

Higher National School of Hydraulic

The Library

Digital Repository of ENSH



المدرسة الوطنية العليا للري

المكتبة

المستودع الرقمي للمدرسة العليا للري



The title (العنوان):

**Etude de la vulnérabilité d'une nappe d'eau souterraine basée sur l'approche méthodologique galdit (cas de la nappe de Bouteldja) Nord-Est (w. Alger) .**

The paper document Shelf mark (الشفرة) : 6-0026-17

APA Citation (توثيق APA):

Haddad, Ouissam (2017). Etude de la vulnérabilité d'une nappe d'eau souterraine basée sur l'approche méthodologique galdit (cas de la nappe de Bouteldja) Nord-Est (w. Alger)[Thèse de master, ENSH].

The digital repository of the Higher National School for Hydraulics "Digital Repository of ENSH" is a platform for valuing the scientific production of the school's teachers and researchers.

Digital Repository of ENSH aims to limit scientific production, whether published or unpublished (theses, pedagogical publications, periodical articles, books...) and broadcasting it online.

Digital Repository of ENSH is built on the open DSpace software platform and is managed by the Library of the National Higher School for Hydraulics. <http://dspace.ensh.dz/jspui/>

المستودع الرقمي للمدرسة الوطنية العليا للري هو منصة خاصة بتقييم الإنتاج العلمي لأساتذة و باحثي المدرسة.

يهدف المستودع الرقمي للمدرسة إلى حصر الإنتاج العلمي سواء كان منشورا أو غير منشور (أطروحات، مطبوعات، مبداعات، مقالات، البوريات، كتب....) و بنه على الخط.

المستودع الرقمي للمدرسة مبني على المنصة المفتوحة DSpace و يتم إدارته من طرف مديرية المكتبة للمدرسة العليا للري.

كل الحقوق محفوظة للمدرسة الوطنية العليا للري.



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'HYDRAULIQUE  
« ARBAOUI Abdellah »

DEPARTEMENT HYDRAULIQUE URBAINE

*MEMOIRE DE MASTER*  
*Pour l'obtention du diplôme de Master en Hydraulique*

**Option : Conception des Systèmes D'Assainissement**

**THEME :**

Etude de la vulnérabilité d'une nappe d'eau souterraine basée sur  
l'approche méthodologique GALDIT  
(Cas de la nappe de BOUTELDJA, Nord EST Algérien.)

**Présenté par :**  
M<sup>mle</sup> HADDAD Ouissam

**Devant le Jury composé de :**

Nom et prénom :	Grade	Qualité
M <sup>me</sup> MEDDI Hind	M.C.A	Présidente
M <sup>f</sup> AMMARI Abdelhadi	M.C.B	Examineur
M <sup>r</sup> BOUFEKANE Abdelmajid	M.AA	Examinateur
M <sup>me</sup> Houli Samia	M.AA	Examinatrice
M <sup>me</sup> DJOUDAR Dahbia	M.C.B	Promotrice

AVRIL 2017

# Dédicace

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

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

À mes chers **parents**, essayant ainsi de vous exprimer toute ma gratitude pour tout ce que vous m'avait apporté.

À ma **sœur** : **Sohaila**, sans oubliée mes chères **Malak IYAD** et **Raouf** et ma meilleure amie **Maya**

.  
je vous remercie pour tous les sentiments d'amitié que vous avez envers moi et dont je suis fier.

A tous et à toutes, je dédie ce travail

WISSEM 2017.

# REMERCIEMENT

*Avant tout, nous remercions le bon Dieu qui a illuminé notre chemin et qui nous a armés de force et de sagesse, ainsi la bonne volonté pour achever ce modeste travail.*

*Ces quelques lignes ne vont jamais exprimer à la juste valeur ma reconnaissance à l'égard de ma Promotrice Mme DJOUDAR DAHBIA , pour l'aide qu'il m'a offert durant la période de la réalisation de ce travail.*

*Toute gratitude à nos professeurs et enseignants qui nous ont guidés au cours de la formation , et nos respects aux membres de jury qui nous feront l'honneur d'apprécier ce travail.*

*Mon derniers remerciements, mais non les moindres s'adressent à tous mes amies, pour avoir beaucoup de sollicitudes et de chaleur humaine dont nous avions tant besoin.*

*Merci à vous tous.*

## ملخص :

تعرف كتل الكثبان الرملية لبوثلجة المتواجدة بولاية الطارف بكونها من أهم خزانات المياه الجوفية ،والقادرة على تخزين مياه الأمطار نظرا لطبيعة تربتها . للأسف ،طبقة هذه الأخيرة ،يستغل استغلالا مكثفا استجابة لحاجيات الزراعة وكذلك الماء الشروب لولايتي عنابة والطارف الذي ساهم في التدهور الكمي والنوعي للمياه الجوفية.إن رسم الخرائط المتعلقة بخطر تسرب مياه البحر إلى المياه الجوفية يعتبر أداة فعالة لإدارة جيدة للموارد المائية وذلك لتقييم قابلية تلوث المياه الجوفية .وقد استخدمنا تقنيات تعتمد على عوامل ومؤشرات بالتنسيق مع نظام المعلومات الجغرافي. ان طريقة GALDIT تأخذ بعين الاعتبار مختلف العوامل من أجل إعطاء نتائج متماثلة نسبيا للمنطقة الساحلية.

## Résumé :

Le massif dunaire de Bouteldja est connu comme un important réservoir souterrain capable de stocker les eaux dont l'infiltration est favorisée par de la nature du sol. Malheureusement, la nappe du massif dunaire est intensivement exploitée et même surexploitée pour répondre aux besoins de l'irrigation et l'AEP des deux wilayas : Annaba et El Tarf ce qui contribue à la dégradation quantitative et qualitative des eaux souterraines. En fait, la cartographie de la vulnérabilité de l'aquifère à l'intrusion marine se présente comme un outil efficace pour une bonne gestion des ressources en eaux. Afin d'évaluer la vulnérabilité de l'aquifère à la pollution marine, Nous avons eu recours à la méthode paramétrique combinée avec les techniques de SIG. La méthode de GALDIT, tient compte de différents paramètres, en donnant des résultats relativement similaires pour la zone côtière

## Abstract:

The dune massive of Bouteldja is known as an important reservoir of groundwater able to stock the rainwater in view of the nature of soil. Unfortunately, the ground water of the laster exploited intensively and is even overexploited to answer to supply of the irrigation for the two willayas: Annaba and El Tarf. This contributes to the quantitative and qualitative degradation of groundwater. In fact the cartography of the vulnerability of the aquifer to the marine intrusion presents an efficient tool for a good management of the resources in waters. In order to evaluate the vulnerability of the aquifer to the marine pollution, we refer to the parametric method combined with GIS techniques. The GALDIT method, taking into account different parameters, gives relatively similar results for the coastal zone.

## Sommaire

### Chapitre 1 :Présentation de la zone d'étude

Introduction :	1
I.1 - La situation géographique du massif dunaire de Boutheldja :	1
1.2. Caractéristiques géomorphologiques:	2
1.3-Géologie et caractéristiques physico-chimiques des dunes	4
1.4- Caractéristiques climatiques	5
1.5.-Partie hydrogéologie	9
1.6.- Caractéristiques hydrodynamiques de la nappe	15
1.7-HYDROCHIMIE :	18
1.7.1 Paramètres physiques :	18
1.7.1.1 - La température.	18
1.7.1.2 - Le pH :	19
1.7.2.3. La conductivité.....	19
1.7.2.4 Origines de la minéralisation observée :	19
Conclusion :	21

### Chapitre 2 Présentation des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité des aquifères à la pollution

Introduction :	22
2.1. Définition et Historique du concept de vulnérabilité :	22
2.2. Critères de vulnérabilité :	23
2.2.1. Critères de vulnérabilité spécifique	23
2.2.2. Critères de vulnérabilité intrinsèque :	24
2.3. Outils et Méthodes d'évaluation de la vulnérabilité :	26
2.3.1 Outils d'évaluation de la vulnérabilité :	26
2.3.2. Méthodes d'évaluation de la vulnérabilité :	28
Conclusion :	35

### Chapitre 3 :La vulnérabilité des aquifères côtiers par rapport à l'intrusion saline.

Introduction :	36
----------------	----

3.1. La vulnérabilité des aquifères côtiers à l'intrusion saline :.....	36
3.2- Facteurs déterminants dans l'évolution de l'intrusion marine.....	38
3.3.Critères de distinction des intrusions de l'eau de mer.....	40
Conclusion :.....	43

## **Chapitre 4 : Etude et application de la méthode de vulnérabilité GALDIT**

Introduction :.....	44
4.1Présentation de la méthode de GALDIT :.....	44
4.2. L'application de la méthode GALDIT au massif dunaire de Boutheldja : .....	50
4.2.1Paramètre (G)( type d'aquifère) : .....	50
4.2.2. Conductivité hydraulique ou « Aquifer conductivity » (A) : .....	52
Boutheldja selon la méthode GALDIT.....	52
4.2.3. Profondeur du plan d'eau ou « Aquifer Level» (L) :.....	53
4.2. 4. Distance à la côte ou « Distance from the shore» :.....	54
4.2.5. Impact des intrusions marines existantes ou« Impact of existing intrusions » (I).....	56
4.2.6. Épaisseur de l'aquifère ou « Aquifer Thickness » (T) : .....	57
4.2.7. Calcul de l'indice de vulnérabilité GALDIT :.....	58
Conclusion : .....	61

## **LISTE DES TABLEAUX**

### **Chapitre 1 :Présentation de la zone d'étude**

Tableau 1.1: Les coordonnées Lamberts des stations pluviométriques .....	5
Tableau1.2 : Précipitations moyennes mensuelles en mm (1990/2010) .....	6
Tableau1.3: Précipitations moyennes annuelles en mm (1990/2010).....	7
Tableau1.4 : Températures moyennes mensuelles en °C (1980/10) .....	8
Tableau n°1.5 : Concentrations des éléments chimiques des sources d'eaux .....	20

### **Chapitre 2 Présentation des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité des aquifères à la pollution**

Tableau 2.1 : Principaux critères de vulnérabilité intrinsèque.....	25
---	----

### **Chapitre 4 : Etude et application de la méthode de vulnérabilité GALDIT**

Tableau 4.1: Tableau de synthèses des poids et rangs de la méthode de GALDIT .....	49
Tableau 4.2 : Classes de vulnérabilité GALDIT .....	50



## LISTE DES FIGURES

### Chapitre 1 :Présentation de la zone d'étude

Figure 1.1 : Situation géographique du massif dunaire de Bouteldja. ....	2
Figure 1.2 : Carte des unités morphologiques dans la wilaya d'EL Taref.....	4
Figure1.3 : Histogramme des précipitations moyennes mensuelles .....	7
Figure1.4 : Températures moyennes mensuelles en °C .....	8
Figure.1.5- Carte de la répartition des forages dans le massif dunaire de Bouteldja .....	10
Figure 1.6 : Carte piézométrique de la nappe du massif dunaire de Bouteldja.....	12
Figure1.9 : Carte d'égale épaisseur de la couche saturée de la nappe libre du massif dunaire de Bouteldja.....	16

### Chapitre 3 :La vulnérabilité des aquifères côtiers par rapport à l'intrusion saline.

Figure3.1 : Représentation schématique de l'interface « eau douce-eau salée ».....	37
Figure3.2 .Impact d'un pompage sur l'interface eau douce/eau salée .....	38
Figure 3.3 Exemple de diagramme de piper .....	42

### Chapitre 4 : Etude et application de la méthode de vulnérabilité GALDIT

Figure 4.1 Type d'aquifère du massif dunaire de Boutheldja	
Figure 4.2: Conductivité hydraulique de l'aquifère.....	52
Figure 4.3. Carte des profondeurs du plan d'eau du massif dunaire .....	53
Figure4.4 : Carte de la distance du point d'eau de la nappe du massif dunaire .....	54
Figure4.5.Carte montrant l'impact des intrusions marines existantes .....	56
Figure 4.6 : Représentation du paramètre (T) l'épaisseur de l'aquifère.....	57

## INTRODUCTION GÉNÉRALE

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.

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 d'eau souterraine.

L'évaluation de la vulnérabilité d'un aquifère par rapport à l'intrusion marine est un cas particulier à la fois de la vulnérabilité spécifique et la vulnérabilité intrinsèque d'une certaine manière.

Ainsi l'étude de la vulnérabilité des nappes constitue un **outil d'aide à la décision** . La prise en considération de ces derniers leur permettra de limiter et contrôler les risques de dégradation de la qualité des eaux souterraines , par conséquent de prendre des mesures de protection adaptées.

C'est dans ce contexte que s'inscrit cette modeste recherche ayant pour but l'évaluation de la vulnérabilité de la nappe libre du massif dunaire de Boutheldja W.EL Taref par l'approche **GALDIT**.

Le présent mémoire est scindé en quatre chapitres :

- Le premier chapitre sera consacré à une présentation de la zone d'étude sur les plans géographique, climatique, géologique et hydrogéologique.
- Le second chapitre présentera une synthèse bibliographique sur les différentes méthodes traitant de la vulnérabilité des aquifères à la pollution (DRASTIC, DRIST ,GOD et GALDIT ....)
- Le troisième chapitre définira la vulnérabilité des aquifères côtiers par rapport à l'intrusion saline
- Le quatrième chapitre, constitue l'objectif principal de ce travail, il portera sur :  
-une présentation bien détaillée du modèle GALDIT

-application du modèle GALDIT à l'évaluation de la vulnérabilité de la nappe libre du massif dunaire de Boutheldja.

Enfin nous terminons cette modeste recherche par une conclusion générale qui relatera l'ensemble des résultats obtenus.

