etude hydrogéologique (Khérici1993 ,1982) |

V.4-1-1.Description des paramètres et réalisation des cartes thématiques

V.4-1-1-1. Nappe d'Annaba :

a. Le paramètre "profondeur de l'eau (D)"

L'évaluation de ce paramètre a été faite sur la base de plusieurs mesures piézométriques, effectuées pendant une période de plus de 29 ans. Ces mesures montrent que le niveau piézométrique de la nappe varie entre 1 m à 15m. Ces différentes valeurs permettent de distinguer trois zones (**Fig.18**), chaque zone est affectée d'un indice de vulnérabilité partiel (ID), relatif au paramètre "Profondeur du niveau statique":

- Une zone située au Nord de l'oued Seybouse, où la profondeur de l'eau est inférieure à 3m, d'indice de vulnérabilité partiel, d'une valeur de 45.
- Une zone (occupe la majeure partie de la plaine), dont la profondeur de l'eau varie entre 4.5 et 9 m et d'indice partiel de 35.
- La Troisième zone (située latéralement, aux extrémités Est, Sud-ouest et Sud de la plaine). A cet endroit le toit de la nappe s'approfondit progressivement de 9 à 15 m où l'indice de vulnérabilité partiel correspond à 25.

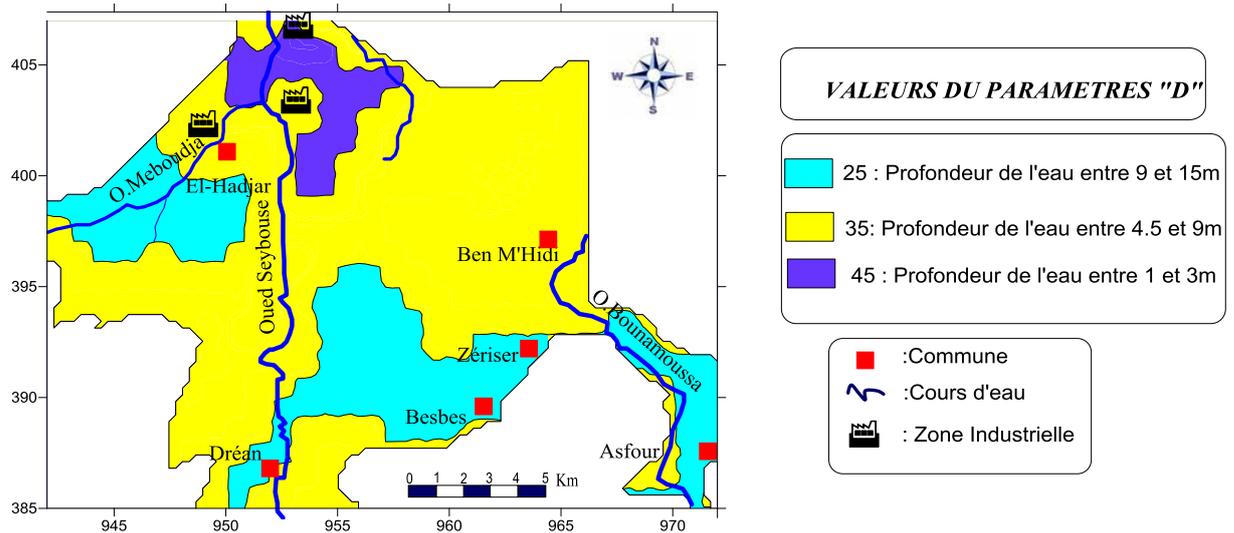


Fig.18: Carte du paramètre "DEPTH" : profondeur de la nappe d'Annaba.

b. Le paramètre "Recharge nette (R)"

La recharge efficace joue un rôle déterminant dans le transfert de la lame d'eau depuis la surface du sol jusqu'à l'aquifère sous-jacent. Ce paramètre est particulièrement difficile à évaluer lors des études hydrogéologiques. Pour l'estimation de ce paramètre dans la nappe de Annaba , nous avons utilisé les résultats de bilans hydriques des Stations pluviométriques bien répartis dans la plaine établis par plusieurs auteurs (**Thorntwaite et Turc.....etc**). La carte du paramètre "Recharge nette", ainsi obtenue (**Fig19**), montre trois domaines d'indices de vulnérabilité partiels (IR) distincts:

- L'un, couvrant la partie Sud de la plaine, ou la lame d'eau de réalimentation est de l'ordre de 620 mm/an . Elle est affectée un indice de vulnérabilité partiel de 4 .
- L'autre, occupant le centre de la plaine avec une réalimentation < 600 mm/an, l'indice partiel est de l'ordre de 12.

Le troisième domaine occupe le reste de la plaine (Nord et Nord-est) avec une réalimentation considérable de 650 à 800 mm/an, l'indice partiel est de l'ordre de 24

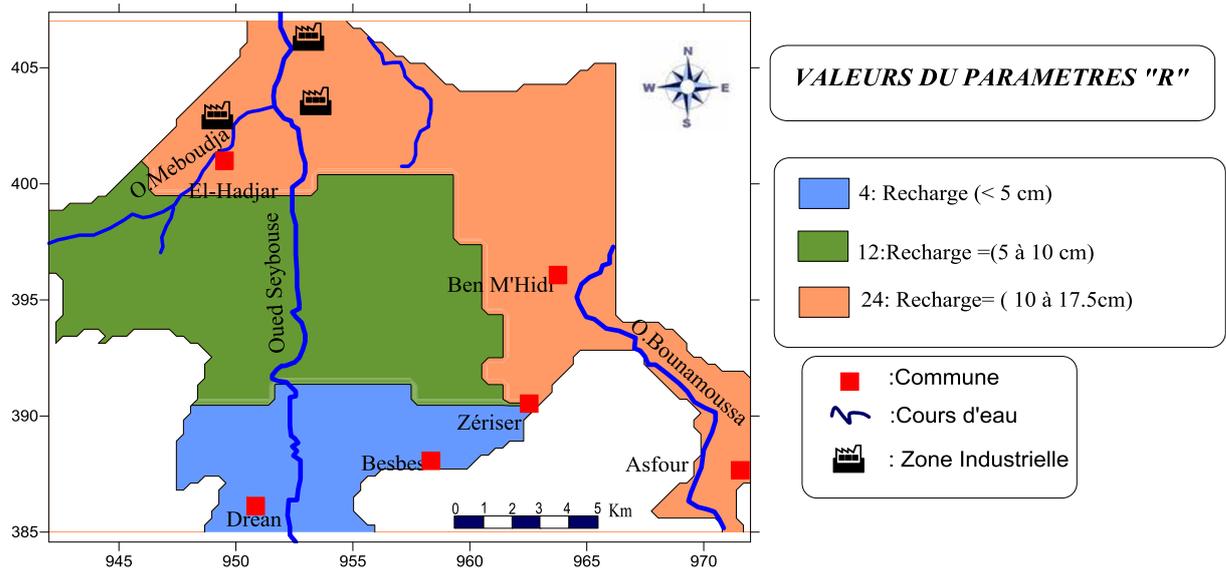


Fig.19 : Carte du paramètre "R" : Recharge de la nappe de Annaba.

d. Le paramètre " Lithologie de l'aquifère (A) "

La description du matériel constituant la zone saturée et non saturée, a été réalisée grâce à la notice explicative de l'esquisse géologique de la région et des coupes géologiques, et lithologiques des forages captant l'aquifère. Les rapports de prospections géophysiques et les coupes géo-électriques interprétatives ont été également exploitées.

Il ressort de la compilation des tous ces documents, que le remplissage alluvial de la plaine est constitué d'un mélange de sable argileux, limons sableux et de graviers, ainsi que des formations argileuses et marneuses. Le matériel perméable est donc prédominant. Conformément à la nature sableuse et graveleuse de l'aquifère, la carte relative à ce paramètre (**Fig.20**), montre pour l'ensemble de la plaine, hormis ses bordures latérales, un "indice Drastic" moyen, de l'ordre de 15 occupe presque toute la plaine d'Annaba. Seule une zone limitée au Sud de Dréan, présente un indice partiel de 24, lié à la prédominance des affleurements sablo-argileux et du graviers.

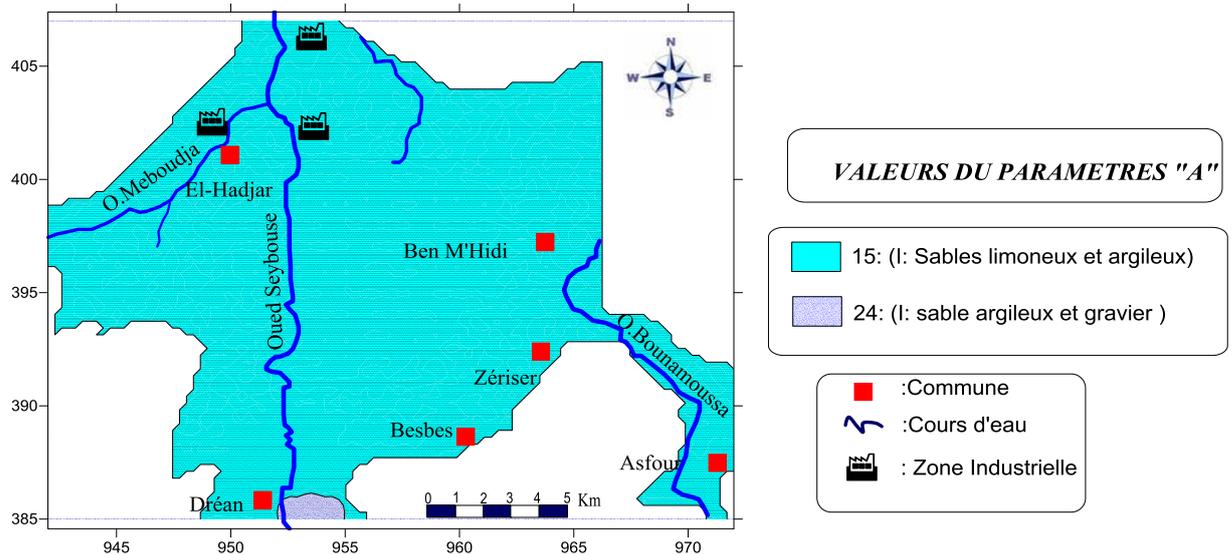


Fig.20: Carte du paramètre "A" : Nature lithologique de l'aquifère d'Annaba

d. Le paramètre "Nature du sol (S)"

Cette carte a fait ressortir deux types de sols : (Fig. 21)

Classe (01) : elle occupe presque toute la plaine de Annaba elle représente des terrains à limons sableux.

Classe (02) : elle contient des terrains argileux donnant un indice de l'ordre de 2, ces terrains se situent dans la partie Sud et Nord –Oouest de la plaine et dans la partie centrale entre Dréan et Besbes et Ben M'Hidi .

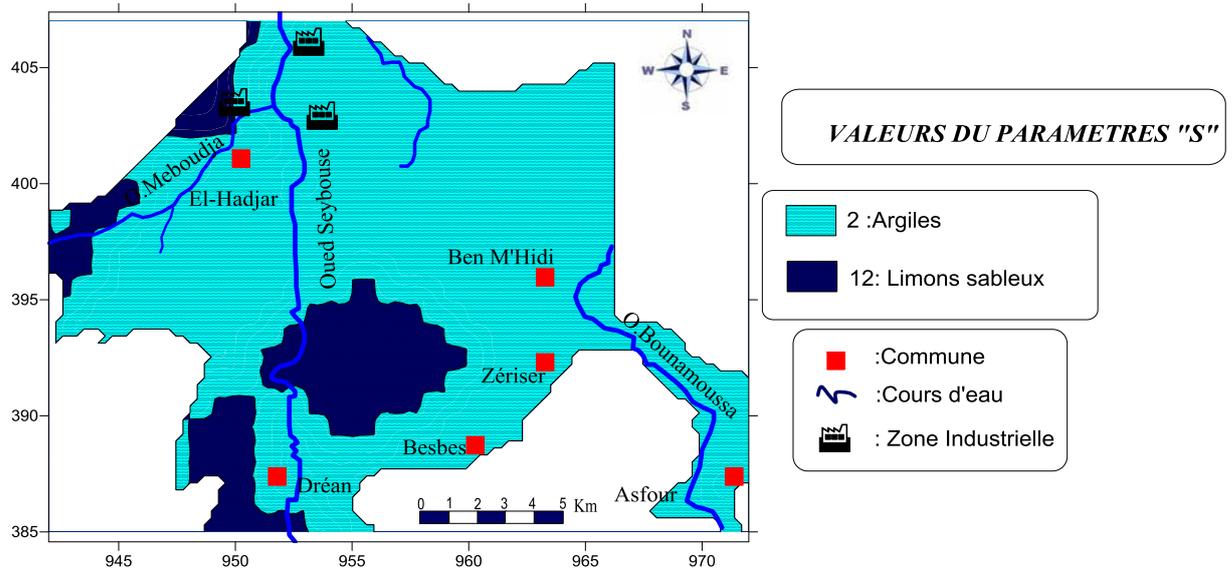


Fig.21: Carte du paramètre "S" : Nature lithologique de sol de la nappe d'Annaba

e. Le paramètre Topographie (T) ou pente des terrains

La plaine d'Annaba est relativement plane, présentant des pentes faibles, inclinée vers le nord et s'ouvrant sur la mer Méditerranée.

La carte des pentes a été réalisée à l'aide des cartes topographiques au 1/50000^{ème} de Mondovi(Dréan). Dans la carte du paramètre "Topographie" (**Fig.22**), la plaine est assignée d'un indice de vulnérabilité partiel (IT) compris entre 9 et 10:

Au Nord est , où les altitudes sont comprises entre 0 à 18m, et la pente topographique inférieure à 2 %, l'indice partiel est maximum (IT = 10) ;

▪ Presque partout ailleurs, où la topographie varie entre 20 et 42 m et les pentes comprises entre 2 % et 6 %, l'indice partiel est de l'ordre de 9.

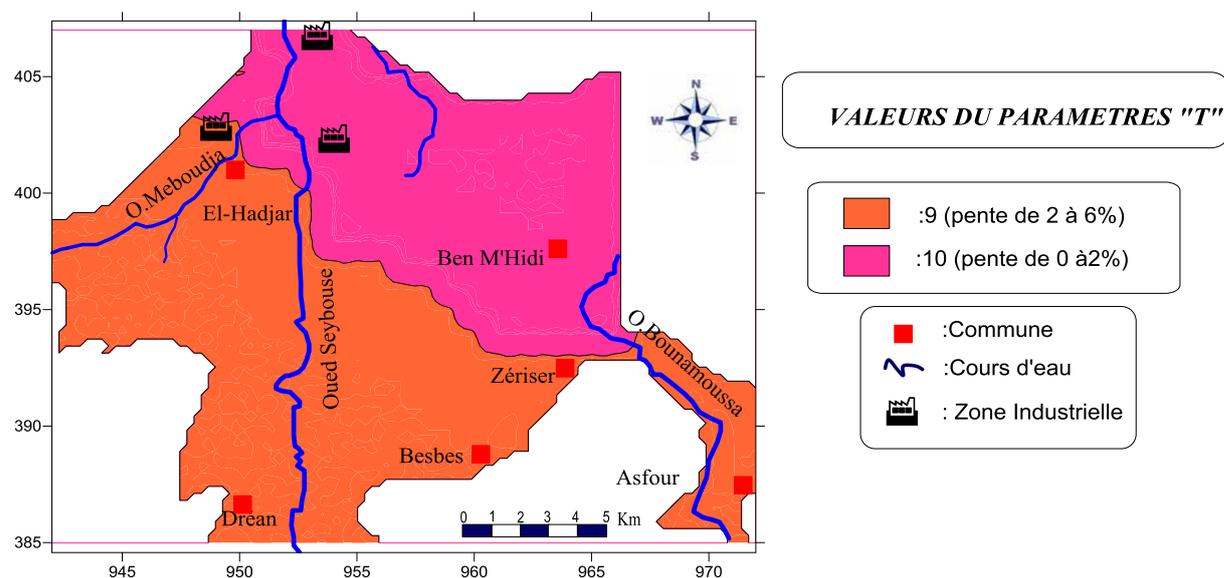


Fig.22: Carte du paramètre "T" pente de la nappe d'Annaba

f. Le paramètre " Zone non saturée (I) "

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

*La carte du paramètre "zone non saturée" (**Fig.23**) présente la même configuration que celle relative à la "nature du matériel aquifère" (**Fig.22**). Elle montre l'existence d'un seul domaine de vulnérabilité, couvrant la majeure partie de la plaine d'Annaba. Dans tout ce domaine, la zone non saturée, constituée essentiellement de formations perméables, favorise l'infiltration des substances polluantes, qui seraient éventuellement déversées en surface. Il est affecté d'un indice de vulnérabilité partiel très élevé (II = 40).

Cependant, dans les zones de piémonts et le Sud Est, sont délimitées des zones d'indice élevé (II = 30).

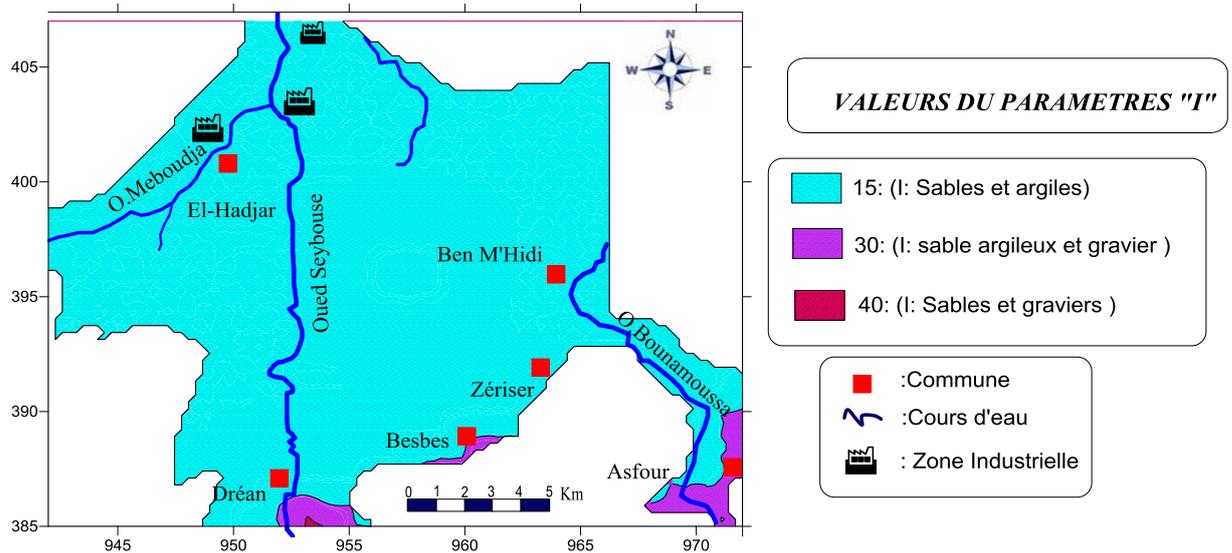


Fig. 23: Carte du paramètre "I" impact de la zone non saturée de la nappe d'Annaba

g. Le paramètre "Conductivité Hydraulique (C)"

Ce paramètre est évalué avec les données de valeurs de transmissivité (**Hani 2003**) et des logs de forages pour estimer la perméabilité.

*Selon la nature lithologique de l'aquifère, des valeurs des perméabilités obtenues par cette méthode, qui varient d'un point à un autre. Elles permettent néanmoins, d'identifier trois grandes zones de perméabilité (**Fig.24**), chacune caractérisée par son propre indice de vulnérabilité partiel (IC) :

- L'une située au Sud de la plaine au niveau de Dréan, caractérisée par une perméabilité élevée, supérieure à 10^{-4} m/s, et se traduisant donc par un indice de vulnérabilité partiel "IC", élevé, égal à 30.
- L'autre couvrant presque la totalité de la plaine, à moyenne perméabilité (10^{-5} m/s à 10^{-4} m/s), qui est affectée d'un indice de vulnérabilité partiel de 18.
- Localement, de petites zones au centre de la plaine et au niveau de la région de Asfour se caractérisent par de faibles valeurs de perméabilité (10^{-9} m/s et 10^{-6} m/s), présentant un indice IC égal à 3.

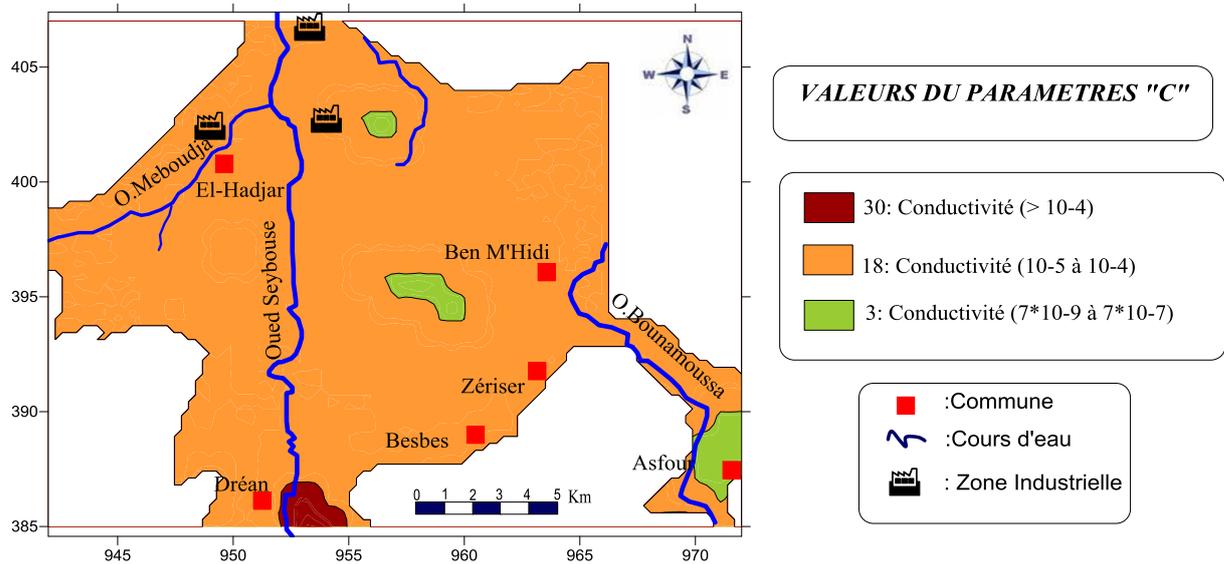


Fig.24: Carte du paramètre "C" Conductivité hydraulique de la nappe d'Annaba

h. Niveau de vulnérabilité de la nappe d'ANNABA selon DRASTIC

Trois degrés de vulnérabilité à la pollution sont mis en évidence par la méthode DRASTIC

-La classe "très faible" : Cette classe se rencontre dans les parties Sud Ouest d'El-Hadjar, ... au Nord-Est, Nord de Dréan et au niveau de la commune de Zérizer et Besbes. Elle représente 3.89% (**Fig25**).

. Cette situation peut s'expliquer essentiellement par la situation du niveau statique identifié entre 9 à 15m.

Dans ces secteurs de la nappe, la zone vadose est constituée de couche d'argiles sableuses, et argiles limoneuses sables argileux et même d'argiles en certains endroits combinée à une perméabilité comprise entre 10^{-9} m/s et 10^{-4} m/s.

-La classe "Faible" : Elle occupe plus de la moitié de la plaine et se localise dans les parties Sud, Ouest, Nord-Ouest et Centre-Est de la zone d'étude. Elle représente près de 62.92% de la plaine ; le faible degré de vulnérabilité peut s'expliquer par le fait que dans ces zones, les niveaux statiques sont généralement compris entre 4 m et 9 m. La zone vadose est essentiellement constituée de sables argileux.

-La classe "Moyenne" : Cette classe est confinée dans l'extrême Nord et Sud de la zone d'étude. Elle représente moins de 33.19% de la zone d'Annaba. L'indice Moyen de vulnérabilité peut être dû à une faible profondeur de la nappe comprise entre 1m et 4 m avec

une pente inférieure à 2 %. La zone vadose est essentiellement constituée de sables argileux et sables graveleux pouvant faciliter la circulation des polluants, combinée à une perméabilité élevée ($>10^{-4}$ m/s) dans certains endroits essentiellement au Sud de Dréan . Ces conditions favorisent l'infiltration de tout polluant présent à la surface du sol.

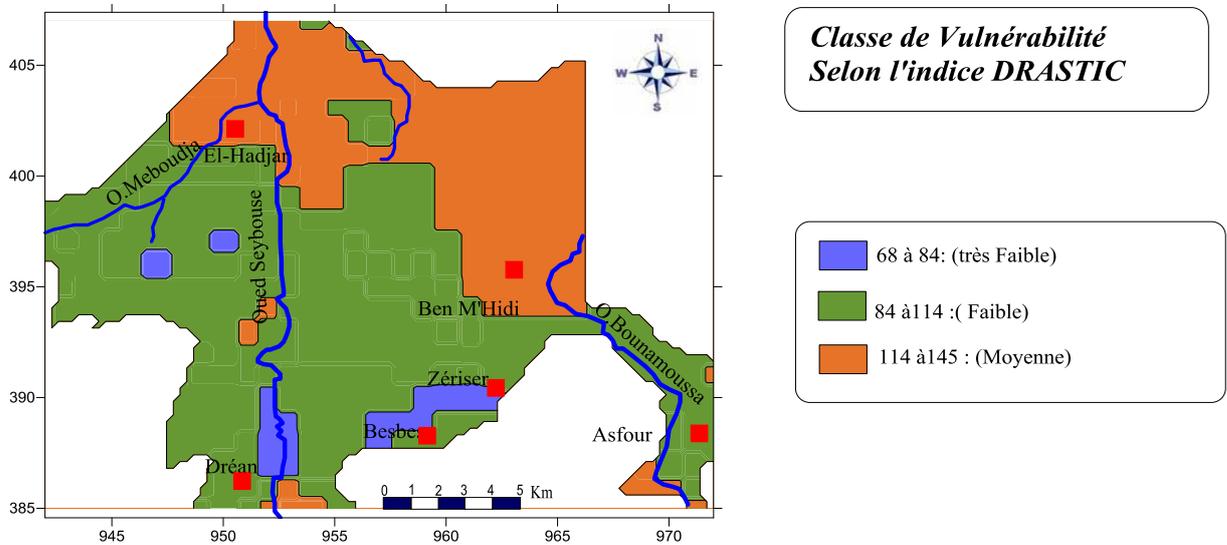


Fig.25 : Carte de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines de la nappe de la plaine d'Annaba d'après la méthode DRASTIC

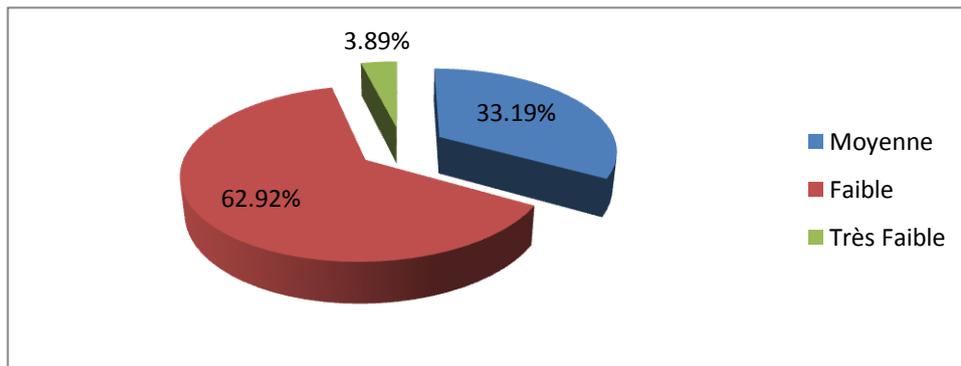


Fig .26 : Répartition des degrés de vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines de la Plaine d'Annaba selon DRASTIC

V.4-1-1-2. Le Massif Dunaire de Bouteldja :

Les cartes sont établies en fonction de systèmes d'indication, ce qui facilite la mise en œuvre de chaque paramètre

a. Le paramètre "profondeur de l'eau (D)"

La détermination de ce paramètre au niveau de la nappe des sables a été faite sur la base de la carte piézométrique, effectuées en 1983(Khérici).

Nous définissons ainsi six classes (Fig. 27) réparties comme suit :

Classe (01) : occupe toute la partie Ouest du massif dunaire de Bouteldja. La profondeur de cette classe dépasse les 31 m, avec un indice de vulnérabilité partiel égal à 5;

Classe (02) : sa profondeur varie entre 30 et 22.5 m, avec un indice de vulnérabilité partiel de 10; cette classe se trouve dans la partie Est de la plaine et Nord du massif.

Classe (03) : elle longe la précédente, avec une profondeur allant de 15m jusqu'à 22 m, et un indice de vulnérabilité partielle égale à 15.

Classe (04) : caractérisée par un indice partiel de 25 et une profondeur d'environ 9 à 15m. Elle se situe au Nord de la région de Righia.

Classe (05) : occupe la partie Sud de Bordj Ali Bey, sa profondeur varie entre 4.5m et 9 m ou on un indice de vulnérabilité partiel de 35.

Classe (6) : cette classe présente un intervalle de profondeur allant de 1.5 à 3m et un indice de 45. Elle caractérise la partie Nord du massif dunaire.

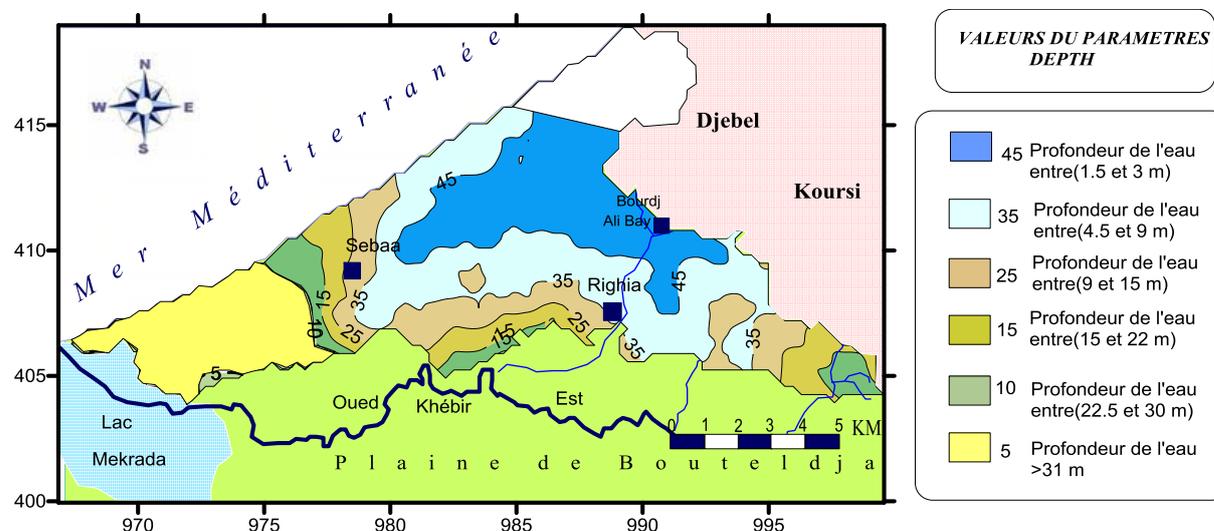


Fig.27: Carte du paramètre "DEPTH" : profondeur de la nappe du massif dunaire

b. Le paramètre "Recharge nette (R)"

Son estimation est basée sur les résultats des équations des bilans réalisés dans l'étude hydrogéologique de (Khérici ,1985). Cette étude donne une estimation de l'infiltration égale à 273mm soit environ 34% des précipitations pour la nappe des sables. Pour la nappe des graviers, nous avons utilisés les résultats établis dans l'étude hydrogéologique de Gaud (1976) où le volume moyen interannuel transitant dans la nappe des graviers est de l'ordre de $35,9.10^6 \text{ m}^3/\text{an}$. La quantité d'eaux susceptible d'être infiltrée est de l'ordre de 60 mm.

On observe deux classes (Fig28), la première classe occupe toute la nappe des sables avec un indice de 36 et une deuxième classe présentant un indice partiel de 12 qui occupe la nappe des graviers.

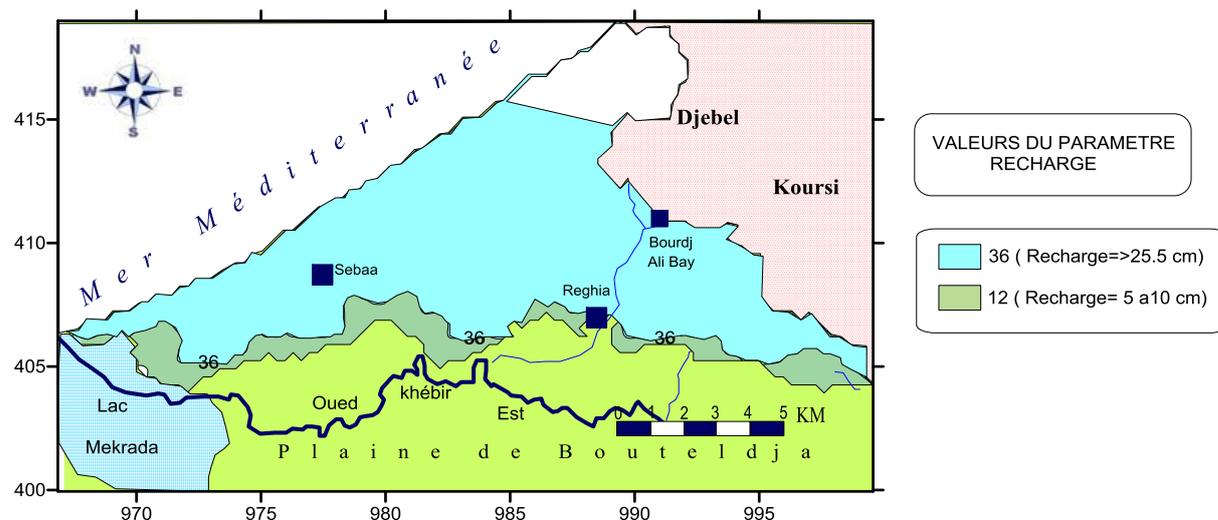


Fig.28: Carte du paramètre "R" : Recharge de la nappe du massif dunaire

c. Le paramètre "Nature lithologique de l'aquifère (A)"

L'étude des logs lithologiques des forages captants l'aquifère nous a permis de dégager trois (03) classes à degré de vulnérabilité variable (Fig. 29)

Classe (01) : elle est représentée par des sables et d'argiles, l'indice partiel est égale à 21. Cette classe occupe presque toute la partie Ouest de la région et une petite partie de l'Est (au Sud de Bordj Ali Bey) ;

Classe (02) : elle contient des graviers et des sables, son indice partiel est de 24 et elle est présente dans la partie de la zone d'étude (Bordj Ali Bey).

Classe (03) : les formations les plus dominantes sont les galets, les graviers et les sables auxquels nous attribuons un indice partiel élevé de 27. Ce matériel caractérise une petite zone au Sud de Righia.

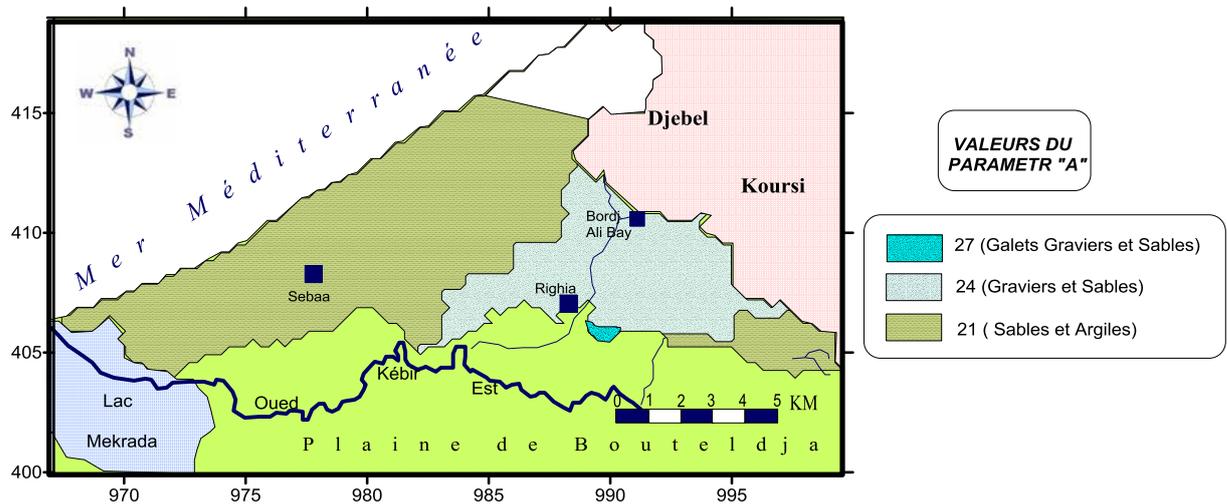


Fig.29: Carte du paramètre "A" : Nature lithologique de l'aquifère du massif dunaire

d. Le paramètre "Nature du sol (S)"

Cette carte a fait ressortir trois classes ou trois types de sols : (Fig. 30)

Classe (01) : elle occupe presque toute la plaine de Bouteldja et la partie centrale du massif elle représente des terrains à limons sableux.

Classe (02) : elle contient des terrains à argiles plus au moins sableux donnant un indice 14, ces terrains se situent dans la partie Sud de la plaine et dans la partie centrale du massif dunaire;

Classe (03) : cette classe qui intègre des sols sableux avec un indice de 18, apparait dans le massif dunaire et dans la partie Sud de la région d'étude.