# Chapitre 1

## Présentation de la zone



## **Introduction :**

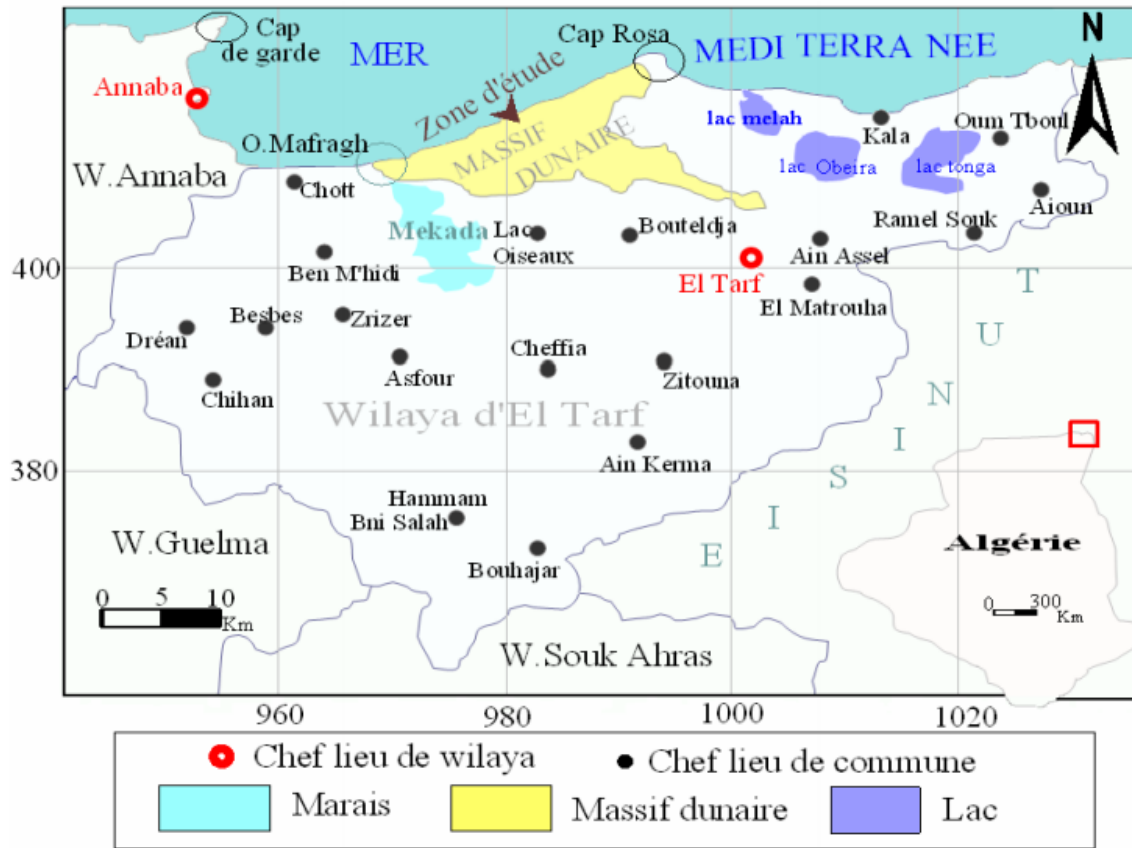
La présente étude porte sur l'évaluation de la vulnérabilité et le risque de l'intrusion marine des eaux souterraines de la nappe libre du massif dunaire de Boutheldja. Dans toute étude de ce type la présentation de la zone d'étude s'avère d'une extrême importance, nécessaire pour connaître les caractéristiques physiques, climatiques, hydrogéologiques, hydrochimiques ce qui permettra de constituer une bonne base de données.

### **I.1 - La situation géographique du massif dunaire de Boutheldja :**

La zone d'étude se localise dans la partie orientale de l'Algérie, à l'extrême Est de la plaine alluviale d'Annaba. Elle se situe dans le territoire de la wilaya d'El Tarf, répartie sur les communes de Bouteldja et Berrihane. Elle fait partie du bassin versant de la Mafragh d'une superficie d'environ 2660 Km<sup>2</sup>. Dans ses parties sud et est, cette zone est ceinturée par une zone montagneuse typique du tell algérien.

Le système se compose essentiellement d'une plaine alluviale résultant des dépôts de l'oued Kebir Est et de ses affluents sur une superficie de 40 Km<sup>2</sup> et d'un massif dunaire d'une superficie d'environ 160 Km<sup>2</sup> et limité :

- Au Nord par la mer Méditerranéenne.
- Au Sud par la plaine de Bouteldja.
- A l'ouest par la Mafragh
- A l'Est par le massif du Cap Rosa.



**Figure 1.1 : Situation géographique du massif dunaire de Bouteldja.**

Source : (SAADALI .B ,2007)

**1.2. Caractéristiques géomorphologiques:**

La géomorphologie de la région d'étude (fig. 1.2) est caractérisée par une formation Quaternaire dominant la partie avale au Nord – Est et au Nord – Ouest.

Le massif dunaire est un cordon dunaire qui est localisé au Nord de la plaine alluviale de Bouteldja, il est caractérisé par une grande extension en contact avec la mer Méditerranée, il s'étend jusqu'aux pieds des djebels Bourdim et Hajar Siah à l'Est (Ramdani, 1996).

Les différentes unités géomorphologiques qui constituent notre région d'étude seront détaillées dans le présent chapitre.

**1.2.1-Le complexe alluvial de la vallée de l'oued El Kébir Est**

Il est caractérisé par une série de terrasses à faciès hétérogènes (de sables, graviers, limons et surtout d'argiles).



### 1.2.2- Les marécages et les lacs :

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 des différents oueds. Les marécages de Mekada Mohacène et le lac des oiseaux (fig1.2), développés dans la basse vallée d'El Kébir Est, forment un delta commun aux principaux oueds drainant la région.

### 1.2.3. Les oueds :

Le principal oued est l'oued Bounamoussa à l'Ouest et El Kébir Est à l'Est (fig1.2), ces deux grands cours d'eau rejoignent la mer à l'embouchure sous le nom de la Mafragh (exutoire unique).

### 1.2.4. Les montagnes

Les montagnes de la Cheffia surplombent la partie avale du bassin formant une barrière Est – Ouest. Leurs altitudes avoisinent les 450 m, avec la présence des massifs de 700 à 900 m d'altitude (djebel Bled Gherfie 996 m) à l'Ouest, et djebel Rhona 1202 m à l'extrême Est (frontière Algéro – Tunisienne)

Les monts de la Cheffia sont caractérisés par les grès de la nappe Numidienne qui constituent le principal affleurement (fig 1.2).

### 1.2.5. Les collines :

Elles se sont développées à la limite des plaines, au niveau des terrasses déprimées. Au Nord – Est de Bouteldja, les collines 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 (A.Ramdani ,1996)

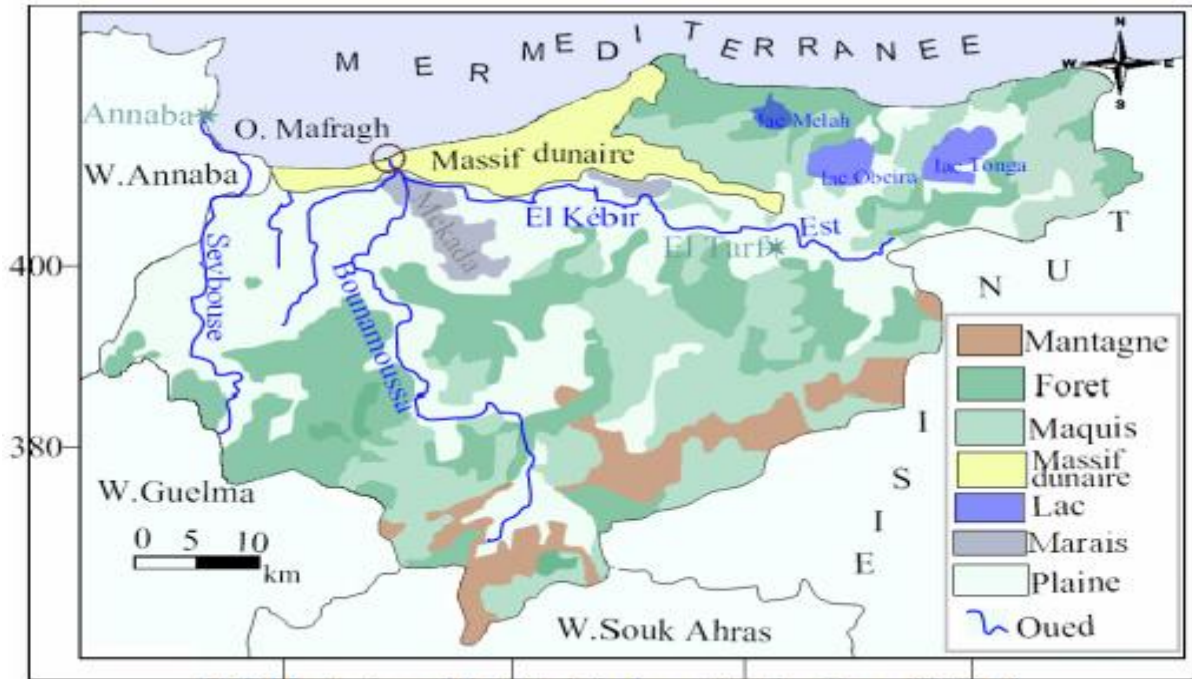


Figure 1.2 : Carte des unités morphologiques dans la wilaya d'EL Taref

Source : (SAADALI .B ,2007)

### 1.3-Géologie et caractéristiques physico-chimiques des dunes

Les dépôts du matelas dunaire sont le produit principale de l'érosion intense des massifs argilo gréseux numidiens et gneissiques charriés vers la mer, dégradés en sable, puis ramenés à l'intérieur par le vent.

Les niveaux d'argiles, provenant du massif numidien, s'intercalent dans les niveaux sableux. La délapidification progressive des grés numidiens et des formations métamorphiques a donc donné des sables qui a l'état pure renfermes 80 à 90% de silice.

C'est ce qui se dégage de la carte géologique et structurale établit par (J.M. Vila ,1978,in Hani Bourbia ,2011) qui montre un lambeau du socle de l'Edough au Nord de Bouteldja. Le sable est donc siliceux, fin et renferme une quantité plus ou moins forte d'argile. Il devient très argileux au pied de la chaine numidienne. La présence de fer oxydé donne au sable sa coloration rouge, brune ou jaune (source de Bouglès).

Les travaux réalisés dans la région (Khérici, 1985 ; Ramdani, 1996 ; Hani, 2003 ,in Hani Bourbia ,2011)) permettent de distinguer :





- Des sables blancs ou jaune claire généralement perméables situés au centre du massif dunaire ;
- Des sables dont les grains sont enrobés d'une fine pellicule d'argile et de ce fait moins perméable que les bancs localisés surtout en bordures 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 noir en relation avec la décomposition des végétaux.

Les analyses granulométriques effectuées à différents points du massif dunaire (en surface et en profondeur) ont bien confirmé que ces sables sont homogènes et d'origine éolienne (bien superposables à la courbe standard des dépôts éoliens).

La granulométrie est fine à moyenne (75 à 85 %), les grains ayant un diamètre de 0.15 – 0.5 mm. Il s'en suit en l'absence d'argile une bonne perméabilité de la formation ( $10^{-4}$  à  $10^{-3}$  m/s) de telle sorte que l'eau précipitée y pénètre immédiatement et totalement.

Ces sables jouent ainsi le rôle de filtre naturel et de magasin aquifère. Seuls les sables des bas reliefs argilo - gréseux ont une moins bonne perméabilité ( $10^{-6}$  m/s) mais une capacité de rétention supérieure due à la fraction argileuse provenant de l'érosion (Joleaud, 1936, in Hani Bourbia, 2011).

#### 1.4- Caractéristiques climatiques

Notre étude est basée sur les données disponibles des deux stations pluviométriques, les Salines et Ain Assel pour une période d'observation de 20 ans (1990/2010).

**Tableau 1.1:** Les coordonnées Lamberts des stations pluviométriques

Les coordonnées Lamberts des stations pluviométriques				
Station	Coordonnées			Période
Station	X(km)	y(km)	Z(m)	d'observation
Les salines	955.80	403.8	3	1990 - 2010
Ain Assel	1005.55	400	32	1990 - 2010

## I-4.1 Les précipitations

### 1.4.1.1- Précipitations moyennes mensuelles

La précipitation moyenne mensuelle nous permet de donner un aperçu sur les variations mensuelles et pluriannuelles des précipitations en se basant sur des calculs de la moyenne arithmétique des hauteurs des précipitations du mois considéré pour un nombre d'années quelconques. Les hauteurs des pluies moyennes mensuelles enregistrées durant les périodes d'observation (1990 - 2010) sont illustrées dans le tableau ci-dessous :

**Tableau1.2** : Précipitations moyennes mensuelles en mm (1990/2010)

Station /mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
Les Salies	49,07	69,18	131,22	149,41	112,98	96,16	67,00	80,64	37,33	11,95	3,01	8,80
Ain Assel	48,04	52,51	130,89	132,5	112,91	91,18	65,39	76,3	34,1	7,9	2,76	5,61

(source : ANRH ANNABA)

A partir des précipitations moyennes mensuelles des deux stations, les Salines et Ain Assel, on remarque un accroissement des précipitations allant du mois de septembre jusqu'au mois de Décembre ou atteindre les valeurs maximum 149, 41 mm et 132,5 mm successivement. A partir du mois de Janvier débute la baisse des précipitations qui se poursuit jusqu'au mois d'Août. Les valeurs minimum sont marquées au mois de juillet ou les précipitations sont presque nulles 3,01mm pour la station des Salines et 2,76 mm pour la station d'Ain Assel

### 1.4.1.2- Précipitations moyennes annuelles (PMA)

Les hauteurs des pluies moyennes annuelles enregistrées par les deux stations pluviométriques pour 20 ans d'observations sont comme suite:

**Tableau1.3:** Précipitations moyennes annuelles en mm (1990/2010)

Précipitations moyenne annuelles en mm (1990/2010)					
Année	Les Salies	Ain Assel	Année	Les Salies	Ain Assel
90/91	952.4	689.3	00/01	860.5	550.7
91/92	890.6	684.6	2001/2002	489.8	460.3
92/93	861	644.1	2002/2003	1225.6	772.1
93/94	590.1	519.7	2003/2004	951.3	708
94/95	668.6	548.3	2004/2005	1158.6	988.2
95/96	930.4	807	2005/2006	622.4	612.3
96/97	438.6	422.8	2006/2007	855.1	647.9
97/98	1011.6	941	2007/2008	706.9	539.7
98/99	887.9	841	2008/2009	750.6	687.4
99/00	606.1	459.6	2009/2010	850.4	754.8

(source :ANRH ANNABA)

## 1.4.2 - La température

La température de l'air est un facteur de grande influence sur le bilan hydrique du fait qu'il conditionne l'évaporation.

### 1.4.2.1. - Les températures moyennes mensuelles

L'analyse des données de la température est basée sur les données relevées au niveau des deux stations Les Salines et Ain Assel (1980/2010).

**Tableau1.4 :** Températures moyennes mensuelles en °C (1980/10)

Mois Station	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
les salines	23,03	20,01	51,61	13,11	11,53	11,65	13,25	15,13	18,25	21,9	25	25,79
Ain Assel	23,3	19,7	15,39	12,31	10,74	11,19	13,15	14,987	18,32	21,89	24,48	25,66

Le tableau des températures moyennes mensuelles montre une différence assez proche entre les températures des deux stations .

Les plus faibles valeurs sont mesurées aux mois de décembre, janvier, février et mars où on remarque que le mois le plus froid est le mois de janvier (avec une température de l'ordre de 11.53°C aux Salines et de 10.74°C à Ain Assel).

Par contre les plus fortes valeurs caractérisent les mois de juin, juillet et août où on remarque que le mois le plus chaud est le mois d'Août (avec une température de l'ordre de 25.79°C aux Salines et de 25.66°C à Ain Assel) .



### 1.4.3 - L'humidité relative de l'aire:

L'humidité relative de l'aire correspond au rapport de la tension de vapeurs réelles observées par la tension de la vapeur saturante à la même température. Elle nous permet de donner une idée sur l'état de l'atmosphère s'il est plus ou moins proche de la condensation. La variation de l'humidité relative au cours de l'année est irrégulière, elle atteint son minimum au mois de juillet, tandis que, le maximum est enregistré au mois de janvier.

### 1.4.4 - Le vent

Le vent est l'un des éléments les plus déterminants des régimes pluvieux, de l'évaporation et par conséquent du climat. Les mesures réalisées sur le site d'une durée effective de 15 mois entre janvier 2007 et novembre 2009 (hors période d'été car il n'y a pas eu de mesures), font apparaître des vents de toute provenance, avec prédominance du secteur Est à Sud-est et Nord à Nord-ouest, ces derniers étant également prépondérants en intensité (vitesse maximale de 2 à 2,5 m/s) (d'après SOGREAH ALGERIE, 2009, in Hani Bourbia, 2011).

### 1.4.5. Type de climat:

La région d'étude est soumise à un climat méditerranéen qui est tempéré, se caractérise par deux saisons l'une humide et douce allant du mois d'octobre jusqu'au mois de mai et l'autre chaude et sèche relativement courte durant les mois de juin, juillet, août et septembre.

## 1.5.-Partie hydrogéologie

La structure hydrogéologique du système aquifère de la région du massif dunaire de Bouteldja pourrait être schématisée de la façon suivante :

- 1- Une nappe libre, exploitée par un grand nombre de forages et composée essentiellement de sables.
- 2- Une nappe profonde reconnue par les forages profonds et par les campagnes géophysiques et constituée de graviers.



### 1.5.1. Inventaire des points d'eau :

La nappe est captée par les puits, les sources, et par les forages.

- **Les sources :**

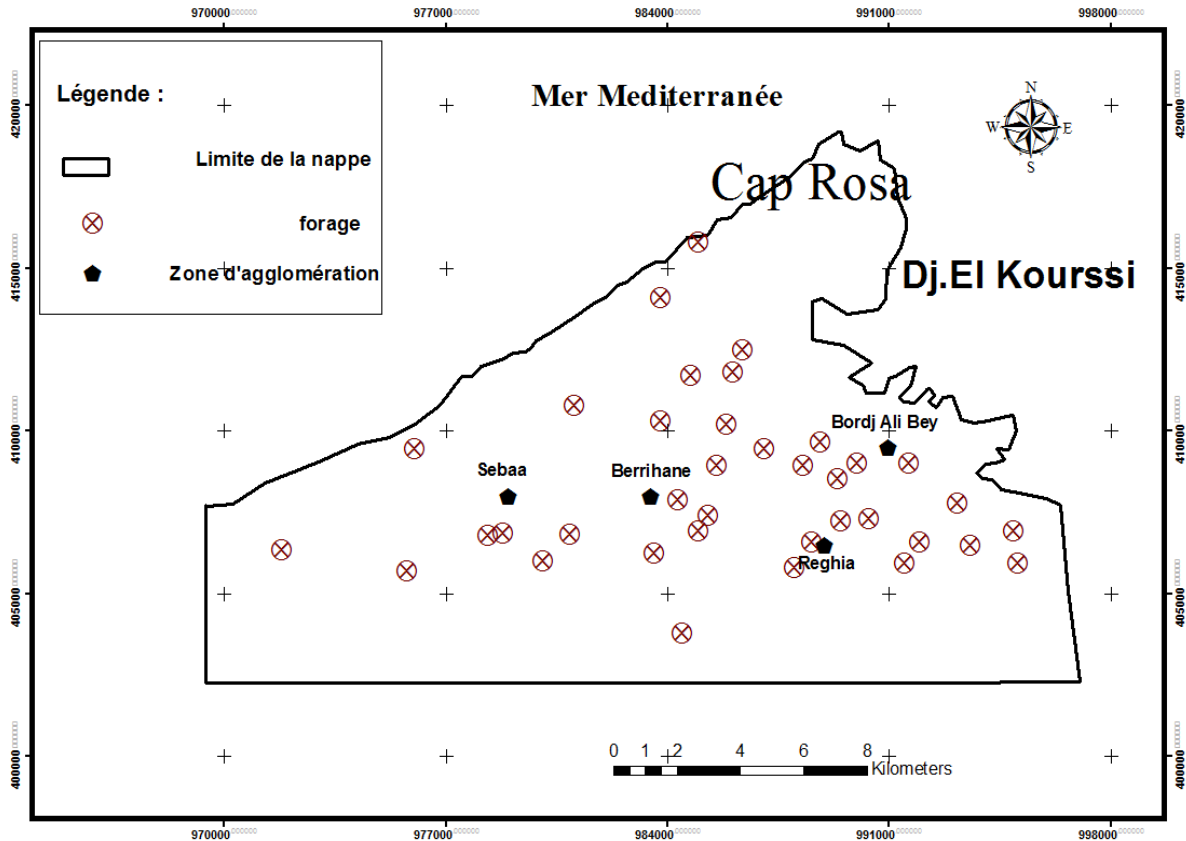
On remarque que dans la région d'étude, les sources (source Bougles, Diteri, Bourdim et Source Espagnole) sont visiblement concentrées à l'Est près des massifs gréseux et des dépressions sableuses et sont liées à la présence d'un massif nu ou couvert par les sables dunaires.

- **Les puits :**

Presque dans toute la région le captage de la nappe superficielle se fait par les puits, surtout aux niveaux des agglomérations rurales éparses pour leurs besoins quotidiens. Il existe plus de 200 puits (Source APC Berrihane , 2007 ;in Haied .Nadjib,2015,).

- **Les forages :**

Généralement les forages captent la nappe libre du massif dunaire de Bouteldja. Au niveau du massif de Bouteldja et vu la bonne qualité des eaux, il existe un grand nombre de forages pour l'A.E.P qui sont concentrés au Sud-Est du massif dunaire.



**Figure.1.5-** Carte de la répartition des forages dans le massif dunaire de Bouteldja

**1.5.2.- Définition de La nappe des sables dunaires de Bouteldja**

La nappe du massif dunaire est alimentée par les précipitations atmosphériques, les marécages (marais Righia et Oum Lagareb), le ruissellement à partir des pentes favorables des formations numidiennes et en fin les affluents de l'oued El Kébir Est. Elle est limitée :

- Au Nord par la mer Méditerranée d'où la relation souterraine perméable;
- Au Sud par une limite perméable avec les terrasses de l'oued El Kébir Est et avec la nappe profonde des graviers dans lesquelles elle se décharge;
- A l'Est une limite perméable au niveau des grés numidien et une limite imperméable dans la zone argileuse
- A l'Ouest une limite perméable avec les marécages.

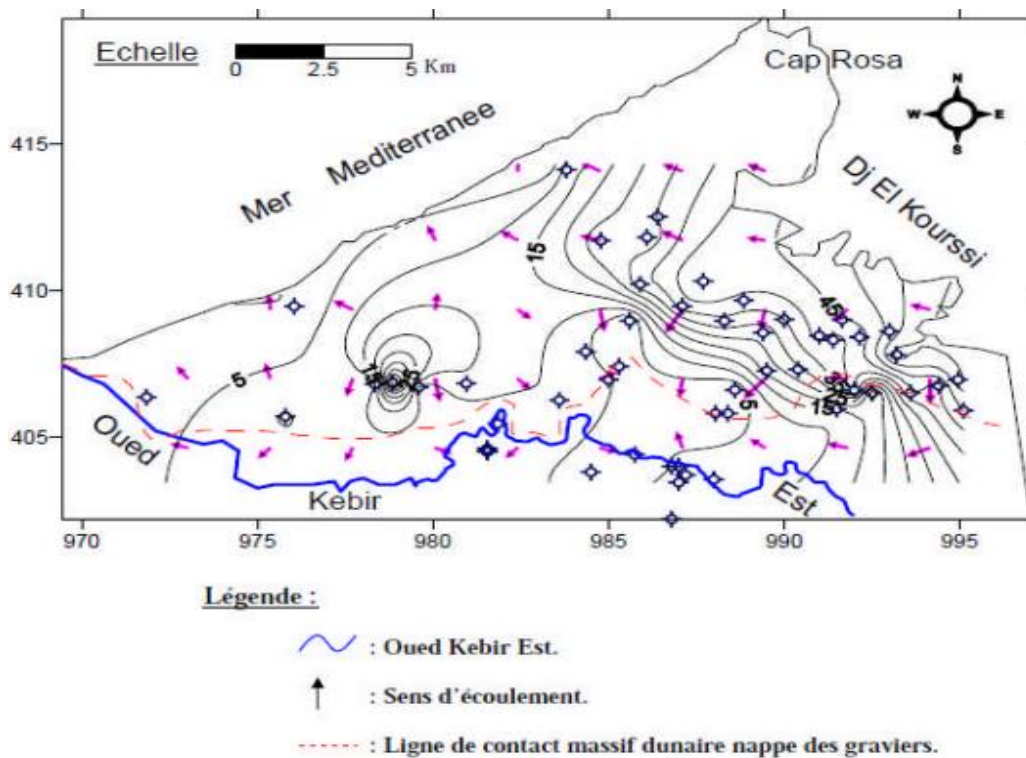
Au nord-est, la nappe libre du massif dunaire est contenue dans les sables éoliens épais de 20m à l'Est et de 120m à l'Ouest. La partie orientale du massif est caractérisée par une augmentation progressive des épaisseurs, suivant une première direction Est-Ouest de l'oued

Bourdim (20 m) à l'oued Bouglés (75 m), puis une seconde direction NE-SW du djebelKoursi (70 m) vers Nécha Righia (150 m). La zone centrale englobant la Garaet El Groubzi et El Gouréate présente une épaisseur relativement constante, évaluée à quelques 150 m. Dans toute la partie orientale du massif, la carte montre des épaissements très importants des alluvions notamment à l'aplomb des thalwegs reconnus par la prospection géophysique (Khérici, 1985; Ramdani, 1996 ; Toubal, 1998 in ; Hani Bourbia ,2011).

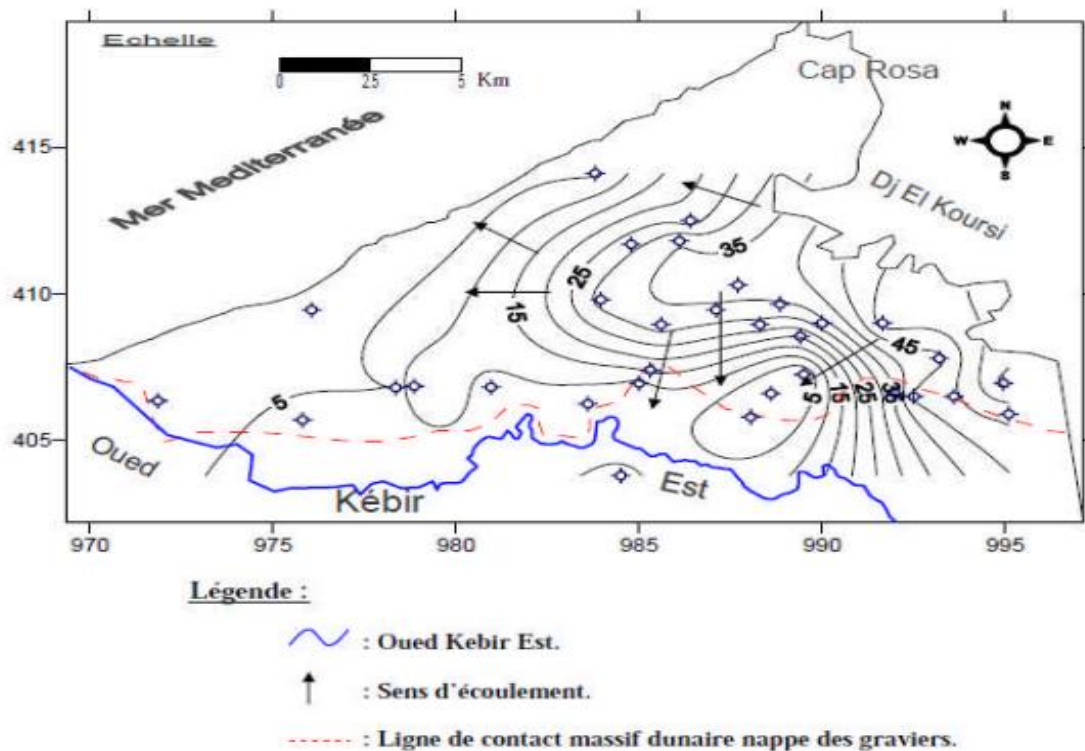
### 1.5.3. - Piézométrie de la nappe libre de Bouteldja

Les points ayant fait l'objet de mesures par l'ANRH en Mai et en Octobre 2002, sont groupés dans un espace très réduit et se localisent bien loin de notre zone d'étude ce qui ne permet pas de faire des extrapolations fiables. Ainsi que les points d'eaux dont nous disposons pour établir la carte piézométrique. Ils sont concentrés dans des agglomérations rurales, ce qui ne nous permet pas d'avoir une idée claire sur l'écoulement de l'eau souterraine.