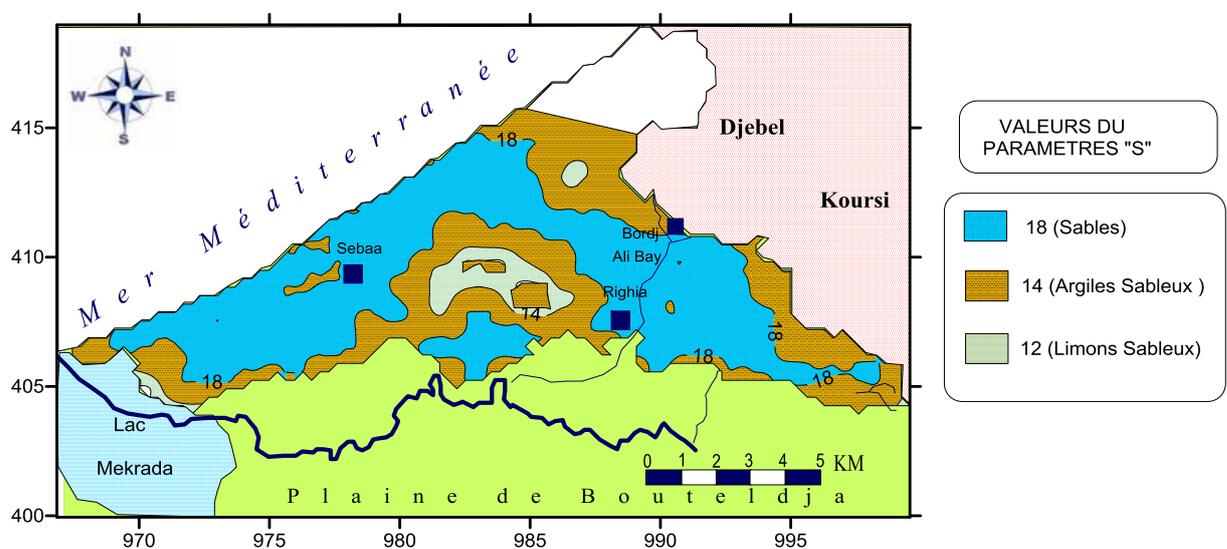


Fig.30: Carte du paramètre "S" : Nature lithologique de sol du massif dunaire

e. Le paramètre Topographie (T) ou pente des terrains (Fig.31)

L'évaluation de ce paramètre est basée sur les cartes des pentes réalisées à partir des cartes topographiques. En effet, la zone d'étude est presque plane, avec des pentes qui ne dépassent pas 10 %. Deux classes de pente ont été trouvées :

Classe (01) : elle présente des pentes de 0 à 2% et occupe presque 80% de la zone d'étude d'où un indice $IT=10$ qui implique une vulnérabilité élevée avec une possibilité de transfert de polluants.

Classe (02) : elle est peu présentée dans la région, elle occupe la partie Nord avec un indice partiel égale 9.

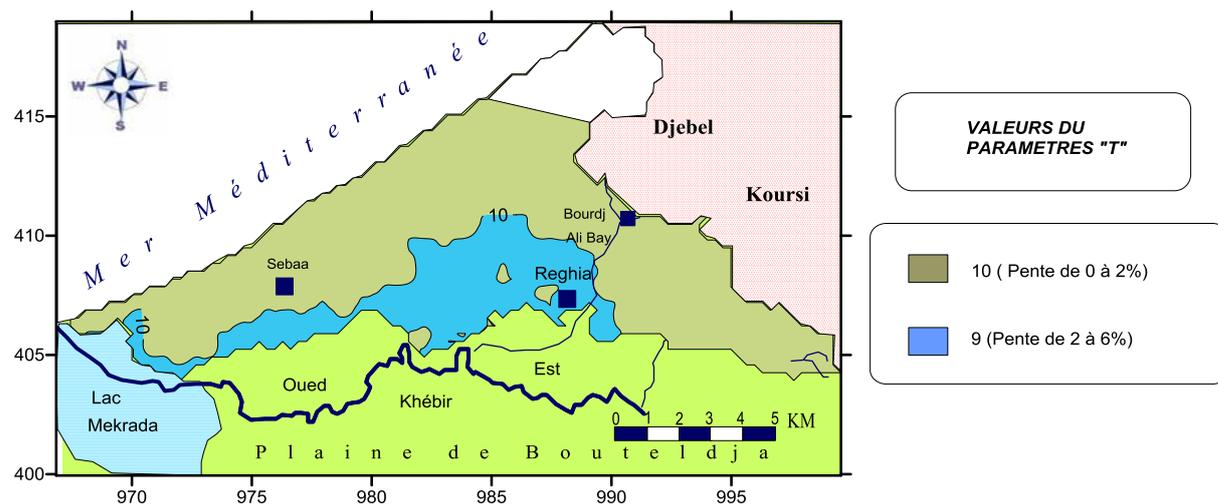


Fig.31: Carte du paramètre "T" pente du massif dunaire

f. Le paramètre " Zone non saturée (I) "

Cette zone est très importante dans l'évaluation de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines car elle représente la transition vers les eaux souterraines(Fig.32).

Classe (01) : cette classe est caractérisée par une lithologie imperméable (argile) son indice est égale à 5. Elle est présente dans la plaine de Bouteldja.

Classe (02) : montre des terrains à limon argileux qui occupe la partie Nord de la plaine avec un indice partiel de 10.

Classe (03) : formée essentiellement par une lithologie constituée de sables argileux, son indice est de 20. Elle est présente dans la zone centrale et la zone Nord du massif.

Classe (04 et 05) : occupent la partie Nord-Ouest du massif dunaire et le Sud de Bordj Ali Bey, où on note deux types du matériel perméable, l'un constitué de sables et l'autre de sables et graviers dont les indices partiels respectifs sont de 30 et 40.

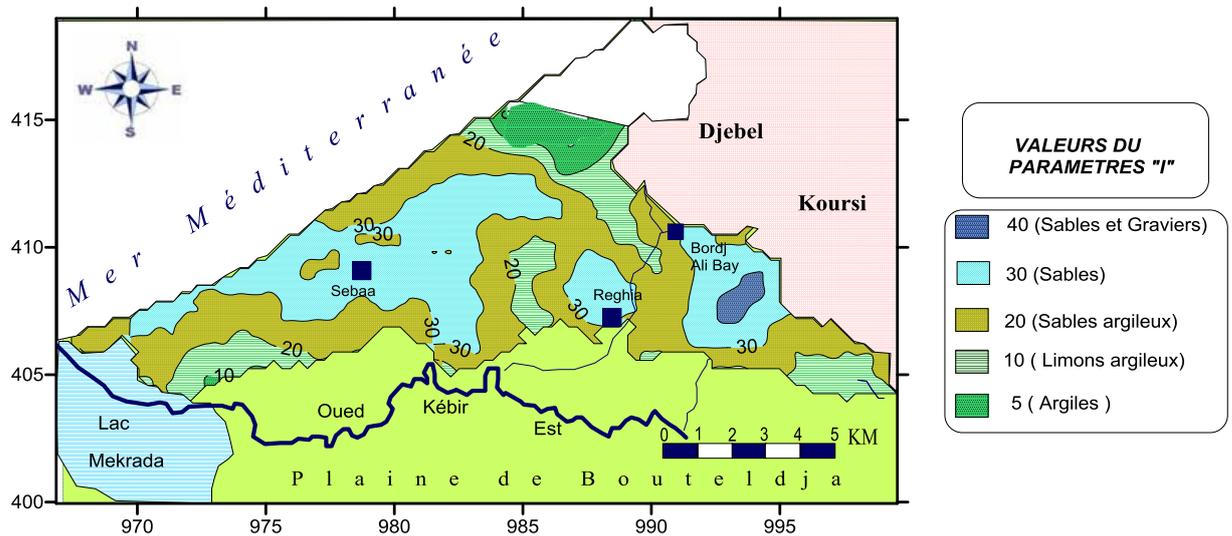


Fig.32: Carte du paramètre "I" impact de la zone non saturée du massif dunaire

g. Le paramètre "Conductivité hydraulique (C)"

La carte de la répartition hydraulique de la région de Bouteldja (**Fig. 33**) a été faite sur la base des essais par pompage, effectués au niveau de quelques forages situés surtout dans la partie Nord de la région. Les valeurs de la perméabilité moyennes sont de l'ordre de $2 \cdot 10^{-5}$ m/s pour toute la zone d'étude. Ainsi on note deux classes :

Classe (01) : elle occupe presque toute la zone d'étude avec un indice partiel de l'ordre de 3.

Classe (02) : située dans la partie Est du massif et Sud de la plaine avec un indice partiel égale à 6.

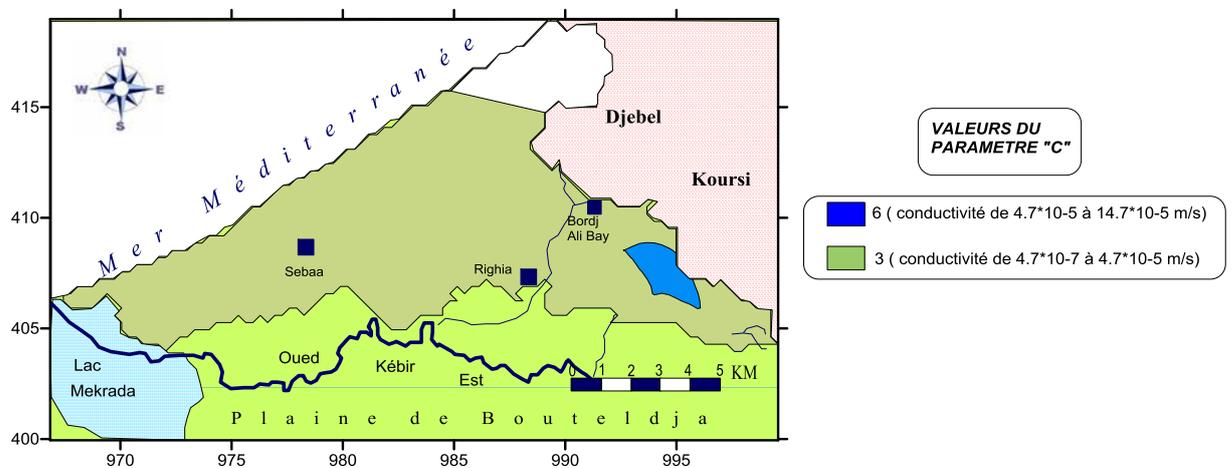


Fig.33: Carte du paramètre "C" Conductivité hydraulique du massif dunaire

h. Identification des classes de vulnérabilité à la pollution:

Les différentes unités hydrogéologiques sont illustrées dans la carte de vulnérabilité à la pollution (**Fig.34**) qui reflète le résultat des principaux travaux réalisés :

L'observation de la carte de vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines permet de distinguer quatre classes à différentes échelles de vulnérabilité :

- **Classe Faible (84-114) :**

Elle correspond à une zone de vulnérabilité à la pollution faible avec une couverture limono-sableuse, argileuse, reposant sur des formations argileuses, limono-argileuses et des sables argileux. La profondeur de la nappe est variable. Elle atteint les 65m dans la partie Ouest près du lac Mekhrada et au sud Est de Bordj Ali Bey l'est du massif dunaire Cette classe occupe une zone très limitée dans la région.

- **Classe Moyenne (114-145):**

Elle représente une zone de vulnérabilité à la pollution moyenne avec un aquifère sableux, argileux et graveleux, avec une couverture sableuse.

La prédominance des fractions sableuses dans les terrains de couverture facilitent la recharge de la nappe qui est de l'ordre de 34%. Ainsi ces paramètres favorisent l'infiltration des polluants vers les eaux souterraines du massif dunaire, où le toit de la nappe se situe entre 10 et 60m dans la partie Ouest et elle ne dépasse pas les 15m dans la partie Est du massif dunaire.

- **Classe Elevée (145-175)**

Cette classe occupe presque toute la partie centrale du massif dunaire (Sébaa, Righia, Borj Ali Bey) présentant une couverture sableuse, ou limoneuse sableuse avec un aquifère continu dans des graviers, sables et argiles avec une zone non saturée de type sables argileux. La profondeur de la nappe est faible, elle ne dépasse pas les 5m. La prédominance des terrains à forte proportion de sables et une profondeur faible de la nappe déterminent une zone de vulnérabilité à la pollution élevée.

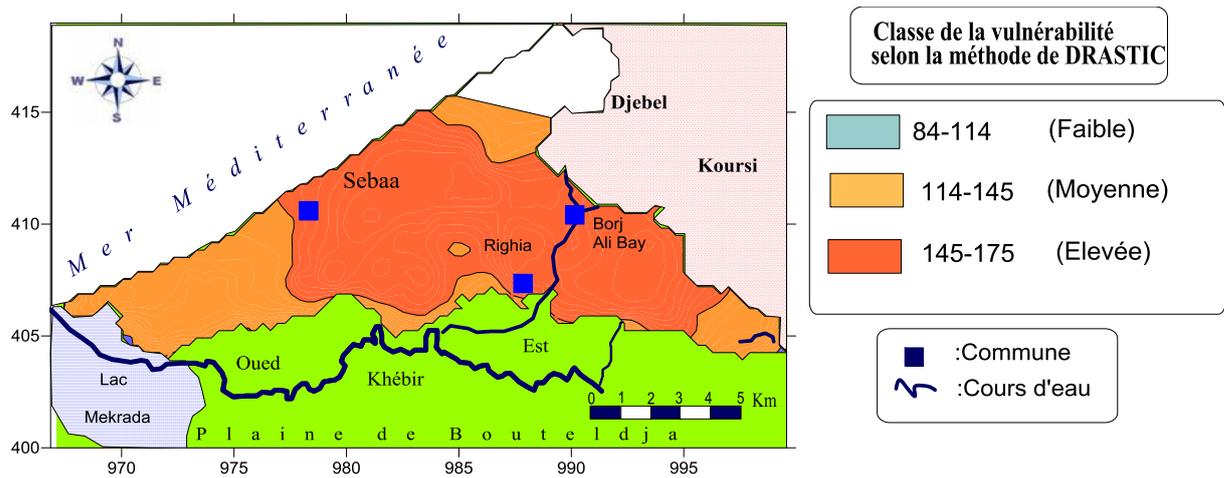


Fig.34 : Carte vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines du massif dunaire de Bouteldja D’après la méthode DRASTIC

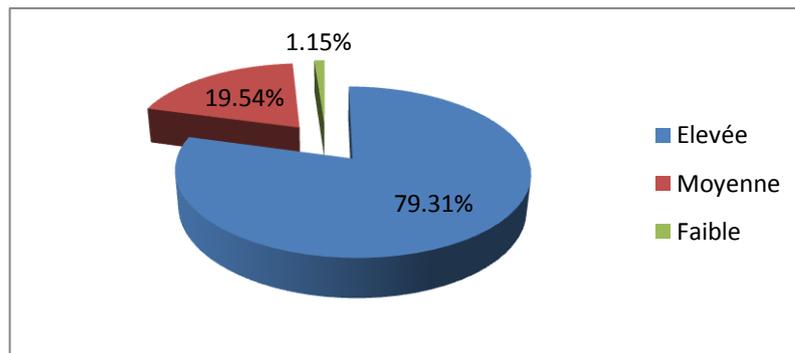


Fig.35: Répartition des degrés de vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines du Massif dunaire de Bouteldja selon DRASTIC

V.4-1-1-3. Le cordon dunaire d’Echatt :

a. Le paramètre ‘profondeur de l’eau (D)

Selon la carte de profondeur de la nappe libre du cordon dunaire d’El-Chat , on rencontre deux classes qui sont les suivantes :

L’une occupe la partie Nord de la commune d’El-Chat présente une profondeur compris entre 1m et 4.5m.

L’autre couvre presque la totalité de la nappe avec une profondeur variant entre 4.5m et 9m.

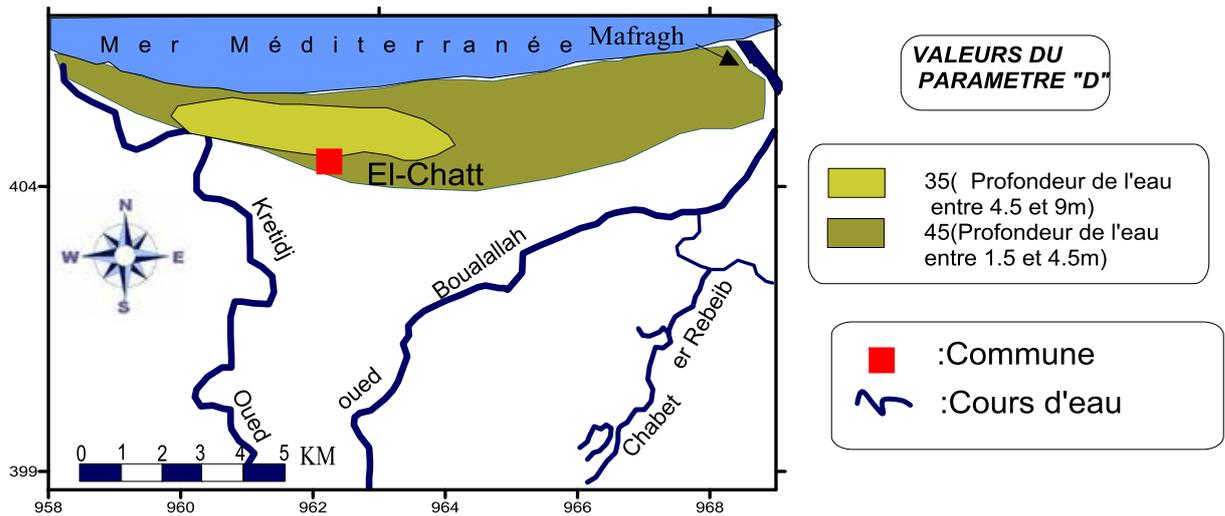


Fig.36: Carte du paramètre "D" Profondeur de la Nappe du Cordon Dunaire

b. Le paramètre ‘Recharge nette (R)’

D’après les données de la station des Salines (1990-2009) le calcul du coefficient d’infiltration est admis à partir du bilan hydrologique établi sur une période de 19 ans ; on observe un indice de recharge de l’ordre de 24 (107mm), occupant toute la nappe.

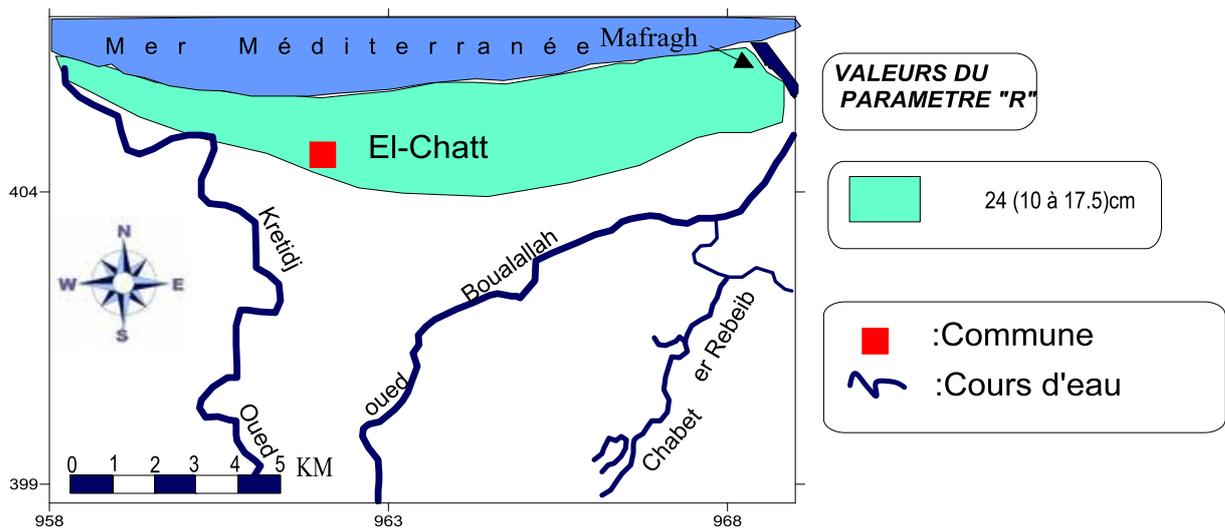


Fig37: Carte du paramètre "R" Recharge de la nappe du Cordon Dunaire

c. Le paramètre ‘Nature lithologique de l’aquifère (A)’

D’après les études et les coupes hydrogéologiques qui ont été faite (**Khérici 1993**), la texture de la zone saturée est composée essentiellement par des sables éoliens qui couvrent toute la nappe libre du cordon dunaire avec un indice de 21.

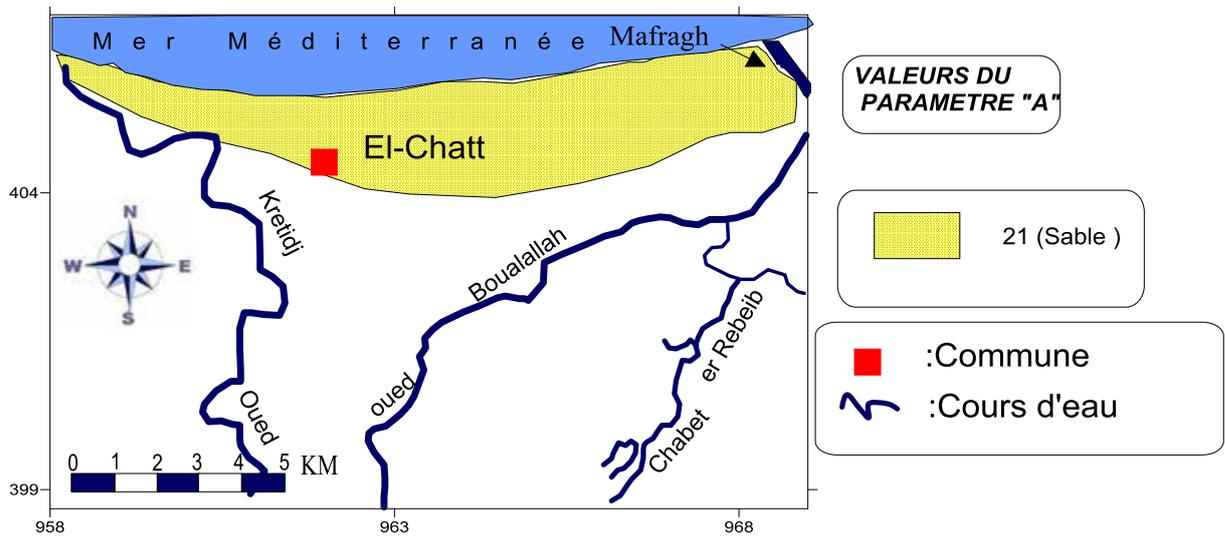


Fig.38: Carte du paramètre "A" : Nature lithologique de la nappe du Cordon Dunaire

d. Le paramètre "Nature du sol (S)"

D'après la carte si dessous on remarque que la région d'étude est caractérisée par un sol sableux avec quelques passages de silt et d'argiles qui donnent un indice de l'ordre de 12.

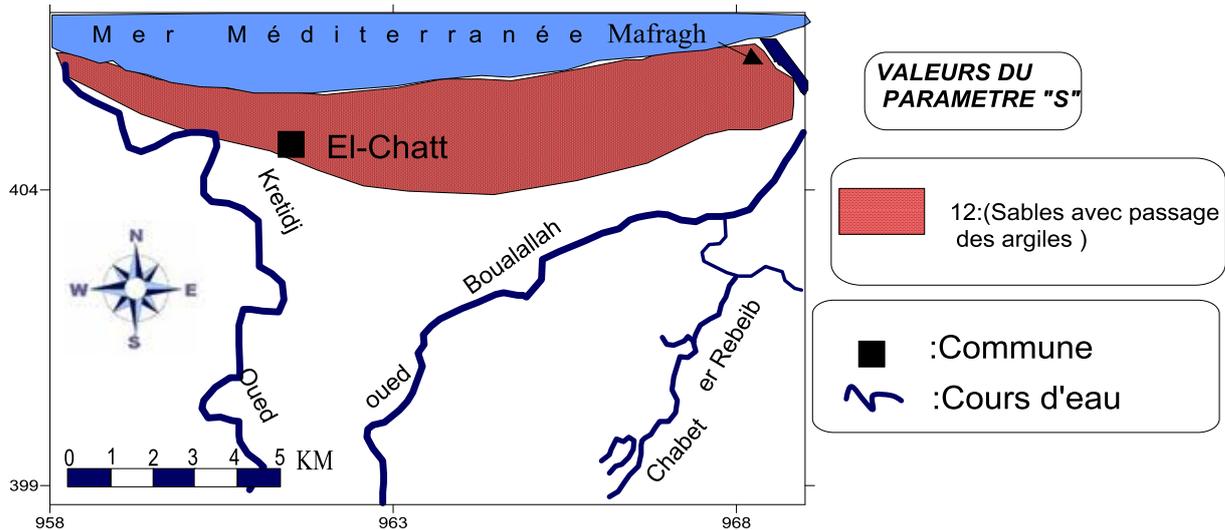


Fig.39: Carte du paramètre "S" : Nature lithologique de sol dela nappe du Cordon Dunaire

e. Le paramètre Topographie (T) ou pente des terrains

D'après la carte topographique de Bône N17(Annaba) au 1/50.000 on remarque que la zone d'étude est caractérisée par des pentes faibles (relativement plane), deux classes ont été observées :

-Une pente topographique inférieure à 2 %, où l'indice partiel est maximum (IT = 10) occupe presque toute la zone .

-Et une pente comprise entre 2 % et 6 %, où la topographie varie entre 20 et 42 m et l'indice partiel est de l'ordre de 9.

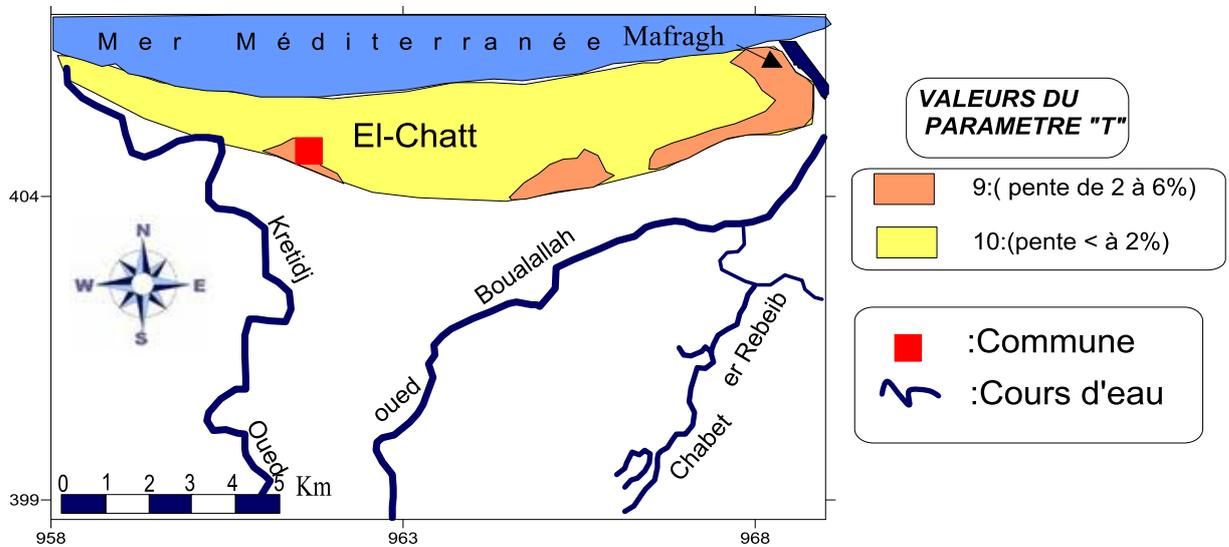


Fig.40: Carte du paramètre "T" pente de la nappe du Cordon Dunaire

f. Le paramètre " Zone non saturée (I)"

La carte de la lithologie de la zone non saturée présente une texture sableuse avec quelques passages d'argiles qui donnent un indice de l'ordre de 30 (**Fig.41**)

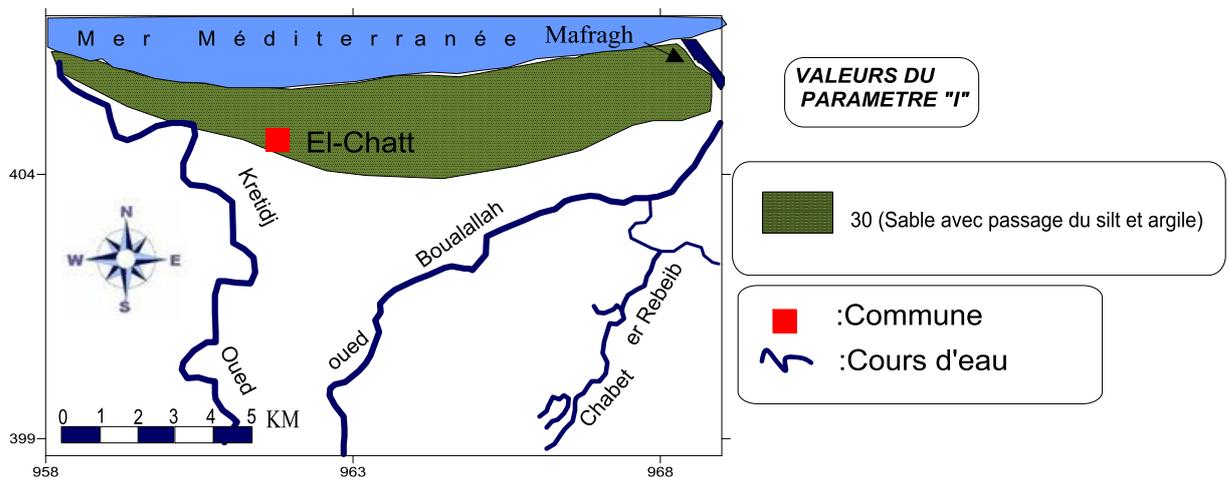


Fig.41: Carte du paramètre "I" impacte de la zone non saturée

g. Le paramètre "Conductivité hydraulique (C)"

D'après l'étude hydrogéologique de **Khérici 1993, Hani 2003**, cette nappe est caractérisée par une très bonne perméabilité compris entre 10^{-4} et 10^{-3} m/s qui correspond à un indice de l'ordre de 30(**Fig.42**)

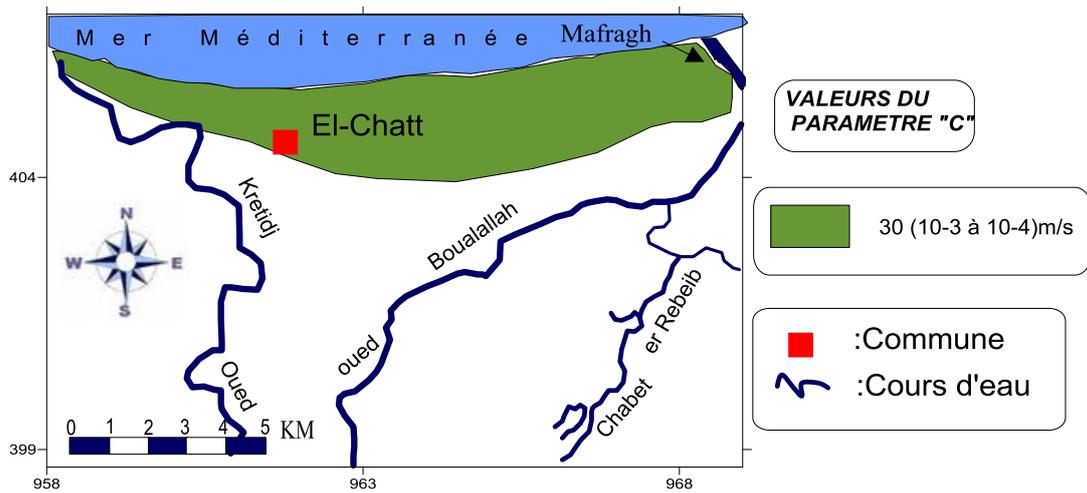


Fig.42: Carte du paramètre "C" Conductivité hydraulique

h. Interprétation de la carte de vulnérabilité à la pollution selon DRASTIC :

Le résultat de la superposition des sept paramètres précédents donne la carte de vulnérabilité à la pollution (**Fig.43**) ; elle identifie une vulnérabilité élevée marquée sur toute la nappe du cordon dunaire d'Echatt, qui est due à la bonne perméabilité et la texture de la zone non saturée, type de sol (Sables éoliens) conjuguée à la faible profondeur de la nappe (proche de la surface du sol) et à la faible pente qui assure une infiltration rapide vers la zone saturée .

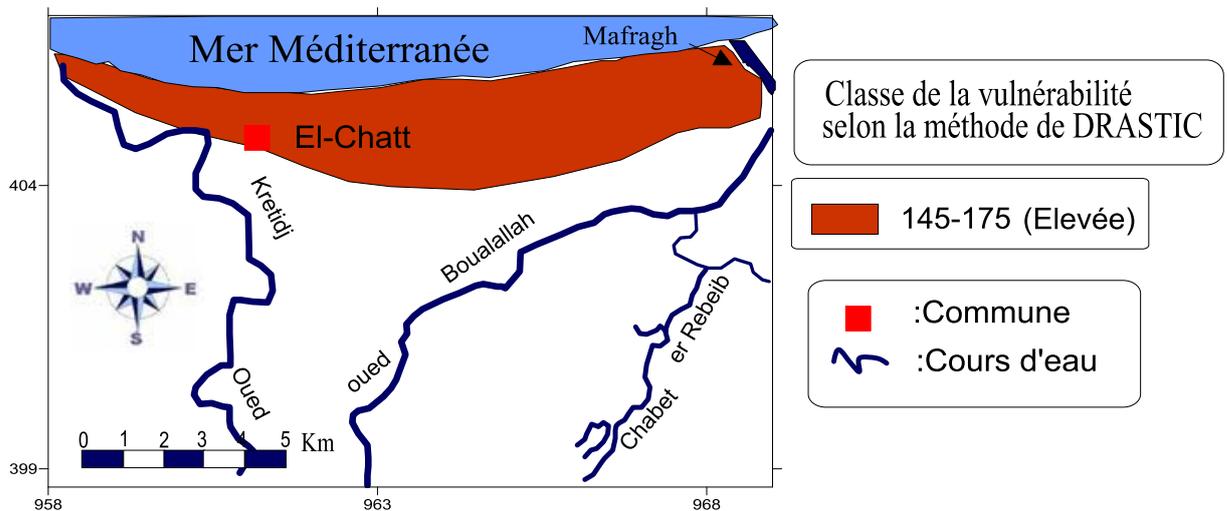


Fig.43 : Carte de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines de la nappe du Cordon Dunaire par l'application de la méthode DRASTIC

V.4-1-1-4. La Nappe d'El-Tarf :

a. Le paramètre "profondeur de l'eau (D)"

Le traçage de la carte de la hauteur de l'eau s'est basé sur les données des niveaux piézométriques (Hp) les plus pessimistes que possible durant plus d'une vingtaine d'année (2006-2012). D'après la carte des profondeurs de la nappe d'El-Tarf on note que la profondeur augmente du Nord vers le Sud, elle est comprise entre 1.5m au Nord et 15m au Sud de la plaine.

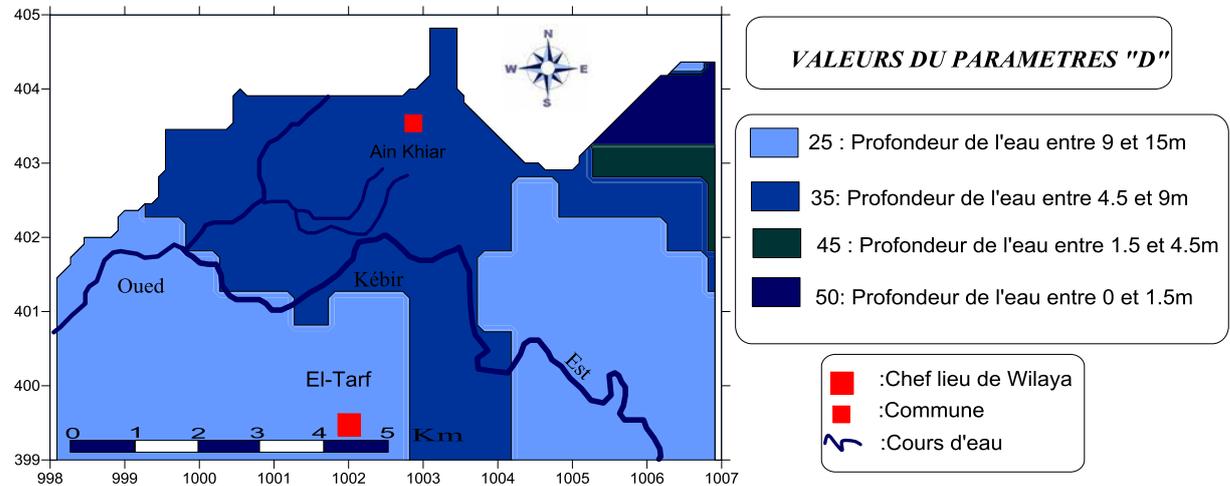


Fig.44: Carte du paramètre "D" Profondeur de la Nappe

b. Le paramètre "Recharge nette (R)"

La recharge moyenne annuelle dans la plaine d'El-Tarf est de l'ordre de 168mm (enregistrée au niveau de la station de Ain Assel) qui présente environ 20 % des précipitations annuelles) et de l'ordre de 146 mm (à la station de Bouteldja) qui correspond à environ 19.83% des précipitations annuelles moyennes interannuelles 1990-2009). L'établissement de la carte révèle deux classes: la première occupe la partie Nord de la plaine avec un indice de 32 et la deuxième présente un indice de 24 se localisant dans la partie Sud de la plaine.

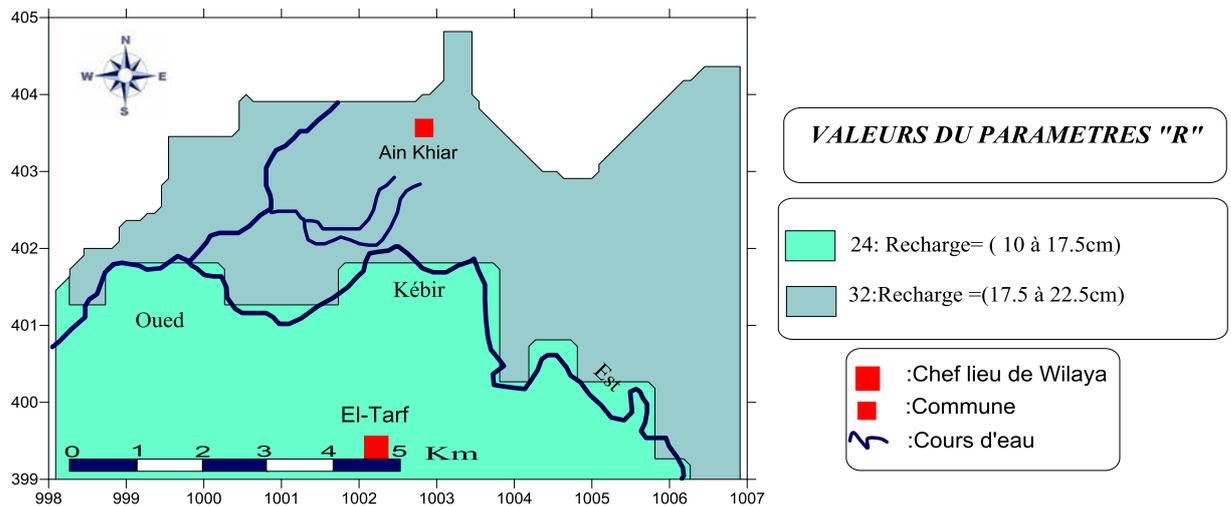


Fig.45: Carte du paramètre "R" Recharge

c. Le paramètre "Nature lithologique de l'aquifère (A)"

Une nappe aquifère est une formation géologique ou groupe de formations contenant de l'eau libre, qui peut être exploitée à travers les puits ou les sources pour des usages domestiques, industriels ou agricoles. La circulation et la propagation d'un contaminant dans la zone saturée dépendent de la texture et de la lithologie des couches de l'aquifère. Cela est toujours contrôlé par la granulométrie, la porosité, la perméabilité et la lithologie des formations géologiques. Le paramètre A est obtenu par corrélation litho-stratigraphique, puis par interpolation sur les données de forages. La répartition spatiale des niveaux réservoirs de la nappe d'El-Tarf montre trois classes lithologiques, les graviers, les sables, et les sables argileux, où on identifie deux faciès dominants, le faciès argilo-sableux qui occupe presque la totalité de la plaine et le faciès sablo-graveleux qui couvre une petite partie au centre de la plaine. (Fig46).