C'est pour cette raison que nous nous sommes basés sur des données de forage obtenues au mois d'Octobre 1994 (A. Ramdani, 1996) et de 1982 (N. Khérici, 1985, in Hani Bourbia,2011).



**Figure 1.6 :** Carte piézométrique de la nappe du massif dunaire de Bouteldja en Octobre 1994 (Ramdani A. 1996 ;in Hani Bourbia ,2011).



**Figure 1.7 :** Carte piézométrique de la nappe du massif dunaire de Bouteldja en 1982  
(Khérici N. 1985;in Hani Bourbia, 2011).).

Ces cartes montrent que l'écoulement souterrain est dirigé vers la mer au Nord et vers les terrasses de l'oued Kébir au Sud.

On observe un écoulement vers la zone sud-est, caractérisée par les apports venant des reliefs gréso-argileux. Cette zone d'extension, limitée par rapport au Nord dont la circulation des eaux est beaucoup plus orientée, reste soumise à un écoulement important et rapide compte tenu de l'alimentation de la nappe qui se fait principalement par les précipitations.

On note que l'exploitation intensive a modifié la morphologie de la nappe. L'allure des courbes piézométriques est caractérisée par plusieurs axes de drainages liés aux pompages excessifs.

Le gradient hydraulique est d'autant plus fort que les courbes sont plus serrées, c'est notamment le cas de la partie sud, sud-est correspondant aux sous bassins de Bouglés et B'haim. Ce resserrement est dû essentiellement à surexploitation (Khérici N. 1985, in Hani Bourbia, 2011).





Par contre, au centre, au nord, nord-ouest, les courbes isopièzes sont espacées traduisant un faible gradient et une bonne perméabilité.

Le manque de points de mesure dans la partie Ouest de la zone d'étude, ne nous permet pas de connaître l'allure de la piézométrie.

#### **1.5.4. Régime de la nappe du massif dunaire de Bouteldja**

La nappe est libre, elle renferme, d'une part, une zone non saturée aux caractéristiques hydrodynamiques similaires à celles de la zone saturée et d'autre part, a une zone de fluctuation.

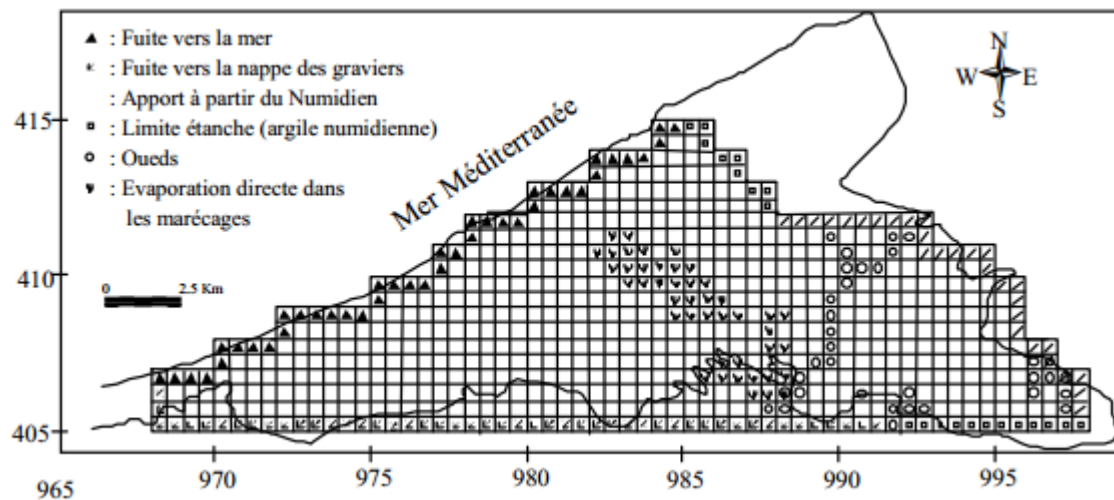
En fonction de l'importance des précipitations et de la perméabilité des sables, les niveaux maximum apparaissent de Décembre à Avril (le plus souvent en Décembre et en Mars). Les niveaux minimaux apparaissent le plus souvent d'Avril à Octobre quand les précipitations sont très faibles voir nulles. L'alimentation du massif dunaire est en apparence simple, elle se fait à partir des pluies abondantes de la saison pluvieuse, pénétrant dans un sédiment à fort pouvoir hydrophile et reposent sur un substratum imperméable. Ainsi le ruissèlement est faible sauf pour le bassin de Bourdim où l'eau s'écoule du numidien environnant. Ailleurs les eaux provenant du numidien s'infiltrent au contact des sables. Contrairement au ruissèlement, l'infiltration est très élevée, favorisée à la fois par la morphologie et la perméabilité des dunes.

#### **1.5.5. Conditions aux limites de la nappe du massif dunaire de Bouteldja :**

Après avoir interpréter les coupes hydrogéologiques, on constate que la nappe libre du massif dunaire repose sur un substratum argilo-gréseux imperméable. Latéralement, ses limites se présentent sous différents aspects lithologiques :

- A l'Est : on a deux types de limites.
  - ❖ Limite étanche : située dans les zones argileuses (argile du numidien).
  - ❖ Limite perméable : elle se localise au niveau des grès numidien.
- A l'Ouest : il existe une limite perméable entre le massif dunaire et les grands marécages (Garaat Makrada) d'une part, et la nappe de la Maffragh dans les couches profondes d'autre part.
- Au Nord : on note l'existence d'une liaison souterraine entre le massif dunaire et la mer méditerranée.
- Au Sud : dans la direction de la vallée de Kébir, on note l'existence d'une :

- ❖ Limite perméable profonde entre la partie basse du massif dunaire et la nappe alluvionnaire captive de la terrasse de l'oued Kébir.



**Figure 1.8:** Carte des conditions aux limites de la nappe libre du massif dunaire de Bouteldja. (Hani A. 2003, in Haïd Nadjib, 2015)

## 1.6.- Caractéristiques hydrodynamiques de la nappe

Les caractéristiques hydrodynamiques des nappes sont généralement obtenues au moyen des tests portant sur les modifications du comportement hydrodynamiques du complexe aquifère-ouvrage de captage, en réponse à une impulsion créée par un pompage à un débit constant. L'essai par pompage est l'un des moyens les plus utilisés pour connaître les caractéristiques du complexe aquifère-ouvrage, et déterminer les paramètres hydrodynamiques (perméabilité, transmissivité, coefficient d'emmagasinement) et les caractéristiques particulières de l'aquifère (structure, hétérogénéité, drainance...etc.).

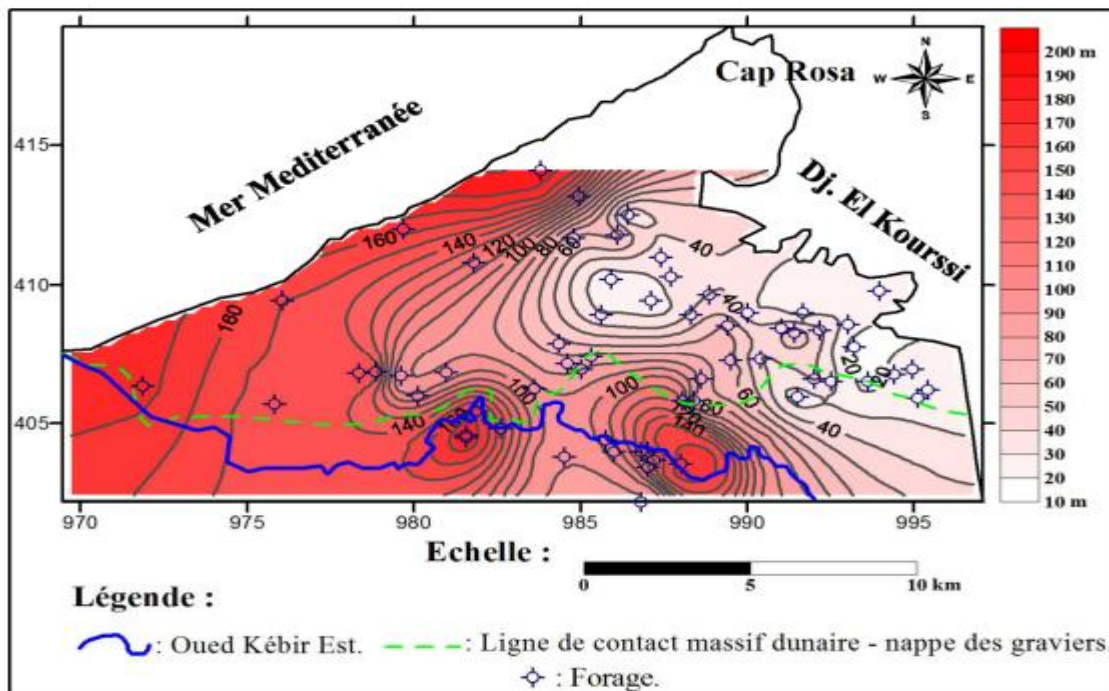
### 1.6.1-Epaisseur saturée

La carte du substratum et la carte piézométrique des basses eaux ont permis de tracer la carte d'épaisseur de la couche saturée de l'aquifère libre du massif dunaire de Bouteldja (Figure N° 1.9).

Plus de 78% des ouvrages montrent une épaisseur saturée comprise entre 100 et 160m. La valeur moyenne est de l'ordre de 119 m.

Cette carte visualise la répartition spatiale des épaisseurs. Elle nous montre en effet, trois zones bien distinctes :

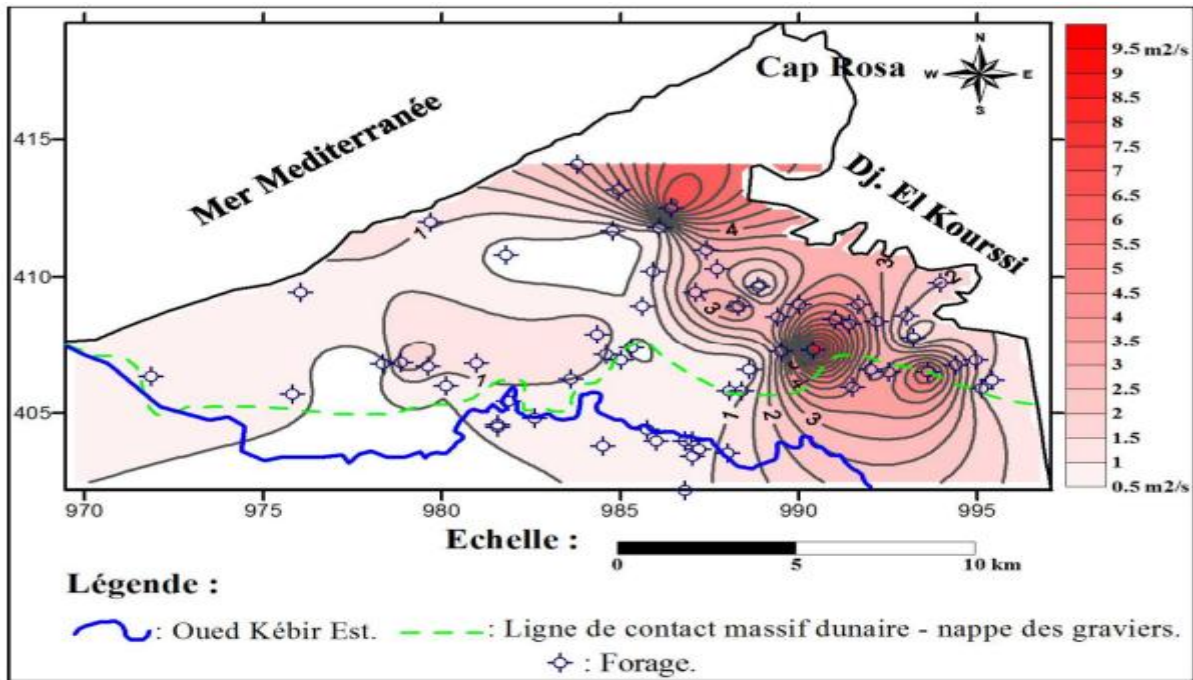
- La zone Sud-Ouest localisé au niveau de Haraba, Mouaïssia et Oued Dieb avec une épaisseur saturée entre 120 et 160 m.
- La zone centrale allongée selon deux axes Nord-Ouest, Nord-Nord-Est dont les épaisseurs varient respectivement de 100 à 160 m et de 60 à 120 m.
- La zone Est, Sud-Est (Bourdim, Dj.Siah, Oum El Agreb et Dj Kourssi). Dans cette zone le substratum argilo-gréseux numidien se trouve entre 60 et 100 m de profondeur. Les proportions d'argile demeurent très importantes, ce qui limite par conséquent la fraction de la couche saturée. Les épaisseurs de la nappe ne dépassent pas les 60 m.



**Figure 1.9** : Carte d'égale épaisseur de la couche saturée de la nappe libre du massif dunaire de Bouteldja. (Haied .Nadjib,2015)

### 1.6.2.-Transmissivités

Les valeurs, consignées dans l'annexe N 1, ont permis l'établissement d'une carte (**Figure 1.10**) sur laquelle s'individualise une zone préférentielle où les valeurs de transmissivités et de perméabilités sont élevées.



**Figure1.10 : Carte de répartition des valeurs de la transmissivité de la nappe du massif dunaire de Bouteldja en  $10^{-3}m^2/s$  (Haeid Nadjib,2015)**

Cette zone, se situant dans la partie sud-est du massif dunaire est très sollicitée et productive au vu du grand nombre de forages implantés. L'analyse de la carte des transmissivités montre que la variabilité du paramètre transmissivité est dû à la variation de la perméabilité des formations alluviales. Les valeurs de la transmissivité sont comprises entre 1 et  $3 \cdot 10^{-3}m^2/s$  dans la partie Nord Est de l'oued Kébir Est. Par contre au Sud, Sud Est les valeurs de la transmissivité s'améliorent et passent à  $10^{-2} m^2/s$  (Ramdani. A ; 1996).

### 1.6.3. Détermination et répartition des perméabilités :

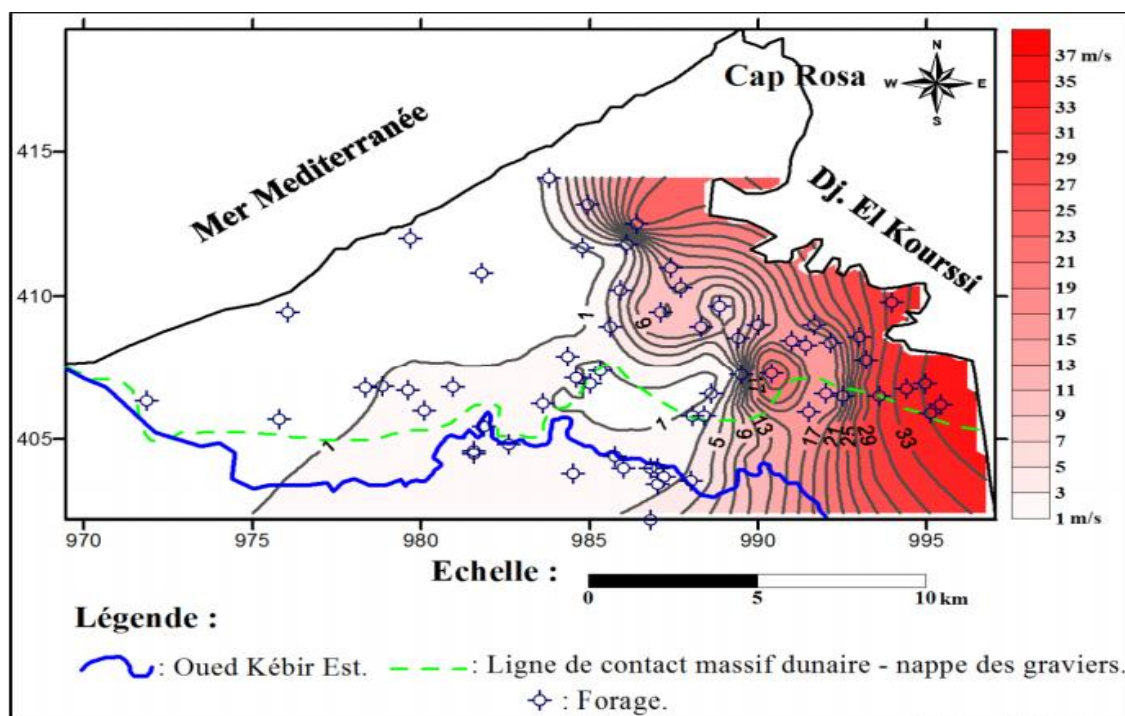
La perméabilité est donc définie comme étant le rapport entre la transmissivité et l'épaisseur saturée de la couche aquifère. C'est par cette relation à partir de la superposition de la carte des transmissivités et celle des épaisseurs mouillées qu'il a été possible de déterminer la variation des coefficients de perméabilités à travers la nappe dunaire (Ramdani. A ; 1996).

La répartition géographique des perméabilités (**fig.1.11**), on constate que les valeurs se distribuent de la manière suivante:

- Les plus fortes valeurs, perméabilités supérieures à  $1 \cdot 10^{-4} m/s$ , se situent au Sud – Est de la région, entre la source de Bourdim et le lac noir. Ces fortes valeurs de

perméabilités sont dues vraisemblablement aux lessivages des sables par les échanges permanents entre les surfaces d'eau libre et la nappe.

- Les régions les moins permanentes (perméabilités inférieures à  $1.10^{-5}$  m/s) sont situées:
  - ❖ Dans la partie Ouest du terrain d'étude;
  - ❖ Dans la partie centrale du cordon dunaire suivant une zone s'étend d'El Haraba au Sud jusqu'à la mer au Nord. Ces valeurs sont fortement influencées par les fortes proportions d'argile dans l'aquifère. (Hani Bourbia;2011)



**Figure 1.11: Carte des valeurs du coefficient de perméabilité en 10-5 m/s de la nappe du massif dunaire de Bouteldja (Haeid Nadjib ,2015)**

### 1.7-HYDROCHIMIE :

L'étude hydrochimique permet d'évaluer la qualité des eaux souterraines après la détermination des caractéristiques physiques et chimiques, Pour cela nous avons essayé, dans un premier temps de faire le point sur la qualité des eaux souterraines à partir des données des compagnes d'analyses chimiques des eaux de la nappe effectuées par l'ADE (laboratoire



centrale d'ADE, Annaba) en Septembre 2004, Mai (2004, 2005, 2006, 2008 et 2010) et Octobre 2009.

### **1.7.1 Paramètres physiques :**

#### **1.7.1.1 - La température.**

La température de l'eau joue un rôle dans la solubilité des sels et surtout des gaz, dans la dissolution des sels dissous donc sur la conductivité électrique. La température du massif dunaire varie entre 17.5°C à 22.5°C avec une moyenne de près de 20°C (N. Haied, 2015).

#### **1.7.1.2 - Le pH :**

Le pH (potentiel Hydrogène) mesure la concentration en ions H<sup>+</sup> de l'eau. Ce paramètre caractérise un grand nombre d'équilibre physico-chimique et dépend de facteurs multiples, dont l'origine de l'eau (Castany, Margat, 1977 ;in Hani Bourbia ,2011).

Les eaux du massif dunaire de Bouteldja présentent un pH oscille entre 6 à 7 caractérisant ainsi une eau acide à neutre. (Hani Bourbia,2011).

#### **1.7.2.3. La conductivité**

La conductivité est l'inverse de la résistivité, et elle caractérise la propriété pour un liquide à laisser passer le courant électrique.

La plupart des matières dissoutes dans l'eau se trouvent sous forme d'ions chargés d'électron, donc la mesure de la conductivité reflète assez fidèlement sa minéralisation. Elle augmente avec la teneur en sels dissous et varie en fonction de la température. La variation de la conductivité donne des informations importantes sur l'évolution de la qualité de l'eau.

Les valeurs de la conductivité des eaux de la zone étudiée sont comprises entre 130 et 285  $\mu\text{s}/\text{cm}$ . Ces valeurs montrent clairement que les eaux de la nappe du massif dunaire de Bouteldja ont une minéralisation faible à accentuée.

Les valeurs de la conductivité qui ne dépassent pas 250  $\mu\text{s}/\text{cm}$  sont dues aux apports pluvieux qui diluent les eaux, par contre les fortes valeurs ( $> 250 \mu\text{s}/\text{cm}$ ) sont dues à présence des lentilles d'argile (N. Haied, 2015)



### 1.7.2. Origines de la minéralisation observée :

Le massif dunaire de Bouteldja, une région à forte pluviométrie, constitue de grés et de sables purement siliceux ayant permis un lessivage complet. L'absence de carbonates, en particulier, donne des eaux à résidu sec très faible, très souvent de l'ordre de quelques centaines de mg.

Le CO<sub>2</sub> dissous, fonction de la pression partielle du CO<sub>2</sub> de l'atmosphère des sols, la même qu'ailleurs, donne certes un certain nombre d'ions HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> et CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> par dissolution. Mais ceux-ci ne sont pas augmentés de ceux que fournirait la dissolution des carbonates, ici absents de ces roches. Le CO<sub>3</sub> combiné est donc faible. Il n'y a que quelques milligrammes à quelques dizaines de milligrammes (Hani.A , 2003 in ; saadali Baderdine ,2007).

Comme les ions Ca ne se trouvent qu'en très petite quantité, il y a plus de CO<sub>2</sub> libre que CO<sub>2</sub> d'équilibre. Il y a par conséquent du CO<sub>2</sub> agressif, et les eaux peuvent avoir des pH très faibles de l'ordre de 5 à 6. la teneur en Cl et en SO<sub>4</sub>, quoique pouvant être plus faible que dans les eaux des terrains calcaires, peut devenir égale à la teneur en CO<sub>3</sub>, ou même le plus souvent la surpasser par faiblesse du CO<sub>3</sub> combiné. La teneur en Ca est liée à celle du CO<sub>3</sub> qui est faible. Il en est de même de Mg. De ce fait, rNa est lié à rCl. (saadali Baderdine ,2007)

**Tableau n°1.5** : Concentrations des éléments chimiques des sources d'eaux dans le massif dunaire de Bouteldja (2006/07). (saadali Baderdine ,2007)

<b>Elément</b>	Mg <sup>+2</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	NO <sup>-</sup>	R.S
<b>Pointd'eau</b>							
Bou Glés	5.46	19.62	<10	31.29	22.5	5.65	215
Titri	4.71	21.68	<10	41.49	13.25	4.91	194
Bourdimi	3.66	18.51	<10	34.69	12	5.25	200.5
Greate	12.36	26.66	<10	67.85	18.4	3.95	267.5
AinSaboun	3.88	19.31	<10	27.87	16.35	2.62	182
Sebaa	3.01	18.46	<10	28.72	16.35	2.62	196
Rmel Terch	109.3	985.6	>20	1688.0	24.14	1.1	2275
Espagnole	85.12	1017	>20	1621	48	1.28	1410
Kesba	21.41	61.29	<10	124.3	22.45	6.07	479
Rmel Aib	5.27	47.48	<10	88.81	22.55	1.75	362
o.B'haim	5.08	21.29	<10	39.31	16.9	2.21	218.5



**Conclusion :**

L'analyse des résultats de l'étude géophysique et les cartes du coefficient de perméabilité, transmissivité et de l'épaisseur saturée ont permis de faire la synthèse des principales caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère dunaire de Bouteldja :

- L'épaisseur saturée varie de 37 m à l'Ouest de la région de Bourdim, à 190 m au Nord Ouest de la région.
- Les valeurs de la transmissivité sont comprises entre 1 et  $3 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$  dans la partie Nord Est de l'oued Kébir Est. Parcontre au Sud, Sud Est les valeurs de la transmissivité s'améliorent et passent à  $10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$
- Les perméabilités les plus fortes se situent au Sud Est de la région, entre la source de Bourdim et le lac noir. Les faibles perméabilités se localisent à l'Ouest et au centre du cordon dunaire. Ces faibles valeurs sont provoquées par les fortes proportions d'argile dans l'aquifère.

La piézométrie indique que les écoulements d'eau souterraines dans l'aquifère du massif dunaire se dirigent vers la mer au Nord et vers la nappe alluvionnaire de l'oued Kébir au Sud, suivant un deux axes d'écoulement préférentiels Nord Est, Sud Ouest.

## Chapitre 2 : Présentation des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité des aquifères à la pollution

## **Introduction :**

Les eaux souterraines représentent une importante ressource exploitée pour la consommation humaine et pour l'utilisation dans les domaines agricoles et industriels. Ces eaux sont souvent exposées à la contamination par des polluants de différente nature.

La vulnérabilité d'une nappe dépend de multiples facteurs intervenant soit sur la nature et/ou la concentration de la contamination ; soit par son transfert.

Ainsi l'approche de la vulnérabilité à la pollution des nappes présente comme un outil efficace pour limiter et contrôler les risques de dégradation de la qualité des eaux souterraine , permettant donc de prendre des mesures de protection adaptées.

### **2.1. Définition et Historique du concept de vulnérabilité :**

Le terme générique de vulnérabilité est défini de différentes manières selon les disciplines et les auteurs.

Dans la littérature scientifique, il n'existe pas de définition unifiée du concept de "vulnérabilité". Par exemple, ( CUTTER ,1996,in Haddouche,2011), le voit comme une formulation rhétorique permettant d'avertir d'un danger et des pertes qui pouvaient l'accompagner. D'autres la définissent comme la capacité d'un système à répondre aux contraintes et aux chocs qu'il subit. (Haddouche,2011)

C'est particulièrement le cas en hydrogéologie ou la vulnérabilité des aquifères a été définie par **margat** dès 1968 comme étant le degré d'exposition de la nappe d'eau souterraine à une pollution exogène. La notion de vulnérabilité repose sur l'idée que le milieu physique, en relation avec la nappe d'eau souterraine, procure un certain degré de protection vis-à-vis des pollutions et cela, en fonction des caractéristiques de ce milieu. (BRGM ;2011)

(Vrba et Zoporozec ,1994 ;in Saidi ,2011) ont défini la vulnérabilité comme étant la probabilité des contaminants d'atteindre le système aquifère après leur introduction au dessus de l'aquifère. De plus, ils ont distingué entre deux types de vulnérabilité : la vulnérabilité intrinsèque et la vulnérabilité spécifique.

Dans la détermination de la vulnérabilité intrinsèque, les caractéristiques et le comportement spécifique des polluants ne sont pas pris

en considération (Margane, 2001,inSaidi ,2011). Seules les caractéristiques hydrogéologiques sont scrutées (Stiger et al., 2006,in saidi,2011 ). Quant à la vulnérabilité spécifique, elle considère un polluant particulier ou un groupe de polluants. Ce type de vulnérabilité tient compte des propriétés des polluants et leurs relations avec les divers composants de la vulnérabilité intrinsèque (BRGM, 2005in,saidi)

La vulnérabilité intrinsèque est généralement conçue comme outil pertinent dans la prise de décision pour les aménageurs. Par contre, la vulnérabilité spécifique est utilisée pour répondre à une problématique spécifique (Bézélgues et Dougaparsard, 2002,in Saidi ,2011)

## **2.2. Critères de vulnérabilité :**

### **2.2.1. Critères de vulnérabilité spécifique**

#### **2.2.1.1 Capacités dispersives et épuratoires des sols :**

En cas d'une pollution, les sols ont des propriétés épuratoires plus ou moins développées qui dépendent étroitement de la nature du polluant.( Djoudar ,2014)

#### **2.2.1.2- Intrusions marines :**

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

#### **2.2.1.3- Qualité des eaux du réseau hydrographique :**

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

#### **2.2.1.4- Typologie de l'occupation du sol :**

L'occupation du sol constitue un paramètre important dans l'évaluation de la vulnérabilité des nappes. En effet, certaines zones sont sujettes à des activités anthropiques apportant des modifications aux caractéristiques du milieu naturel à savoir (Djoudar ,2014):

- les activités agricoles ;
- l'urbanisme ;
- le développement industriel, touristique, ... etc.