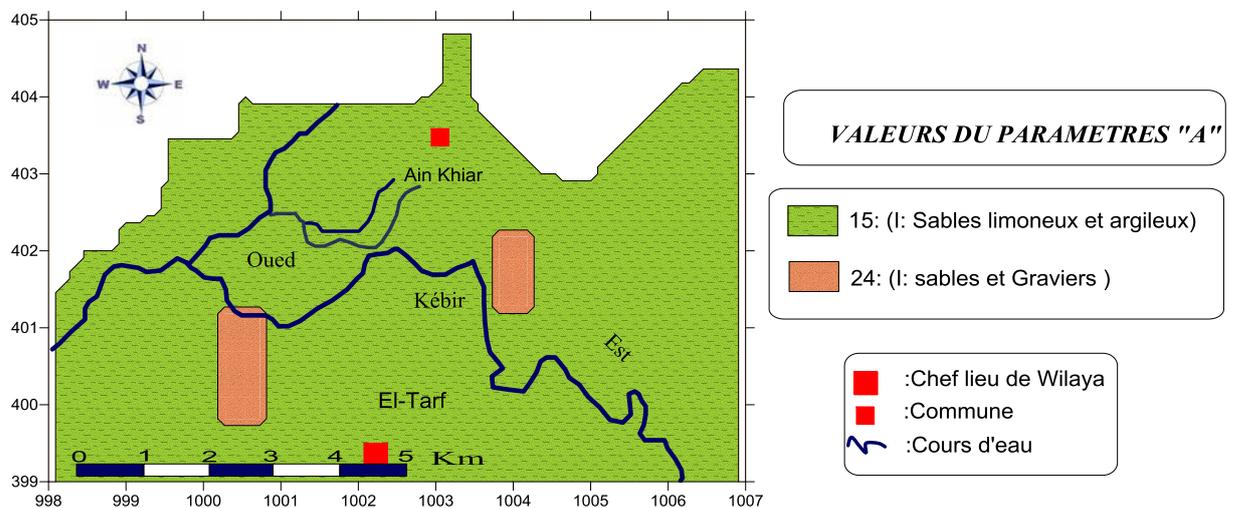


Fig.46: Carte du paramètre "A" : Nature lithologique de l'aquifère

d. Le paramètre "Nature du sol (S)"

Les caractéristiques du sol contrôlent les mouvements descendants des contaminants. En effet, la présence de matériaux fins (argiles, silts et limons) et de la matière organique dans le sol diminue la perméabilité intrinsèque, et retarde la migration des contaminants, par les processus physico-chimiques – adsorption, échange ionique, oxydation, biodégradation. La carte de répartition de type de sol dans la plaine d'El-Tarf (**Fig.47**) révèle trois types de sol :

- Sol limono-sableux: occupant presque la totalité de la plaine
- Sol argileux : occupant une surface très limitée au Sud –ouest de Ain khiair
- Sol sableux : qui représente une zone très limitée au Nord –est d'El –Tarf

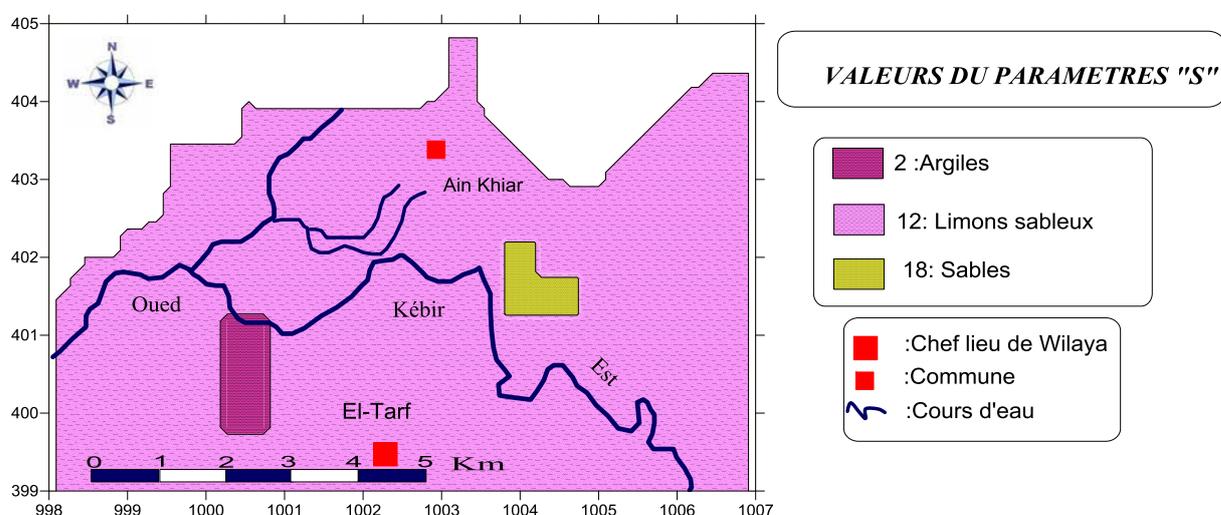


Fig.47: Carte du paramètre "S" : Nature lithologique de sol

e. Le paramètre Topographie (T) ou pente des terrains

La topographie indique si un polluant fuira ou restera à la surface du sol pour s'infiltrer dans la nappe. La couverture topographique de la région d'El-Tarf est obtenue à l'aide de la carte topographique à l'échelle 1/50 000. La carte des pentes (**Fig.48**) est montrée en trois classes :

- Pente supérieure à 18% : occupant la partie sud de la plaine et représentée aux pieds des montagnes qui entourent la zone.
- Pente à valeurs comprises 2 à 6%, bien marquée dans la zone d'étude occupant une très vaste surface.
- Pente à valeurs comprises entre 0 à 2 % qui couvre la partie Sud-ouest de la plaine.

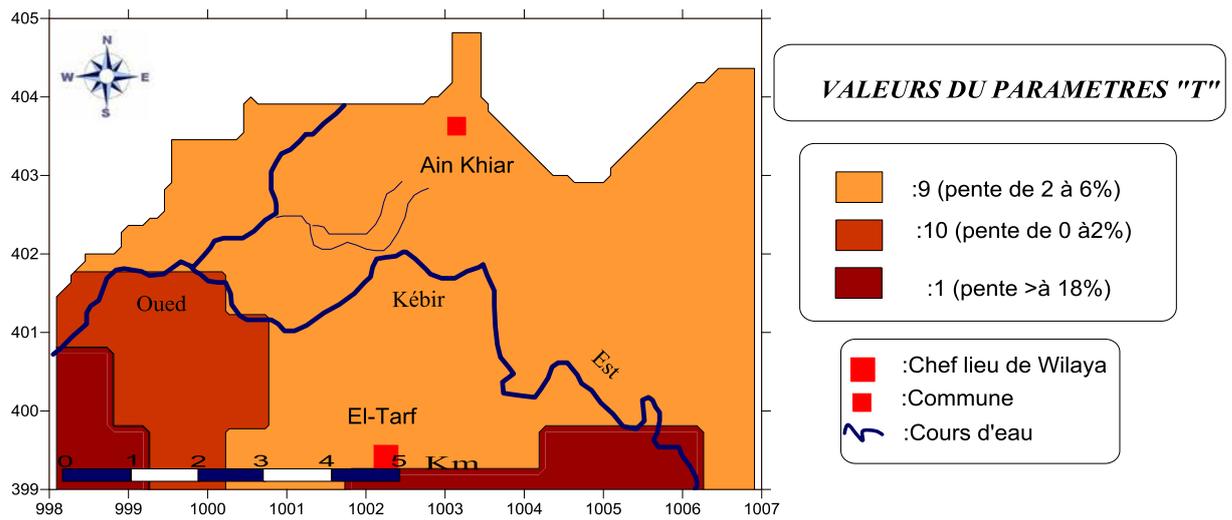


Fig.48: Carte du paramètre "T" pente

f. Le paramètre ‘ Zone non saturée (I) ’

La zone non saturée est définie comme la fraction entre le niveau piézométrique de la nappe et la surface du sol où les pores sont partiellement saturés en eau. La perméabilité de cette zone non saturée contrôle la circulation des polluants et leur arrivée à la nappe. La plupart des processus physicochimiques qui ont lieu dans cette zone sont influencés par son épaisseur. L'infiltration et la dispersion des contaminants sont guidées par les caractéristiques lithologiques des couches qui contrôlent leurs chemins et leurs trajectoires en subsurface. Ce paramètre est obtenu à partir de données de surface (couverture géologique) et de données de subsurface (données de forages). Cette carte montre la répartition spatiale des couches géologiques en affleurement. Les données de forages montrent la distribution, l'épaisseur et le pendage des couches géologiques en profondeur, après corrélation lithostratigraphiques. Ces deux types d'informations permettent d'avoir une carte de synthèse(**Fig.49**) représentant la lithologie de la zone non saturée. Les différentes formations obtenues sont :

- Sablo-argileuses : couvrant presque la totalité de la plaine avec un indice de 15.
- Argileuses : occupant une petite zone au Nord-Ouest d'El-Tarf avec un indice de 25.
- Sableuses : se localisant au Nord –est du chef lieu de wilaya et couvrant une surface très limitée avec un indice de 30.

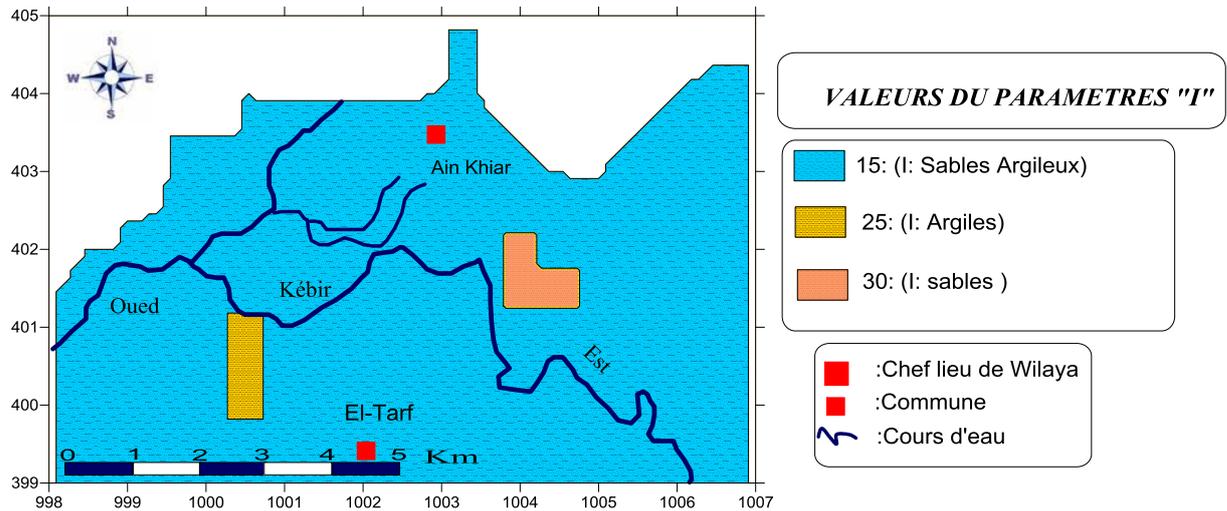


Fig.49: Carte du paramètre "I" impacte de la zone non saturée

g. Le paramètre "Conductivité hydraulique (C)

La conductivité hydraulique désigne la capacité, des formations géologiques de l'aquifère, à transmettre de l'eau. Elle contrôle la migration et la dispersion des contaminants du point d'injection à la surface jusqu'à la zone saturée et, par conséquent, leurs concentrations dans la nappe aquifère. La conductivité hydraulique est obtenue par affectation d'un coefficient de perméabilité pour chaque classe lithologique. Ce facteur est obtenu par interpolation de données de forages et de piézomètres. D'après la carte (**Fig.50**) la variabilité spatiale de la conductivité hydraulique dans la nappe d'El –Tarf montre deux classes de perméabilité, indexées d'après le modèle DRASTIC, allant de 10^{-6} cm/s à 10^{-5} m/s .On note la présence de deux classes majeures en termes de surface. La première [$4.7 \cdot 10^{-5}$ m/s – $1.47 \cdot 10^{-4}$ m/s] est au centre de la plaine, couvrant une petite zone par rapport à la surface totale, la deuxième [$7 \cdot 10^{-7}$ m/s à $7 \cdot 10^{-9}$ m/s] qui couvre presque la totalité de la zone d'étude.

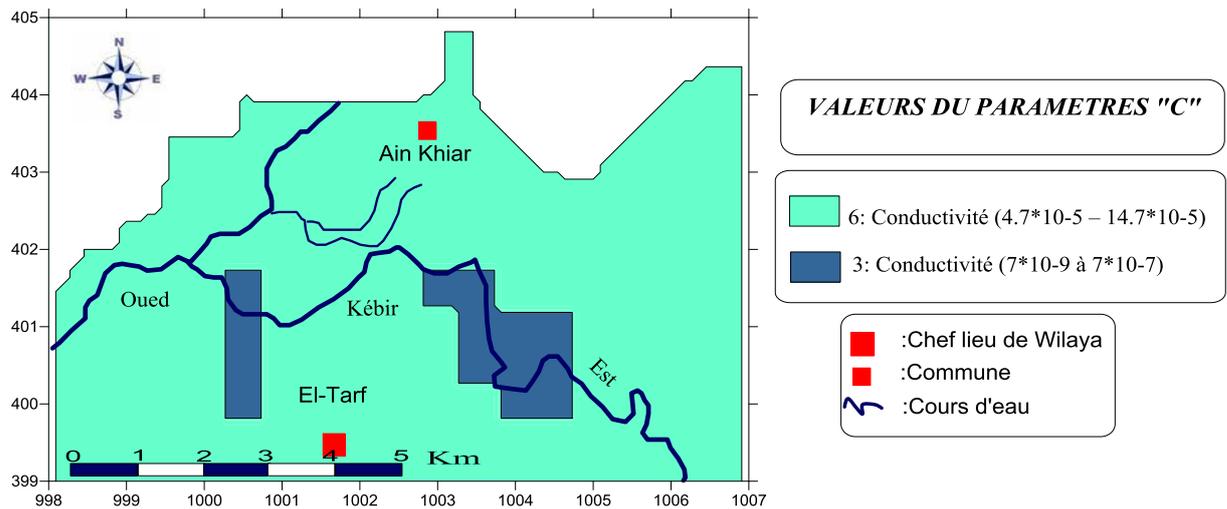


Fig.50: Carte du paramètre "C" Conductivité hydraulique

h. Interprétation de la carte de vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines de la nappe d'El Tarf selon DRASTIC :

L'observation de la carte de vulnérabilité à la pollution des eaux de la plaine d'El-Tarf selon la méthode DRASTIC identifie des indices qui oscillent entre 84 et 145 et représentant ainsi deux classes réparties comme suit :

- la classe « faible » traduisant une vulnérabilité faible à la pollution sur une superficie de l'ordre de 55 % de la zone cartographiée (**Fig.51-52**). Ce faible indice de vulnérabilité résulte de la texture de la zone non saturée sablo-argileuse, du degré de la pente assurant un bon ruissellement (évacuation) des eaux et de l'importance de la profondeur de la nappe.
- la classe « moyenne » se localisant au Nord et au Sud-est de Ain Khiair l'ouest et à l'est de la plaine, donne lieu à une pollution moins sévère et représente plus de 44 % de la superficie de la plaine étudiée. Le degré de vulnérabilité moyen est engendré par la profondeur moins marquée que celles du Sud.
- la classe « Elevée» occupe une surface très limitée qui présente moins de 11% de la plaine, cette forte vulnérabilité à la pollution des eaux est certainement due à la lithologie de la zone non saturée (sableuse) et la faiblesse de la profondeur du niveau piézométrique dans cette région.

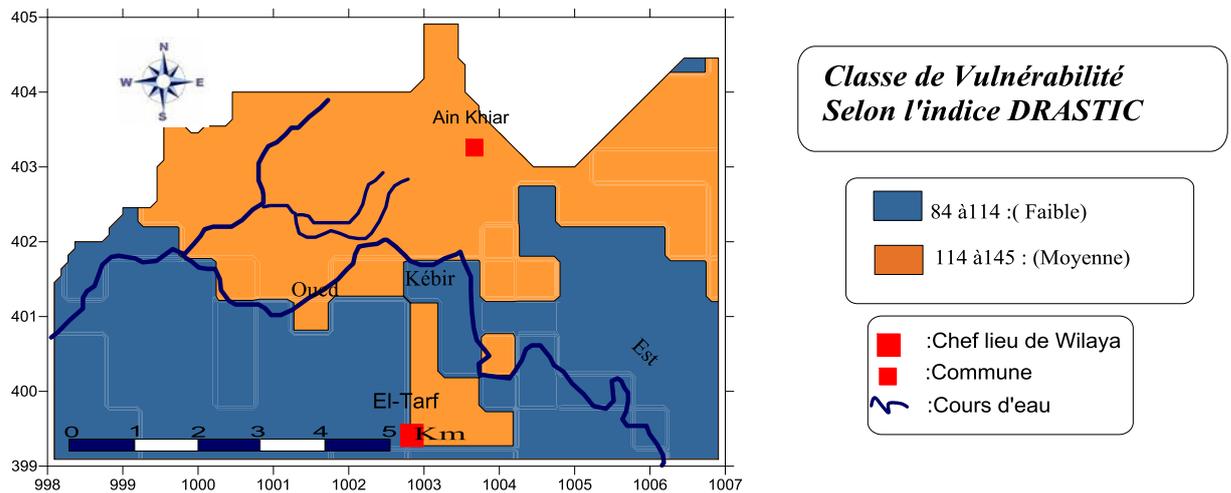


Fig.51: Carte de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines de la plaine d'El-Tarf par l'application de la méthode DRASTIC

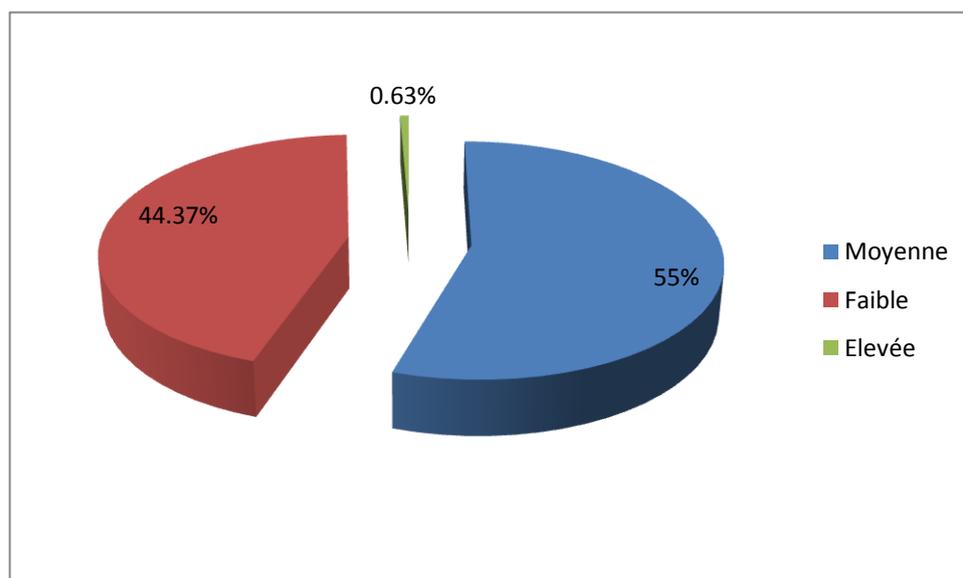


Fig.52 : Répartition des degrés de vulnérabilité à la pollution des eaux de la plaine d'El-Tarf selon DRASTIC

V.4-2. APPLICATION DE LA METHODE DE « GOD » :

Bien que ce soit une méthode de systèmes paramétriques, la méthode GOD nécessite moins de paramètres que DRASTIC. La méthode GOD a été conçue en Angleterre par Foster (1987). L'appellation de la méthode provient de l'Acronyme suivant:

- Groundwater occurrence (type l'aquifère);

- Overall aquifer class (caractéristiques de l'aquifère en termes de lithologie et de porosité);
- Depth to groundwater table (profondeur de la nappe).

Les éléments nécessaires pour le schéma de protection des eaux souterraines et pour la classification de la vulnérabilité des aquifères sont, selon cette méthode: le type de sol, les formations géologiques de la zone non saturée et la profondeur de la nappe. Contrairement à DRASTIC, les paramètres ne subissent aucune pondération.

L'indice de vulnérabilité (I) est obtenu selon l'équation suivante :

$$I = Ca * Cl * Cd$$

Dont Ca = cote du type d'aquifère; le Cl = cote de la lithologie,

et enfin le Cd = cote de la profondeur de la nappe. La vulnérabilité à la pollution augmente avec l'indice et la classification qui se fait en cinq catégories, allant de 0 à 1.

V.4-2-1-Description des paramètres et réalisation des cartes thématiques

V.4-2-1-1.Nappe d'Annaba :

a. Paramètre « G » type de l'aquifère :

D'après les logs des forages et des études faites sur la région, on observe qu'il existe deux type de nappes, l'une semi-perméable (superficielle) et l'autre captive se séparant par une couche d'argiles, cette dernière disparaît au Sud où les deux nappes précédentes se confondent pour donner une nappe libre. De cette configuration on distingue deux types d'indice :

-l'un de l'ordre de 0.5 occupant presque la totalité de la plaine

Et l'autre de l'ordre de 0.7 observé très limité au niveau de la nappe libre au sud de la commune de Dréan.

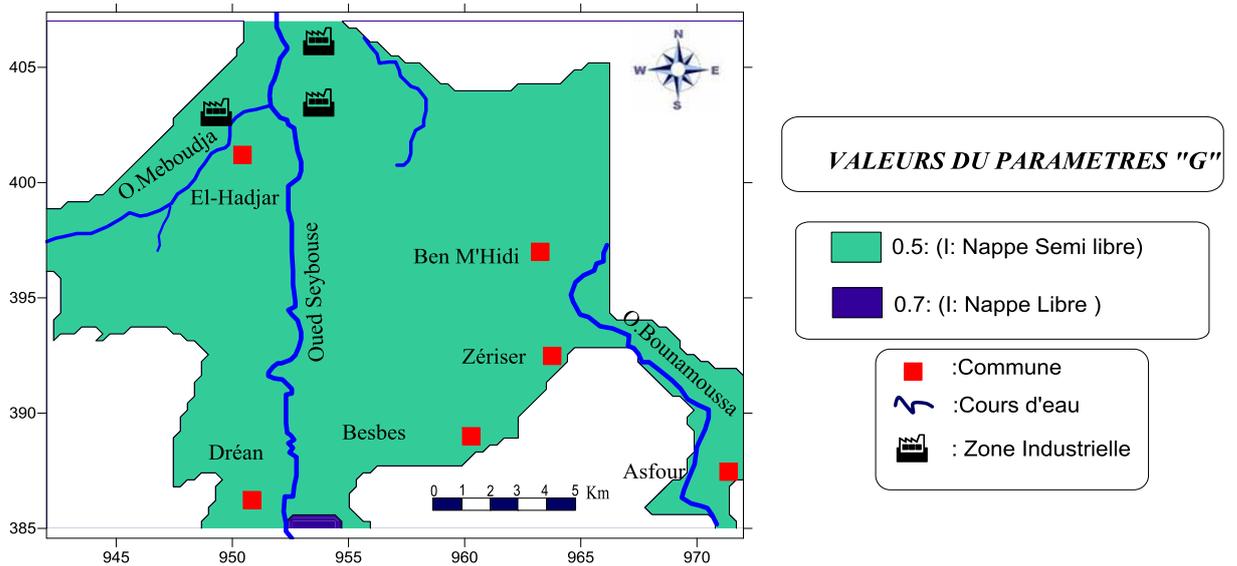


Fig.53: Carte du paramètre "G" type d'aquifère de la plaine d'Annaba

b. Paramètre « O » Nature lithologique de la ZNS :

La carte de la lithologie de la zone non saturé (ZNS) montre la présence de trois classes :

- la première présente des formations sablo-argileuses occupant la majorité de la surface de la plaine avec un indice de 0.5.
- la deuxième représentant les formations sablo-argileuses, argileuses et graveleuses couvrant une partie au sud de Besbes , Asfour et Dréan avec un indice de 0.7.
- la dernière classe identifiant les formations sableuses et graveleuses occupe une surface très limitée au sud de Dréan avec un indice de 0.8.

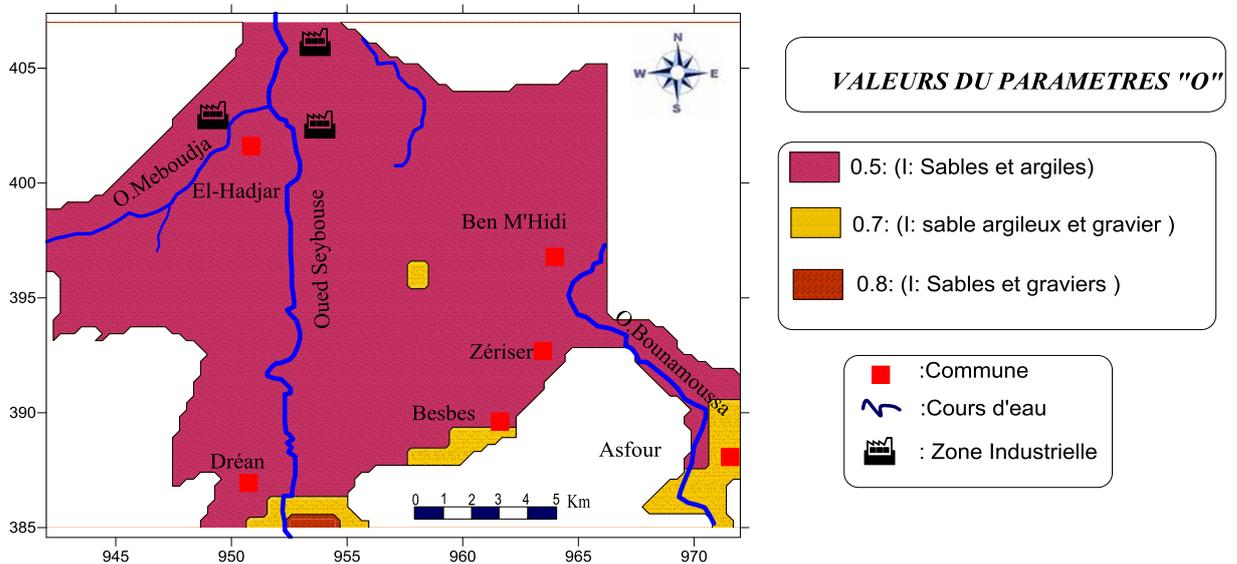


Fig.54: Carte du paramètre "O" nature lithologique de la ZNS de la plaine d'Annaba

c. Paramètre « D » profondeur de la nappe :

D'après la carte (**Fig.55**) trois classes ont été remarquées :

-Classe1 : cette classe occupe la région d'El-Hadjar ,Dréan, Besbes et , Asfour avec une profondeur allant de 10m à20m avec un indice ID = 0.7

-Classe 2 : présente des profondeurs allant de 5m à 10m avec un indice ID = 0. 8 cette classe est située dans la partie centrale de la zone d'étude.

-Classe 3 : elle caractérise la partie Nord de la plaine, la profondeur de cette classe est comprise entre 2-5m avec un indice ID= 0.9.

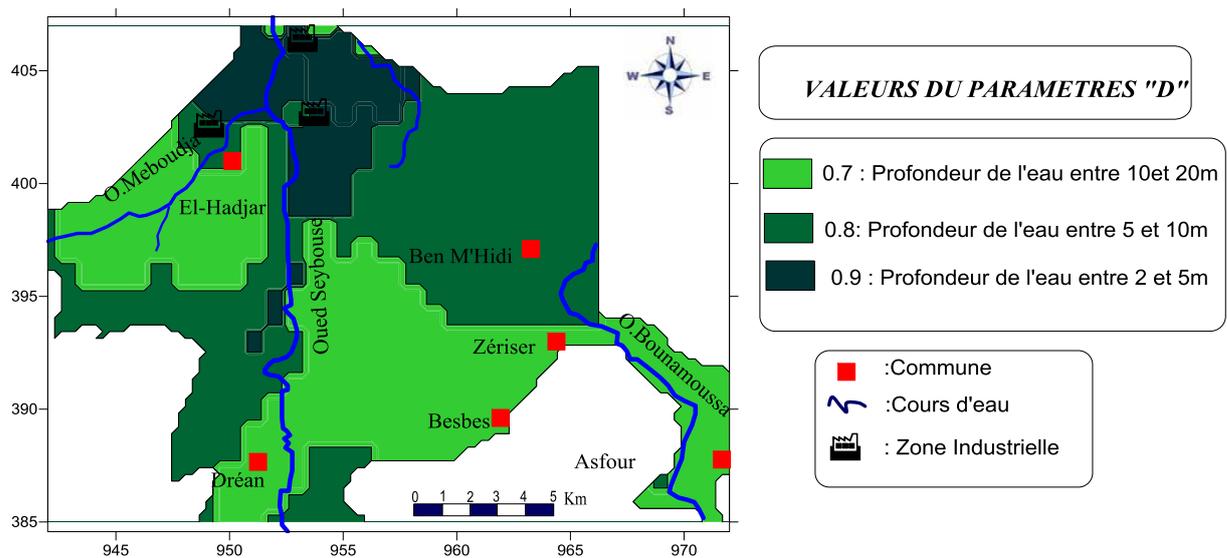


Fig.55: Carte du paramètre "D" profondeur de la nappe d'Annaba

d. Interprétation de la carte de vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines de la nappe d'Annaba selon GOD :

Les Zones de vulnérabilité moyenne, faible et très faible ont été mises en évidence par la méthode GOD et traduisent le degré de vulnérabilité auquel est soumise la nappe de Annaba. Cette vulnérabilité croît du centre vers le Sud, Sud-Ouest et Sud-Est. L'analyse de ces zones révèle trois classes de vulnérabilité à la pollution.(**Fig56**).

-la classe "Très faible " : cette classe s'observe au centre de la zone d'étude et affirme une pollution moins sévère en cas de contamination de la nappe. Elle représente environ 34 % de la zone d'étude. Elle serait due aux profondeurs de la nappe comprises entre 10 et 20 m dans cette partie et à la nature de la zone non saturée constituée de sables moyens argileux.

-la classe "Faible " : cette classe s'observe rencontre dans la partie Nord-Ouest et Sud de la zone avec une proportion plus importante que la classe très faible, soit de l'ordre de 65%.. Elle serait due également à des profondeurs de la nappe comprises entre 5 et 10m.

-la classe "Moyenne": c'est la classe la moins répandue de cette méthode GOD dans la région de Annaba. Elle se retrouve préférentiellement dans la partie Sud de la commune de Dréan , elle présente une surface très limité moins de 1 %. La distribution spatiale de cette classe s'expliquerait par la nature lithologique de la zone non saturée constituée de sables graveleux favorables à l'infiltration d'un polluant.

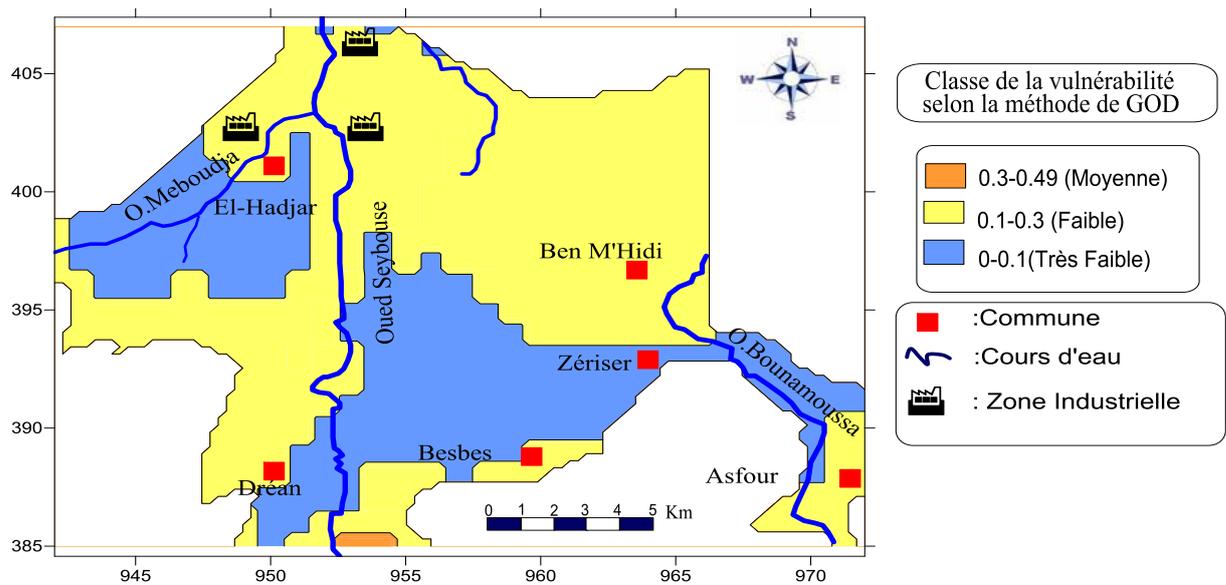


Fig.56: Carte de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines de la plaine d'Annaba par l'application de la méthode de GOD

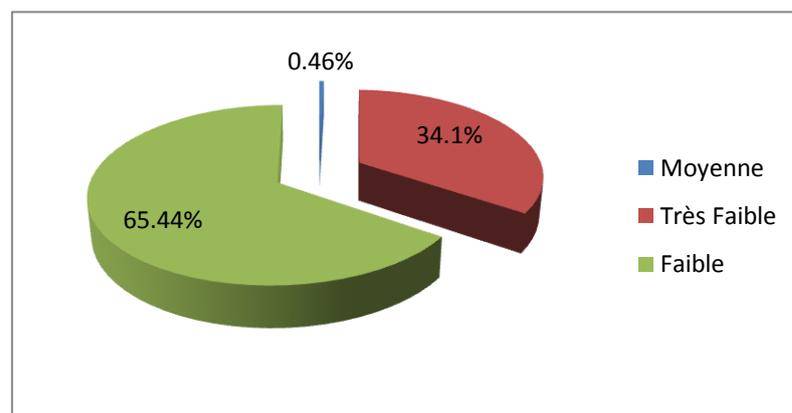


Fig.57 : Répartition du degré de vulnérabilité à la pollution des eaux de la plaine d'Annaba selon GOD

V.4-2-1-2. Le Massif Dunaire de Bouteldja :

a. Le paramètre "G" (Fig.58)

L'étude hydrogéologique a montré la présence de deux nappes dans la région de Bouteldja révélant ainsi la présence de deux classes :

-classe 1 : occupe toute la nappe des graviers (nappe profonde) qui donne le caractère confiné à la nappe présentant un indice IG = 0.2

-classe 2 : caractérise toute la nappe des sables (nappe libre) avec un indice IG = 0.7

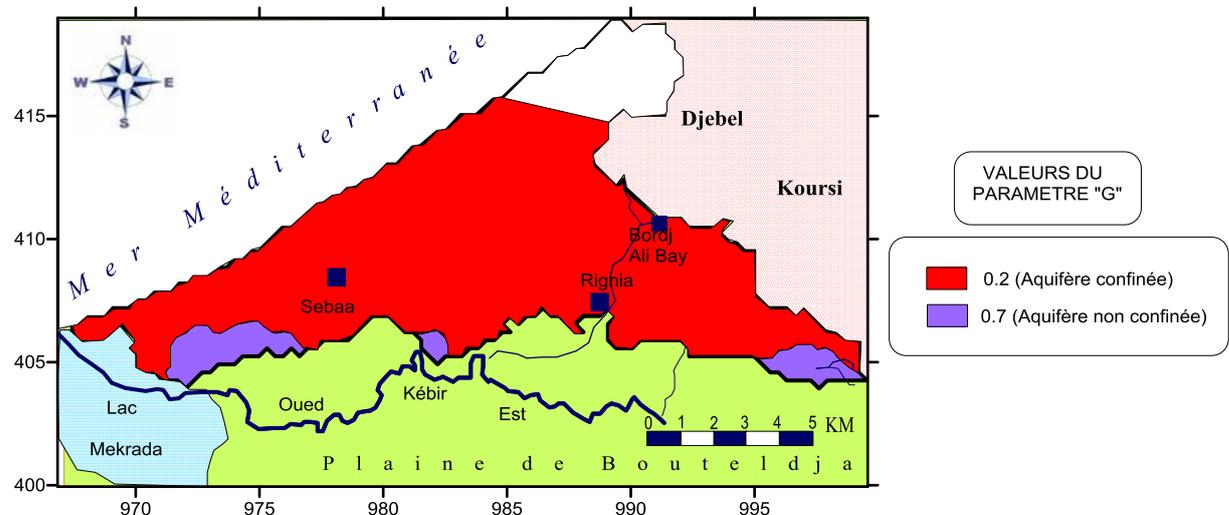


Fig.58: Carte du paramètre "G" type d'aquifère du massif dunaire

b. Le paramètre "O" (Fig.27)

La carte de la lithologie de la zone non saturée montre la présence de deux classes ;

-classe 1 : elle est située dans la plaine de Bouteldja constituée essentiellement par des argiles dont où son indice IO= 0.5, ce qui empêche l'infiltration des polluants vers l'aquifère.

-classe 2 : elle occupe tous le massif dunaire avec une lithologie de la zone non saturée formée par des sables et des graviers donnant un indice IO = 0.7.