### **2.2.1.5- Points sensibles :**

Sur certains sites, de par l'activité à risque qui y est pratiquée, la vulnérabilité de la nappe augmente significativement. Ce sont les surfaces agricoles, les décharges, les rejets, les voies de circulation, les prélèvements dans la nappe.(Djoudar ,2014)

### **2.2.2. Critères de vulnérabilité intrinsèque :**

Le tableau I.1 résume les différents critères de vulnérabilité intrinsèque. Plusieurs facteurs agissent sur la vulnérabilité d'une nappe d'eau souterraine, ces facteurs sont présents dans le sol, la zone non saturée et la zone saturée

**Chapitre 2 : Présentation des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité des aquifères à la pollution**



**Tableau 2.1** : Principaux critères de vulnérabilité intrinsèque (Bézèlgues et al, 2002 modifié ;in BRGM 2002)

Vulnérabilité intrinsèque		
Sol	Zone non saturée (ZNS)	Zone saturée (ZS)
Ruissellement infiltration	Profondeur de la nappe libre ou épaisseur de la ZNS	Type de nappe : libre ou captive
Pédologie, perméabilité vertical des sols, nature et texture des sols	Temps de transfert, perméabilité verticale	Temps de résidence dépend des paramètres hydrodynamiques des formations aquifères (T, k, S, I) Présence ou non d'un horizon moins perméable et position de celui-ci
	Structure de la ZNS, variation de faciès, épaisseur des discontinuités de faciès, position dans le profil vertical, texture, teneur en matière organique et argile	Relation eaux souterraines/eaux de surface
		Piézométrie : évolution des sens et direction d'écoulement selon la période du cycle hydrologique
		Epaisseur de l'aquifère (quantité de réserve)
		Type systèmes hydrogéologique caractères plus ou moins capacitif et transmissif
		Direction et sens d'écoulement
Nivellement de la nappe		
Recharge : quantité d'eau atteignant la ZS sur une période donnée (recharge annuelle nette)		
Fracturation, directions et densité		

## **2.3. Outils et Méthodes d'évaluation de la vulnérabilité :**

### **2.3.1 Outils d'évaluation de la vulnérabilité :**

#### **2.3.1.1. les Systèmes d'information géographique :**

Un système d'information géographique (SIG) est par définition un système permettant de stocker, de consulter, de traiter et d'afficher de l'information géographique. Les SIG doivent répondre aux besoins des décideurs en matière de gestion et d'aménagement des territoires (Minivelle et Souiah, 2003 ,in Saidi,2011 ).

- **Historique et fonctions de base des SIG :**

Les systèmes d'information géographique sont nés de la rencontre entre la gestion de l'information géographique et le dessin assisté par ordinateur (DAO) sous Autocad. Les premiers SIG ont fait leur apparition au Canada et aux USA vers les années 1964-1965 dès qu'il fut possible d'établir un lien entre la géométrie des objets (lignes, points et surfaces) et les informations qui leur sont associées (Minivelle et Souiah, 2003 ;in Djoudar,2014). C'est ainsi que les premières versions du logiciel Arc Info voient le jour ; En effet, l'outil SIG permet de gérer et de traiter l'information liée aux objets géographiquement localisés. Il met à la disposition de l'utilisateur de multiples fonctionnalités dont on cite : acquisition et gestion des données, interrogation des données par des requêtes, le traitement, la mise à jour et la représentation graphique. En effet, ils aident à :

- accéder à des informations localisées et les mettre en relation ;
- améliorer la productivité et la gestion des activités ;
- faciliter la prise de décision et la communication;
- créer de nouveaux produits, acquérir de nouvelles aptitudes, assurer de nouveaux Services... C'est un outil de gestion, d'analyse, de synthèse, d'aide à la décision et de communication interne et externe. (Saidi,2011)

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

Parmi ces logiciels, on trouve des logiciels libres (AccuGlobe, Google Earth ...) ainsi que des logiciels propriétaires (ArcGis, Mapinfo, Surfer, Isatis...)

- **Mapinfo :**

C'est un logiciel SIG bureautique très répandu. Les fonctionnalités essentielles de gestion des données géographiques, d'analyses multicritères et de cartographie sont simples et efficaces à mettre en place. Il permet de visualiser et d'analyser toutes les données à caractères géographiques afin de les transformer en une information claire et lisible.

- **Surfer : (Golden Software)**

Surfer permet de réaliser des modèles numériques de terrain issues des données récoltées sous différents formats (MsExcel, MsAccess, ...) en créant des grilles qui vont interpoler les données irrégulières des points x, y, z afin de les ordonner ce qui nous permettra de créer plusieurs types de cartes. ( Djoudar,2014)

- **Isatis : (Geovariances)**

Isatis est un outil de géostatistique permettant la mise en œuvre des techniques d'estimation géostatistiques. Il exige une analyse préalable approfondie des données expérimentales, afin de bien cerner les caractéristiques de ces données et de décrire et modéliser la structure spatiale de la variable étudiée. (Djoudar,2014)

Pour notre étude, nous avons utilisé logiciel **Arc Gis 10.4**

- **Arc GIS** est une suite de logiciels d'information géographique (ou logiciels SIG) développés par la société américaine *Esri* (Environmental Systems Research Institute, Inc.). c'est un système complet qui permet de collecter, organiser, gérer, analyser, communiquer et diffuser des informations géographiques. En tant que principale plateforme de développement et d'utilisation des systèmes d'informations géographiques (SIG) au monde. <sup>1</sup>

**Remarque :** A part les différentes interfaces d'Arc Gis 10.4 (Arc Map, Arc Catalog, Arc Scene...), un autre logiciel est utilisé lors de l'élaboration de la carte de vulnérabilité :



- **Microsoft Excel** : c'est un logiciel bureautique tabulaire très connu et très utilisé pour l'établissement des tableaux. Dans cette étude le logiciel est utilisé pour échanger les données entre les autres logiciels appliqués dans le projet.

### **2.3.1.2 Intérêt des SIG dans la cartographie de la vulnérabilité :**

- saisie des informations géographiques sous forme numérique (Acquisition)
- gestion de base de données (Archivage)
- manipulation et interrogation des données géographiques (Analyse)
- mise en forme et visualisation (Affichage)
- représentation du monde réel (Abstraction)
- la prospective (Anticipation).

### **2.3.2. Méthodes d'évaluation de la vulnérabilité :**

Pour étudier la vulnérabilité des ressources en eaux face à diverses sources de pollution diffuses de nombreuses méthodes ont été développées, allant des plus complexes avec des modèles prenant en compte les processus physiques, chimiques, et biologiques dans la zone saturée, à des méthodes de cartographies et de pondération de différents critères pouvant affecter la vulnérabilité. Elles peuvent être classées selon différentes familles de méthodes (Mardhel et al 2005 in BRGM ;2011)

#### **2.3. 2. 1. Les méthodes cartographiques :**

La cartographie est un outil de compréhension qui permet de représenter rapidement des phénomènes ayant une structure spatiale.

La réalisation des cartes de vulnérabilité repose majoritairement, sur la classification des sites en fonction des propriétés et de la géométrie des aquifères, en caractérisant la vulnérabilité à partir des divers paramètres de terrain. Pour simplifier le travail de cartographie et de synthétiser l'information, on identifie, par classes, les paramètres les plus importants caractérisant les terrains.

Parmi ces méthodes, il existe certaines telles que :

- **Albinet et Margat (1970)**

Les grands principes cartographiques proposés consistent à représenter une vue générale des paramètres qui conditionnent la vulnérabilité. Ces paramètres sont :

- la nature géologique du sous-sol ;
- profondeur de la nappe et le drainage de surface.

La représentation s'appuie sur un regroupement schématisé effectué en six classes de vulnérabilité correspondant à six couleurs différentes.

- **BRGM (1971-1983)**

En 1971, Lichardt et Collin reprennent la méthode proposée par Albinet et Margat (1970) et l'adoptent dans le but de cartographier la vulnérabilité des nappes d'eau souterraines de la région lyonnaise (France) à l'échelle du 1/50 000. (Haddouche, 2011) La carte obtenue est un document de synthèse résultant de la superposition de 3 cartes de même échelle.

- La première traduit l'aptitude du terrain à se laisser traverser par un contaminant ;
- La deuxième représente la répartition spatiale des ressources exploitées et exploitables

La troisième concerne les contraintes d'aménagement.

- **Parascandola (1980) :**

Cet auteur suppose que la représentation de la vulnérabilité qui tient compte de chaque type de pollution des eaux souterraines à des fins d'intervention sur le milieu, demandera une mise à jour fréquente. Constatant une difficulté dans l'estimation et la mise en relation des paramètres de vulnérabilité relatifs à la nature des contaminants et des conditions du milieu, Parascandola et Albinet (1983) (Haddouche, 2011) ont suggéré que seule la vulnérabilité en liaison avec la structure hydrogéologique et physiographique du milieu peut être rendue de façon synthétique.

- **La méthode Wipp (environnement Ontario)**

En 1982, le ministère de l'environnement de l'Ontario a publié une série de carte de vulnérabilité de plusieurs aquifères à l'échelle de 1/5000. La méthode utilisée tient compte des paramètres suivants:

- La perméabilité du sol de surface ;
- Le mouvement de l'eau souterraine ;
- La profondeur de la nappe ;
- L'utilisation de l'eau.

Pour une région donnée, trois types de vulnérabilité peuvent être associés (fort, moyen et faible) et à chacune de ces catégories correspond une teinte particulière.

**Environnement Québec Me Cormack (1985)**

En 1985, le ministère de l'environnement de Québec a publié deux cartes de vulnérabilité de la région de Granby. Les paramètres considérés sont : la composition du matériel de surface, la topographie et la perméabilité. Le degré de vulnérabilité est représenté par un dégradé de couleur dont la teinte passe du blanc (vulnérabilité faible) au gris foncé (vulnérabilité élevée). On trouve également sur les cartes une série de symboles complémentaires permettant de localiser certaines activités humaines (carrières, industries, etc.) pouvant influencer le degré de vulnérabilité d'un site. :( Hadouche,2011)

**La méthode anglaise NRA (National Rivers Authority, 1992)**

La méthode développée par la NRA est basée essentiellement sur les caractéristiques de la couche du sol recouvrant le milieu aquifère. Elle tient compte également de:

- la nature du sol;
- la présence d'une source potentielle de pollution;
- la nature géologique de la zone non saturée;
- l'épaisseur de la zone non saturée ou l'épaisseur du toit dans le cas d'une nappe captive(Hadouche ,2011)

- **La méthode AVI (Aquifer Vulnerability Index) :**

Développé par l'institut de recherche national d'hydrologie, c'est la méthode cartographique la plus facile et la plus rapide dans l'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque est. Elle utilise la conductivité hydraulique verticale (k) et l'épaisseur des couches non saturées surmontant l'aquifère (b) afin d'estimer la résistance hydraulique (c) par l'intermédiaire de la formule suivante:

$$C = \sum bi/ki \dots\dots\dots(2.1)$$

Parmi les méthodes cartographiques apparues dans les années 2000 ; on cite «Minnesota», développée par le département des ressources naturelles de Minnesota en 2003. La carte de vulnérabilité de la zone, selon cette dernière, résulte de la superposition de trois cartes : la carte pédologique, la carte de perméabilité et la carte de la profondeur du plan d'eau.(Djouidar ,2014)

### **2.3.2.2 - Les méthodes axées sur la caractérisation des rejets ponctuels**

Une méthodologie toute spéciale s'est élaborée au cours des dernières années aux Etats Unis. Il s'agit de la caractérisation des aquifères localisés sous des sites de rejets ponctuels.

La caractérisation des sites ponctuels se fait plutôt à l'aide de modèles numériques de cotation. Ces systèmes présentent l'avantage d'assigner une cote pour chaque site, et ils favorisent l'évaluation et la comparaison de la vulnérabilité entre les régions. Parmi ces méthodes : (Haddouche,2011)

- JRB associates (1982)
- Legrand (1983)
- Union Cabride (1982)
- BRGM (1990)

### **2.3.2.3. Les méthodes numériques :**

Elles constituent des outils jugés pertinents, mais sont surtout préconisées en cas de masse importante de données (Stiger et al., 2006,in Saidi,2011 ). Elles sont basées sur des lois mathématiques et des principes analogiques simples ou complexes. Ces

méthodes sont souvent développées pour l'estimation de la vulnérabilité spécifique à un polluant ou une source diffuse (Michaud et al; , 2003,in Saidi,2011).

Telle que la méthode **EVARISK** qui est un logiciel conçu en 1997 par l'INRS – Eau ; il est défini comme un outil d'évaluation du risque de contamination des eaux souterraines par les sources diffuses à l'échelle régionale.

#### **2.3. 2. 4. Les méthodes de cartographie à index avec pondération des critères**

L'objectif principal visé par les concepteurs est de rehausser l'importance relative des paramètres physiques d'un aquifère pour la classification relative des régions considérées et de donner un cadre plus rigoureux aux méthodes cartographiques.

Selon le BRGM les méthodes de cartographie à index avec pondération des critères (Point Count Systems Models, PCSM) sont les plus pertinentes vis à vis des réalités de terrain du fait de la prise en compte de l'importance relative de chaque critère vis-à-vis de la vulnérabilité générale de la nappe. Ce sont aussi les plus reconnues et utilisées.(Djoudar ,2014)

- **La méthode DRASTIC :**

La méthode DRASTIC a été mise au point par l'EPA (Environmental Protection Agency) aux Etats-Unis en 1985 et Aller et al. en 1987, afin d'estimer le potentiel de pollution des eaux souterraines (Schnebelen et al., 2002,in Attoui ,2014 ). Elle permet d'évaluer la vulnérabilité verticale en se basant sur sept critères:

- D: Depth to groundwater (distance à la nappe, épaisseur de la zone non saturée) ;
- R: Recharge (recharge) ;
- A: Aquifer media (nature de la zone saturée) ;
- S: Soil media (nature du sol) ;
- T: Topography(topographie, pente en %) ;
- I: Impact of the vadose zone (nature de la zone non saturée) ;
- C: Conductivity (perméabilité de l'aquifère).

- **La méthode GOD**

- Ce système a été développé par Foster en 1987,) qui présente la vulnérabilité de l'aquifère face à la percolation verticale de polluants à travers la zone non saturé et ne traite pas de la migration latérale des polluants dans la zone saturée (Attoui,2014) .

Cette méthode (Douyemi et Khelaifa ,2015) est basée sur l'identification de trois critères

- Type de nappe (Groundwater occurrence) ;
- Type d'aquifère en termes de facteurs lithologiques (Overall aquifer class) ;
- Profondeur de la nappe (Depth to groundwater table).

- **La méthode SINTACS**

Elle est dérivée de la méthode DRASTIC, développée en Italie, au début des années 1990, de manière à s'adapter à la cartographie à plus grande échelle (BRGM ;2011). Les paramètres de caractérisation de la vulnérabilité qui ont été retenus dans cette approche sont les mêmes que ceux de la méthode DRASTIC.(Haddouche,2011)

- **La méthode EPIK**

C'est la première méthode dédiée spécifiquement aux aquifères karstiques sensus stricto (Doerfliger, 1996 ; Doerfliger et Zwahlen, 1997 ;in BRGM,2002). Elle est basée sur quatre critères :

- Epikarst (l'épikarst ou zone épikarstique rassemble l'eau d'infiltration dans un aquifère perché local et discontinu, drainé par le bas soit par les vides les plus larges en un ruissellement souterrain rapide, soit par les vides de petites dimensions, en une infiltration lente)
- Protective Cover (couverture protectrice : sol) ;
- Infiltration Conditions (conditions d'infiltration) ;
- Karst network développement (développement du réseau karstique). (BRGM,2002)

- **RISKE :**

Cette méthode s'inspire de la méthode suisse EPIK en raison de sa spécificité karstique. RISKE est un acronyme qui reprend les initiales des 5 critères pris en compte : Roche aquifère, Infiltration, Sol, Karstification, Epikarst. (Petelet-Girud et al ,2000 ;in BRGM ,2002)

- **Méthode DRASTIC modifiée**

Cette méthode, exposée dans les travaux de M. SINAN M. (École Hassania des Travaux Publics –Maroc, 2000), se base sur les paramètres DRASTIC, relatifs uniquement à la zone non saturée de l'aquifère.( Haddouche,2011)

Les paramètres utilisés par la méthode DRASTIC modifiée sont:

- - D : Profondeur de la nappe ;
- - R : Recharge de la nappe ;
- - S : Nature du Sol;
- - T : Topographie;
- - I : Impact de la zone non saturée.

Enfin, certaines méthodes ont été développées par des organismes pour une utilisation spécifique à leur pays, province ou Etat comme la méthode **GALDIT**. Elle a été développée pour la première fois lors du projet "EU- India INCO-DEV COASTIN" (Michaud et al. 2003in saidi 2011) et dont l'objectif était de déterminer la vulnérabilité des aquifères côtiers à l'intrusion marine (Chachadi et Labo-Ferreira, 2005in Saidi, 2011).

En terme de méthode de cartographie à index, la méthode de **GALDIT** est la seule méthode dédiée à la vulnérabilité des aquifères côtiers.

### **2.3.2.5 Méthodes statistiques :**

représentent la dernière catégorie des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité, utilisées ces dernières années à travers le monde. De plus les études statistiques sont utilisées pour tester les autres méthodes telles que le krigeage, utilisé souvent dans la description des paramètres qualitatifs de l'eau.

Cette dernière est utilisée pour tester les méthodes paramétriques telles que DRASTIC, utilisant un grand nombre de paramètres. Elle a été introduite pour la première fois par (Lodwick et al. 1990 in Djoudar, 2014). Bon nombre d'auteurs se sont intéressés à ce type d'étude dans différentes régions du monde. Ce test consiste à supprimer, du calcul de l'indice de vulnérabilité, à chaque fois un paramètre et voir l'influence de cette suppression sur le résultat obtenu. Le degré de variation ou perturbation induit par cette suppression est évalué par la formule suivante :

$$S = ((V/N - V' / n) / V) * 100 \dots \dots \dots (2.2)$$

- V : représente l'indice de vulnérabilité non perturbé,
- V' : la valeur de vulnérabilité perturbée par la suppression d'un ou plusieurs paramètres,
- N, n : nombre de paramètres respectivement avant et après la suppression. (Djoudar, 2014)

**Conclusion :**

La pollution constitue un risque permanent pour les ressources en eaux souterraines. Elle peut dégrader leur qualité. 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.

Plusieurs méthodes ont été développées pour l'évaluation de la vulnérabilité des aquifères pour mieux estimer la vulnérabilité des eaux souterraine, Il s'agit des méthodes DRASTIC, GOD, SINTACS, EPIK, GALDIT...etc



# Chapitre 3 La vulnérabilité des aquifères côtiers par rapport à l'intrusion saline.



## **Introduction :**

Le phénomène d'invasion marine pourrait présenter une origine majeure des fortes salinités des eaux souterraines dans les régions côtières qui sont des réservoirs stratégiques où ces dernières constituent la source principale d'approvisionnement en eau. Sous certaines conditions, l'eau salée se propage à l'intérieur des terres et contamine les eaux de la nappe côtière.

Ce risque s'accroît en raison de l'accroissement de la fréquence et de l'intensité des périodes de sécheresses, mais aussi en réponse à l'augmentation importante de la population vivant en zone côtière. Il deviendra encore plus important lors de la remontée du niveau de la mer corrélative du changement climatique.

### **3.1. La vulnérabilité des aquifères côtiers à l'intrusion saline :**

L'analyse de la vulnérabilité d'un aquifère par rapport à l'intrusion marine est un cas particulier à la fois de la vulnérabilité spécifique et la vulnérabilité intrinsèque d'une certaine manière. Des critères de salinisation doivent être pris en compte en des critères relatifs à la vulnérabilité intrinsèque. Dans ce sens il s'agit d'une vulnérabilité spécifiques. (BRGM,2011)

L'intrusion saline des aquifères par les eaux de mer constitue l'un des mécanismes de salinisation les plus répandus, qui impacte la qualité des eaux souterraines des aquifères côtiers partout dans le monde (Custodio, 2010 ,in Travers et al ,2014)

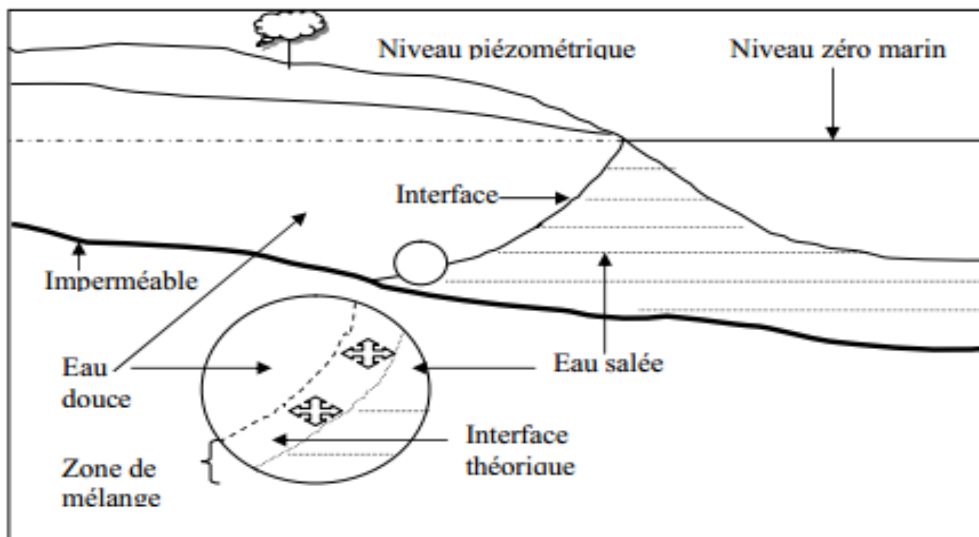
Suivant les concepts de base présenté par LOBO-FERREIRA et CABRAL (1991), la vulnérabilité des eaux souterraines à une intrusion saline est défini comme :

“La sensibilité de la qualité des eaux souterraines à un pompage imposé des eaux souterraines, ou à la montée du niveau de la mer, ou bien aux deux dans la zone côtière, est déterminée par les caractéristiques intrinsèques de la nappe aquifère.” (Niazi ,2007)

L'eau souterraine douce contenue dans un aquifère s'écoule vers le rivage et sa progression est limitée par la présence de l'eau marine salée. Le contact entre les eaux est marqué par une interface eau douce/eau salée. L'eau de mer pénètre par le sous-sol, et par effet de contraste de densité entre l'eau douce continentale et l'eau salée (l'eau de mer contient en moyenne 30 grammes de sel par litre, et elle est donc plus dense et plus lourde que l'eau douce). Ce phénomène est connu sous le nom d'intrusion du biseau salé. Sa position à l'intérieur des terres est imposée par la différence entre la cote

piézométrique de la nappe et le niveau moyen de la mer (0 mètre) : plus ce niveau piézométrique dans l'aquifère est bas, plus le biseau salé progresse à l'intérieur des terres. La zone de transition entre l'eau douce et l'eau salée est d'une épaisseur ne dépassant pas quelques mètres (Ledoux, 1986, in Niazi, 2007)

La nappe d'eau douce se recharge par la surface du sol par infiltration efficace de l'eau de pluie (Pour évaluer la quantité d'eau infiltrée dans le sol, on rappelle qu'il faut soustraire la quantité d'eau évapotranspirée à la quantité des précipitations). Lorsqu'il pleut beaucoup (période des hautes eaux) l'interface eau douce-eau salée est repoussée vers la mer alors que cette interface se déplace vers le continent en période sèche (période des basses eaux). On comprend donc bien qu'elle se déplace au fil des saisons en quelques mètres. (Bouderbala, 2015)

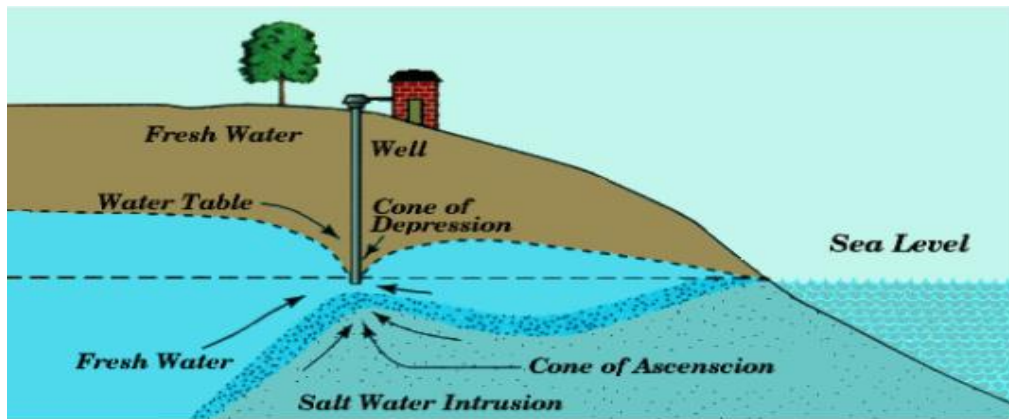


**Figure 3.1 :** Représentation schématique de l'interface « eau douce-eau salée »

(Haddani, 2010)

Toute exploitation intense de la nappe côtière par creusements anarchiques des puits, va entraîner un déséquilibre hydrodynamique de l'interface «eau douce-eau salée marine». Cela se traduit par une diminution des débits souterrains et un abaissement du niveau de la nappe. Celui-ci va devenir inférieur à celui de la mer, ce qui va provoquer un écoulement des eaux marines vers l'aquifère côtier. (Haddani, 2010)

Lors de l'exploitation d'un forage dans un aquifère côtier, un cône de rabattement se forme au droit du forage au niveau de la surface de la nappe, qui modifie l'interface entre l'eau douce et l'eau salée. Selon le principe de **Ghyben-Herzberg**, un rabattement d'un mètre provoqué par un pompage entraîne une remontée de l'eau salée de quarante mètres



**Figure 3.2.** Impact d'un pompage sur l'interface eau douce/eau salée selon le principe de Ghyben-Herzberg 1901

### 3.2- Facteurs déterminants dans l'évolution de l'intrusion marine

La forme et l'épaisseur de cette interface ainsi que de son étalement vers les terres, dépendent de plusieurs facteurs (hydrodynamiques, géométriques, exploitation et débit de la nappe,...).

#### a) Profondeur de la nappe

Généralement, les nappes d'eaux souterraines dans les zones côtières circulent à des profondeurs généralement faibles, et qui diminuent au fur et à mesure qu'on se rapproche de la cote marine. Ce qui fait de ces secteurs, des zones considérées à priori comme les plus vulnérables au phénomène de l'intrusion marine.

#### b) Débit de la nappe

Avec les activités agricoles et les investissements réalisés dans les régions côtières, la demande en eau pour l'irrigation et pour l'alimentation augmente. Toute exploitation intense de la nappe côtière par creusements anarchiques des puits, va entraîner un déséquilibre hydrodynamique de l'interface «eau douce-eau salée marine». Cela se traduit par une diminution des débits souterrains et un abaissement du niveau de la nappe. Celui-ci va devenir inférieur à celui de la mer, ce qui va provoquer un écoulement des eaux marines vers l'aquifère côtier.

Ainsi, les aspects liés à l'exploitation d'un aquifère en zone côtière peuvent être énumérés comme suite (Younsi, 2001, in Haddani, 2010) : baisse du niveau de la nappe, pénétration du biseau salée vers les terres, salinisation des eaux de la nappe



côtière à cause de cette pénétration (principalement dans les deux premiers kilomètres du rivage), abandon des puits à cause des fortes salinités des eaux,...

Par ailleurs, les nappes d'eau souterraine côtières sont alimentées principalement par l'infiltration et la percolation des eaux de pluies efficaces. Le taux d'infiltration efficace conditionne l'évolution piézométrique et par conséquent l'évolution de la qualité des eaux souterraines. En effet, une importante infiltration efficace va favoriser une surélévation du niveau de la nappe et une augmentation de son débit, ce qui va permettre de chasser le biseau basé et empêcher son avancée vers le continent.

### c) Perméabilité

L'intensité de la pollution des eaux souterraines (transport, vitesse de propagation des solutés,...) dépend essentiellement de la perméabilité des terrains aquifères. Dans les terrains à perméabilité d'interstice tels que les sables, la pollution ne se transmet qu'à une très faible vitesse, surtout s'il y a des particules argileuses. Dans les terrains à perméabilité de fissures (terrains cristallins et carbonatés), la vitesse de propagation des solutés est relativement plus rapide, elle est proportionnelle au degré de fissuration. Par contre, dans les terrains karstiques, la pénétration est rapide et souvent instantanée, la filtration est quasiment nulle. (Haddani, 2010)

### d) Géométrie de l'aquifère et topographie du substratum

L'étalement du biseau salé à l'intérieur de la plaine côtière est régi par la topographie du substratum. En règle générale, plus ce dernier est incliné vers la mer, plus il y aurait une avancée rapide des eaux de mer vers l'aquifère côtier.