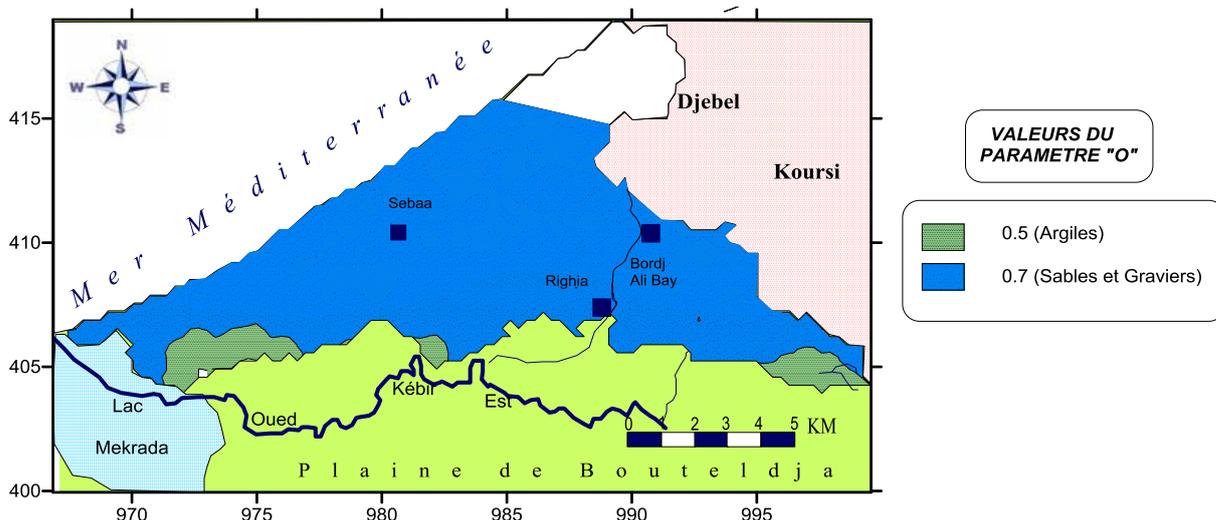


Fig.59: Carte du paramètre "O" nature lithologique de la ZNS

c.Le paramètre "D" (Fig. 60)

Cinq classes ont été observées ;

-classe 1 : cette classe occupe toute la plaine de Bouteldja où la profondeur est relativement importante oscillant entre 50m et 78m, avec un indice ID = 0.5. La présence d'une profondeur importante suppose que les polluants prennent un temps plus long pour atteindre l'aquifère.

-classe 2 : présente des profondeurs allant de 20m à 50m avec un indice ID = 0.6, cette classe est située dans la partie centrale de la zone d'étude.

-classe 3 : elle caractérise la partie Sud du massif dunaire, la profondeur de cette classe est comprise entre 10-20m avec un indice ID= 0.7.

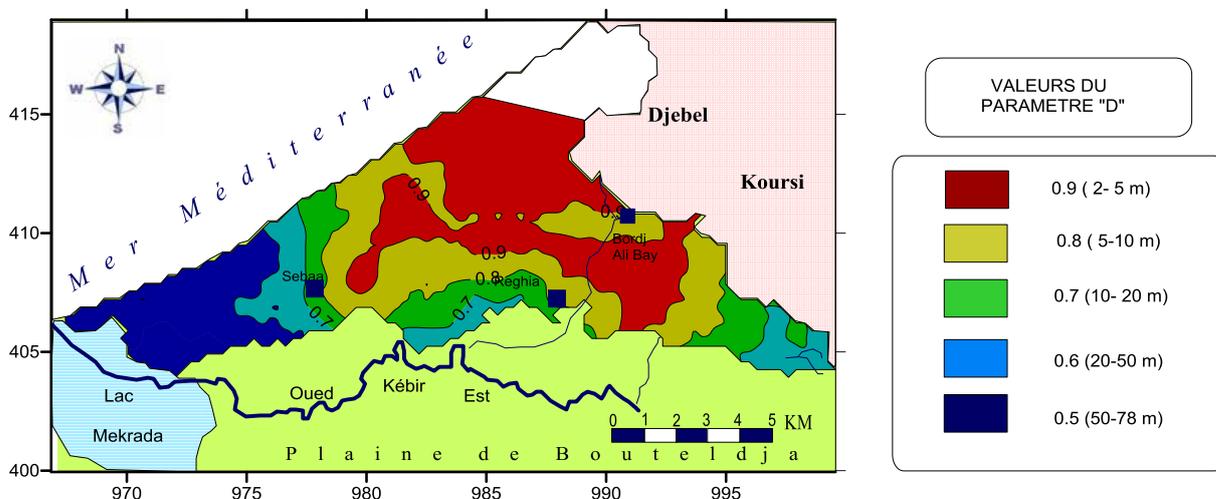


Fig.60: Carte du paramètre "D" profondeur de la nappe

d. Interprétation de la carte de vulnérabilité à la pollution des eaux, établie par la méthode GOD

La cartographie de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines de la région de Bouteldja par la méthode de GOD a permis de trouver 3 classes (Fig61):

-classe à vulnérabilité très faible : elle occupe la partie sud de la plaine du massif de Bouteldja, présente des couches de la zone non saturée formées essentiellement par des argiles qui limitent le risque d'infiltration des polluants vers la nappe souterraine. Cette classe est caractérisée par des profondeurs importantes allant de 50 à 78m, ainsi les polluants prennent un temps de séjour plus long pour atteindre la nappe souterraine. L'indice total est l'ordre de 0.1.

-classe à vulnérabilité faible : cette classe est caractérisée par des formations sableuses et argileuses, où l'indice global est compris entre 0.1 et 0.3 avec des profondeurs des niveaux piézométriques de l'ordre de 20m. Cette classe occupe la partie centrale de la zone d'étude ainsi qu'au voisinage de l'Oued Mafragh.

-classe à vulnérabilité moyen : cette classe située dans la partie Nord du massif dunaire, la prédominance des fractions sableuse à graveleuse facilite l'infiltration des polluants vers la nappe souterraine, l'indice globale varie de 0.3 à 0.5 avec des faibles profondeurs de la nappe/sol. .

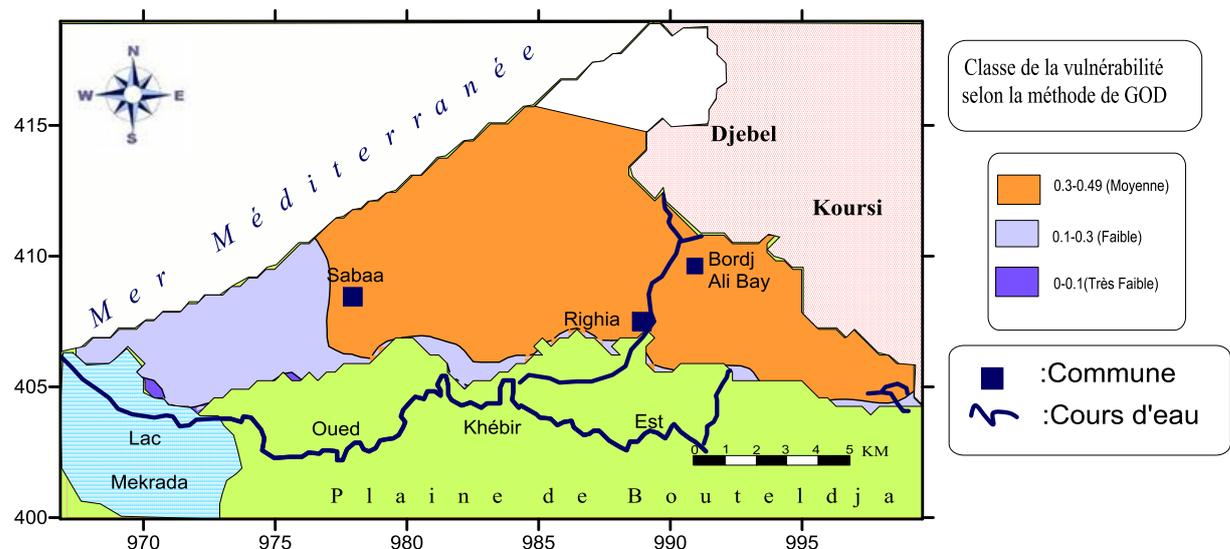


Fig.61 : Carte de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines du massif dunaire par l'application de la méthode de GOD.

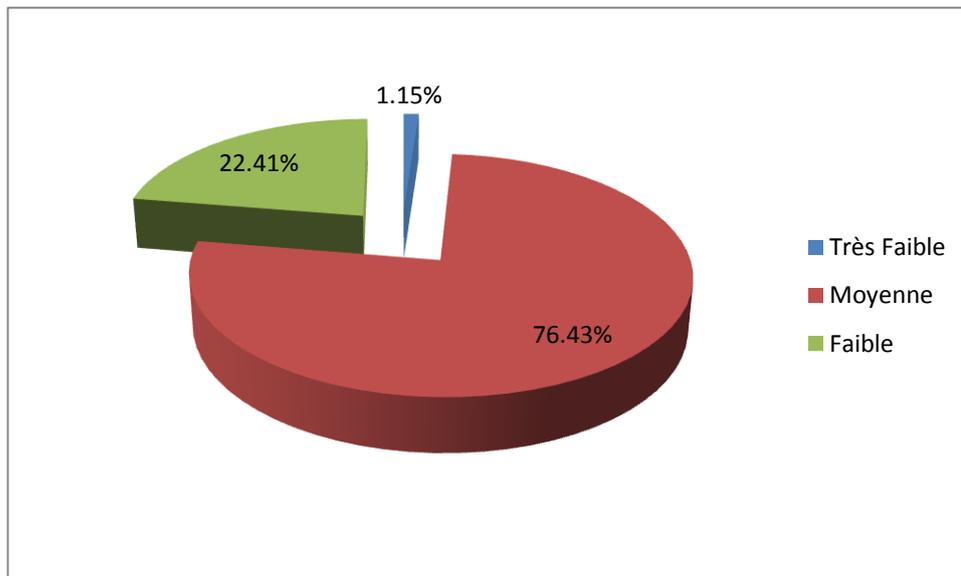


Fig.62 : Répartition du degré de vulnérabilité à la pollution du Massif Dunaire de Bouteldja selon GOD

V.4-2-1-3.La Nappe du Cordon Dunaire :

a. Paramètre "G" type d'aquifère :

D'après la géologie, et la carte hydrogéologique, la nappe du cordon dunaire d'El-Chatt est formée essentiellement par des sables perméables qui donnent naissance à une nappe libre avec un indice de 0.7.

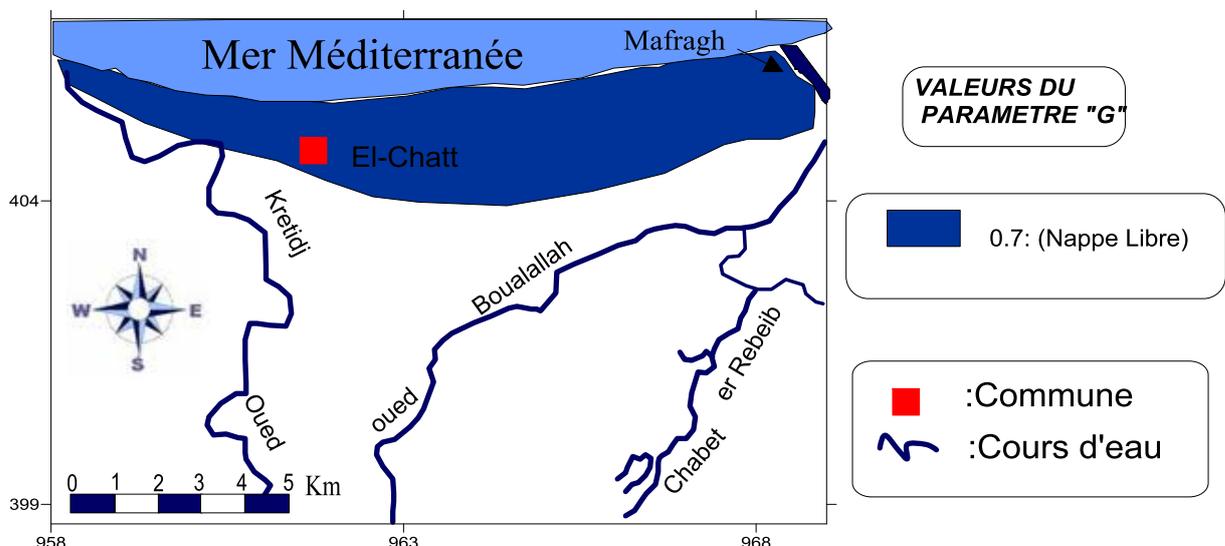


Fig.63: Carte du paramètre "G" type d'aquifère du cordon dunaire

b. paramètre "O" nature lithologique de la ZNS :

La lithologie de la zone non saturée de la nappe du cordon dunaire d'El-Chatt est formée principalement par des sables éoliens avec un indice de 0.6.

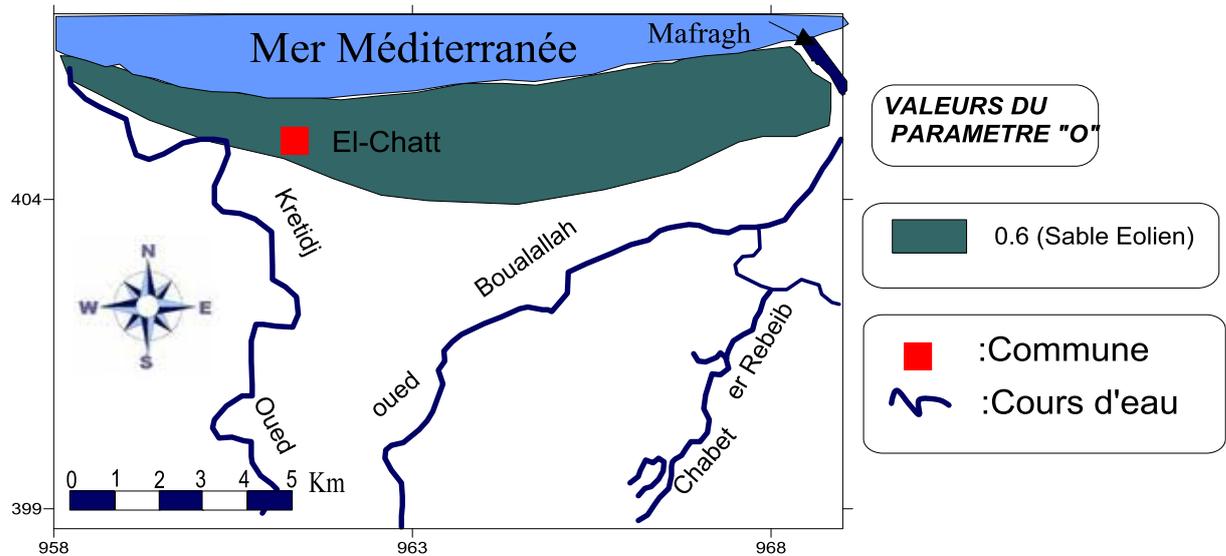


Fig.64: Carte du paramètre "O" nature lithologique de la ZNS

c. paramètre "D" profondeur de la nappe :

La nappe libre du cordon dunaire d'El-Chatt est exploitée essentiellement par des puits domestiques destinés à l'alimentation en eau potable. D'après la carte figure 65 deux classes ont été localisées :

-une classe occupe toute la nappe du cordon dunaire d'El-Chatt avec une profondeur allant de 2m à 5m avec un indice ID = 0.9. La présence d'une profondeur faible favorise la contamination rapide de l'aquifère. - l'autre classe caractérise la partie Sud-ouest de la nappe où la profondeur du niveau piézométrique est comprise entre 5-10m avec un indice ID= 0.7.

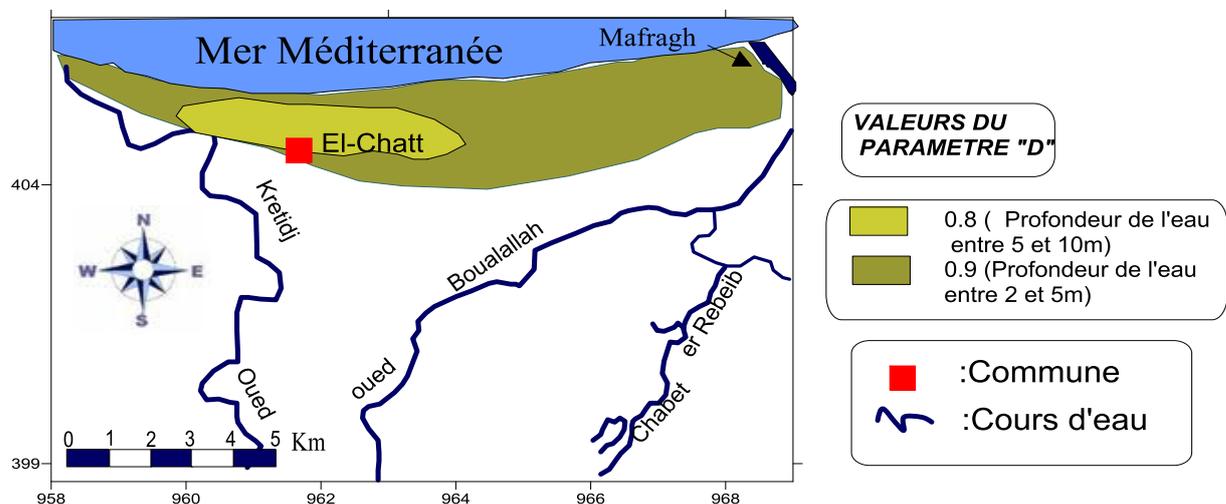


Fig.65: Carte du paramètre "D" profondeur de la nappe

d. Interprétation de la carte de vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines établie selon la méthode GOD

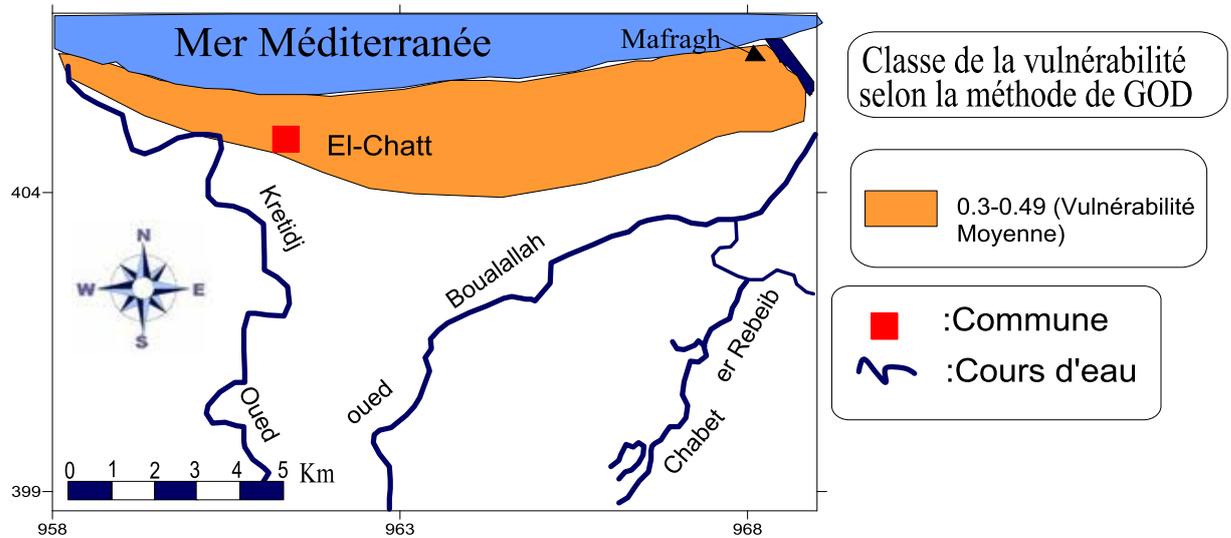


Fig.66 : Carte de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines du cordon d'El-Chatt dunaire selon la méthode GOD.

La répartition spatiale des différentes classes de vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines au niveau de la nappe du cordon dunaire, montre que le degré de vulnérabilité moyen occupe la totalité de la superficie de la nappe. Cet état s'explique d'une part par la faiblesse de la profondeur du niveau piézométrique et d'autre part par la nature sableuses perméables des formations lithologiques.

V.4-2-1-4. La Nappe de la plaine d'EL-Tarf :

a. Paramètre "G" type d'aquifère :

La carte (**Fig.67**) du paramètre type de la nappe a été élaborée d'après les données des logs lithologiques des forages et des coupes hydrogéologiques de la plaine d'El-Tarf , elle fait sortir trois types de nappes :

-Nappe semi libre : caractérisée par une formation sablo-argileuse et occupe presque la totalité de la plaine avec un indice de 0.5.

-Nappe libre : occupant une petite partie au Sud de Ain khiar, d'une lithologie composée par la combinaison de sables de graviers, qui présente un indice de 0.7.

-Nappe Captive : occupe une surface limitée située au Nord-ouest du chef lieu de la commune (EL-Tarf), où son toit est formé par des argiles et contenue dans des sables et graviers , ce qui lui confère un indice de 0.7 .

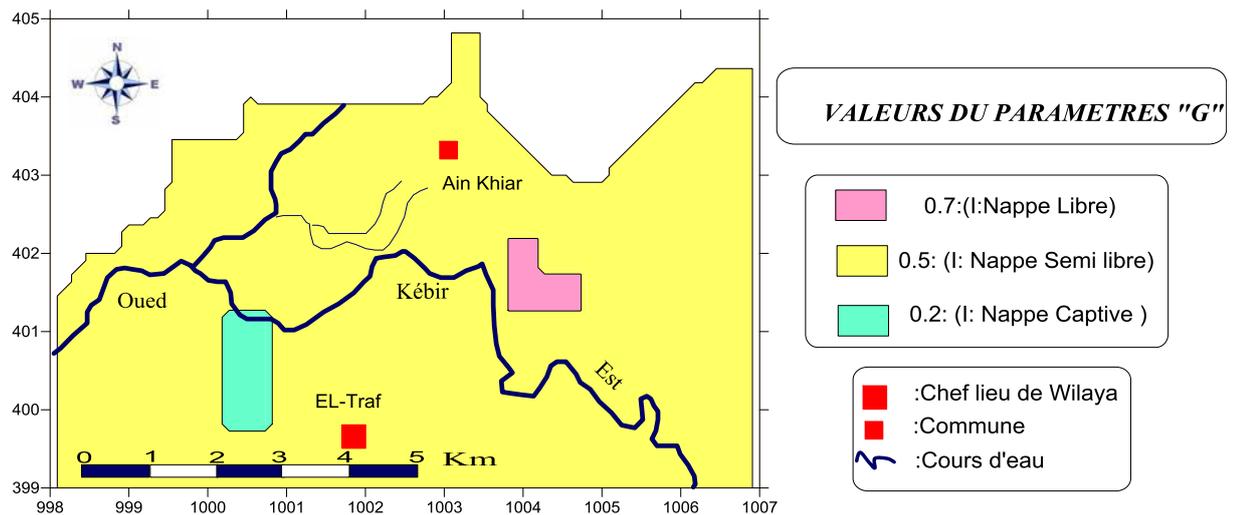


Fig.67: Carte du paramètre "G" type d'aquifère

b.paramètre "O" nature lithologique de la ZNS :

D'après la carte (**Fig.68**) de la nature lithologique de la zone non saturée réalisée à

partir des données de forages occupant la plaine, on observe deux types de formations :

-L'une sablo-argileuse : occupant presque toute la plaine avec un indice de l'ordre de 0.5

-L'autre sableuse : se localisant au Sud-est de Ain khiair et présentant un indice de 0.6.

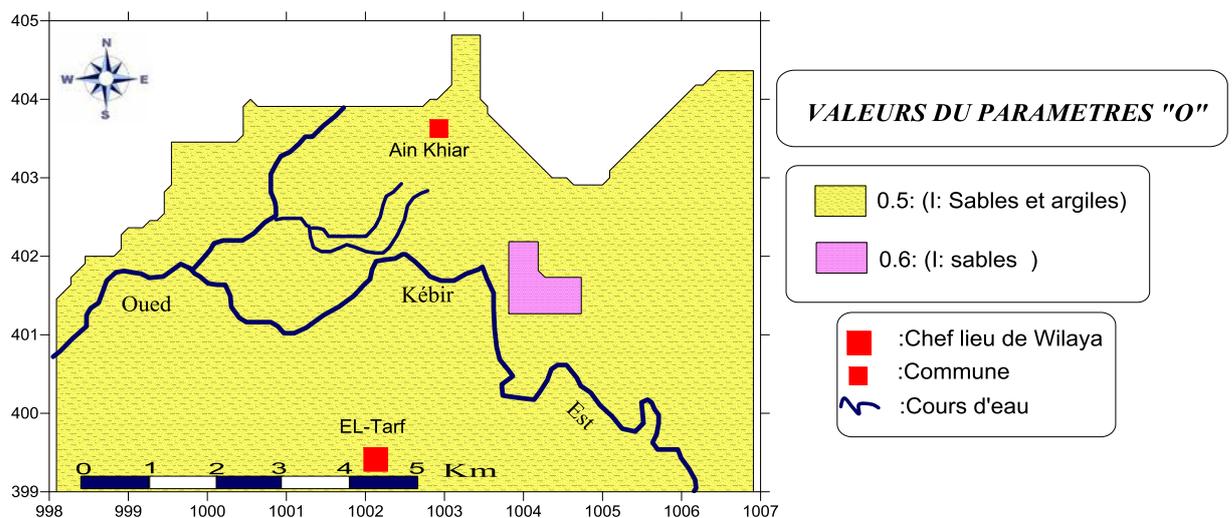


Fig.68: Carte du paramètre "O" nature lithologique de la ZNS

c.paramètre "D" profondeur de la nappe :

D'après les données piézométriques de la plaine faites en 2004 et 2012 nous avons

réalisé la carte des profondeurs de la nappe, qui fait sortir quatre classes :

- Une première classe qui occupe la partie Nord-est et Sud –ouest d’Ain khiar avec une profondeur inférieure à 2m
- La deuxième classe couvre la partie Sud-est de Ain Khiar et le Nord-est de la commune d’El-Tarf et présente une profondeur compris entre 2 à5m.
- La troisième classe occupe la partie Sud -est d’Ain khiar avec un indice de 0.7 où le niveau piézométrique se situe entre 10 et 20 m.
- La quatrième classe s’étend sur sur la majorité de la superficie de plaine d’El Tarf et présente un indice de 0.8 où les profondeurs du niveau piézométrique se situent entre 5 et10 m.

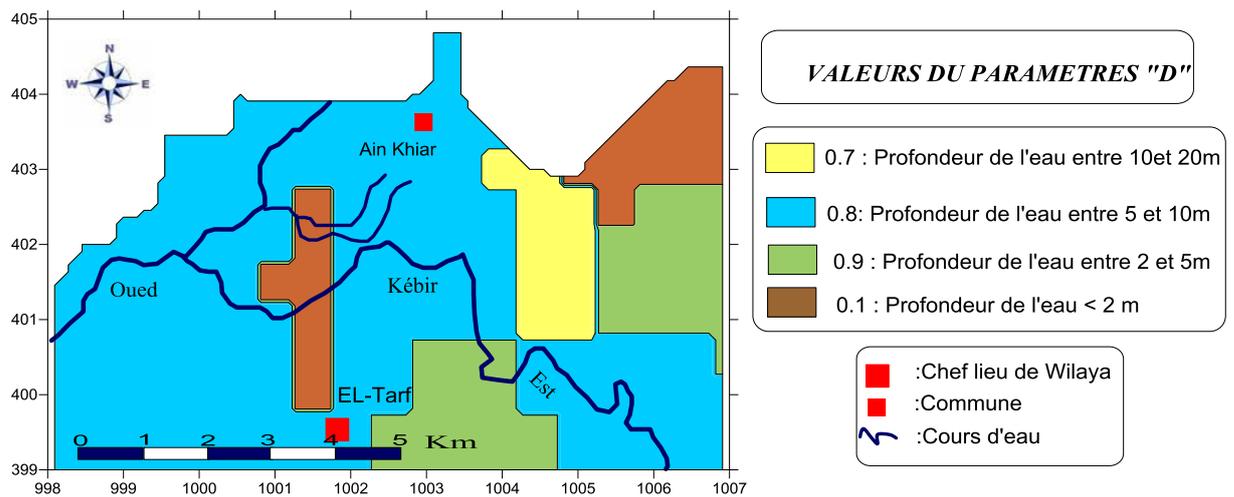


Fig.69 : Carte du paramètre "D" profondeur de la nappe

d. Interprétation de la carte de vulnérabilité à la pollution des eaux selon la méthode de GOD :

Après la superposition des trois cartes qui résume les paramètres de GOD nous avons élaboré la carte de vulnérabilité(**Fig.70**), où nous pouvons identifier trois classes :

- Une classe très faible : couvre une partie limitée et présente 1.5% de la surface totale, où la zone non saturée est formée par des argiles qui limitent l’infiltration du polluant vers la zone saturée.
- Une classe faible occupe presque toute la plaine et présente 97% (**Fig.71**) de la surface totale, cette faiblesse est due à la lithologie de la zone non saturée composée de sables argileux.
- Une classe de moyenne vulnérabilité : occupe la partie Sud-est de Ain khiar (la nappe devient libre), où la zone non saturée est formée par des textures sableuses.

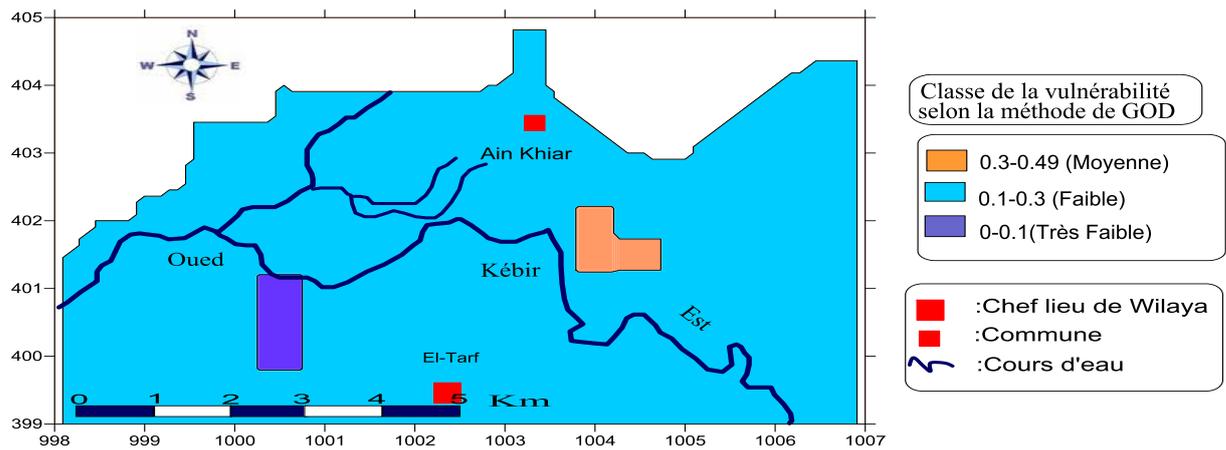


Figure.70 : Carte de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines de la nappe de la plaine d'El-Tarf selon la méthode de GOD.

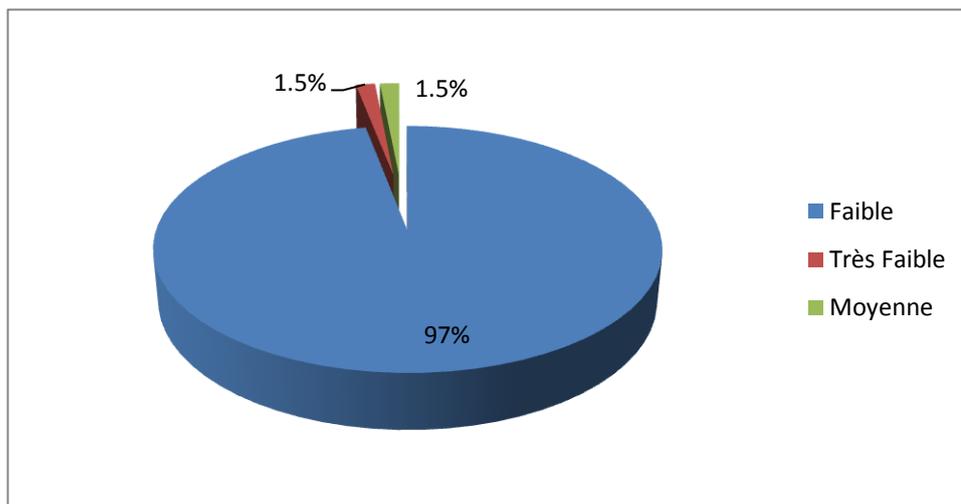


Figure.71 : Répartition du degré de vulnérabilité à la pollution de la nappe d'El-Tarf selon GOD

V.4-3. Application de la méthode de vulnérabilité et risque de pollution (Khérici,2010) :

V.4-3-1- Réacteur sol -zone non saturée - nappe :

Dans le cas général, la coupe transversale d'un sol est la suivante :

- ◆ Une première couche organique de quelques centimètres à quelques décimètres d'épaisseur qui est le siège d'activité biologique et physico-chimique intense. Elle permet une épuration totale pour une épaisseur $H > 1.2m$ (Detay 1997, Rehse 1977, Khérici 1993,

Bousnoubra 2002), lui attribuant d'ailleurs un coefficient d'autoépuration élevé de l'ordre ($i=1/H=0.8$, **Tab.21**) c'est la partie du sol exploitée par les racines des plantes.

◆ Une zone de transfert vertical de pollution en milieu poreux non saturée, où les indices de l'autoépuration(**Rehse 1977**) sont donnés en fonction de l'épaisseur des couches et de leur nature lithologique.

◆ Une zone de transfert horizontal où l'épuration se fait par dilution dans la nappe (zone saturée) suivant la vitesse d'écoulement

Tabl.21 : Pouvoir épurateur du sol dans la couverture (zone non saturée) (Rehse 1977)

| Description du matériau | H(m) |
|--------------------------------------------------------|-----------|
| Humus 5à10%, 5à10% argile | 1.2 |
| Argile, limon argileux , sable très argileux | 2.0 |
| Silt argileux à silt | 2.5 |
| Silt, sable silteux, sable peu silteux et peu argileux | 3.0 à 4.5 |
| Sable fin à moyen | 6.0 |
| Sable moyen à grossier | 10.0 |
| Sable grossier | 15.0 |
| Gravier silteux riche en sable et argile | 8.0 |
| Gravier peu silteux, beaucoup de sable | 12.0 |
| Gravier fin à moyen riche en sable | 25.0 |
| Gravier moyen à grossier, peu de sable | 35.0 |
| Galets | 50.0 |

H : épaisseur de la couche de sol nécessaire pour une épuration totale

Tabl. 22: Pouvoir épurateur du sol dans l'aquifère (zone saturée) (Rehse 1977)

| Description du matériau | Vitesse effective)(m/J) | L (m) |
|------------------------------------------|--------------------------|-------|
| Graviers peu silteux, riches en sables | $V < 3$ | 100 |
| | $3 < V < 20$ | 150 |
| | $20 < V < 50$ | 170 |
| | $V > 50$ | 200 |
| Graviers fins à moyens, riches en sables | $V < 3$ | 150 |
| | $3 < V < 20$ | 200 |
| | $20 < V < 50$ | 220 |
| | $V > 50$ | 250 |
| Graviers moyens à grossiers, peu sableux | $V < 3$ | 200 |

| | | |
|--------------------|---------|-----|
| | 3<V<20 | 250 |
| | 20<V<50 | 270 |
| | V>50 | 300 |
| Graviers et galets | V<3 | 300 |
| | 3<V<20 | 340 |
| | 20<V<50 | 360 |
| | V>50 | 400 |

V : vitesse effective des eaux de la nappe.

L : Distance horizontale pour une épuration totale.

H. BOLSENKOTTER (1984) a complété le tableau 18, en admettant des pouvoirs épurateurs dans les roches dures et fissurées. Ces derniers doivent être appliqués en tenant compte des conditions de vulnérabilité de chaque champ de captage (**Tab.23**).

Tabl.23: Pouvoir épurateur des aquifères de fractures (Bolsenkotter 1984)

| Description du matériau | H (cm) | ia =0.5/H |
|---------------------------------------------------|--------|-----------|
| Marnes | 10 | 0.05 |
| Grès avec argile, argiles, micachistes, phyllites | 20 | 0.025 |
| Basaltes et roches volcaniques | 30 | 0.017 |
| Grauwake, arkose , ou grès silteux | 50 | 0.01 |
| Granite, granodiorite, diorite, syénite | 70 | 0.007 |
| Quartzites, grès à silex | 100 | 0.005 |
| Calcaire | 200 | 0.0025 |

D'après **Rehse 1977**, si on définit **Mx** ($Mx = Md + Mr$) comme étant le pouvoir épurateur sur la totalité du transfert, **Md** ($Md = h_1 i_1 + h_2 i_2 + h_3 i_3 + \dots + h_n i_n$) le pouvoir épurateur sur le trajet vertical (où **h** est la hauteur non mouillée des différentes catégories de terrains rencontrés dans la zone non saturée de la nappe et **i** est l'index caractéristique associé à chaque type de terrain) et **Mr** le pouvoir épurateur sur le trajet horizontal, d'après Rehse l'épuration est complète pour **Mx =1**. On peut identifier deux cas :

-**Md>1**, l'épuration est totale dans les couches de couverture et que la délimitation d'un périmètre de protection n'est pas nécessaire.

-**Md< 1**, la dépollution n'est pas totale. Elle doit se poursuivre dans l'aquifère lors du transfert horizontal; dans ce cas le calcul de périmètres de protection s'impose. Ainsi on

calcule le pouvoir épurateur dans l'aquifère M_r ($M_r = 1 - M_d$) qui tient compte de la distance L ($L = M_r / i_a$; où i_a est l'index de l'aquifère relatif à la vitesse d'écoulement) à parcourir horizontalement pour une épuration totale (Tabl.22).

V.4-3-2- Calcul du Pouvoir épurateur :

V.4-3-2-1-La nappe du massif dunaire : le calcul du pouvoir épurateur de la région du massif dunaire est porté au tableau 24.

Tabl. 24 : Pouvoir épurateur dans le massif dunaire de Bouteldja (Khérici H.,2002 ; Attoui.B.2009).

| | forage | Lithologie de couverture | E(m) | ENS(m) | NP(m) | Md (m) | M_r (m) |
|---|--------|--------------------------|------|--------|-------|--------|-----------|
| B | B1 | Sables fins | 250 | 15.4 | 15.4 | 2.61 | |
| O | B2 | Sable fin | 160 | 6.88 | 6.88 | 1.16 | |
| | B3 | Sable fin | / | 4.06 | 4.06 | 0.69 | 0.31 |
| | B4 | Sable fin | 4 | 4 | 4.08 | 0.73 | 0.27 |
| U | | Sables grossiers | 34 | 0.8 | | | |
| | B5 | Sable fin | 26 | 5 | 5 | 0.85 | 0.15 |
| | B6 | Sable fin | 64 | 2.17 | 2.17 | 0.36 | 0.64 |
| T | B7 | Sable argileux | 8 | 3.51 | 3.51 | 1.75 | |
| | B8 | Sable fin | 80 | 3.93 | 3.93 | 0.66 | 0.34 |
| | B9 | Sable fin | / | 2.6 | 2.6 | 0.44 | 0.56 |
| | B10 | Sable fin | / | 8.59 | 8.59 | 0.46 | 0.54 |
| | B11 | Artésien | | | | | |
| | B12 | Artésien | | | | | |
| | B13 | Sable fin | 4 | 4 | 6.72 | 1.47 | |
| | | Sable argileux | 1 | 1 | | | |
| | | Sable fin | 41 | 1.72 | | | |
| E | B14 | Sable fin | / | 3.6 | 3.6 | 0.61 | 0.39 |
| | B15 | | | | 6.47 | 1.09 | |
| | 6902 | Sable fin | 112 | 2.49 | 2.49 | 0.42 | 0.58 |
| | 6906 | Sable moyen | 6 | 2.7 | 2.7 | 0.45 | 0.55 |
| | 6909 | | | 5.05 | | 0.85 | 0.15 |

| | | | | | | | |
|-----|------------|--------------------------|---------|-----------|-------|-------|-------|
| L | 6910 | Sable fin | 150 | 1.98 | 1.98 | 0.33 | 0.67 |
| | 6911 | Gravier fin | 41 | 2.45 | 2.45 | 0.098 | 0.902 |
| D | 6912 | Gravier grossier | 15 | 5.6 | 5.6 | 0.16 | 0.84 |
| | 6913 | Sable grossier | 15 | 8.95 | 8.95 | 0.62 | 0.38 |
| | 6917 | Sable fin | / | 7.5 | 7.5 | 1.27 | |
| | 6918 | Sable fin | / | 8.82 | 8.82 | 1.49 | |
| J | 6920 | Gravier sableux | 6 24 | 6 0.39 | 6.39 | 0.31 | 0.69 |
| | 6921 | Sable fin | 74 | 4.19 | 4.19 | 0.71 | 0.29 |
| | 6923 | Gravier fin Sable fin | 6 17 | 6 1 | 7 | 0.41 | 0.59 |
| A | 6925 | Sable moyen | 26 | 8.01 | 8.01 | 1.36 | |
| | S3 | Sable fin | 138 | 5.5 | 5.5 | 0.93 | 0.07 |
| | P19 | Sable fin | 125 | 6.1 | 6.1 | 1.03 | |
| | 565 | Artésien | | | | | |
| | B20 | Sable fin | 19.5 | 4.74 | 4.74 | 0.8 | 0.2 |
| | A5 | Sable fin | 130 | 12.66 | 12.66 | 2.15 | |
| | 6919 | Sable fin | 150 | 5.12 | 5.12 | 0.87 | 0.13 |
| | U1 | Sable fin | 13 | 4.55 | 4.55 | 0.77 | 0.23 |
| | U3 | Sable fin | / | 4.5 | 4.5 | 0.76 | 0.24 |
| | A7 | Argile sableux | 3.08 | 0.5 | 3.08 | 1.54 | |
| | F2 chaffia | Sable fin | / | 5 | 5 | 0.85 | 0.15 |
| 625 | Sable fin | / | 7.05 | 7.05 | 1.19 | | |

Md : pouvoir épurateur sur le trajet vertical.

D'après les données du tableau 20, on remarque que le pouvoir épurateur dépend beaucoup plus du niveau piézométrique que de la couverture de la nappe. L'autoépuration est très insuffisante sur toute la surface de la nappe au droit des forages B4, B5, B6, B7 et B8 et médiocre aux endroits où cette dernière affleure (forage 6910, forage 6921) et mauvaise au niveau du forage 6911. Cependant en certains points, les forages montrent un bon pouvoir épurateur dû à l'importance de la profondeur du niveau piézométrique (forage B1, forage B2, forage A5), ceci ne protège nullement la nappe parce que cette dernière est continue.

V.4-3-2-2-Les nappes alluvionnaires d'Annaba-EL Tarf :

Les nappes alluvionnaires d'Annaba–El Tarf sont souvent captives, par endroits leur couverture argileuse disparaît et elles deviennent libres.

Tabl. 25: Pouvoir épurateur dans les nappes alluvionnaires d'Annaba-El Tarf(Khérici H. 2002 , Attoui B. 2009)

| | Forage | Lithologie de couverture | E(m) | ENS(m) | NP(m) | Md | Mr |
|----------|-------------------|--------------------------|------|--------|-------|------|------|
| A | 500-7-17 | Argiles | 3 | 3 | 7.5 | 2.76 | |
| | | Sables fins | 3 | 3 | | | |
| | | Sables argileux | 5 | 1.5 | | | |
| | 252-7-17 | Terre végétale | 1.5 | 1.5 | 4.8 | 2.85 | |
| | | Argiles sableuses | 29.5 | 3.3 | | | |
| | 166-7-17 | Alluvions | 5 | 5 | 11 | 1.1 | |
| | | sables | 7 | 7 | | | |
| | 103-7-17 | Terre végétale | 3.1 | 3.1 | 5.90 | 1.4 | |
| | | argiles | 38 | 2.8 | | | |
| | 502-4-17 | Terre végétale | 1 | 1 | 8.35 | 4.47 | |
| | | Argiles sableuses | 65 | 7.35 | | | |
| | 526-8-17 | Sables finsgraviers | 4 | 4 | 4.16 | 0.76 | 0.24 |
| | | | 4 | 0.16 | | | |
| | 506-8-17 | argiles | 101 | 1.76 | 1.76 | 0.88 | 0.12 |
| | 501-8-17 | argiles | 10 | 8 | 8 | 4 | |
| 500-8-17 | Argiles sableuses | 83 | 3.55 | 3.55 | 1.77 | | |
| 173-1-34 | argiles | 24 | 9.13 | 9.13 | 4.56 | | |
| N | 537-1-34 | Terre végétale | 2 | 2 | 14 | 7.27 | |
| | | Argiles | 6.45 | 6.45 | | | |
| | | Sables fins | 1 | 1 | | | |
| | | Argiles | 5 | 4.55 | | | |
| 508-7-17 | Terre végétale | 2 | 2 | 8.38 | 4.79 | | |
| | Argile | 28 | 6.38 | | | | |
| N | 216-7-17 | Terre végétale | 3.48 | 3.48 | 9.2 | 5.64 | |
| | | Argile | 6.52 | 5.72 | | | |
| | | Molasses | 2 | | | | |
| | | Marne | 51 | | | | |
| 561-1-34 | Terre végétale | 2 | 2 | 6.45 | 3.82 | | |
| | Argile | 51 | 4.45 | | | | |

| | | | | | | | |
|---|-----------|--------------------|------|------|-------|------|------|
| A | 109-7-34 | Terre végétale | 2.8 | 2.8 | 4.56 | 2.27 | |
| | | Galets et graviers | 19.2 | 1.76 | | | |
| B | 506-7-17 | Terre végétale | 2 | 2 | 3.92 | 2.56 | |
| | | Argile sableuse | 71 | 1.92 | | | |
| A | 503-7-17 | Argile | 2 | 2 | 7.60 | 3.8 | |
| | | Argile sableuse | 54 | | | | |
| | 505-7-17 | Terre végétale | 1 | 1 | 6.10 | 3.35 | |
| | | Argile sableuse | 2 | 2 | | | |
| | 501-7-17 | Argile | 54 | 3.10 | 16.3 | 7.15 | |
| | | Terre végétale | 1 | 1 | | | |
| | 502-7-17 | Sable fin | 1 | 1 | 14.80 | 7.7 | |
| | | Argile sableuse | 43 | 14.3 | | | |
| | 502-7-17 | Terre végétale | 1 | 1 | 14.80 | 7.7 | |
| | | Argile | 38 | 13.8 | | | |
| | 500-7-34 | Argile sableuse | 3 | 3 | 3 | 1.5 | |
| | 502-7-34 | Argile sableuse | 5 | 3 | 3 | 1.5 | |
| | 110-7-34 | Argile sableuse | 1.20 | 1.20 | 1.8 | 0.9 | 0.1 |
| | | Sable argileux | 0.80 | 0.8 | | | |
| | 501-7-34 | Argile sableuse | 1 | 1 | 3 | 0.53 | 0.47 |
| | | Graviers | 20 | 2 | | | |
| | 502-6-34 | Terre végétale | 3 | 3 | 7 | 4.4 | |
| | | Argile | 21 | 4 | | | |
| A | 144 -1-34 | Terre végétale | 2.5 | 2.5 | 7.55 | 2.85 | |
| | | Sable fin | 12.5 | 5.05 | | | |
| N | 131-4-17 | Argile sableuse | 1 | 1 | 4.3 | 1.49 | |
| | | Sable fluvial | 2 | 2 | | | |
| N | 146-1-34 | Argile | 42 | 1.3 | 6.6 | 4.2 | |
| | | Terre végétale | 3 | 3 | | | |
| A | 574-1-34 | Sable et argile | 24 | 3.6 | 9 | 4.17 | |
| | | Argile | 5 | 5 | | | |
| B | | Sable fin | 1 | 1 | 3 | | |
| | | Argile | / | | | | |
| A | 117-4-34 | Terre végétale | 4 | 4 | 9.65 | 6.02 | |
| | | Argile et grés | 16 | 5.65 | | | |
| | 108-2-34 | Terre végétale | 1 | 0.5 | 0.5 | 0.4 | 0.6 |
| | | Argile sableuse | 26.5 | | | | |

| | | | | | | | |
|----------------------------|---------------|-----------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|------------------------|----------------|------|------|
| | 217-7-17 | Terre végétale Argile marneuse | 9 | 4.5 | 4.5 | 3.6 | |
| | 102-7-17 | Terre végétale Argile | 1 39 | 0.8 | 0.8 | 0.8 | 0.2 |
| | 130-7-17 | Terre végétale Alluvion argileuse Sable | 1 4 7 | 1 4 3.45 | 8.45 | 3.38 | |
| | 503-4-17 | Argile Argile Sableuse | 3 15 | 3 1.08 | 4.08 | 2.04 | |
| | 128-4-17 | Argile sableuse | 65 | 4.7 | 4.7 | 2.35 | |
| A S F O U R | 543-6-34 | Argile | 17 | 17 | 13.7 | 6.85 | |
| | 119-6-34 | Terre végétale Galet grossier | 5 9.8 | 5 7 | 12 | 4.14 | |
| | 102-6-34 | Argile sableuse Gravier et sable Argile Galet grossier | 1.5 6 2.5 10 | 1.5 6 2.5 8.2 | 18.2 | 2.94 | |
| | 103-6-34 | Terre végétale Argile sableuse | 1.5 28 | 1.5 16.8 | 18.3 | 9.6 | |
| | 115-6-34 | Terre végétale Argile sableuse Sable et grès | 0.5 6.5 10 | 0.5 6.5 5 | 4.08 | 4.5 | |
| | 121-6-34 | Argile sableuse Argile | 6 18 | 6 1.7 | 7.7 | 3.85 | |
| | 122-6-34 | Terre végétale Argile | 2 10 | 2 14 | 15 | 8.6 | |
| | 544-6-34 | Argile sableuse Sable fin | 3 11 | 3 10 | 13 | 3.2 | |
| | Asfour centre | Argile | 12 | 10.5 | 10.5 | 5.25 | |
| | B | Belahmer2 | Terre végétale Argile Argile sableuse | 3 5 10 | 4 5 1.66 | 9.66 | 5.73 |

| | | | | | | | |
|-----------------|-----------------|--------------------|-----|------|------|-------|------|
| E | Belahmer1 | Terre végétale | 2 | 2 | 5.45 | 3.32 | |
| | | argile | 51 | 3.45 | | | |
| S | Besbes AEP | Terre végétale | 1 | 1 | 5.45 | 3.32 | |
| | | argile | 18 | 18 | | | |
| B | 177-1-34 | Argile | 1 | 1 | 6.39 | 3.19 | |
| | | Argile Sableuse | 4 | 4 | | | |
| E | 567-1-34 | Argile | 2 | 2 | 7.4 | 3.56 | |
| | | Argile siliteux | 5 | 1.39 | | | |
| S | 180-1-34 | Sable argileuse | 5 | 5 | | | |
| | | Sable fin | 12 | 0.4 | | | |
| | | Terre végétale | 1.8 | 1.8 | 3.2 | 2.14 | |
| ZER IZE R | F M'radi | Argile | 10 | 10 | 7.12 | 3.56 | |
| | Sidi Abed | Argile | 25 | 6.8 | 6.8 | 3.4 | |
| CH | 178-1-34 | Argile sableuse | 33 | 1.8 | 1.8 | 0.9 | 0.1 |
| BAI TA | 531-1-34 | Terre végétale | 1 | 1 | 7.5 | 4.05 | |
| | | Argile sableuse | 17 | 6.5 | | | |
| MO KH | 519-1-34 | Terre végétale | 1 | 1 | 8.2 | 4.55 | |
| | | Argile | 11 | 7.2 | | | |
| TAR | Zaamcha 2 | Argile | 41 | 9.8 | 9.8 | 4.9 | |
| | Chbaita1 | Argile | 37 | 11.7 | 11.7 | 5.85 | |
| | Chbaita2 | Argile | 37 | 12.5 | 12.5 | 6.25 | |
| DRE AN | 571-4-34 | Argile sableuse | 4 | 4 | 6.2 | 2.066 | |
| | | Gravier et galets | 12 | 2.2 | | | |
| 517-1-34 | Terre végétale | 2 | 2 | 10 | 5.6 | | |
| | | Argile sableuse | 12 | 8 | | | |
| F6 | Terre végétale | 1 | 1 | 8.5 | 1.68 | | |
| | | Sable fin | 3 | 3 | | | |
| | | Argile | 1 | 1 | | | |
| | | Sable graviers | 3 | 3 | | | |
| | | Graviers grossiers | 15 | 0.5 | | | |
| D F8 | Argile | 14 | 6.8 | 6.8 | 3.4 | | |
| CHI HAN I | Chihani2 | Argile sableuse | 1 | 1 | 7.32 | 0.62 | 0.38 |
| | | Galets | 18 | 6.32 | | | |
| Chihani1 | Argile sableuse | 3 | 3 | 6.5 | 1.57 | | |
| | | Galets | 34 | 3.5 | | | |

| | | | | | | | |
|--|----------|---------------------------|--------|----------|-----|------|------|
| | Chihani3 | Argile sableuse Galets | 1 / | 1 6.2 | 7.2 | 0.62 | 0.38 |
|--|----------|---------------------------|--------|----------|-----|------|------|

| | | | | | | | | |
|------------------|----------|--------------------------------------------------------|---------------------|-------------------|------|-------|--|--|
| T A R F | 563-9-18 | Terre végétale Argile sableuse Argile | 4 5.7 10 | 4 5.7 10 | 4.7 | 11.05 | | |
| | 561-9-18 | Terre végétale Argile sableuse Gravier argile | 1 2 2 10 | 1 2 2 10 | 5.5 | 6.84 | | |
| | 606-9-18 | Terre végétale argile | 1 18 | 1 18 | 3 | 9.8 | | |
| | 605-9-18 | Terre végétale Argile | 1 21.5 | 22.5 | 4.5 | 11.5 | | |
| | 598-9-18 | Terre végétale argile | 1 16.5 | 17.5 | 5.3 | 9.05 | | |
| | 562-9-18 | Terre végétale Argile Sable fin argile | 2 5 2 13.5 | 22.5 | 4.5 | 6.75 | | |
| R | 561-9-18 | Argile sableuse argile | 12.5 4 | 16.5 | 4.65 | 8.25 | | |
| F | 564-9-18 | Terre végétale argile | 2 9 | 11 | 4.2 | 6.1 | | |
| | 560-9-18 | Argile Sable argileux | 6 11.5 | 17.5 | 5.87 | 8.75 | | |
| | 607-9-18 | Terre végétale Argile sableuse | 1 24 | 25 | 4.5 | 12.8 | | |

E : épaisseur de la couche (m)

ENS : épaisseur non saturée de la nappe (m)

NP : niveau piézométrique de la nappe (m)

Md : pouvoir épurateur sur le trajet vertical

Pratiquement toutes les nappes précédentes présentent une autoépuration suffisante, sauf aux endroits où les nappes communiquent avec celles de dessus, comme c'est le cas du forage 501-7-34 Chihani.1 et 3 et du forage 526-8-17 où la nappe superficielle et la nappe

profonde sont confondues. A ces endroits le pouvoir épurateur est faible, il varie entre 0.5 et 0.9. La valeur d'autoépuration est faible dans ces endroits où le niveau piézométrique est très proche de la surface du sol ; ce qui correspond aux forages 108-2-34, 110-7-34, 102-7-17, 506-8-17 avec des valeurs variant de 0.4 à 0.9. On remarque également d'après le tableau 21 que dans la majorité des forages l'indice d'autoépuration est très élevé variant entre 1 et 9 du fait de l'importance de l'épaisseur des couches sablo-argileuses et argileuses.

V.4-3-3-Méthode de détermination de la vulnérabilité et du risque de pollution des eaux (N.Kherici2008).

Pour montrer l'état de vulnérabilité et le risque de pollution des eaux des différentes nappes, une nouvelle méthode proposée par Khérici (2008) basée sur les facteurs (naturels (épaisseur de la zone non saturée, faciès géologique, degré d'autoépuration) et les causes de vulnérabilité à la pollution des nappes (facteurs anthropiques) provoquées par l'homme.

-Les facteurs naturels :

Ces facteurs sont identifiés dans le triangle semi-logarithmique A, qui met en évidence l'indice d'autoépuration total de la zone non saturée d'après les tableaux 17 et 19.

-Les facteurs anthropiques :

Ces facteurs sont identifiés dans le triangle B donnant l'indice de contamination totale (ICT).

La projection du facteur naturel (l'indice d'autoépuration total) et anthropique (l'indice de contamination totale (ICT)), mettra en évidence l'état de vulnérabilité et de risque de pollution des souterraines des nappes(Fig.14).

V.4-3-3-1-CLASSIFICATION DES ELEMENTS ORGANIQUES ET MINERAUX :

Dans l'abaque proposé par Kherici 2008, on considère deux indices de contamination : un indice de contamination organique(ICO) et un indice de contamination minérale(ICM). L'indice de pollution organique se base sur quelques paramètres résultant des pollutions organiques : les nitrates (NO_3^-), l'azote ammoniacal (NH_4^+), les nitrites (NO_2^-), les orthophosphates (PO_4^{---}) et la DBO5. L'indice de contamination minérale se base sur les paramètres résultants des pollutions minérales : plomb (Pb^{++}), chrome (Cr^{6+}), Nickel,.... Pour chacun de ces paramètres, 3 classes de teneurs se distinguent ayant une

signification écologique et liées aux teneurs limites de l’OMS. Les indices (ICO et ICM) sont la moyenne des numéros de classe pour chaque paramètre et les valeurs obtenues sont réparties en 6 niveaux de pollution. Ces niveaux sont beaucoup plus importants si on prend plus de 4 paramètres. Ainsi ces indices permettent donc de rendre compte de manière synthétique de la pollution organique et minérale existante aux points de prélèvements.

V.4-3-2-1-1-L’indice de contamination Organique (ICO) :

C’est la somme des deux classes des éléments issus de pollutions organiques d’un même échantillon.

Dans ce cas l’ICO = la classe des nitrates + classe des nitrites ou la BDO5 (**Tabl.22**)

-Classification des éléments organiques :

a- La DBO5 :

La DBO5 ou Demande Biologique en Oxygène sur 5 jours, représente la quantité d'oxygène nécessaire aux micro-organismes pour oxyder (dégrader) l'ensemble de la matière organique d'un échantillon d'eau maintenu à 20°C, à l'obscurité, pendant 5 jours. Elle représente le degré de la pollution organique d’origines domestiques et urbaines (provoquées par les rejets au niveau des agglomérations). Les teneurs sont très élevés (3^{ème} classe) dans la majorité des nappes près des agglomérations (Righia, Berrihane et Sebaa dans le massif dunaire), et les Oueds (Oued Seybouse, Méboudja, à proximité des prélèvements de la nappe profonde et superficielle).

Tabl. 26 : Classification de la DBO5 d’après les normes de l’OMS

| Classification Elément | En Trace | Classe 1 | Naturelle | Classe 2 | Norme OMS | Classe 3 |
|---------------------------|----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|
| DBO5 (mg/l) | 0-1 | 1 | 1-5 | 2 | >5 | 3 |
| Nappe superficielle | | 0 | | 0 | | 3 |
| Nappe profonde | | 0 | | 0 | | 7 |
| Nappe du massif dunaire | | 6 | | 5 | | 10 |

b-Nitrates (NO₃) :

Les nitrates sont l'un des polluants les plus fréquents des eaux souterraines en milieu rural.

L'origine des nitrates dans l'eau souterraine est principalement due aux engrais, aux systèmes septiques, et parfois aux eaux usées industrielles. D'après le tableau 27 ci-dessous toutes les nappes sont touchées par la pollution de cet élément. La nappe libre d'El-Chatt comporte les 14/15 des prélèvements appartiennent à la deuxième 2^{ème} classe et 1 échantillon dépasse les normes de l'OMS, pour la nappe du massif dunaire ; on note 10 échantillons qui dépassent les normes du fait de la nature libre des nappes qui sont presque plus sensibles à la pollution. Par contre la nappe de la plaine d'El-Tarf contient 13 échantillons qui sont classés dans la classe 1 et deux prélèvements qui sont classés dans la 2^{ème} classe. Cependant la nappe profonde et la nappe superficielle d'Annaba présentent plus d'une quinzaine de valeurs dépassant les normes, malgré la structure protégée de ces nappes. Le résultat provient de la situation des points d'eau au voisinage des Oueds (Seybouse et Meboudja) et des sites agricoles (nappe superficielle).

Tabl.27 : Classification des Nitrates d'après les normes de l'OMS

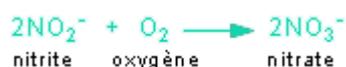
| Classification | Trace | Classe 1 | Naturelle | Classe 2 | Norme OMS | Classe 3 |
|------------------------------|-------|----------|-----------|----------|-----------|----------|
| Elément | | | | | | |
| NO ₃ (mg/l) | 0-10 | 1 | 10-50 | 2 | >50 | 3 |
| Nappe superficielle | | 14 | | 9 | | 17 |
| Nappe profonde | | 24 | | 16 | | 14 |
| Nappe du massif dunaire | | 25 | | 9 | | 10 |
| Nappe libre d'El-Chatt | | 0 | | 14 | | 1 |
| Nappe de la plaine d'El-Tarf | | 13 | | 2 | | 0 |

c-Nitrites (NO₂) :

Considérés comme des éléments toxiques, les NO₂ sont la forme la moins stable dans le cycle de l'azote. Ils sont issus de la réduction de l'ammonium NH₄. Leur origine est liée à l'agriculture ou aux rejets urbains et industriels.



La transformation des nitrites en présence de l'oxygène donne naissance à des nitrates :



Comme indique le tableau 28 ci-dessous les teneurs des nitrites sont élevées dans la nappe superficielle et la nappe libre d'El-Chatt et dépasse largement les normes, due a la présence de rejets domestiques et agricoles et industriels (présence de l'ammonium dans les rejets industriels) , par contre dans la nappe profonde il y a quelques échantillons qui sont classés dans la 3^{ème} classe, les autres obéissent aux normes, le massif dunaire ne présente aucun échantillon qui est classé dans la 3^{ème} classe. Pour la nappe de la plaine d'El-Tarf on note qu'un seul échantillon qui dépasse les normes, ce point est localisé près de l'oued kébir Est

Tabl.28 : Classification des Nitrites D'après Les normes de L'OMS

| Classification Elément | Trace | Classe 1 | Naturelle | Classe 2 | Norme OMS | Classe 3 |
|------------------------------|--------|----------|-----------|----------|-----------|----------|
| NO2 (mg/l) | 0-0.05 | 1 | 0.05-0.1 | 2 | >0.1 | 3 |
| Nappe superficielle | | 0 | | 4 | | 37 |
| Nappe profonde | | 22 | | 14 | | 8 |
| Nappe du massif dunaire | | 23 | | 8 | | 0 |
| Nappe libre d'El-Chatt | | 0 | | 0 | | 15 |
| Nappe de la plaine d'El-Tarf | | 12 | | 01 | | 01 |

V.4-3-3-2-L'indice de contamination Minérale(ICM) :

C'est la somme des classes des éléments issus de pollutions minérales d'un même échantillon.

ICM = la classe du Plomb+ classe du Nickel ou autres éléments issus de pollutions minérales.

A partir de la projection des deux indices (Organique et Minérale) on va obtenir l'indice de contamination total (ICT).

-Classification des éléments minérales:

a- Le Chrome :

Le Chrome comme l'un des métaux lourds toxiques, il présente un risque de pollution des eaux souterraines et de surface. L'origine de ce métal peut être naturelle, il existe dans les formations à roches basiques ou dans les silicates (pyroxène, muscovite, grenat), ou bien industrielle où il peut être utilisé en galvanoplastie, raffinerie, tannerie, métallurgie, colorants, peinture...etc..

Les données du tableau 29 présentent 5 échantillons qui dépassent les normes pour la nappe superficielle et un seul échantillon se trouvant en 3^{ème} classe correspondant à la nappe profonde. Ces échantillons sont répartis le long de l'Oued Méboudja vers la confluence avec l'Oued Seybouse pour la nappe superficielle et au sud d'El-Hadjar pour la nappe profonde (voir **Fig.75.76**). Cette pollution est due à l'activité industrielle dans cette région (Unité d'El Hadjar, Debieche et al, 2001).. En général les autres faibles concentrations sont présentes dans les eaux de surface, dans la nappe superficielle ou dans la nappe des graviers ayant comme origine les rejets industriels dans l'atmosphère de l'usine Mittal Steel qui précipitent sous l'effet de pluies sur la plaine (Khérici, 1993).

Tabl.29: Classification du Chrome D'après Les normes de L'OMS

| Classification | Trace | Classe 1 | Naturelle | Classe 2 | Norme OMS | Classe 3 |
|---------------------|---------|----------|--------------|----------|-----------|----------|
| Elément | | | | | | |
| Chrome (mg/l) | 0-0.005 | 1 | 0.005 - 0.05 | 2 | >0.05 | 3 |
| Nappe superficielle | | 0 | | 22 | | 5 |
| Nappe profonde | | 2 | | 10 | | 1 |

b- Le Plomb :

Le Plomb comme étant un métal lourd dangereux, présente un risque de pollution des eaux des nappes (superficielle et profonde) comme indiqué au tableau 30, où nous notons les concentrations de 6 échantillons qui dépassent largement les normes, ils sont issus de la nappe superficielle, et situés au centre de la plaine d'Annaba et au long de l'Oued Meboudja vers la

confluence avec la Seybouse. On peut également noter 3 échantillons pollués de la nappe profonde, situés au Sud de l'Oued Seybouse à Dréan où la nappe devient libre, exposée à la pollution, d'autres échantillons pollués sont situés au centre de la plaine d'Annaba et au centre de l'Oued Seybouse. Les deux échantillons qui dépassent les normes dans le massif dunaire sont répartis dans les puits destinés à l'alimentation domestiques près des agglomérations de Berrihane et Righia. Ce qui permet de supposer qu'en plus de l'industrie le trafic routier constitue une origine probable du plomb dans le site étudié (Hamzaoui.2007).

Tabl. 30 : Classification du Plomb D'après Les normes de L'OMS

| Classification Elément | Trace | Classe 1 | Naturelle | Classe 2 | Norme OMS | Classe3 |
|---------------------------|--------|----------|-----------|----------|--------------|---------|
| Plomb (mg/l) | 0-0.05 | 1 | 0.05-0.1 | 2 | >0.1 | 3 |
| Nappe superficielle | | 13 | | 14 | | 06 |
| Nappe profonde | | 05 | | 05 | | 03 |
| Nappe du massif dunaire | | 14 | | 03 | | 02 |

c- Le Manganèse :

Le manganèse est un métal de transition qui ressemble au fer.

D'après les résultats du tableau 31 on trouve que la nappe superficielle est la plus contaminée par le Manganèse. Les points de prélèvements sont situés le long de l'Oued Méboudja et l'Oued Seybouse, ce qui met en évidence que l'origine de ce métal provient des eaux usées de ces deux Oueds, donc d'origines industrielles liées aux rejets de l'usine sidérurgique (Debièche, 2002) et peut être aussi des rejets domestiques qui sont versées directement dans ces Oueds. Comparés à ceux de la nappe profonde les résultats sont moins affectés, ils sont représentés le long de l'Oued Seybouse vers la mer Méditerranée. Ce qui montre que l'origine de cet élément dans les eaux de la nappe profonde est le résultat d'infiltration des eaux de la nappe superficielle par drainance où nous observons des rejets domestiques des petites agglomérations situés le long du cet Oued.

Tabl. 31 : Classification du Manganèse D'après Les normes de L'OMS

| Classification Elément | Trace | Classe 1 | Naturelle | Classe 2 | Norme OMS | Classe 3 |
|---------------------------|--------|----------|-----------|----------|-----------|----------|
| Manganèse (mg/l) | 0-0.05 | 1 | 0.05-0.1 | 2 | >0.1 | 3 |
| Nappe superficielle | | 22 | | 02 | | 16 |
| Nappe profonde | | 02 | | 05 | | 06 |
| Nappe du massif dunaire | | 19 | | 0 | | 0 |
| Nappe libre d'El Chatt | | 15 | | 0 | | 0 |

d- Le Nickel :

Les données du tableau 32 montrent que le Nickel est présent dans la majorité des échantillons des eaux de la nappe superficielle où il dépasse largement les normes, ces points d'eau sont répartis le long de l'Oued Méboudja et l'Oued Seybouse. Il est remarqué aussi au niveau des eaux de la nappe profonde qui sont répartis le long de l'Oued Seybouse vers le point de rejet dans la mer méditerranée. La source de ce polluant est certainement l'activité humaine et les rejets industriels, où se trouve les unités industrielles notamment le complexe d'El-Hadjar qui jette ses rejets directement dans l'Oued Méboudja. Ce qui permet de supposer qu'en plus de l'industrie, le trafic routier constitue une origine probable dans le site étudié.

Tableau 32 : Classification du Nickel D'après Les normes de L'OMS

| Classification Elément | Trace | Classe 1 | Naturelle | Classe 2 | Norme OMS | Classe 3 |
|---------------------------|---------|----------|------------|----------|-----------|----------|
| Nickel (mg/l) | 0-0.025 | 1 | 0.025-0.05 | 2 | >0.05 | 3 |
| Nappe superficielle | | 01 | | 10 | | 21 |
| Nappe profonde | | 0 | | 05 | | 08 |

e- L'Aluminium :

L'aluminium provient de l'altération chimique des sédiments provenant de l'érosion des roches sédimentaires (grès, argiles et marnes...). D'après les données de classification des

échantillons prélevés de différentes nappes les plus fortes teneurs de l'aluminium sont présentes dans la nappe profonde et la nappe du massif dunaire par contre elles sont nulles dans les eaux de la nappe superficielle d'Annaba.

Tabl.33 : Classification de l'Aluminium D'après Les normes de L'OMS

| Classification Elément | Trace | Classe 1 | Naturelle | Classe 2 | Norme OMS | Classe 3 |
|------------------------------|--------|----------|-----------|----------|-----------|----------|
| Aluminium (mg/l) | 0-0.05 | 1 | 0.05-0.2 | 2 | >0.2 | 3 |
| Nappe superficielle | | 33 | | 02 | | 0 |
| Nappe profonde | | 27 | | 09 | | 06 |
| Nappe du massif dunaire | | 16 | | 08 | | 07 |
| Nappe de la plaine d'El-Tarf | | 05 | | 08 | | 0 |

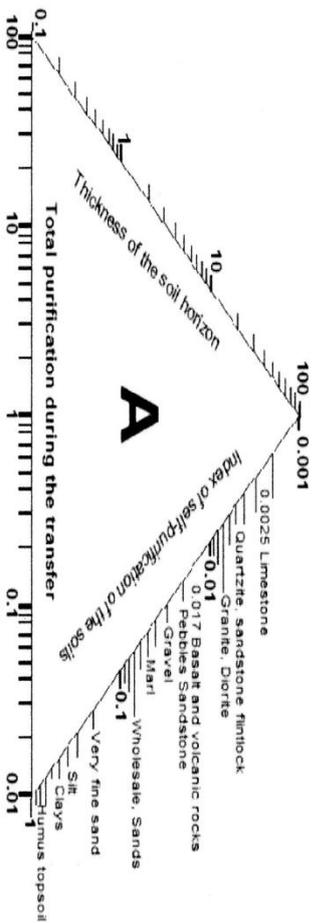
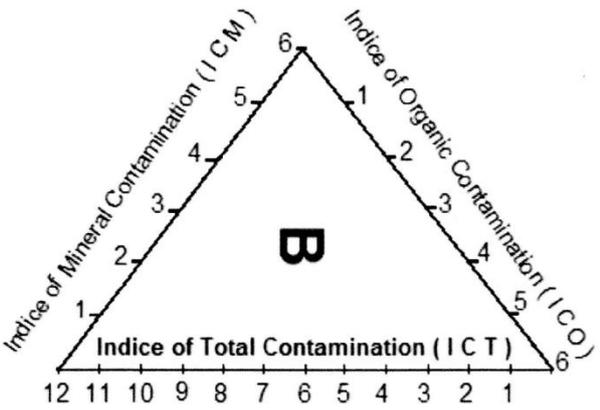
f- Le Fer Total :

Existant dans les eaux souterraines ou superficielles, l'origine du fer peut être attribuée à la géologie par lessivage des formations argileuses, ou à l'industrie (métallurgie et sidérurgie) comme c'est le cas dans notre étude.

Les données du tableau 34 montrent que les échantillons analysés de la nappe superficielle et profonde, dépassent largement les normes, essentiellement ceux de la nappe profonde (par lessivage des formations argileuses qui surmontent les couches de graviers). On remarque dans la nappe du massif dunaire des concentrations en fer assez élevées au niveau des forages, dont l'origine est sans doute naturelle par l'altération des grès et des argiles (formations montagneuses réparties à l'est et au Sud Est du massif dunaire. A cet endroit les eaux usées (effluents des fosses septiques) peuvent être également la source de contamination si on considère que le territoire urbain occupe environ 19% de la superficie de l'aquifère avec les agglomérations de Righia, Sebaa et Berrihane (Sedrati.2006).Par contre les échantillons qui ont été prélevés de la nappe de la plaine d'El-Tarf ne dépasse pas les normes de l'OMS .

Tabl.34: Classification du Fer Total D'après Les normes de L'OMS

| Classification Elément | Trace | Classe 1 | Naturelle | Classe 2 | Norme OMS | Classe 3 |
|------------------------------|--------|----------|-----------|----------|-----------|----------|
| Fer total (mg/l) | 0-0.05 | 1 | 0.05-0.3 | 2 | >0.3 | 3 |
| Nappe superficielle | | 0 | | 27 | | 15 |
| Nappe profonde | | 03 | | 14 | | 29 |
| Nappe du massif dunaire | | 12 | | 3 | | 15 |
| Nappe libre d'El-Chatt | | 04 | | 10 | | 01 |
| Nappe de la plaine d'El-Tarf | | 07 | | 03 | | 03 |



| Zone I | Zone II |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| Zone protégée, non vulnérabilité à la pollution, sans risque de pollution | Zone vulnérable à la faiblesse de de pollution (absence d'auto-épuraton vertical) |
| Zone III | Zone IV |
| Zone protégée en surface (satisfaisant vertical auto-épuraton), la possibilité de risque de pollution des eaux souterraines | Zone vulnérable au risque de pollution. (Absence d'auto-épuraton verticale) |
| | Zone vulnérable loin de toutes les activités humaines. |

Fig. 72 : Abaque de détermination de zones vulnérabilités et de risque de pollution (N.Kherici, 2010)

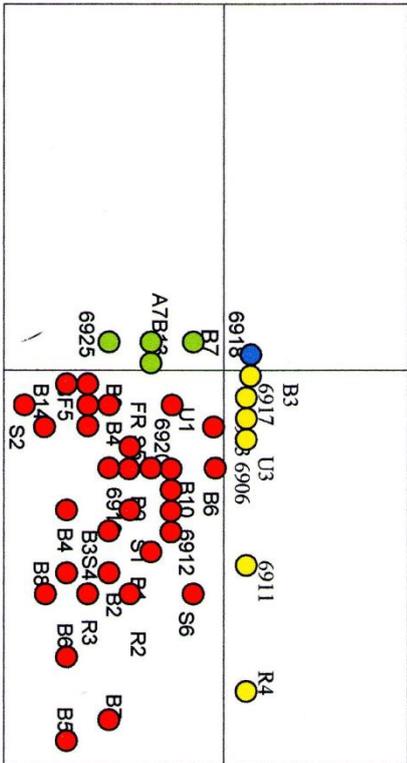
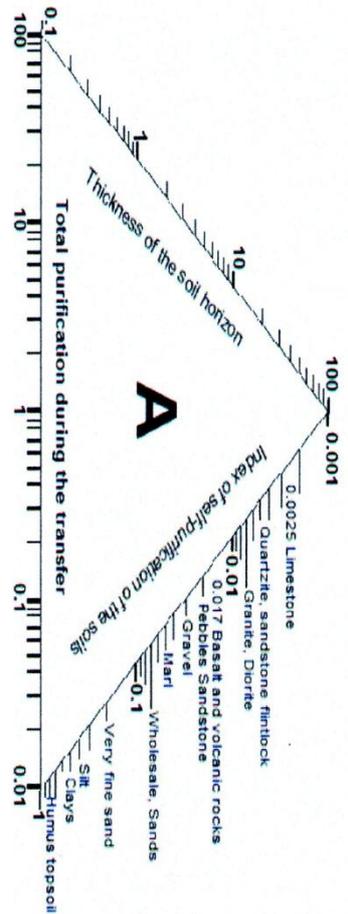
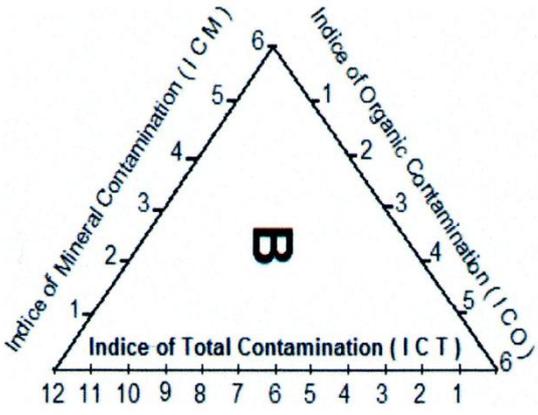
A

- 1-Limestone= Calcaire.
- 2- Quartzite, sandstone flintlock= Quartzite, Grès Silex.
- 3- Granite, diorite=Granite, diorite.
- 4-Basalt and volcanic rocks= Basaltes et roches volcaniques.
- 5-Pebbles Sandstone=Galeis, grès.
- 6-Gravel=Graviers.
- 7-Marl=Marnes.
- 8-Wholesale Sands=Sables grossiers.
- 9-Very fine sand=Sables très fins.
- 10-Silt= Limons.
- 11-Clays=Argiles.
- 12-Humus topsoil=Humus et terres végétales.
- 13-Index of self-purification of the soils= Indice d'auto-épuraton du sols.
- 14-Thickess of the soil horizon=Epaisseur de l'horizon du sol.
- 15-Total purification during the transfer = transfert au cours de l'épuration totale

B

- 1-ICO= Indice de contamination organique
- 2-ICM= indice de contamination minérale
- 3-ICT= Indice de contamination totale

B
 1-ICO= Indice de contamination organique
 2-ICM= indice de contamination minérale
 3-ICT= Indice de contamination totale



● : Zone protégée, non vulnérabilité à la pollution, sans risque de pollution
 ● : Zone vulnérable à la faiblesse des risques de pollution (absence d'auto-épuration vertical). Zone vulnérable loin de toutes les activités humaines
 ● : Zone protégée en surface (satisfaisant vertical auto-épuration), la possibilité de risque de pollution des eaux souterraines
 ● : Zone vulnérable au risque de pollution. (Absence d'auto-épuration verticale

A
 1-Limestone= Calcaire.
 2- Quartzite, sandstone flintlock= Quartzite, Grès Silex.
 3- Granite, diorite=Granite, diorite.
 4-Basalt and volcanic rocks= Basaltes et roches volcaniques.
 5-Pebbles Sandstone=Gaiels, grès.
 6-Gravel=Graviers.
 7-Marl=Marnes.
 8-Wholesale,Sands=Sables grossiers.
 9-Very fine sand=Sables très fins.
 10-Silt= Limons.
 11-Clays=Argiles.
 12-Humus topsoil=Humus et terres végétales.
 13-Index of self-purification of the soils= Indice d'auto-épuration du sols.
 14-Thickness of the soil horizon=Epaisseur de l'horizon du sol.
 15-Total purification during the transfer = transfert au cours de l'épuration totale

Fig.7.3: Détermination des zones de la vulnérabilité et le risque de pollution (N. Khérici2010) « nappe libre de massif dunaire ».

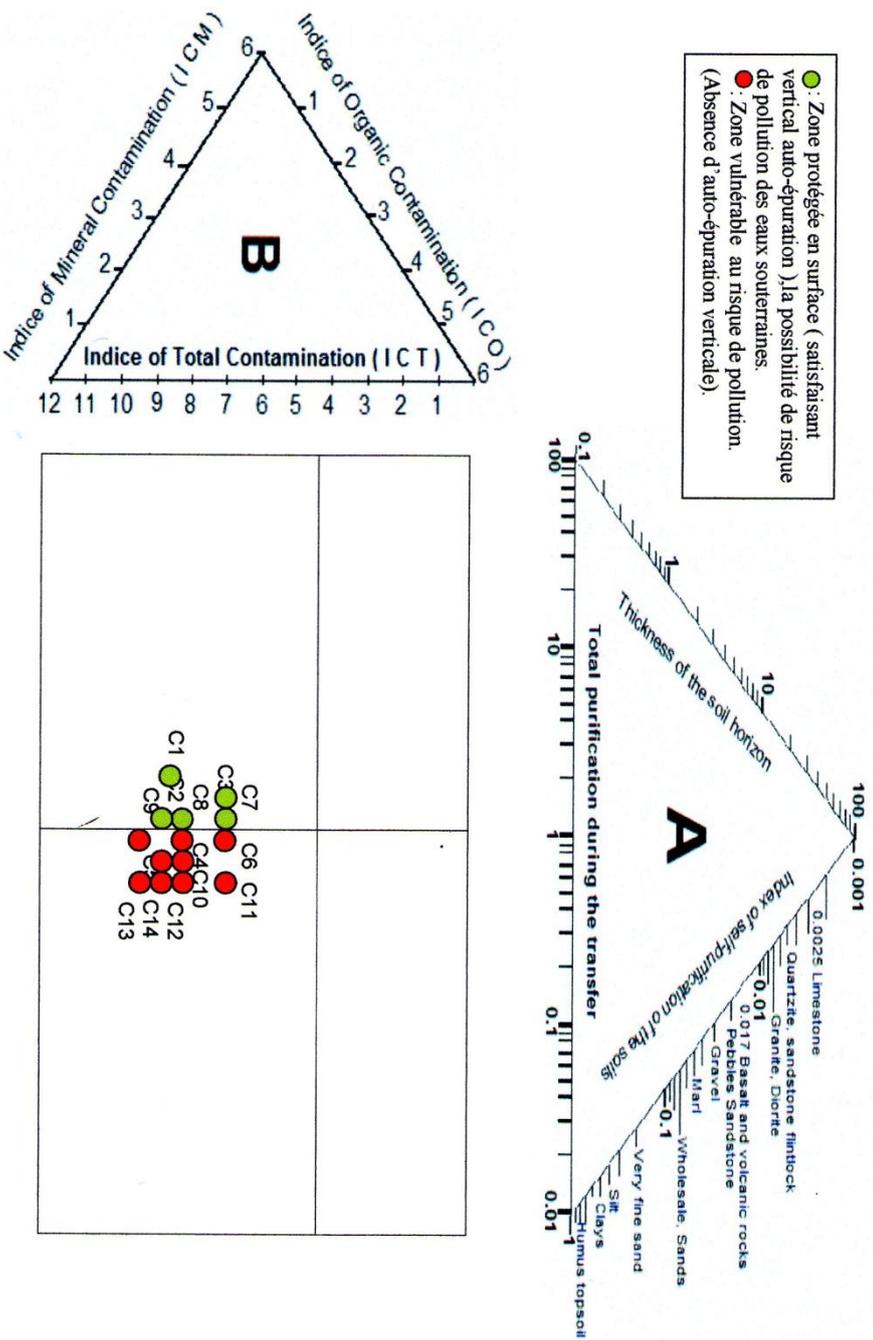


Fig.74: Détermination des zones de la vulnérabilité et le risque de pollution (N. Khérici 2010) « Nappe libre d'EL Chatt ».

- A**
- 1-Limestone= Calcaire.
 - 2- Quartzite, sandstone flintlock= Quartzit Grès Silex.
 - 3- Granite, diorite=Granite, diorite.
 - 4-Basalt and volcanic rocks= Basaltes et roches volcaniques.
 - 5-Pebbles Sandstone=Galeis, grès
 - 6-Gravel=Graviers.
 - 7-Marl=Marnes.
 - 8-Wholesale,Sands=Sables grossiers.
 - 9-Very fine sand=Sables très fins.
 - 10-Silt= Limons.
 - 11-Clays=Argilles.
 - 12-Humus topsoil=Humus et terres végétales.
 - 13-Index of self-purification of the soils= Indice d'auto-épurateur du sols.
 - 14-Thickness of the soil horizon=Épaisseu de l'horizon du sol.
 - 15-Total purification during the transfer = transfert au cours de l'épuration totale
- B**
- 1-ICO= Indice de contamination organique
 - 2-ICM= indice de contamination minérale
 - 3-ICT= Indice de

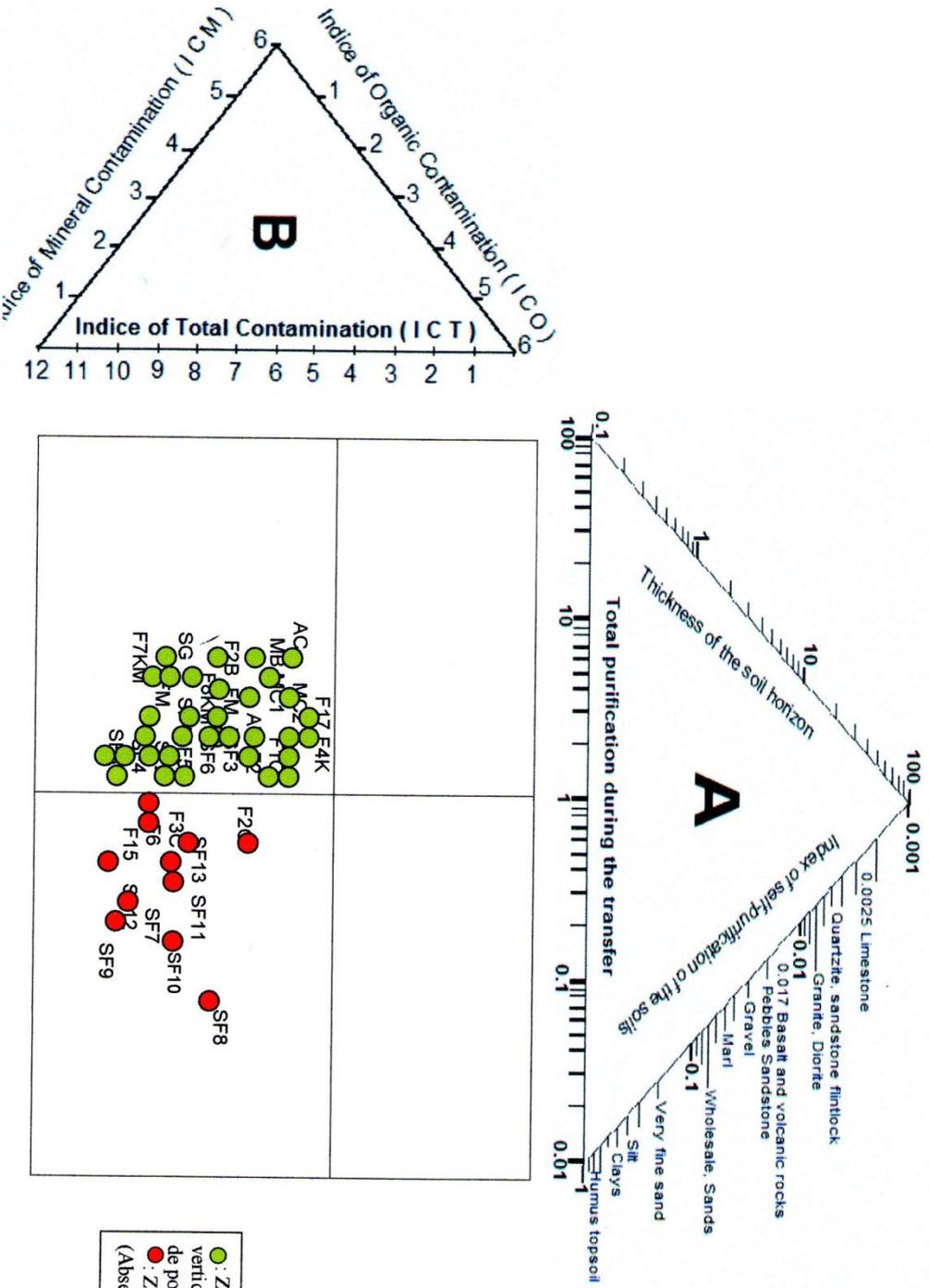


Fig.75: Détermination des zones de la vulnérabilité et le risque de pollution (N. Khérici 2010) « Nappe profonde de gravier ».

Vulnérabilité à la pollution

B.Aitoui, 2014

● : Zone protégée en surface (satisfaisant vertical auto-épuration) la possibilité de risque de pollution des eaux souterraines.
 ● : Zone vulnérable au risque de pollution. (Absence d'auto-épuration verticale)

- B**
- 1-ICO= Indice de contamination organique
 - 2-ICM= indice de contamination minérale
 - 3-ICT= Indice de contamination totale

- A**
- 1-Limestone= Calcaire.
 - 2- Quartzite, sandstone flintlock= Quartzit Gres Silex.
 - 3- Granite, diorite=Granite, diorite.
 - 4-Basalt and volcanic rocks= Basaltes et roches volcaniques.
 - 5-Pebbles Sandstone=Galets, grès.
 - 6-Gravel=Graviers.
 - 7-Mari=Marnes.
 - 8-Wholesale,Sands=Sables grossiers.
 - 9-Very fine sand=Sables très fins
 - 10-Silt= Limons.
 - 11-Clays=Argiles.
 - 12-Humus topsoil=Humus et terres végétales.
 - 13-Index of self-purification of the soils= Indice d'auto-épuration du sol.
 - 14-Thickness of the soil horizon=Epaisseur de l'horizon du sol.
 - 15-Total purification during the transfer = transfert au cours de l'épuration: totale

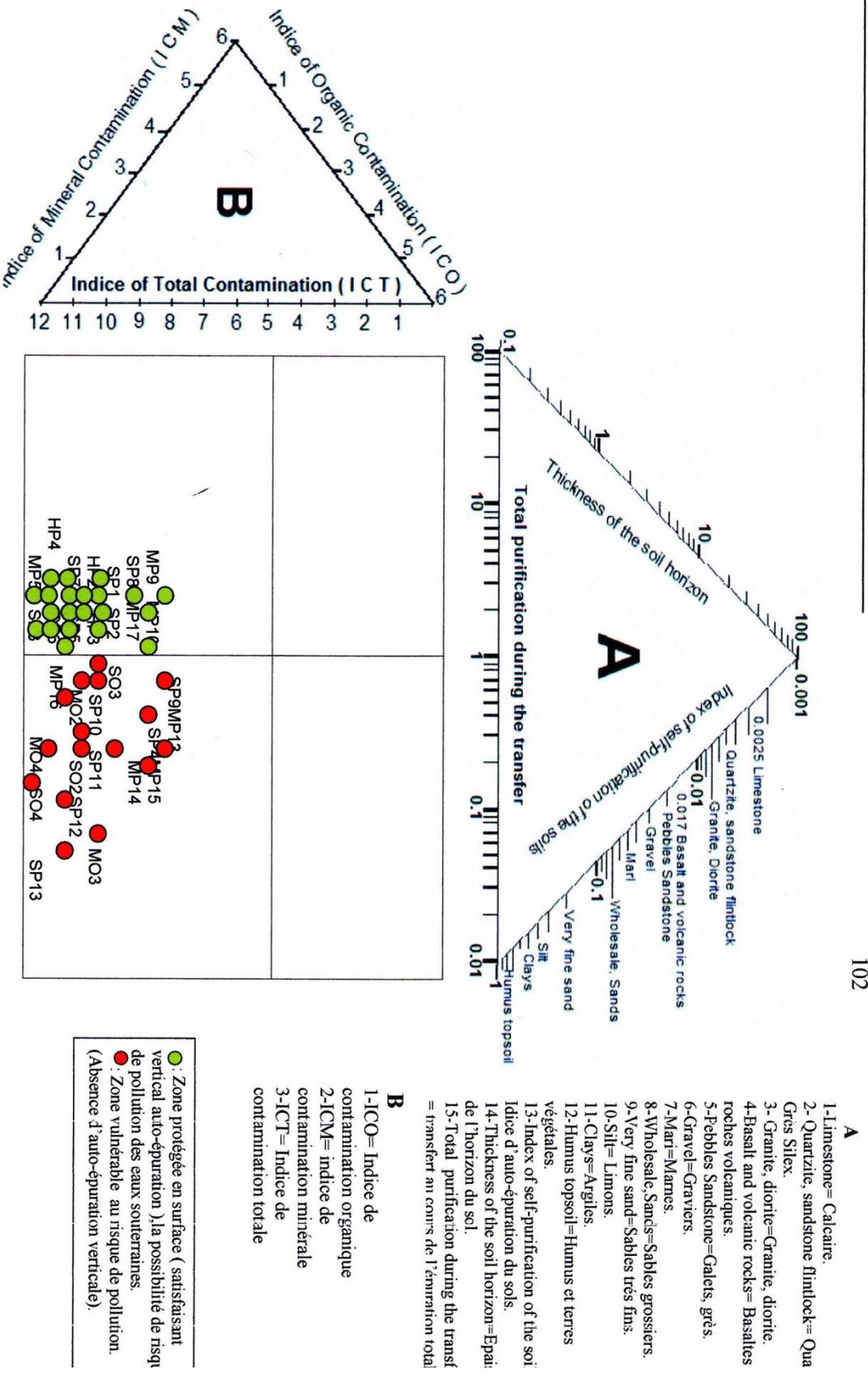


Fig.76 : Détermination des zones de la vulnérabilité et de risque de pollution (N.Khérici,2010) « nappe superficielle »

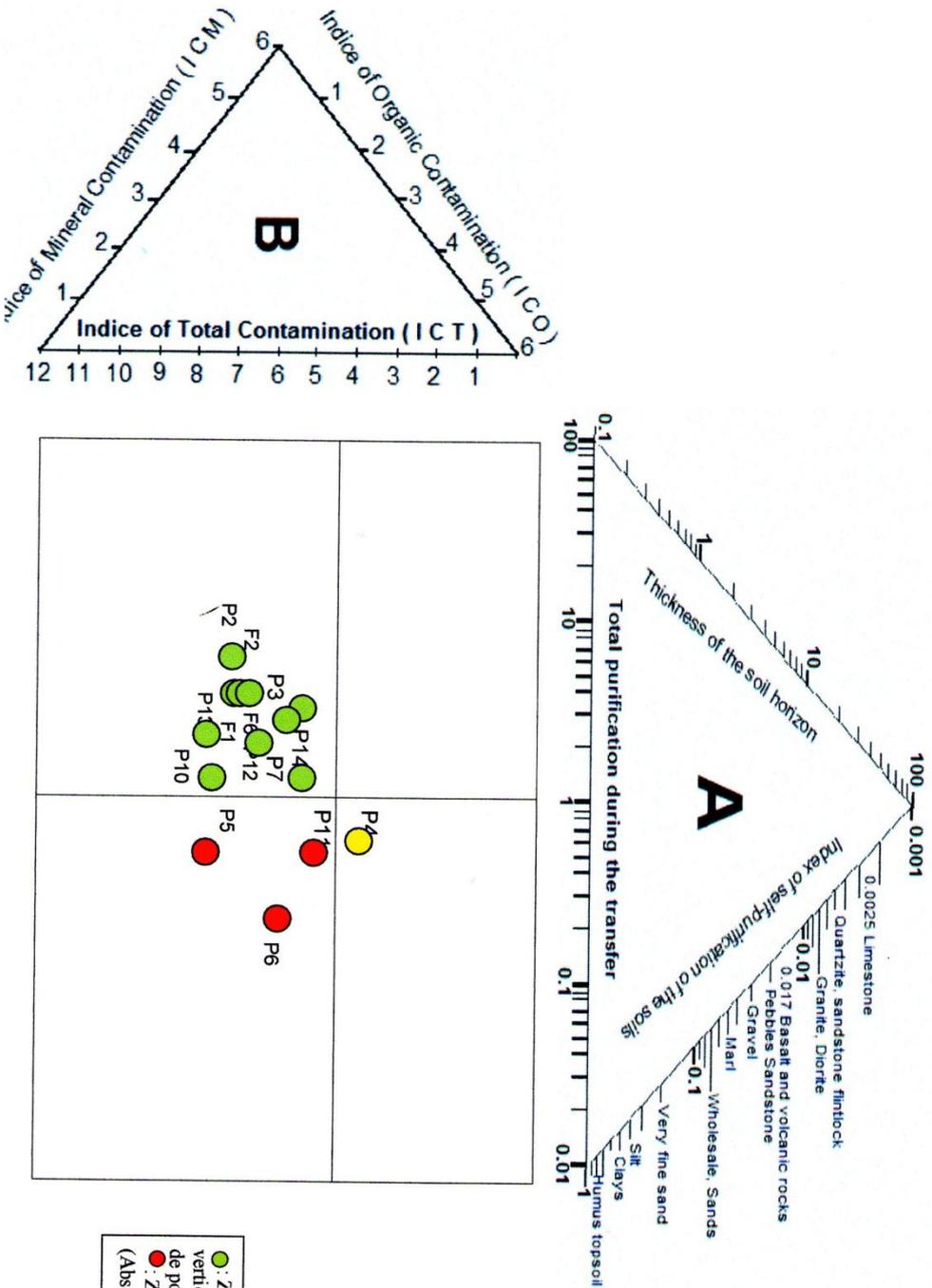


Fig.77: Détermination des zones de la vulnérabilité et le risque de pollution (N.Kherici,2010) « Nappe de La plaine d'El-Tarf ».

V.4-4–Interprétation de la carte de Vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines :

V.4-4-1/Le massif dunaire :

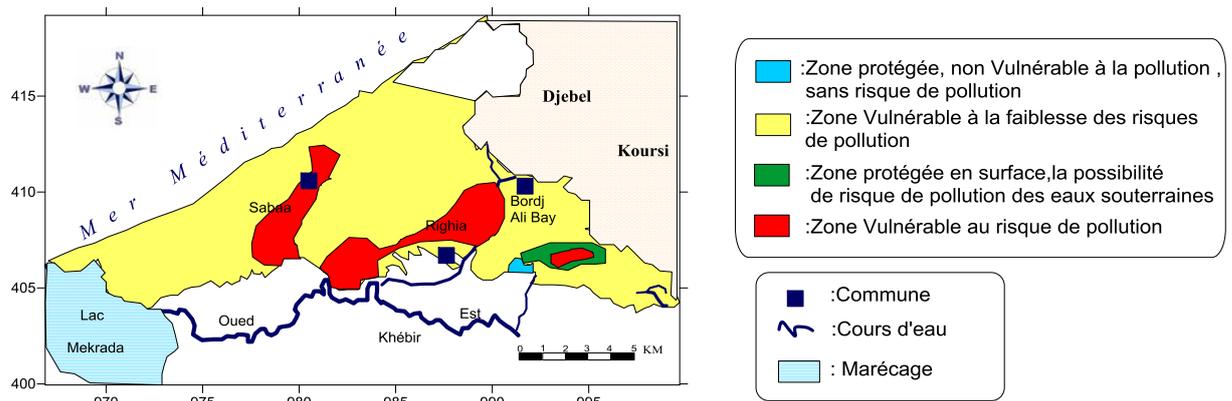


Fig.78 Carte de vulnérabilité et de risque de pollution des eaux de la nappe du Massif dunaire de Bouteldja

La vulnérabilité et le risque de pollution des eaux souterraines occupe le centre du massif dunaire, la raison réside dans la présence d'un terrain constituée de formations perméables essentiellement des sables fins à moyens, et des sables avec des graviers (situés dans la région centrale de la région de Sebaa à coté de Righia et au sud-est de Borj Ali bey où le pouvoir épurateur du sol sur le trajet vertical **Md** est inférieur à **1** donc l'autoépuration n'est pas totale, la contamination si elle existe doit se poursuivre dans la couche aquifère (zone saturée). A cet endroit l'indice de contamination minéral (ICM) est important dans certains forages de l'ordre de 5, de même l'indice de contamination organique (ICO) est élevé de l'ordre de 6 dans les puits au voisinage des agglomérations. Cette zone est la plus accessible à la pollution avec un risque de contamination élevé(**Fig.78**).traduisant un pourcentage de 34%de la totalité du massif dunaire.

Le terrain vulnérable à faibles risques de pollution est occupe presque la totalité du massif dunaire observé dans la partie Nord et l'Ouest de Bouteldja, où la lithologie présente des sables fins à grossiers et des sables avec graviers. A cet endroit le pouvoir épurateur du sol sur le trajet vertical **Md** est inférieur à **1** du au niveau piézométrique qui est très poche de la surface du sol, ce qui donne un l'autoépuration satisfaisant n'est pas totale elle doit se poursuivre dans la couche aquifère (la zone saturée) présente une valeur de 56% de la totalité du massif dunaire .(**Fig.79**).

Le terrain protégé en surface mais présentant un risque de pollution des eaux souterraines, se localise dans la partie Nord Est et à l'Ouest de Bouteldja. La lithologie de ce terrain est constituée de sables fins à sables argileux et d'argiles où on note un pouvoir épurateur du sol sur le trajet vertical **Md** supérieur à **1** lié à l'importance du niveau piézométrique par rapport au sol donnant une valeur de l'ordre de 8% de la totalité du massif .

La zone protégée avec un faible risque de pollution occupe une superficie très limitée dans le massif dunaire de Bouteldja (forage 6918), située au sud de Borj Ali bay traduisant un pourcentage de l'ordre de 2%.

Md est supérieur à **1** du fait de l'importance du niveau piézométrique par rapport à la surface du sol.

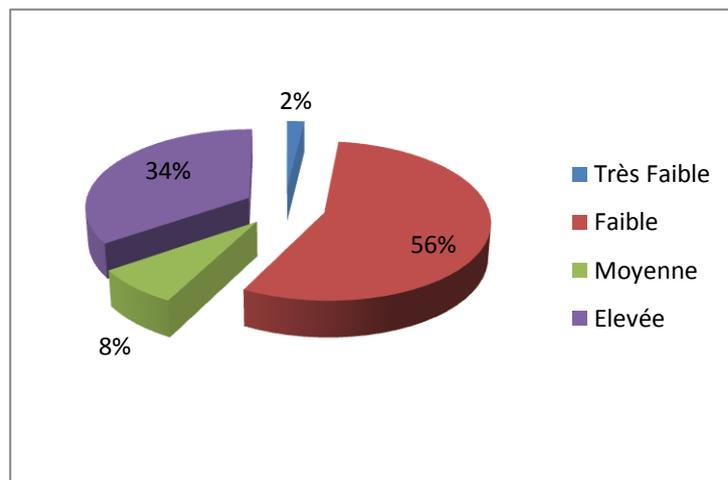


Fig.79 : Répartition du degré de vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines du Massif Dunaire de Bouteldja selon la méthode de Khérici(2010)

V.4-4-2/La nappe libre d'El-Chatt :

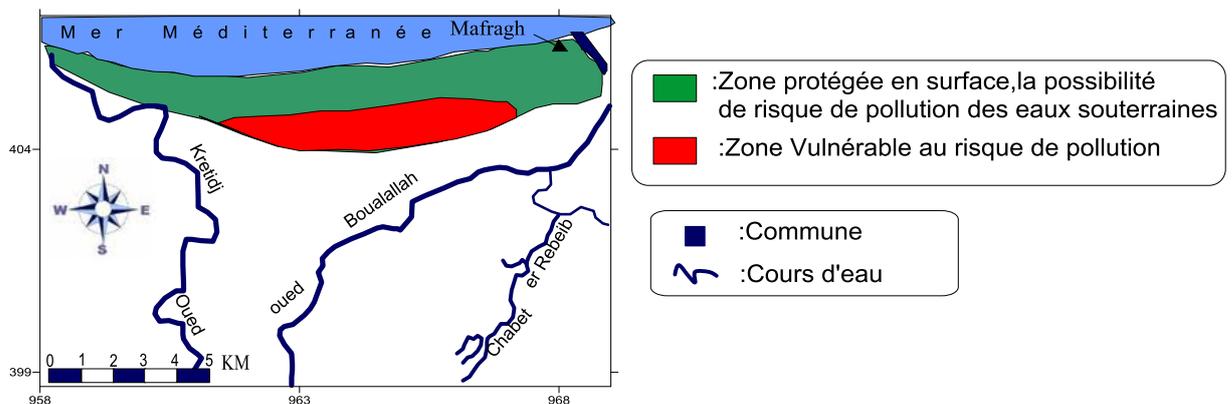


Fig.80: Carte de vulnérabilité et de risque de pollution de la nappe libre du Cordon Dunaire d'EChatt

Le terrain vulnérable avec risque de pollution occupe la majorité du cordon dunaire d'El-Chatt, la lithologie de ce terrain est formée par des sables blancs éoliens, où nous notons un pouvoir épurateur du sol sur le trajet vertical **Md** inférieur à **1** (les niveaux piézométriques de cette région sont très proches de la surface du sol) et l'indice de contamination organique (**ICO**) est élevé de l'ordre de **5** traduisant une valeur de 25% de la totalité du cordon dunaire.

Le terrain protégé présentant un risque de pollution occupe le centre de la commune. La lithologie est la même, le pouvoir épurateur du sol sur le trajet vertical **Md** est supérieur à **1**, avec un niveau piézométrique loin de la surface du sol et des valeurs élevées de l'indice de contamination organique (**ICO**), présentant un pourcentage de 75% de la totalité du cordon dunaire (**Fig.81**).

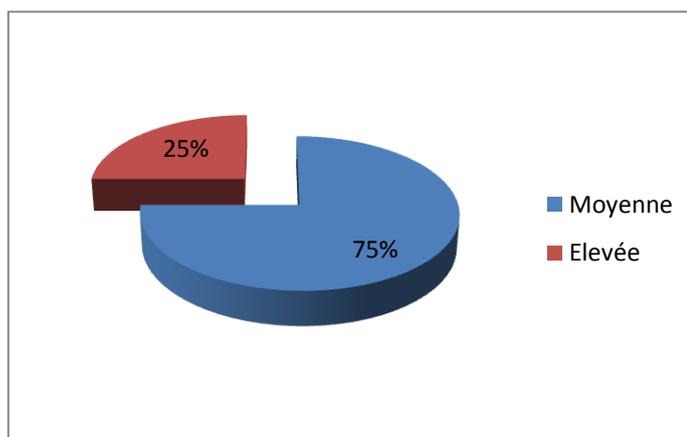


Fig.81 : Répartition du degré de vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines du Cordon Dunaire d'El-Chatt selon la méthode de Khérici(2010)

V.4-4-3/La nappe superficielle :

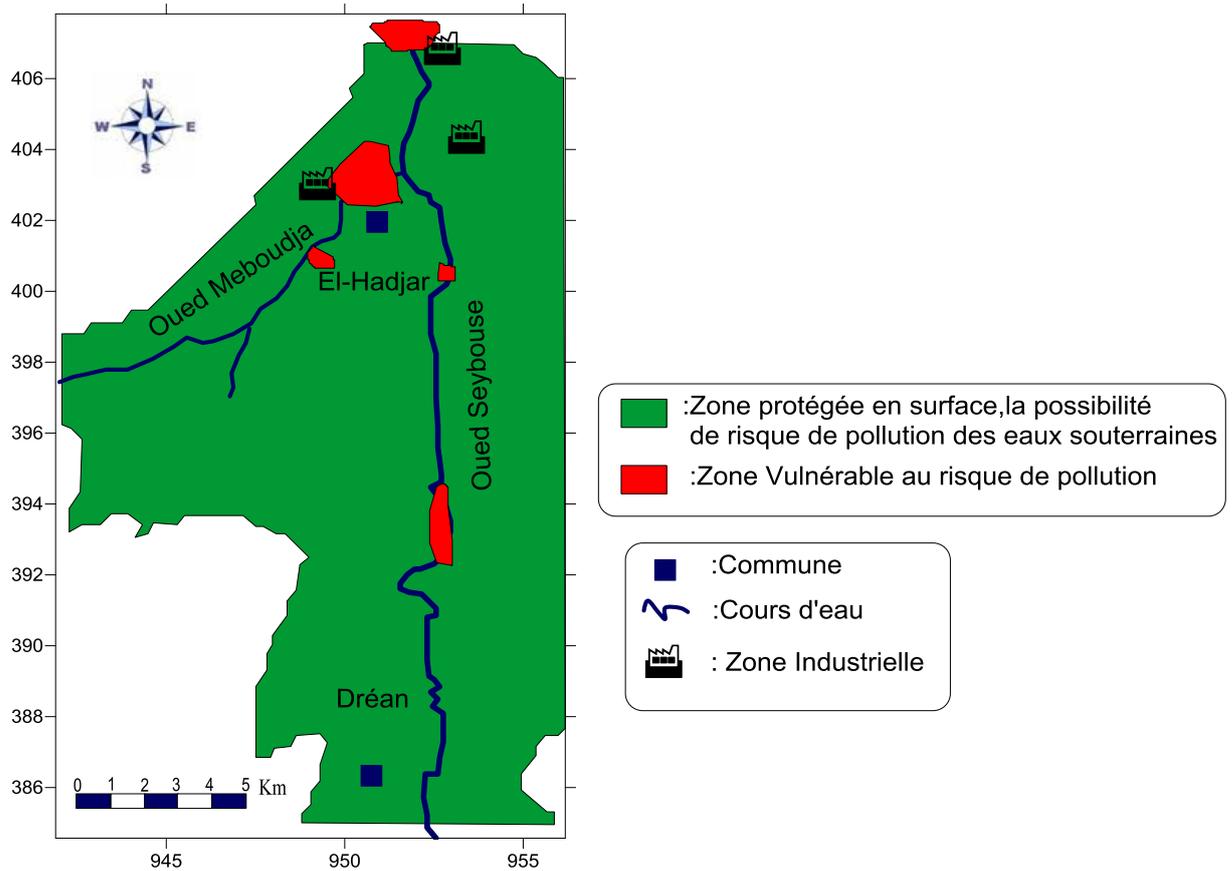


Fig. 82 : Carte de vulnérabilité et de risque de pollution des eaux de la nappe superficielle dans la région d'Annaba

Dans cette nappe il existe deux types de terrains :

Les terrains vulnérables avec risque de pollution, occupent la zone colorée en vert. La lithologie de ces terrains est essentiellement formée de couches sablo-argileuses avec un pouvoir auto épurateur du sol sur le trajet vertical **Md** inférieur à **1** lié surtout au niveau piézométrique proche de la surface du sol. L'indice de contamination minérale (**ICM**) est très élevé de l'ordre de **6** présente une valeur de 8% de la totalité du nappe.

Le vert qui occupe presque toute la plaine d'El-Hadjar indique un terrain protégé en surface et la possibilité de risque de pollution des eaux souterraines. La lithologie est presque la même (la présence des argiles qui protègent la nappe contre la pollution) où la valeur du pouvoir épurateur du sol sur le trajet vertical **Md** est supérieur à **1** et des valeurs élevées de l'indice de contamination minérale (**ICM**) et organique (**ICO**) traduisant un pourcentage de 92% de la totalité du nappe(**Fig.83**).

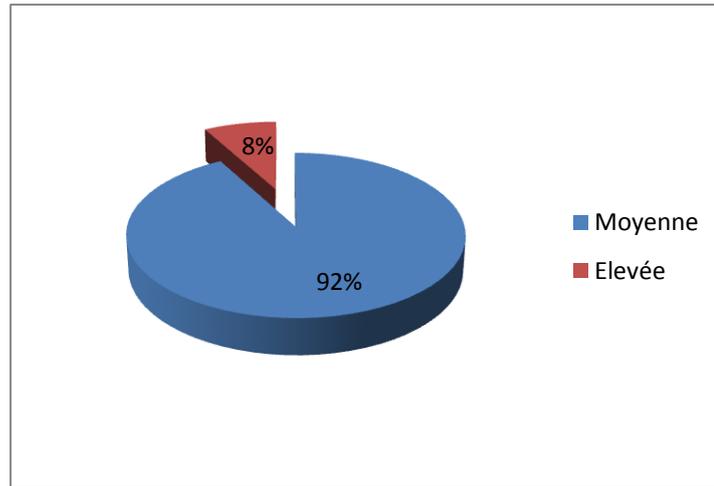


Fig.83 :Répartition du degré de vulnérabilité à la pollution des eaux de la nappe superficielle selon la méthode de Khérici(2010)

V.4-4-4/La nappe profonde :

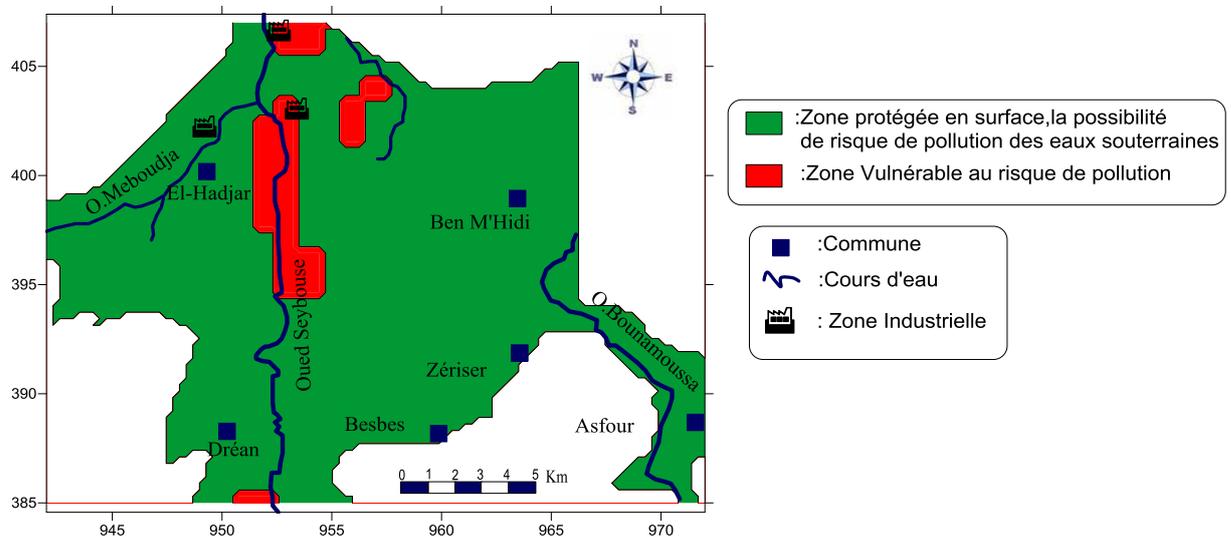


Figure.84 : Carte de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines de la nappe de la plaine d'Annaba selon la méthode de (Khérici,2010).

Le rouge est moins présent, il occupe des surfaces très limitées dans la plaine d'Annaba le long de l'Oued Seybouse, ce qui indique une zone vulnérable et présente un risque de pollution. La lithologie de la zone non saturée est argilo-marneuse, où le pouvoir épurateur du sol sur le trajet vertical Md est supérieur à 1 dans la majorité des forages. L'indice de contamination minérale (**ICM**) et organique (**ICO**) sont élevés respectivement

de l'ordre de **6** (forages des salines) et de l'ordre de **5** (forages de Pont Bouchet).Présentant une valeur de 6% de la totalité de la plaine.

Le vert occupe presque toute la partie de la nappe profonde d'El-Hadjar vers Ben M'Hidi, El Asfour avec une protection idéale de la nappe. La majorité des forages et des puits ont un pouvoir épurateur du sol sur le trajet vertical **Md** supérieur à **1**, de l'ordre de **5**, à ces endroits la couche d'argile est très épaisse, elle est de l'ordre de 10 à 15m avec des indices de contamination minérale (**ICM**) dépassant parfois **6**.Traduisant un pourcentage de 94% de la totalité de la plaine (**Fig.85**).

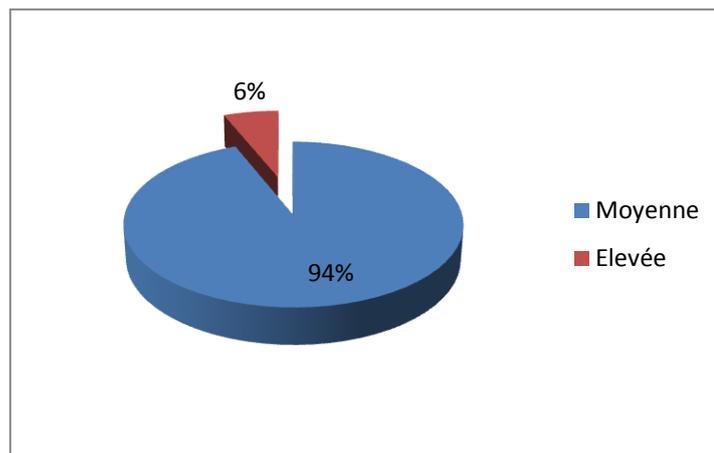


Fig 85:Répartition du degré de vulnérabilité à la pollution de la nappe profonde d'Annaba selon la méthode de Khérici(2010)

V.4-4-5/Relation nappe superficielle – nappe des graviers

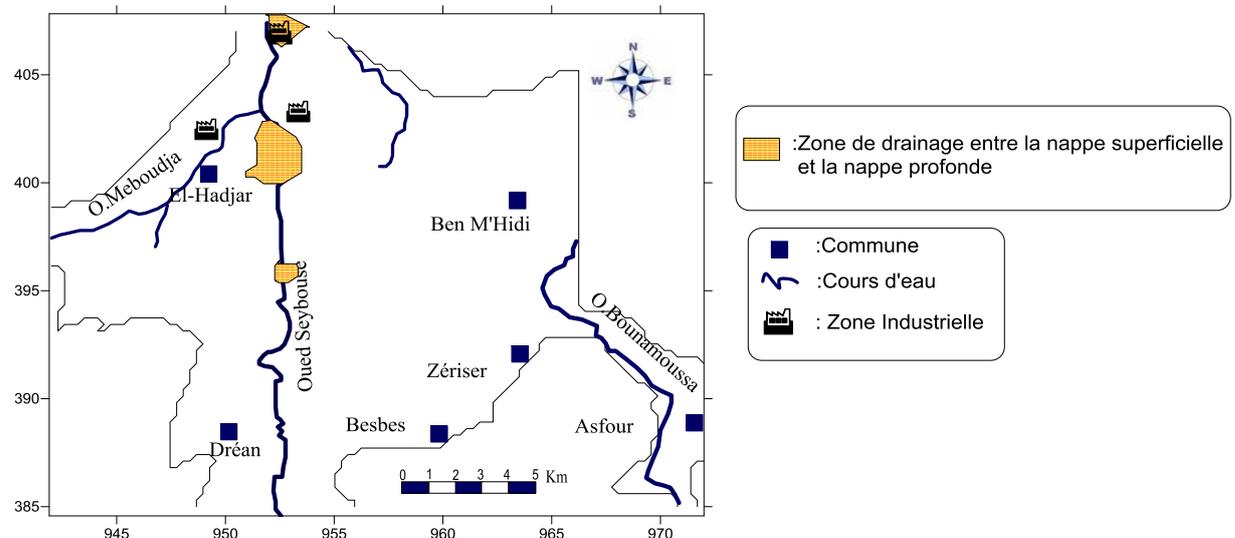


Fig.86: carte représentative du phénomène de drainance entre les deux nappes

Une projection graphique de la vulnérabilité et risque de pollution des eaux de la nappe superficielle sur de la nappe des graviers a été faite sur un profil sud – nord

On note que les deux nappes sont confondues (transport de polluants de la nappe superficielle vers la nappe profonde à cause de la lithologie identique encaissant des deux nappes et la circulation des eaux entre elles. Lors du passage dans la zone de transit entre les deux nappes, on observe une infiltration progressive du polluant, vu la variation de la structure et la morphologie de l'aquifère. Ce phénomène est bien marqué le long de l'oued Seybouse(Fig86).

V.4-4-6/Nappe de la plaine d'El-Tarf :

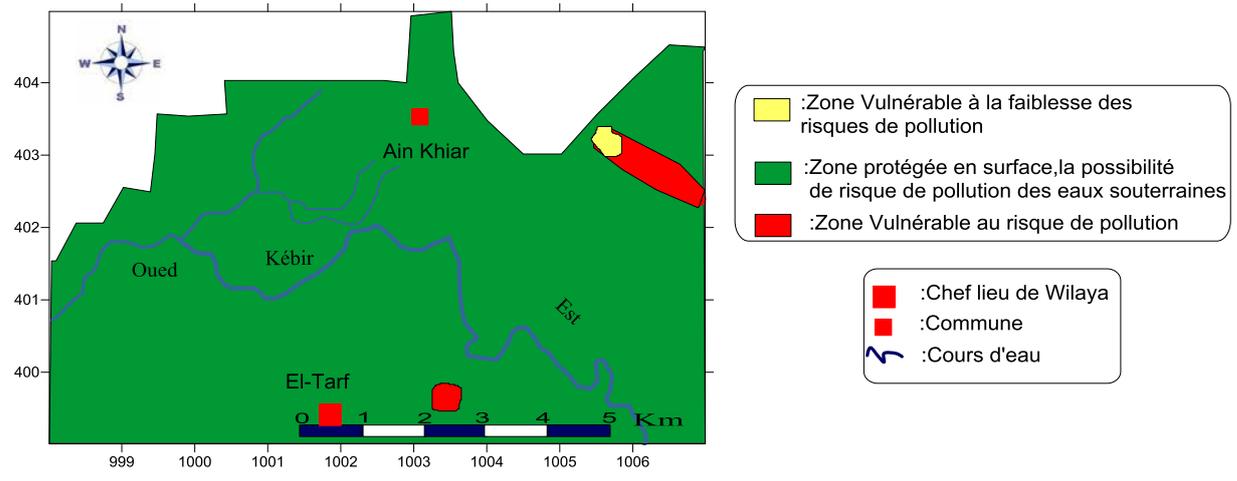


Figure.87 : Carte de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines de la nappe de la plaine d'El-Tarf selon la méthode de (Khérici,2010).

- L'espace identifié par la couleur jaune montre une zone vulnérable à faible risque de pollution des eaux souterraines couvre une surface très limitée située au Nord-est de Ain Khiair ou le $Md < 1$, où l'indice de contamination totale est relativement faible de l'ordre de 4 traduisant un pourcentage de 2% de la totalité de la plaine.
- L'espace identifié par la couleur verte occupe pratiquement toute la plaine d'El-Tarf, à ces endroits on note un indice d'autoépuration supérieur à 1 et un indice de contamination totale moyen de l'ordre de 7.(Fig87).correspond au 93% de la surface totale de la plaine.(Fig88).
- L'espace identifié par la couleur rouge occupe deux zones séparées dans la plaine et présente une superficie limitée située au Nord-est de Ain Khiair et à l'Est du chef lieu de la commune d'El-Tarf qui identifie une zone vulnérabilité au risque de pollution, du fait de la faiblesse de l'indice d'autoépuration ($Md < 1$),où la profondeur de l'eau est relativement faible inférieure à 1m.cette zone correspond à une valeur de 5% de la totale .

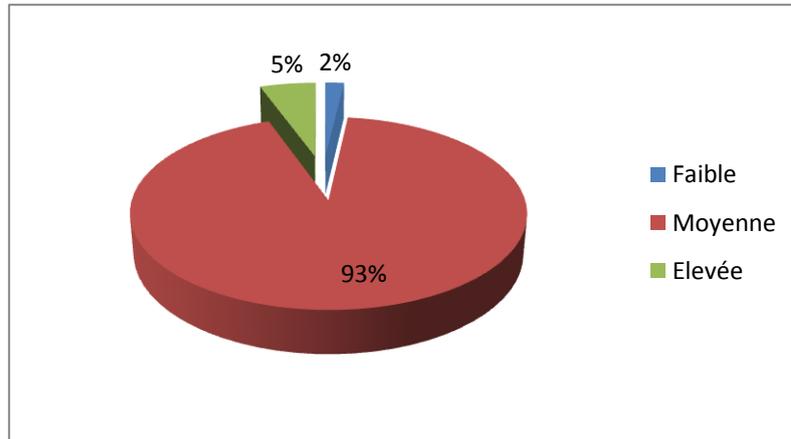


Fig.88: Répartition du degré de vulnérabilité à la pollution des eaux de la nappe d'El-Tarf selon la méthode de Khérici(2010)

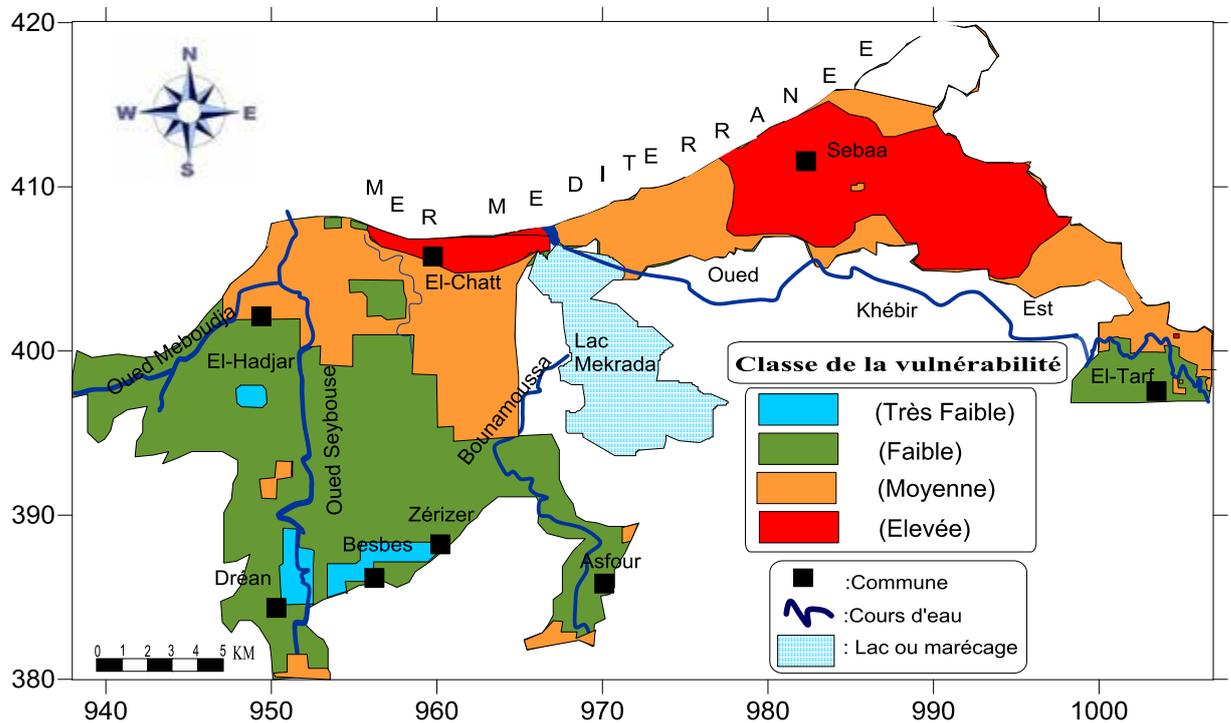


Fig.89 : Carte de vulnérabilité à la pollution des eaux par la combinaison des deux méthodes DRASTIC et GOD (les plus pessimistes zones de vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines)

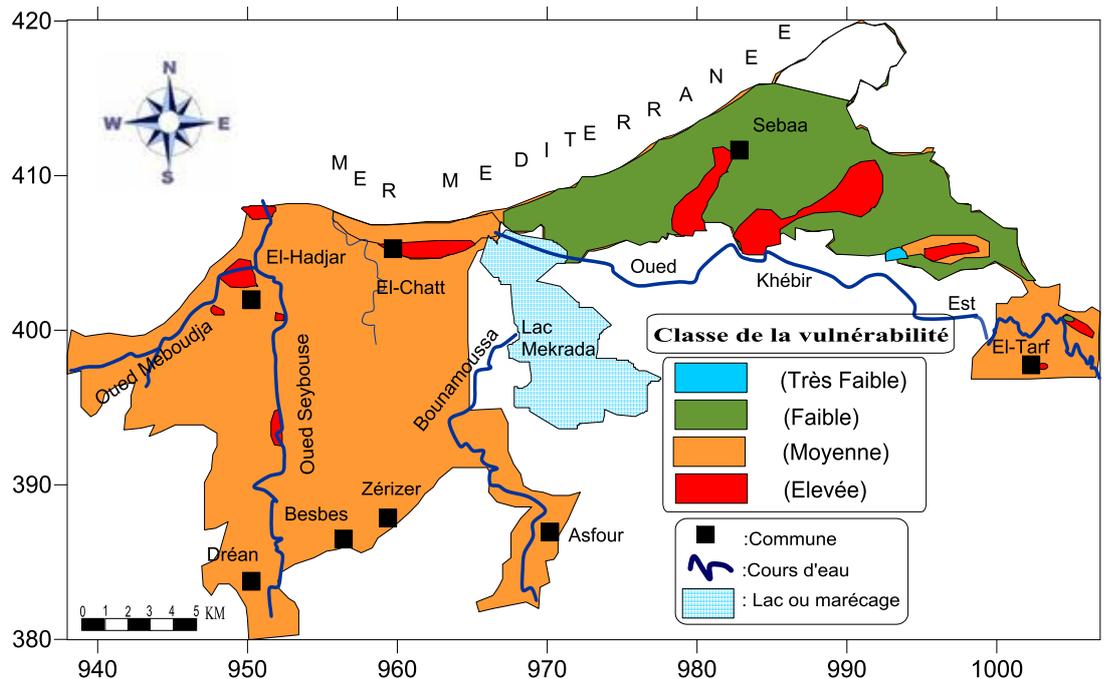


Fig .90: Carte de vulnérabilité à la pollution globale de la région Selon la méthode de vulnérabilité et risque de pollution (Khérici,2010)

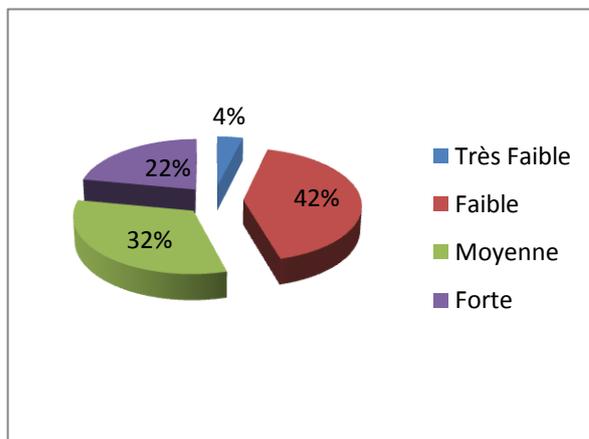


Fig.91: Distribution de vulnérabilité à la pollution par la combinaison entre les deux méthodes DRASTIC et GOD en pourcentages

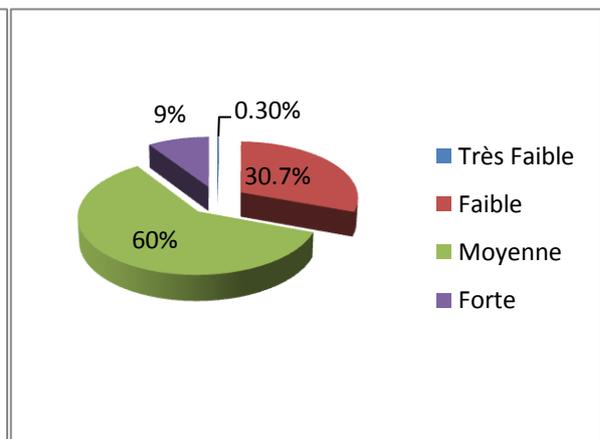


Fig.92 : Distribution des degrés de vulnérabilité Selon la méthode de vulnérabilité et risque de pollution (Khérici,2010) en pourcentages

L'analyse des cartes (Fig.91,92) de vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines par les différentes méthodes et on se basant sur les cas les plus pessimistes, montre que les classes très faibles et faibles occupent environ 31% de la surface totale, la classe moyenne de vulnérabilité occupe 60% tant dis que la classe forte représente moins de 10% de la surface totale.

V.4-4-7/Recommandation : après l'application des différentes méthodes d'estimation de la vulnérabilité à la pollution : plusieurs questions sont posées :

- 1- Sur quelles bases les chercheurs ont précisés ces valeurs de poids et de cotation des paramètres de GOD et DRASTICet sur quelle base ils limitent les chiffres de 1 à 10 et comment ils ont pu estimer le poids des paramètres (exemple l'indice de profondeur *5 et recharge *2)
- 2- Pour le calcul de l'indice du paramètre Recharge (infiltration), on utilise les résultats de calcul de l'infiltration à partir de l'équation de berkloffet du bilan hydrique, sans prendre en compte de nombreux facteurs influençant la capacité d'infiltration vers la zone saturée tel que (perméabilité du terrain, l'intensité de pluie ,la couverture végétale, la géologie, la pente du terrain,et le couvert végétal) Le tableau 35 montre la méthode d'estimation de la recharge.

Tableau35 : Estimation du pourcentage de l'infiltration et le ruissellement

| | Facteurs | Géologie | Couverture végétale | perméabilité | Intensité de pluie | Pente du terrain | Σ | % |
|-------------------|---------------|----------|---------------------|--------------|--------------------|------------------|----------|-----|
| AN NAB A | Infiltration | + - | + - | + - | + - | + - | 5+ 5- | 50% |
| | Ruissellement | + - | + - | + - | + - | + - | 5+ 5- | 50% |
| EI- CH ATT | Infiltration | + + | + - | ++ | + - | ++ | 8+ 2- | 80% |
| | Ruissellement | -- | + - | -- | + - | -- | 8- 2+ | 20% |
| BOU TEL DJA | Infiltration | ++ | + - | ++ | + - | ++ | 8+ 2- | 80% |
| | Ruissellement | -- | -+ | -- | -+ | -- | 8- 2+ | 20% |
| EL- TAR F | Infiltration | + - | -+ | -+ | -+ | -+ | 5+ 5- | 50% |
| | Ruissellement | -+ | + - | + - | + - | + - | 5+ 5- | 50% |

+ : facteur favorable

- : Facteur défavorable

3- De plus pour mieux estimer le degré de vulnérabilité à la pollution d'une nappe, il est apparaît largement insuffisant de déterminer les facteurs naturelles (profondeur de l'eau, type de sol) influençant la rapidité du transport du polluant vers la zone saturée, en écartant les facteurs anthropiques qui identifient le risque de pollution des eaux.

Cependant la 3^{ème} méthode, malgré des imperfections mineurs notamment la validité du calcul de l'autoépuration, elle demeure en général la mieux appropriée pour le calcul de la vulnérabilité et le risque de pollution des eaux souterraines.

4- Contrairement à la troisième méthode les deux premières méthodes utilisées (DRASTIC, GOD) ne nous renseignent aucunement sur le risque de pollution des eaux de surface et souterrain comme le cas de relations verticales et horizontales des aquifères (cas de l'aquifère d'Annaba).

V.4-5-Conclusion :

L'étude comparative menée a aboutit à des résultats sur la validation de 3 méthodes d'estimation de la vulnérabilité à la pollution, il ressort que la méthode de vulnérabilité et risque de pollution (Khérici2010) est celle qui caractérise le mieux la vulnérabilité des eaux de la nappe à la pollution, en plus elle permet d'estimer le risque de pollution des eaux. Il ressort que la surface à forte vulnérabilité est actuellement estimée à moins de 10% de la superficie totale, néanmoins si les procédures de protection ne sont pas mises en œuvre dans un avenir proche les 60% représentant la zone à moyenne vulnérabilité, risquent de totaliser avec les 10% trois quart de zones vulnérables à la pollution des eaux souterraines de la région.

Chapitre VI:
Choix du Sites

VI.1-GENERALITES

L'intérêt porté à l'environnement s'est considérablement développé, et la protection de l'environnement est à présent inscrite dans l'action continue des administrations et des industriels. La prise de conscience de la gravité des problèmes posés par les déchets solides et liquides sur l'environnement en général et sur les ressources en eau en particulier est une réalité. En effet l'essor industriel et l'accroissement de la production ainsi que la densité de la population dans les villes font qu'aujourd'hui le volume des déchets urbains a beaucoup augmenté et on constate une prolifération des décharges publiques sauvages. Ces dernières constituent une réelle et permanente menace à la qualité de la vie. En plus il est difficile de trouver de nouveaux sites d'enfouissement.

La gestion des déchets solides représente l'un des défis les plus importants de nos grandes sociétés urbaines et industrielles. Si l'enfouissement sanitaire des déchets produits par la population, les institutions publiques et privées, les commerces et les industries est pratique courante dans les pays industrialisés, cette dernière est à peine amorcée dans les pays en développement. Aussi il est de plus en plus difficile de trouver de nouveaux sites d'enfouissement, et les gens ne veulent pas vivre à côté d'une décharge à cause des odeurs et du mouvement permanent des camions. Concernant la mise en décharge des déchets industriels, les industriels producteurs de déchets, cherchent souvent à trouver des méthodes techniquement et économiquement acceptables pour éliminer certains déchets. Afin d'éviter des traitements coûteux notamment en énergie, ou générateurs de nouvelles pollutions (atmosphériques par exemple) en procédant à une mise en décharge contrôlée. Pour ces décharges ou ces sites, les autorités locales administratives (Mairies, Wilayas et notamment les agences de l'environnement doivent exiger une autorisation spéciale pour que la mise en décharge soit contrôlée. Ainsi les déchets industriels peuvent être schématiquement classés en deux groupes:

1. Déchets industriels "banals ", pouvant être traités avec les ordures ménagères et dans les mêmes conditions. Ils peuvent ainsi être mis dans les décharges autorisées pour les résidus urbains. Cependant, il y a lieu d'éviter la multiplication des décharges sur le territoire. Par ailleurs, afin de permettre de meilleures conditions d'exploitation et un meilleur contrôle des déchets entrants, il est nécessaire que les décharges aient une capacité suffisante. Il est donc souhaitable, dans la mesure du possible, de rechercher et (ou) d'autoriser, dans chaque

région, un nombre limité de sites capables de recevoir simultanément les résidus urbains et les déchets de l'industrie qui leur sont assimilables.

2. Déchets industriels spéciaux: Certains d'entre eux peuvent être mis en décharges contre un certain nombre d'obligations concernant notamment les modalités d'exploitation à imposer, le contrôle des déchets entrants, la surveillance à long terme. Cependant, il est nécessaire d'identifier au moins une décharge par région apte à recevoir certains déchets industriels spéciaux, ainsi que les ordures ménagères et les déchets industriels banals. Dans certains cas, compte tenu des conditions locales, il pourra être nécessaire de prévoir deux ou trois sites ou même davantage dans les régions très industrialisées.

V1.2-COMMENT CHOISIR UN SITE :

Un site favorable, apte à recevoir une gamme étendue de déchets spéciaux, constitue l'élément fondamental pour une décharge de déchets industriels. Ce choix est évidemment fonction des déchets concernés, mais doit également prendre en compte un certain nombre de paramètres concernant le site, dont il convient d'établir la liste et de préciser l'importance relative. Ainsi on peut noter un certain nombre de paramètres qui doivent être pris en considération dans le choix du site. Selon des expériences menées dans divers pays étrangers, on peut classer les sites en quelques catégories et de ce fait leur associer une gamme de déchets admissibles ou à exclure en fonction de leur quantité, de leur solubilité, de leur toxicité, de leur concentration,...etc.. Il a été défini trois types de sites, en fonction des propriétés de perméabilité de la couche géologique située immédiatement sous le fond de décharge:

1° Les sites imperméables qui assurent un confinement convenable de déchets et des lessivats et qui doivent en particulier pouvoir accueillir certains déchets spéciaux. Un site pourra être considéré de **classe 1** si le substratum contient sur toute l'étendue de la future décharge un niveau dont le coefficient de perméabilité K est égal ou inférieure à 10^{-9} mètres/seconde, et dont l'épaisseur est au moins équivalente à 5 mètres.

Deux considérations devront alors guider le choix d'un site imperméable:

- le caractère effectif de l'étanchéité du fond de décharge;
- la possibilité de mettre en œuvre une évacuation sans nuisance de l'excédent des précipitations par rapport au potentiel d'évaporation.

Les principales caractéristiques indispensables d'un site de 1^{ère} classe seront donc:

- a- Imperméabilité du fond de décharge.
- b- Aptitude du site à un façonnage garantissant les écoulements en fond de décharge vers un point bas.

c- Aptitude à l'implantation d'un ouvrage de contournement évitant les entrées d'eaux de surface.

d- Aptitude à une couverture finale en pente favorisant le ruissellement.

A cela il est souhaitable que les précipitations soient limitées inférieures à 750 mm/an; et la possibilité de raccordement à une station d'épuration existante.

2° Les sites semi-perméables qui assurent une migration lente du lessivat à travers une zone non saturée d'épaisseur suffisante, et qui pourront principalement recevoir les déchets industriels assimilables aux ordures ménagères. Dans les mêmes conditions, un site appartenant à la **classe 2** avec des niveaux de présentation des valeurs de K comprises entre 10^{-9} et 10^{-6} mètres/seconde.

Il s'agit de sites qui n'assurent aucun confinement mais autorisent la migration à faible débit du lessivat de telle sorte que des processus naturels de captage ou de dégradation des éléments polluants apparaissent avant que ce lessivat n'atteigne les eaux souterraines. De tels sites sont acceptables, notamment pour des matières dégradables (par exemple : ordures ménagères et déchets industriels assimilables), il est d'autant acceptable si il est surmonter par une importante zone non saturée permettant une meilleure autoépuration (constituée de sables ou de limons...). Ce site doit être suffisamment loin de points de captages d'eau, de telle sorte que la dilution des produits solubles de fin de dégradation soit suffisante.

Les paramètres intervenant dans l'évaluation des sites de cette classe seront par ordre d'importance décroissante:

a- La capacité de la zone non saturée, à assurer une épuration des lessivats issus de la décharge.

b- L'infiltration potentielle résultant du bilan d'eau effectué comme pour les sites de **classe 1**. Une hauteur d'eau infiltrée modérée après la couverture finale sera un facteur favorable.

c- L'intérêt de garantir la protection des eaux souterraines contre les pollutions. La présence d'une nappe durablement inutilisable est un facteur très favorable. Inversement, on évitera les risques vis-à-vis de nappes exploitées ou exploitables présentant un intérêt.

3° Les sites perméables qui permettent une migration rapide du lessivat, et qui devront être écartés pour les déchets industriels. Ces sites sont tels qu'ils permettent une migration des lessivats à un taux empêchant une atténuation significative et constituant par conséquent un risque aigu de pollution des nappes. De tels sites ne peuvent convenir que pour des déchets inertes et sont donc à proscrire pour les autres déchets. Les sites présentant un substratum à

perméabilité de fissures, ou un coefficient K moyen supérieur à 10^{-6} mètres/seconde, appartiendront à la **classe 3**.

En plus des conditions géologiques, hydroclimatologiques et hydrogéologiques (les critères secondaires suivants: grande épaisseur des formations à faible perméabilité; faible importance des ressources aquifères souterraines; faible pluviosité, topographie locale permettant un drainage et une évacuation des eaux vers une zone non sensible), le critère essentiel à examiner sera la valeur moyenne du coefficient de perméabilité K des formations non saturées constituant le substratum de la future décharge.

En ce qui concerne l'admissibilité des déchets spéciaux, chaque site devra comporter une liste des déchets interdits sur le site (liste négative) et une liste limitative des déchets pouvant être admis (liste positive). Nécessairement, les listes d'autorisation devront tenir compte de la nature précise du déchet, des quantités en cause, et des caractéristiques précises du site. En plus pour tout types de déchets, il est évident d'instaurer des contrôles inopinés de laboratoire et visuel (aux frais de l'exploitant) pour vérifier que le déchet est bien admissible. Le contrôle de l'évolution de la décharge et de la qualité des eaux est indispensable, ce qui nécessite la mise en place de puits d'observation.

Un site favorable, apte à recevoir une gamme étendue de déchets spéciaux, constitue l'élément fondamental pour une décharge de déchets industriels. Ce choix est évidemment fonction des déchets concernés, mais doit également prendre en compte un certain nombre de paramètres concernant le site,

L'approche proposée s'appuie sur des expériences menées dans divers pays étrangers. Elle permet de classer les sites en quelques catégories et de leur associer une gamme de déchets admissibles ou à exclure en fonction de leur quantité, de leur solubilité, de leur toxicité, de leur concentration,...etc.. Il est possible de considérer trois types de sites, en fonction des propriétés de perméabilité de la couche géologique située immédiatement sous le fond de décharge :

1° Les sites imperméables qui assurent un confinement convenable de déchets et des lessivas et qui doivent en particulier pouvoir accueillir certains déchets spéciaux.

2° Les sites semi-perméables qui assurent une migration lente du lessivat à travers une zone non saturée d'épaisseur suffisante, et qui pourront principalement recevoir les déchets industriels assimilables aux ordures ménagères.

3° Les sites perméables qui permettent une migration rapide du lessivat, et qui devront être écartés pour les déchets industriels.

Dans la zone d'étude, notamment la plaine de Annaba–El-Tarf , l'identification de site d'enfouissement de déchets ou de décharge publiques est à écarter pour préserver les réservoirs de ressources en eaux souterraines de la région. On va donc essayer de localiser éventuellement des sites au niveau des zones montagneuses (montagnes qui sont situées au Sud de la plaine). Avec l'identification des caractéristiques hydroclimatologiques, géologiques et hydrogéologiques de ces terrains, et par la nouvelle vue d'aménagement sur la zone d'étude (des nouveaux projets proposés sur cette zone à court et long terme) on va pouvoir étudier la possibilité de situer des sites d'enfouissement de déchets.

VI.3- Caractéristique du premier Site :

VI.3.1-Climatologie :

Pour déterminer quelle pourra être la destination des lessivats recueillis aux points bas du fond de décharge, il est nécessaire d'établir le bilan prévisionnel des entrées et des sorties d'eau dans l'excavation à exploiter.

Supposant écartés, le cas échéant, par des drainages appropriés, les apports d'eaux de ruissellement venus de l'extérieur du site, ce bilan comporte principalement:

- Les précipitations;
- L'eau incluse dans les déchets dont le stockage est envisagé;
- L'évaporation et l'évapotranspiration;
- Le ruissellement superficiel;
- La variation des réserves dans le sol de couverture.

On identifie le premier site à l'Est du massif dunaire de Bouteldja à l'endroit de Djbel Korssi, d'après la station la plus proche (Ain El Assel), les données climatiques de cette station pour la période (1990-2008) indiquent que cette région est soumise à un climat humide, où les précipitations avoisinent 816.71mm, le ruissellement 181.58mm (l'altitude du site plus de 300 m) et une valeur d'infiltration de 157.33mm.

VI.3.2- Géologie :

Les formations géologiques du site sont constituées d'argiles variées d'âge Oligocène moyen à supérieur, constituant la base de la série gréseuse. Cette dernière d'âge Aquitainien de type flysch, en gros bancs parfois décimétriques, bien réglée à grains hétérométriques de couleurs rougeâtre ou jaunâtre.

VI.3.3- Hydrogéologie :

Cette formation est dite semi-perméable elle est composée de grès Numidiens superposés sur un substratum imperméable argileux, au niveau des pentes généralement cette formation ne contient pas d'aquifères mais les eaux de ruissellement sont non négligeables

VI.3.4- Aménagement de territoires :

Ce site est localisé dans le parc national d'El-Kala exactement à l'Est du massif dunaire de Bouteldja, classé sur la liste du patrimoine national et réserve de biosphère par l'UNESCO en 1990 .

VI.3.5- Recommandation :

Le site comporte des avantages applicables pour le choix de site :

1. Site à substratum semi-perméable: assurant une migration lente de lessivat à travers une zone non saturée, et pourra principalement recevoir les ordures ménagères et les déchets industriels assimilables aux ordures ménagères.
2. Dans le cas de la mise en décharge de déchets contenant des métaux, la présence d'argile à une teneur au moins égale à 3 % offrira une capacité d'échange cationique permettant de capter de grandes quantités de métaux, à condition que la teneur en matières organiques soit faible. La présence des argiles dans les formations gréseuses est bien marquée.
3. Aptitude à l'implantation d'un ouvrage de contournement évitant les entrées des eaux de surface.
4. Aptitude à une couverture finale en pente favorisant le ruissellement.
5. La capacité de la zone non saturée, à assurer une épuration des lessivats issus de la décharge, et qui sera déterminée par:
 - L'épaisseur de la zone non saturée comprise entre le fond de la décharge et le niveau saisonnier le plus élevé de la nappe, et qui devra nécessairement et impérativement être supérieure à 5 mètres. Une épaisseur supérieure, de l'ordre des dizaines de mètres est évidemment un facteur favorable;
 - La granulométrie et la perméabilité de différentes couches de cette zone non saturée dont les valeurs faibles à l'intérieur de l'intervalle seront plus favorables que les valeurs fortes en raison de la corrélation entre la perméabilité, l'effet de filtration mécanique et l'effet d'épuration biologique; (couverture végétale intense).

Si les avantages sont nombreux on note également des inconvénients:

Si l'excédent du bilan hydrique est faible (200 mm/an) dans les conditions d'exploitation et de couverture retenue, il pourra suffire pour favoriser l'évaporation par un dispositif de relevage et d'aspersion. L'évaporation réelle pourra alors, sur la surface où est effectuée cette aspersion, ne pas être sensiblement inférieure à l'évaporation potentielle. Cela exigera en général que les précipitations ne dépassent pas 750 mm/an, or dans notre cas $P=816.71\text{mm}$ ce qui est supérieure à la valeur recommandée (750mm).

❖ Ce site doit être suffisamment loin de points de captages d'eau, de telle sorte que la dilution des produits solubles de fin de dégradation soit suffisante (or il est près de la nappe libre du massif dunaire).

❖ L'intérêt plus ou moins grand de garantir la protection des eaux souterraines contre les pollutions. La présence d'une nappe durablement inutilisable est un facteur très favorable. Inversement, on évitera les risques vis-à-vis de nappes exploitées ou exploitables présentant un intérêt (dans notre cas le site est proche au Nord de la mer méditerranée (site touristique important) et à l'Ouest, au massif dunaire qui est caractérisé par une formation hydrogéologique très importante (nappe libre exploitée).

VI.4- Caractéristique du deuxième Site:

VI.4.1- Climatologie :

Le site proposé est situé au sud de Bouteldja, les données utilisées sont celles de la station de Bouteldja relative à une série de 18 ans (1990-2008), caractérisant ce site par une précipitation moyenne annuelle de l'ordre de 714.7 mm et une valeur d'évapotranspiration de l'ordre de 469.6 mm, le ruissellement avoisine une valeur de 123.42mm, et l'infiltration se situe autour de 121.68 mm, topographiquement cette zone est généralement montagneuse.

VI.4.2- Géologie :

Au niveau de la région affleure une série de formation essentiellement gréseuse. Cette formation de grès constitue les monts de Bouteldja, donnant lieu à d'important réservoir d'eau alimentant la nappe. L'âge de la série gréseuse est Aquitanien au dessus des grés on a des argiles, des marnes et des silex d'âge Burdigalien. Les formations gréseuses affleurent en amont, par contre les formations argileuses existent au niveau des pentes des piémonts.

VI.4.3- Hydrogéologie :

Le site est formé par des grès (semi-perméables) surmontés par des argiles qui assurent l'imperméabilité du substratum. Un bon facteur pour l'écoulement de flux polluant vers un point plus bas.

VI.4.4-Aménagement de territoire :

D'après les cartes d'aménagement de territoire dans la zone d'étude, il y a un projet de construction d'un barrage (Barrage de Bouhaloufa) dans cette zone.

VI.4.5- Recommandation :

Le site comporte quelques avantages applicables :

- * Site imperméable (fond de décharge) qui assurent un confinement convenable de déchets et des lessivats et qui doit en particulier pouvoir accueillir certains déchets spéciaux.
- * Aptitude du site à un façonnage garantissant les écoulements en fond de décharge vers un point bas (la morphologie du site sous forme d'un relief)
- * Aptitude à l'implantation d'un ouvrage de contournement évitant les entrées d'eaux de surface.
- * Aptitude à une couverture finale en pente favorisant le ruissellement.
- * Les précipitations sont de 714.7mm ne dépassant pas les 750 mm/an.
- * L'attention doit être portée en priorité sur le bilan des eaux entrant et sortant du site. Sous certains climats, les eaux météoriques incidentes sur la surface d'un site au cours d'une année dépassent en quantité celles qui peuvent être réexportées par évaporation. $P=714.7 > ETR=469.6$ mm.

On note quelques inconvénients :

- ❖ Aux pieds des formations montagneuses, on remarque la présence d'une cuvette qui reçoit les eaux de ruissellement et servira éventuellement à l'établissement de futur barrage. (Près de Bouhaloufa). Donc cet endroit ne peut pas servir comme site d'enfouissement de déchets. C'est un site favorable pour un éventuel Barrage.

VI.5- Caractéristique du troisième Site :

VI.5.1. Climatologie :

Le site est situé au Sud de la Commune de Ben M'Hidi. Pour mieux identifier ses caractéristiques climatologiques nous avons utilisé les données climatiques de la station de Ben M'hidi à partir d'une série de plus de 19 ans (Haid, 2007), qui montre des précipitations annuelles de l'ordre de 618.69mm, et un facteur de ruissellement faible avoisinant les 14.82mm, par contre l'infiltration est proche de 151.32mm (présence des terres végétales : activité agricole intense).

VI.5.5- Recommandation :

Le choix de ce site comporte certains avantages :

- * Imperméabilité du fond de décharge.
- * Aptitude du site à un façonnage garantissant les écoulements en fond de décharge vers un point bas. Les formations argileuses qui sont présentes au niveau des pentes assurent un bon écoulement.
- * Aptitude à l'implantation d'un ouvrage de contournement évitant les entrées d'eaux de surface.
- * Aptitude à une couverture finale en pente favorisant le ruissellement.
- * Précipitations limitées (618.69mm), inférieures à 750 mm/an.
- * Les formations gréseuses affleurant aux sommets des montagnes sont peu argileuses et sont généralement couvertes par des formations forestières qui garantissent un bon facteur d'épuration naturelle.
- * Possibilité d'être raccorder à une station d'épuration existante sans perturber le fonctionnement.
- * Le site est loin de toutes les agglomérations

En conclusion cet endroit est favorable à accueillir un site d'enfouissement ou de décharges publiques.

VI.6- Caractéristiques du quatrième Site

VI.6.1- Climatologie :

Ce site est localisé au Sud de la commune de Cheffia au niveau des montagnes qui l'entourent.

D'après les résultats réalisés à partir des données de la station de Cheffia d'une série de plus de 27ans (période 1978-2006, **Boukhouna, 2007**), on note des précipitations annuelles de d'ordre de 818.5mm, une valeur de ruissellement de l'ordre de 182.78mm et celle de l'infiltration avoisine les 130.32mm.

VI.6.2- Géologie :

La géologie du site comporte des argiles d'âge Aquitaniens superposées par des argiles d'âge Burdigalien qui sont présentées au niveau des pentes, sur une série gréseuses qui affleure aux sommets.

VI.6.3- Hydrogéologie :

Les formations argileuses qui affleurent sur une série gréseuses, ne constituent pas un intérêt aquifère, cependant ces formations présentent des conditions favorables et nécessaires pour le choix d'un site d'enfouissement. Le substratum est imperméable et la pente assure le ruissellement des eaux.

VI.6.4-Aménagement du territoire :

D'après la carte de l'aménagement de territoire on observe l'existence du barrage de la Cheffia au niveau du site choisi, dont l'importance socio économique est réelle, il permet l'absorption des crues de l'Oued Bounamoussa et la mise en valeur agricoles des plaines environnantes.

VI.6.5- Recommandation :

D'après les données climatiques, géologiques, hydrogéologiques et le plan d'aménagement du territoire de la région, ce site contient un certains nombres d'avantages:

- * Site ayant un fond de décharge imperméable.
- * La topographie du site est plus de 600m ce qui assure un bon écoulement en fond de décharge vers le bas.
- * Possibilité d'implanter des ouvrages de contournement pour éviter les entrées d'eaux de surface.
- * Créer une couverture finale en pente assurant le ruissellement.
- * Valeur des précipitations (818.5mm) est supérieure à celle de l'évapotranspiration réelle (505.51mm).

Il convient également de citer quelques inconvénients:

- ❖ La valeur des précipitations (818.5mm) est supérieure à celle préconisée (750mm).
- ❖ La morphologie du site donne naissance à une cuvette recevant les eaux de ruissellement, ce qui servirait éventuellement à l'extension du barrage de Cheffia.

VI.7- Caractéristiques du cinquième site :

VI.7.1- Climatologie :

Ce site est situé au Sud de la Commune de Zerizer au niveau des montagnes.

D'après les données de la station de Kef Mourad, après la réalisation du bilan hydrique, les résultats donnent des valeurs respectivement, de précipitations moyennes de l'ordre de 620.5mm, de ruissellement avoisinant 79.63mm, et d'infiltration de l'ordre de 137.27mm.

VI.7.2- Géologie :

D'après l'étude géologique ce site est formé par des argiles sous numidiennes d'âge Oligocène moyen à supérieur composant la base de série gréseuse d'âge Aquitanien, au dessus de cette formation on retrouve des argiles d'âge Burdigalien

VI.7.3- Hydrogéologie :

D'après les données hydrogéologiques on observe des formations gréseuses (semi-perméables) surmontées par des argiles imperméables et l'absence de formations aquifères.

VI.7.4- Aménagement du territoire :

Le nouveau centre d'enfouissement technique (**C.E.T**) de la wilaya d'El Taref (**Fig. 94**) est installé au niveau de la commune de ZERIZER, c'est une décharge contrôlée de classe 2 qui collecte les déchets ménagers. Le **C.E.T** dont le fonctionnement a commencé en janvier 2011 a pour but de gérer les décharges pendant 10 ans, il rassemble les déchets de la commune de Ben M'hidi, El Asfour, Besbes et aussi les déchets de la société de COJAAL et de Draouche. Il reçoit environ 15 à 20 camions par jour.

Le **C.E.T** situé à plus de deux kilomètres du village de Zerizer, occupe une surface de 550 hectares. Il est composé d'un pont-basculant, d'une station de lagunage et d'un casier d'enfouissement. Pour le tri des déchets (plastique, aluminium...) il se fait manuellement, ensuite ils sont regroupés, et compactés en blocs (**Fig94**).

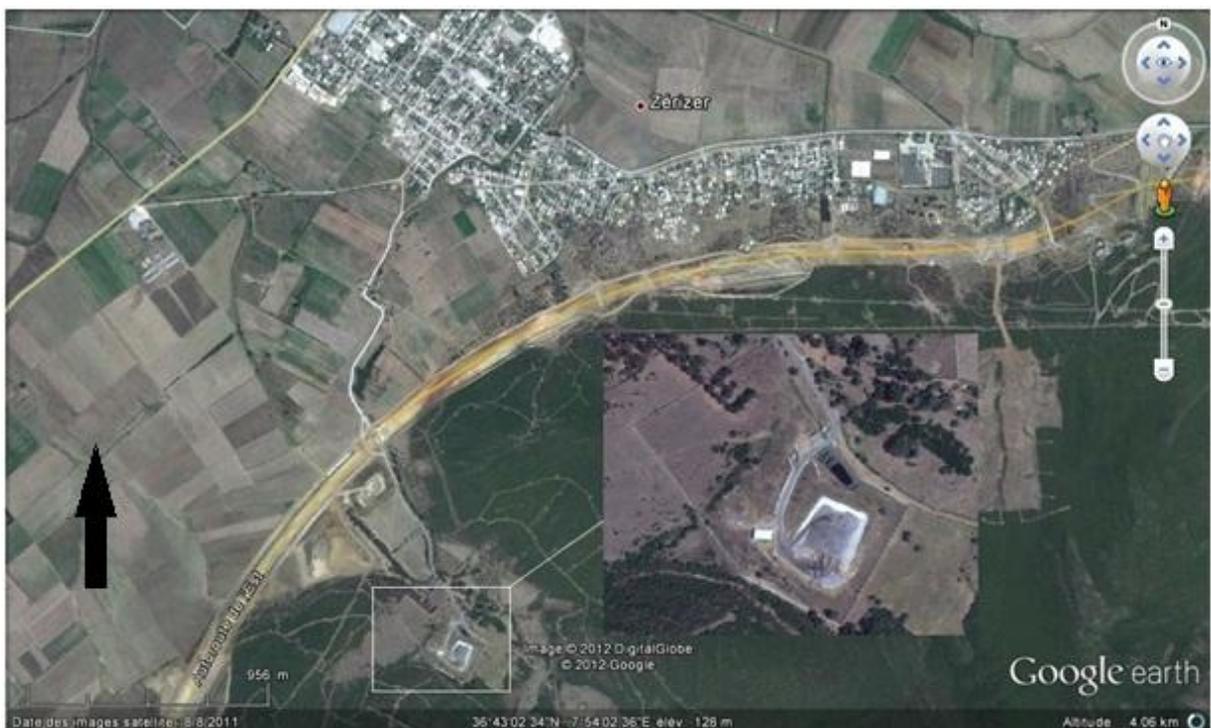


Fig.94 : Carte de situation du centre d'enfouissement dans la commune de Zerizer

VI.7.5- Recommandation :

D'après les données précédentes ce site est caractérisé par un nombre important d'avantages:

- ❖ Contient des argiles imperméables qui seront utilisé comme substratum du fond de décharge.
- ❖ Absence de ressources minérales exploitables.
- ❖ Absence de gisements géologiques classés ou intéressants.
 - ❖ Distance suffisante et position favorable par rapport aux captages et sources captées (situation éloignée des périmètres de protection)
 - ❖ Aptitude du site à un façonnage garantissant les écoulements en fond de décharge vers un point bas.
- ❖ Situation, topologie et morphologie des lieux offrant de bonnes garanties contre la pollution des eaux de surface (ruissellent faible, drainage facile).
 - ❖ Aptitude à une couverture finale en pente favorisant le ruissellement.
 - ❖ Précipitations limitées (620.5mm) inférieures à la valeur limite (750 mm/an).
 - ❖ Possibilité de raccordement à une station d'épuration existante sans perturber le fonctionnement (Station d'épuration de Zérizer).
- ❖ les frais de transport sont les plus bas possibles et représentent de bonnes possibilités d'accès.

Donc ce site est favorable pour un site d'enfouissement ou de décharges publiques, cependant il est indispensable d'éviter de construire au alentour.

VI.8- Caractéristique du sixième site :

VI.8.1- Climatologie

On va utiliser les données de la même station du site précédent (station de Kef Mourad) qui donne des valeurs de précipitations moyenne de l'ordre de 620.5mm(<750mm/an), un ruissellement de 79.63mm, et une infiltration de l'ordre de 37.27mm.

VI.8.2- Géologie :

D'après l'étude géologique du site, le terrain contient des argiles de Numidie (Eocène supérieur) verdâtres ou brunâtres, plus ou moins schisteuses et parfois marneuses

VI.8.3-Hydrogéologie :

Les données hydrogéologiques indiquent l'existence d'une couche imperméable superposée sur une autre semi-perméable et on note généralement l'absence de systèmes aquifères.

VI.8.4-Aménagement du territoire :

Le site proposé est situé au sud de la commune de Chihani, au niveau des pieds des montagnes qui l'entoure, d'après le plan(DUC) ci-dessous on confirme qu'il n'y a pas des nouveaux projets près du site proposé.

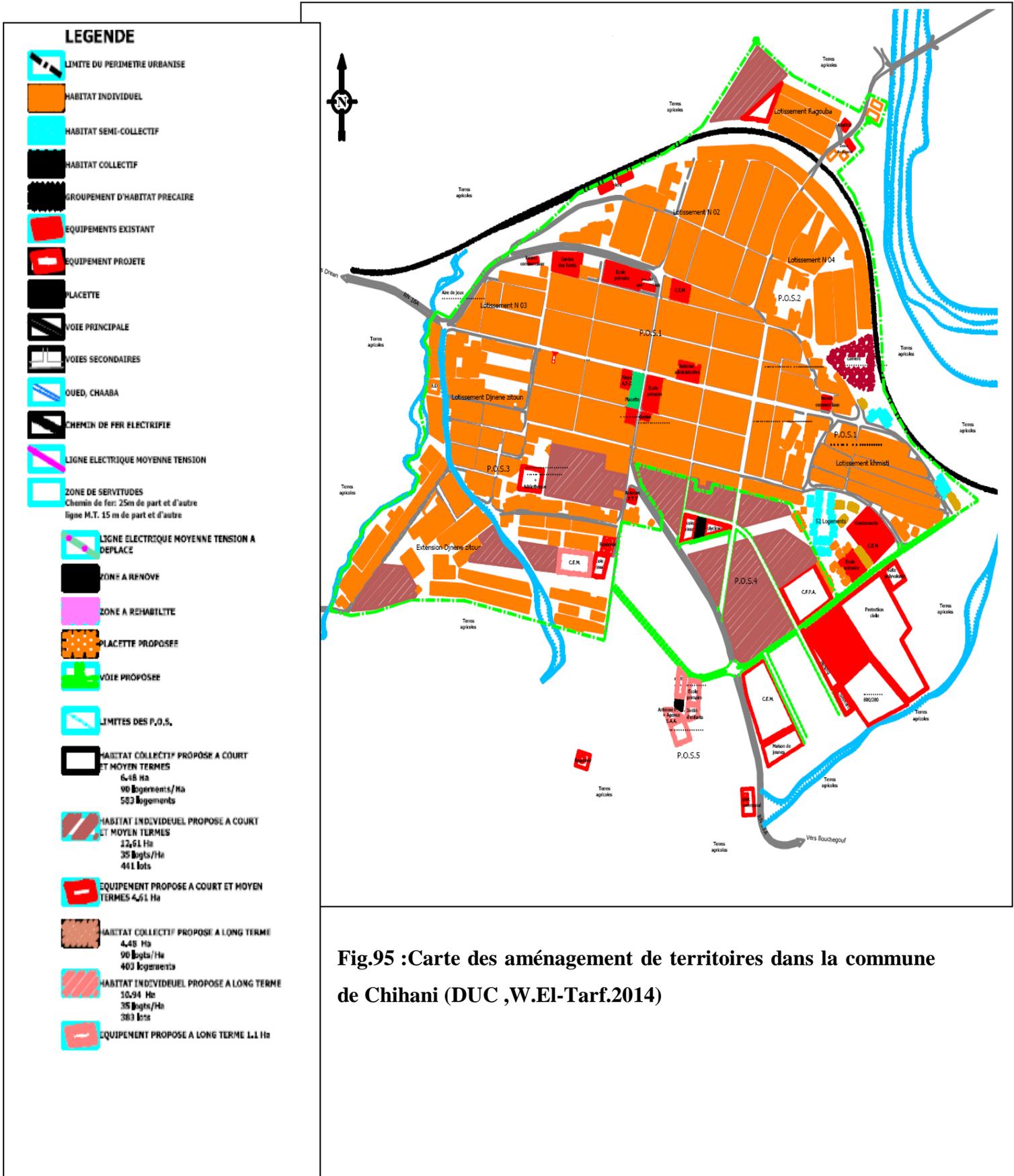


Fig.95 :Carte des aménagement de territoires dans la commune de Chihani (DUC ,W.El-Tarf.2014)

VI.8.5- Recommandation :

Les données précédentes donnent quelques avantages au site:

- * Contient un toit semi-perméable à imperméable qui sera utilisé comme un substratum du fond de décharge.
- * Les formations argileuses qui existent au niveau des pentes assurent un bon écoulement de flux pollué.
- * Possibilité d'implanter un ouvrage de contournement pour éviter les entrées d'eaux de surface
- * Aptitude du site à un façonnage garantissant les écoulements en fond de décharge vers un point bas.
- * Aptitude à une couverture finale en pente favorisant le ruissellement.
- * Précipitations de 620.5mm/an inférieures aux précipitations limites (750 mm/an).

VI.9- Caractéristiques du Septième site :

VI.9.1- Climatologie

La première station se situe proche de la station d'Ain El Assel où les données climatiques de cette station pour la période (1990-2008) donnent une valeur de précipitation de l'ordre de 816.71mm, une valeur de ruissellement de l'ordre de 181.58mm (l'altitude du site plus de 300 m) et une valeur d'infiltration de l'ordre de 157.33mm.

VI.9.2- Géologie :

Du point de vue géologique, ces terrains sont constituées des argiles de Numidie (Eocène supérieur) verdâtres ou brunâtres, plus ou moins schisteuses et parfois marneuses.,

VI.9.3- Hydroéologie :

La zone ne recèle pas de ressources hydriques souterraines exploitables, elle est de ce fait classée par les services de l'environnement et de l'hydraulique de la wilaya d'EI Tarf comme zone sans importance hydraulique particulière. Cette situation est d'ailleurs logique vu le niveau d'imperméabilité des horizons argileux dont l'épaisseur moyenne dépasse les dix (10) mètres et qui ne permet pas des infiltrations aisées.

A l'intérieur du site proprement dit, l'épaisseur moyenne de la couche superficielle du sol dépasse les six (6) mètres, ce sol consiste en des argiles de Numidie. Il n'existe aucun cours d'eau ni sur ce territoire, ni sur les terrains voisins (**Hamzaoui,2011**).

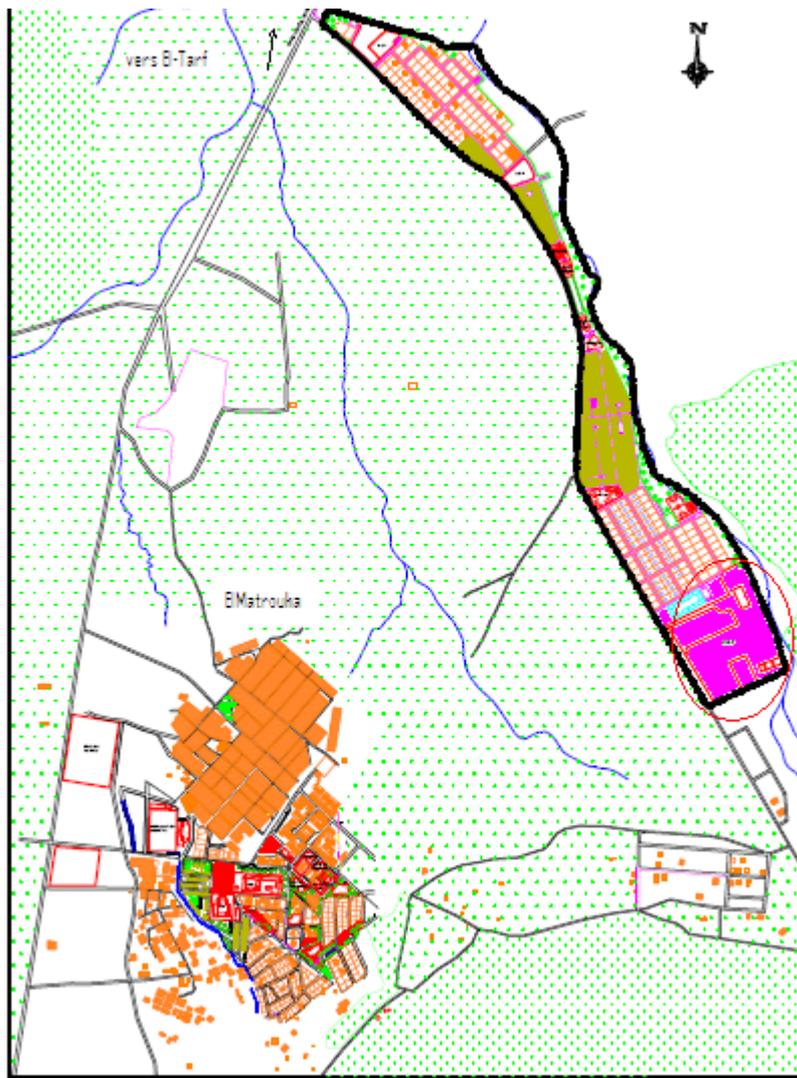
VI.9.4- Aménagement du territoire :

Située à environ 5 km au Sud du chef-lieu de commune d'EI Tarf, le site retenu pour l'installation du centre d'enfouissement technique (classe II) s'étend sur une superficie totale

de 8 hectares. Il est desservi par une voie asphaltée qui prend son départ à partir de la route nationale (RN82) [dite aussi la route de wilaya (RW9)] à l' hauteur du km 3 à partir d'EI Tarf ville en direction du Sud(**Fig96**).



Fig.96 : localisation du site d'enfouissement de déchets dans la commune d'El-Matrouha



LEGENDE

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|
|  | :Habitat Individuel Existant |
|  | :Habitats semi collectif |
|  | :Site d'enfouissement C.E.T.(Classe2) |
|  | :Foret |
|  | :Terre Agricole |
|  | :Logements Individuels |

Fig.97 : carte des aménagements des territoires dans la région d'El Matrouha commune d'El-Tarf

Le site se trouve à un niveau d'altitude évoluant entre 48 et 63 m par rapport au niveau de la mer, il est d'orientation Nord-ouest/Sud-est. Il présente une topographie plane légèrement orientée vers l'Ouest. Dans sa partie Est, le site est traversé par une chaâba de faible profondeur (0,5 m en moyenne) qui se trouve à sec puisqu'elle ne canalise que les eaux pluviales après fortes précipitations. Selon les investigations sur terrain et les enquêtes de voisinage que la GEA (Général Environnement Annaba) avait mené, cette chaâba ne déborde jamais (**Fig96**). Il n'existe pas de pratiques agricoles tout autour du site, mais il existe par contre un projet de construction de logements individuels évolutifs au Nord du site dont le niveau de réalisation semble dépasser les 50 %. Sur son flanc Sud, le site est entouré de terrains broussailleux alors qu'il est limité sur son flanc Est par une forêt d'eucalyptus et par la voie asphaltée desservant l'agglomération secondaire de Matrouha sur le flanc Ouest.

VI.9.5- Recommandation :

Les données précédentes donnent quelques avantages au site:

- * Contient un toit semi-perméable à imperméable qui sera utilisé comme un substratum du fond de décharge.
- * Les formations argileuses qui existent au niveau des pentes assurent un bon écoulement de flux pollué.
- * Possibilité d'implanter un ouvrage de contournement pour éviter les entrées d'eaux de surface
- * Aptitude du site à un façonnage garantissant les écoulements en fond de décharge vers un point bas.
- * Aptitude à une couverture finale en pente favorisant le ruissellement.
- * Précipitations de 620.5mm/an inférieures aux précipitations limites (750 mm/an).
- * Le site est voisin d'un projet de logement individuels (**Fig97**).

Donc toutes les conditions doivent être réalisées sur ce site , et ce là nous donne un véritable futur site de décharge à condition d'annuler la construction du projet de logement dans cette zone.

VI.10-Conclusion :

Le choix de site est soumis à plusieurs critères (la morphologie, la géologie, l'hydrogéologie, l'hydroclimatologie, l'aménagement de territoire...) pour bien assurer la protection de la qualité des eaux souterraines et contrôler le cycle de flux polluant avant

d'atteindre la station d'épuration. D'après l'étude générale de la région d'Annaba–El-Tarf et après le classement de différentes sites on distingue que:

✘ Le site qui occupe Djbel Kourssi ne peut pas faire l'objet d'un site d'enfouissement de déchets étant donné sa situation privilégiée pour un site touristique important.

✘ Les sites situés au Sud de Bouteldja ,et Chaffia bien que les caractéristiques soient favorables pour localiser des sites d'enfouissement de décharges publiques, il se trouve que la morphologie du terrain et l'importance des précipitations sont plutôt favorables pour la construction de barrages.

→ Les sites localisés au Sud de Ben M'hidi et Zerizer et Chihani et au Sud de la commune d'El-Matrouha feront éventuellement l'objet de bons sites de décharges publiques.

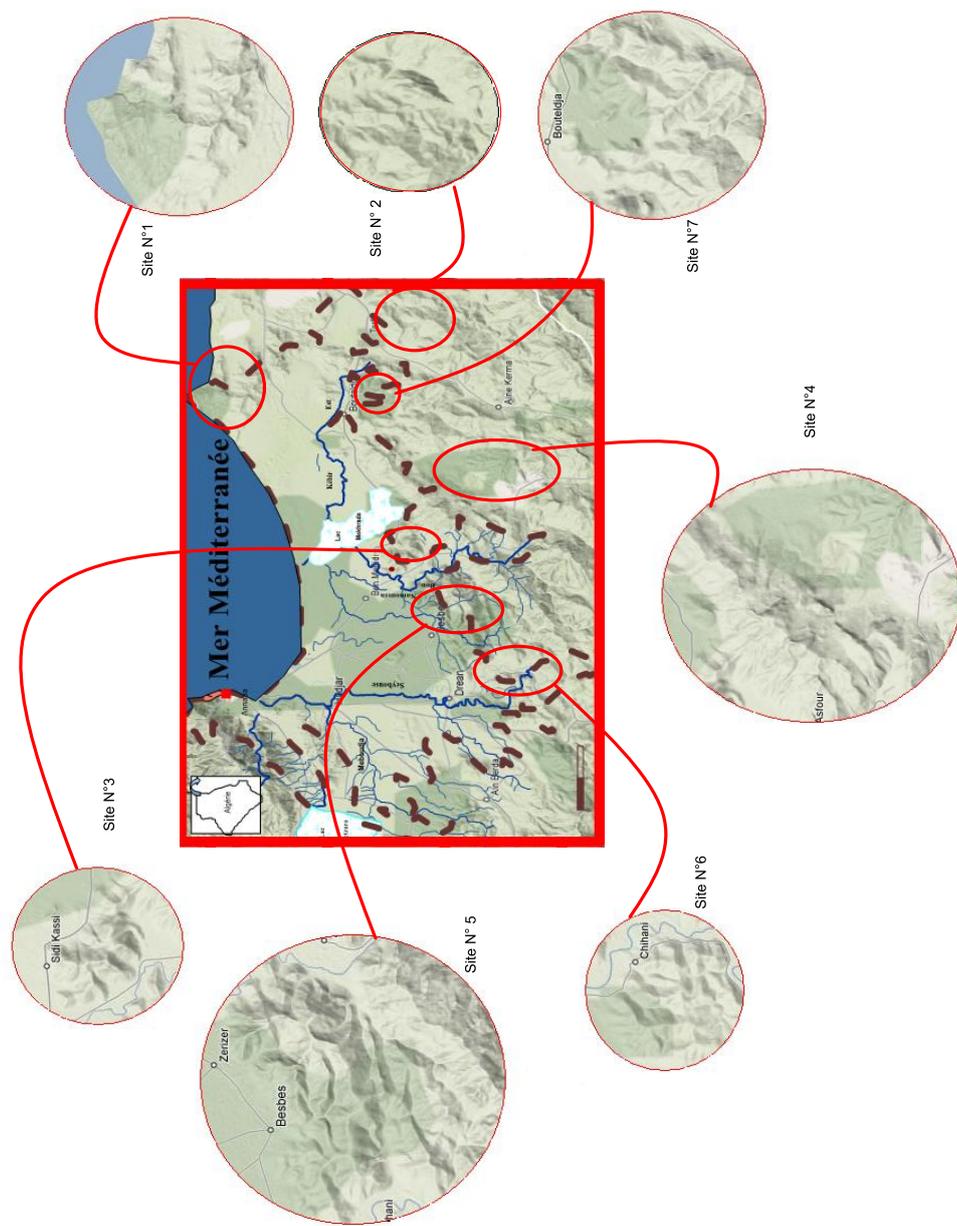


Fig .98: Carte de répartition de sites étudiés

Conclusion
Conclusion
Générale

Conclusion générale

☞ La région d'Annaba-El Tarf fait partie de l'ensemble géologique du Tell Algérien Nord Oriental, elle présente des affleurements de terrains métamorphiques, des roches éruptives localisés au Nord -Ouest et des terrains sédimentaires bordant la plaine d'Annaba-ElTarf et des dunes constituées de sables éoliens mio-Quaternaires dominants la partie avale Nord – Est.

☞ La plaine d'Annaba-El-Tarf est soumise à un climat méditerranéen, doux et humide en hiver et chaud et sec en été. A l'échelle de la plaine les moyennes annuelles des précipitations varient entre 608.49 mm et 832 .18 mm sous une température moyenne annuelle de l'ordre de 17.85 °C, cependant les valeurs moyennes annuelles du ruissellement et de l'infiltration oscillent respectivement entre 75.09mm et 192.10mm et 91.95mm et 188.48mm.

☞ Hydrogéologiquement la plaine d'Annaba-El Tarf englobe quatre principales nappes : la nappe superficielle contenue dans les argiles sableuses, la nappe profonde des graviers , la nappe du cordon dunaire d'El-Chatt, et la nappe des sables du massif dunaire de Bouteldja.

☞ Pour l'estimation de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines 3 méthodes d'estimation ont été testées (DRASTIC,GOD,KHERICI,) il ressort que la méthode de vulnérabilité et de risque de pollution établie par Khérici2010 est celle qui caractérise le mieux la vulnérabilité des eaux à la pollution, en plus elle permet d'apprécier le risque de pollution des eaux. Les résultats montrent une répartition inégale des zones de vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines. En se basant sur les cas pessimistes, globalement à l'échelle des aquifères de la région d'Annaba El Tarf les zones à fortes, moyennes et faibles vulnérabilités occupent respectivement environ 10%, 31% et 60%. A cet effet et pour protéger durablement les ressources en eaux souterraines de la région contre toutes contaminations de surface ou souterraine, sept sites d'enfouissement des déchets ont été identifiés, toutefois seuls quatre sites satisfaits les conditions favorables (morphologie, géologie, hydrogéologie, hydroclimatologie, aménagement de territoire...) , ils sont situés au Sud de Ben M'Hidi, Zérizer, El-Tarf et de Chihani.

Références
Références 
Bibliographiques
Bibliographiques

Bibliographie

- ✎ **ATTOUI .B ,KHERICI.N,BOUSNOUBRA.H(2014)** : Uses of a new method for determining the vulnerability and risk of pollution of major groundwater reservoirs in the region of Annaba-Bouteldja (NE Algeria), *Environmental earth sciences* ,vol 3,N,page 1-13
- ✎ **ATTOUI.B (2010)** : Etat de la vulnérabilité à la pollution des eaux des grands réservoirs d'eau souterraines de la région d'Annaba-El-Tarf et identification des sites d'enfouissement de déchets. Mémoire de magister .Université d'Annaba.P1-84
- ✎ **BOUHDID H , BOUKHLOUN R. (2007)** :Chimisme des eaux de l'amont vers l'aval de la vallée de Oued Seybouse .P64
- ✎ **BOUKELOUNA R., BOUHDID.H(2007)** : Le chimisme des eaux de l'amont vers l'aval de la vallée de l'Oued Seybouse. Mémoire d'ingénieur Université d'Annaba P64.
- ✎ **BOUKHNOUNA S.(2007)** : Impact de l'Oued Bounamoussa sur la Qualité des eaux de la nappe alluviale superficielle d'El-Asfour.(Wilaya D'EL Tarf).Mémoire de magister .Université d'Annaba.P49
- ✎ **BOUMAIZA L. (2003):** Contribution à l'étude des caractéristiques hydrogéologique et hydrochimiques des dépôts sableux d'ECHATT (Nord-Est Algérien).Mémoire d'ingénieur Université d'Annaba P71-72.
- ✎ **BOUSNAOBRA H. (2002)** : Ressources en eaux des région de Skikda, Annaba, El-Tarf, Geulma, Souk Ahras , évaluation,gestion et perspective vulnérabilité et protection. Doctorat. Université d'Annaba.
- ✎ **BOUSNOUBRA.H , KHERICI N., DERADJI EF.(2005)** :vulnérabilité de la nappe dunaire de Bouteldja (Nord-est algérien) à la pollution et à l'aménagement *Earth and Life* , vol 1,N3 ,p15-22
- ✎ **CHAFFAI H L. DJABRI L , S. LAMROUS S.(2005)** :Reserves hydriques de la Wilaya d'Annaba .Inventaire, Evaluation et besoins Futurs en ressources en eau.Hydrogéologie n°4.P31
- ✎ **DEBIECHET H.,(2002).** Evolution de la qualité des eaux (salinité, azote et métaux lourds) sous l'effet de la pollution saline, agricole et industrielle. Application à la basse plaine de la Seybouse Nord-Est algérien. Th. Doct. Univ. de Franche-Comté .P199.

- ✎ **DERRADJI F. (2004)** : identification quantitative et qualitative des ressources en eau dans la région d'Annaba – El Tarf (Nord-Est de l'Algérie) . Thèse de doctorat d'état. Université d'Annaba.P124 -200.
- ✎ **DETAY M.** : La gestion active des aquifères P145.
- ✎ **DIRECTION DES FORETS DE ANNABA.**
- ✎ **DROUCHE A., HAID N. (2005)**: Relation hydrodynamique et processus d'alimentation de la nappa aquifère du massif dunaire de Bouteldja par les eaux d'un lac noir Mémoire d'ingénieur Université d'Annaba P71-72.
- ✎ **ETTIENNE . E,DONGO.K,BOYOSSORO.H,DIBI.B,MAHAMAN.B,BIEMI.J(2009)**: Contribution des Méthodes de Vulnérabilité Intrinsèque DRASTIC et GOD à l'Etude de la Pollution par les Nitrates dans la Région de Bonoua (Sud-Est de la Côte d'Ivoire) European Journal of Scientific Research ISSN 1450-216X Vol.31 No.1 , pp. 157-171.
- ✎ **HAMZAOUI W. (2007)** : Caractérisation de la pollution des eaux en milieux industriels et urbain cas de la plaine d'El-Hadjar .Mémoire de magister .Université d'Annaba.P21-24-25.
- ✎ **HANNOUCHE M., (1990).** Approche à l'étude des mécanismes de la pollution d'une nappe alluviale côtière (Annaba) en site industriel urbanisé. Traitement statistique des données Hydrochimiques. Mémoire de magistère. Univ. Annaba. 202p.
- ✎ **HENI A.D. (2003)**: Analyse méthodologique de la structure et des processus anthropiques : Application aux ressources en eau d'un bassin côtier méditerranéen, Th Doct. Es-Sciences, Univ. Annaba. 214p. P18-33
- ✎ **KENPUN L. (2002)** : L'impact de la pollution des eaux d'irrigation sur les eaux souterraines dans les zones Besbes-Dréan .Mémoire d'ingénieur P53.
- ✎ **KHADRAOUI.S(2011)** :Synthèse hydrogéologique et vulnérabilité à la pollution du système aquifère de la région de Bouteldja (W.El-Tarf) Mémoire de Master ,Université de USTHB ,P28-40.
- ✎ **KHELFAOUI F., MEDJANI F. (2005)** : Influence des rejets de Sider sur les eaux superficielles et souterraines (W.Annaba) Mémoire d'ingénieur Université d'Annaba P24-38.
- ✎ **KHERICI N.(1993)** : Vulnérabilité à la pollution chimiques des eaux souterraines d'un systèmes de nappes superposées en milieu industriel et agricole Annaba –la Mafragh Nord – Est Algérien. Doctoratd'Etat, univ de Annaba. .P 28-31-34.

- ✎ **KHERICLN, BOUSNOUBRA.H, DERRADJI E.F, ROUABHIA.A.K, FEHDL.C (2010):** A new graphic for the determination of the vulnerability and risk of groundwater pollution .Geographia Technica.no.1,p1-24
- ✎ **MEDJANI F.(2007) :** Ressources en eau, vulnérabilité et développement durable dans la plaine de SKIKDA (NE Algérien). Mémoire de magister .hydrogéologie .Université d'Annaba.P66
- ✎ **MOHAMED.HH , AYED.A,ALAIN.F,RAMIRO.R(2007) :**Validité de l'application des méthodes de vulnérabilités DRASTIC,SINTACS et SI à l'étude la pollution par les nitrates dans la nappe phréatique de Metline –Rasjbel-Raf Raf (Nord-Est Tunisien) compte rendus Géosciences, volume 339, Issue 7, , Page 493-505.
- ✎ **ROUABHIA.K(2004) :** Vulnérabilité et risque de pollution des eaux souterraines de la nappe des sables miocènes de la plaine d'El Ma El Abiod (Algérie) Sécheresse, vol. 15, N°4, pp347-352
- ✎ **SAADALI B.(2007) :** Concentration des éléments chimiques des sources dans le massif dunaire de Bouteldja .Mémoire de magister .Université d'Annaba. P 17
- ✎ **SEDRATI N. (2006):** Vulnérabilité et impact des agglomérations sur la qualité des eaux .du massif dunaires de Bouteldja Mémoire de magister .géologie .Université d'Annaba.P43.
- ✎ **SONATRCH, 1966.** Esquisse structurale de la plaine de Annaba. Rapport A.N.R.H., inédit. Annaba, Algérie.
- ✎ **STROJEXPORT, 1975.** Prospection géophysique de la plaine de Annaba. Réinterprétation. Rapport A.N.R.H., inédit, Annaba, Algérie, P30.
- ✎ **ZENATI N.D (1999):** Relation nappes –lac confirmation par l'hydrochimie : cas de la nappe superficielle de la plaine Ouest d'El –Hadjar lac Fetzara N.E Algérien. Mémoire de magister. Hydrogéologie .Université d'Annaba.P67.

Liste
Liste
des Annexes
des Annexes

| <i>Profondeur</i> | |
|-------------------|-------------|
| <i>Classe (m)</i> | <i>Note</i> |
| 0 – 1.5 | 10 |
| 1.5 – 4.5 | 9 |
| 4.5 - 9 | 7 |
| 9.0 – 15.0 | 5 |
| 15 - 23 | 3 |
| 23 - 30 | 2 |
| > 30 | 1 |

| <i>Recharge annuelle</i> | |
|--------------------------|-------------|
| <i>Classe (mm)</i> | <i>Note</i> |
| 0 - 50 | 1 |
| 50 - 100 | 3 |
| 100 - 175 | 6 |
| 175 - 225 | 8 |
| > 225 | 9 |

| <i>Milieux Aquifère</i> | | |
|-----------------------------|-------------|---------------------|
| <i>Classe</i> | <i>Note</i> | <i>Note typique</i> |
| Massive shale | 1 à 3 | 2 |
| Métamorphique | 2 à 5 | 3 |
| Métamorphique Altéré – grès | 3 à 5 | 6 |
| Calcaire massif | 4 à 9 | 8 |
| Grès massif | 4 à 9 | 6 |
| argile | 4 à 9 | 4 |
| Argile Sableux | | 5 |
| Argile Sableux et gravier | | 8 |
| Basalte | 2 à 10 | 9 |

| <i>Type de sol</i> | |
|--------------------|-------------|
| <i>Classe</i> | <i>Note</i> |
| Mince ou absent | 10 |
| Graviers | 10 |
| Sables | 9 |
| Limons sableux | 6 |
| Limons | 4 |
| Limons silteux | 3 |
| Argiles | 1 |

| <i>Topographie</i> | |
|-------------------------------------|-------------|
| <i>Plage de la pente (en degré)</i> | <i>Note</i> |
| 0 à 2 | 10 |
| 2 à 6 | 9 |
| 6 à 12 | 5 |
| 12 à 18 | 3 |
| > 18 | 1 |

| <i>Impacte de la zone non saturée</i> | | |
|----------------------------------------------|-------------|---------------------|
| <i>Nature lithologique</i> | <i>Note</i> | <i>Note typique</i> |
| Silt et argile | 2 à 6 | 6 |
| Sable et argile | 2 à 6 | 3 |
| Calcaire | 2 à 5 | 3 |
| Grès | 2 à 7 | 6 |
| Sable et gravier avec passage silt et argile | 4 à 8 | 6 |
| Sable et gravier | 4 à 8 | 8 |
| Basalte | 2 à 10 | 9 |
| Calcaire Karstique | 8 à 10 | 10 |

| <i>Perméabilité</i> | |
|-------------------------------------------|-------------|
| <i>Plage de la perméabilité (en m/s)</i> | <i>Note</i> |
| $4.7 \cdot 10^{-7} - 4.7 \cdot 10^{-5}$ | 1 |
| $4.7 \cdot 10^{-5} - 14.7 \cdot 10^{-5}$ | 2 |
| $14.7 \cdot 10^{-5} - 32.9 \cdot 10^{-5}$ | 4 |
| $32.9 \cdot 10^{-5} - 4.7 \cdot 10^{-4}$ | 6 |
| $4.7 \cdot 10^{-4} - 9.4 \cdot 10^{-4}$ | 8 |
| $> 9.4 \cdot 10^{-4}$ | 10 |

Tableau 36: Tables ou systèmes de cotation numérique.