### e. Conclusion

Pour expliquer l'apport de chacun des paramètres déterminants dans le phénomène d'intrusion marine vers les aquifères côtiers, ainsi que leur sensibilité les uns par rapport aux autres, nous pouvons les classer depuis le paramètre le plus sensible jusqu'à celui à faible variance, comme suit :

- la fréquence et l'intensité des pompages dans la nappe ainsi que son débit ;
- la pluie efficace qui représente une source d'alimentation importante des nappes côtières et qui a des effets très bénéfiques sur celles-ci. Elle engendre une dilution des eaux et une augmentation des débits souterrains ;

- la géométrie de l'aquifère : la côte du substratum par rapport au zéro marin ;
- la distance du puits par rapport à la mer ;
- la nature des sols et la perméabilité de la zone non saturée. (Haddani,2010)

### 3.3.Critères de distinction des intrusions de l'eau de mer

La distinction des différents mécanismes de salinisation est cruciale pour l'évaluation de l'origine, des chemins, des taux desalination et la quantification des évolutions dans les prochaines décennies des nappes aquifères côtières. La distinction entre une récente et ancienne intrusionde l'eau de mer prise au piège à l'intérieur ou au-dessous des nappes aquifères a des applications pratiques au niveau de la modélisation et de la gestion des ressources en eau.

L'interprétation des processus de salinisation est basée sur des critères géologiques et hydrochimiques. Plusieurs critères géochimiques peuvent être suggérés pour identifier l'origine de la salinité, surtout la détection de l'intrusion de l'eau de mer par opposition à d'autres sources de salinité dans les nappes aquifères côtières.

#### 3.3.1. L'évolution conjointe de la piézométrie et de la salinité

Dans les nappes aquifères côtiers où les surexploitations continues causent une baisse du niveau piézométrique, l'intrusion de l'eau de mer est engendrée par cette baisse et, par conséquent, on assiste à une augmentation de la salinité. Donc le suivi temporel des séries des concentrations en résidu sec ou en chlorure conjointement avec le niveau piézométrique, peut montrer l'évolution relativement rapide du processus de la salinisation. (Ben Hamouda,2008)

#### 3.3.2 Conductivité électrique, résistivité électrique et salinité

Les mesures les plus simples à réaliser et les plus couramment utilisées les mesures de conductivité électrique (sur site) et les analyses (généralement au laboratoire) de concentration en chlorures.

La conductivité électrique traduit la minéralisation d'une eau et par conséquent, renseigne sur la salinité et permet d'apprécier sa qualité. En effet, les sels dissous sont ionisés et contribuent à la minéralisation des eaux (Bermond et Perrodon, 1979,in Kaid Rasso,2009)

### 3.3.3 Ratios molaires entre substances chimiques :

Différents ratios molaires sont utilisés, en vue de leur comparaison avec la composition de l'eau de mer.

Parmi les ratios fréquemment utilisés, on peut citer les ratios calcium/magnésium, bicarbonate/chlorure ou sodium/chlorure. (S.Traverse et al ,2014)

- **Le rapport Na/Cl**

L'augmentation de la salinité peut avoir comme origine un apport d'embruns marins soit par la pluie soit par le vent et surtout un retour des excès des eaux d'irrigation qui vont lessiver les sels accumulés dans les sols.

Les rapports Na/Cl provenant de l'eau ayant subi une intrusion d'eau de mer sont habituellement inférieures aux valeurs marines (c.-à-d.,  $<0.86$ , rapport molaire).

Par conséquent, les faibles rapports de Na/Cl, combinés avec les autres paramètres géochimiques, peuvent être un indicateur de l'intrusion marine, même, relativement, à faibles concentrations du chlorure pendant les premières étapes de la salinisation. Le faible rapport Na/Cl d'intrusion de l'eau de mer est distinguable de celui supérieur à 1: rapport Na/Cl typique des sources anthropogéniques comme les eaux usées industriel (Jones et al, 1999,in Ben Hamouda,2008)).

- **Le rapport Ca/Mg et Ca/(HCO<sub>3</sub> + SO<sub>4</sub>)**

Un des traits les plus visibles de l'intrusion de mer est communément l'enrichissement en Ca par rapport à sa concentration dans l'eau de mer. Les rapports élevés de Ca/Mg et Ca/(HCO<sub>3</sub>+ SO<sub>4</sub>) ( $> 1$ ) .(Jones et al, 1999,in Ben Hamouda,2008)

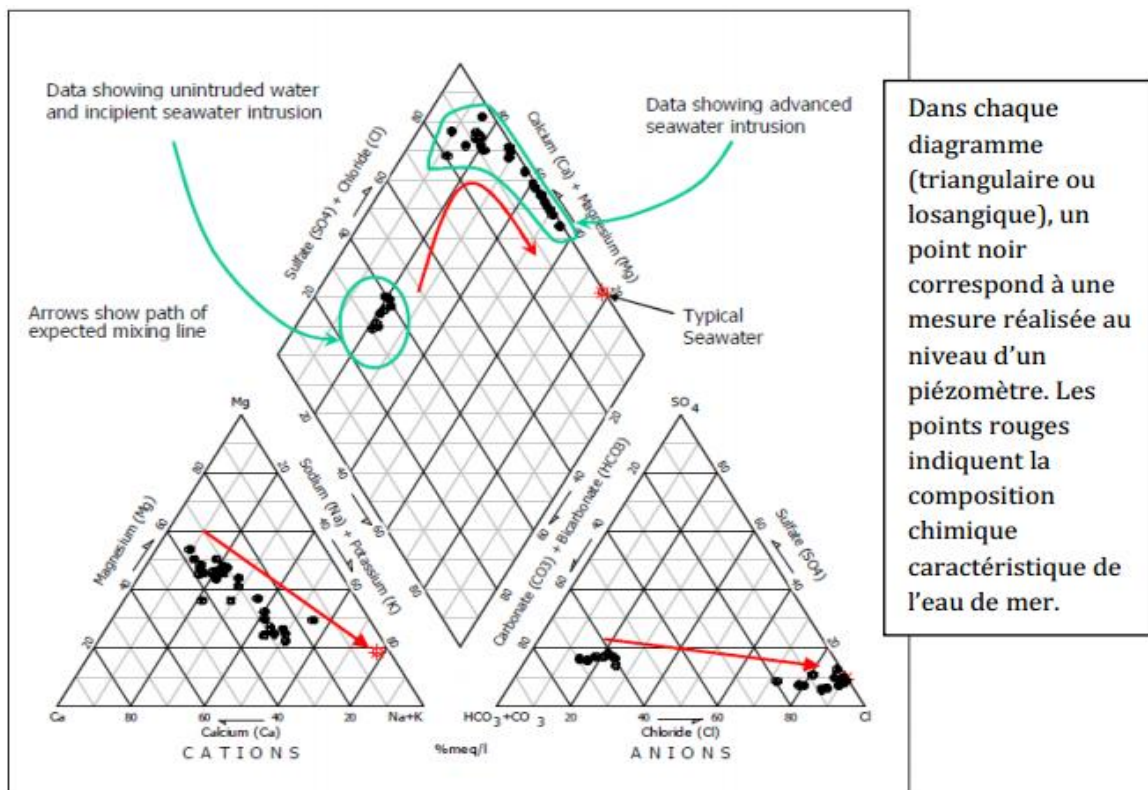
### 3.3.4 Diagrammes

- **Diagramme de Piper**

Le diagramme de Piper est une composante graphique qui permet de visualiser, quantitativement et qualitativement, la composition chimique des eaux. Le procédé consiste à porter les concentrations sur deux triangles équilatéraux (triangle des anions et triangle des cations) puis à projeter les points représentatifs des échantillons dans

un diagramme sous forme de losange (Kaid Rasso,2009) qui rassemble la somme des cations monovalents (Na + K), celle des cations bivalents (Ca+Mg) et les bicarbonates plus les carbonates (HCO<sub>3</sub> + CO<sub>3</sub>) et (Cl + SO<sub>4</sub>+ NO<sub>3</sub>)et qui donne les compositions totales en éléments majeurs et les faciès chimique des eaux.

Le diagramme de Piper peut être utile pour indiquer une intrusion saline lorsque la chimie de l'eau sur le diagramme losangique suit la direction de courbure de la flèche rouge (Figure3.3) et plus particulièrement lorsqu'il atteint le point rouge, caractéristique de la composition chimique de l'eau de mer. (Hanson, 2003,in S.Traverse et al ,2014)



**Figure 3.3** Exemple de diagramme de piper pour une etude dans la PajroValley (Californie)

(Kloppmann W.et al, 2011,in S.Traverse et al ,2014)

### 3.3.5 Eléments traces et indicateurs isotopiques

Dans certaines études, des éléments traces ou des isotopes sont utilisés pour déterminer l'origine de la salinité :

- les éléments traces (Br, B, F, Sr, Rb, As, Li...) permettent de mieux différencier les saumures (primaires et secondaires), l'eau de mer, ou un



mélange eau de mer / eau de nappe. Ces éléments traces sont souvent interprétés sous forme de rapports X/Cl ou dans des diagrammes binaires en fonction de Cl ou encore X/Cl en fonction de Cl ; de nombreux isotopes comme les isotopes stables de l'eau  $\delta^{18}O$  et  $\delta^2H$ , du soufre ou de l'oxygène des sulfates, du Strontium sont utilisés dans l'analyse de l'origine de la salinité. (S.Traverse et al ,2014)

### **Conclusion :**

La salinisation des eaux est l'une des problématiques les plus importantes en termes de dégradation des eaux souterraines, et une des conséquences de l'intrusion marine dont la caractérisation nécessite une étude bien approfondie.

La méthode hydrogéochimique se base sur des paramètres dont certains sont facilement mesurables sur le terrain alors que d'autres nécessitent des mesures en laboratoire. Avec l'ensemble de ces analyses, il est possible de faire une caractérisation spatiale et temporelle du phénomène de salinisation dans une zone d'étude.

Chapitre 4 :Etude et application de la méthode de vulnérabilité GAL

**Chapitre 4 :Etude et application de la méthode de vulnérabilité GALDIT**

## Introduction :

La prévention contre l'intrusion marine des nappes côtières constitue une étape importante à laquelle les scientifiques consentent de plus en plus d'effort, notamment en étudiant la vulnérabilité et le risque de l'intrusion marine. Plusieurs méthodes de caractérisation de la vulnérabilité des nappes sont citées dans la littérature internationale. L'objet de ce chapitre est l'évaluation de la vulnérabilité de la nappe du massif dunaire de Boutheldja en utilisant les résultats de la méthode GALDIT. La méthode se présente sous forme de systèmes de notation numérique, basés sur la considération des différents facteurs influençant le système hydrogéologique. Cette méthode affecte une note et un poids propre à chaque paramètre utilisé. Les prélèvements ont été effectués sur les eaux de quelques forages inventoriés dans le massif.

### 4.1 Présentation de la méthode de GALDIT :

Elle a été initialement développée par (Chachadi et Labo – Ferreira, 2001) dans le cadre du projet Euro – indien coastin (programme Inco-DEV du 4<sup>ème</sup> PCRD). La méthode a été notamment appliquée dans les régions côtières de Goa en Inde et d'Algarve au Portugal (Labo – Ferreira et al. 2005).

GALDIT est une approche de cartographie à index simple d'utilisation, elle nécessite peu de données. La détermination de l'indice de vulnérabilité des eaux souterraines par rapport à l'intrusion saline est fondée sur la combinaison de six paramètres pouvant influencer l'intrusion marine potentielle (al Karkouri et al, 2014).

.En effet, GALDIT tire son nom de ces six paramètres :

- **[G]** Type d'aquifère (**G**roundwater occurrence)
- **[A]** La conductivité hydraulique de la couche aquifère (Perméabilité de la zone saturée) (**A**quifer hydraulic conductivity)
- **[L]** La Profondeur de la nappe en dessous du niveau de la mer (Depth to ground water Level above sea)
- **[D]** Distance du rivage (**D**istance from shore)
- **[I]** l'impact de l'intrusion d'eau de mer (**I**mpact of existing status of seawater intrusion in the area)
- **[T]** L'épaisseur de la couche aquifère (**T**hickness of the aquifer)

L'impact de chacun des six paramètres cités de l'intrusion de l'eau de mer a été décrit comme suit :

- **Type de l'aquifère :**

Dans la nature, les eaux souterraines se produisent généralement dans des couches géologiques, et celles-ci peuvent être confinées (captives), semi confinées (semi captives) ou non confinées (libre). Ainsi, la vulnérabilité à l'intrusion marine dépend du type d'aquifère (Niazi.S, ;2007). Naturellement l'aquifère libre est exposé plus à l'intrusion marine à cause de l'absence de toit imperméable comparé à l'aquifère confiné et semi confiné. Mais en présence de surexploitation, le pompage excessif peut engendrer un cône de dépression et fait appel à l'eau de mer et génère donc du front salé. Ceci se voit plus nettement au niveau de l'aquifère confiné que pour les autres types d'aquifères. Donc, la note la plus élevée est attribuée à l'aquifère confiné. Pour ces raisons, il faut voir l'état de confinement de tout d'aquifère avant d'attribuer les différentes notes pour le paramètre en question. (SAIDI. S, 2011)

- **La conductivité hydraulique de l'aquifère (A)**

Elle exprime la facilité du matériel aquifère à laisser s'écouler l'eau. C'est le résultat de la communication des pores (porosité efficace) dans les sédiments. Le mouvement de l'eau de mer vers la terre est influencé par la conductivité hydraulique (Niazi.S, ;2007): Ainsi, il est aussi nécessaire de prendre en considération la présence des couches d'argile ou des digues présentes parallèlement à la côte agirait comme un mur à l'intrusion de l'eau de mer. La conductivité hydraulique est (en m/j). (Dorfliger N et al, 2011).

La conductivité hydraulique est, d'une part, proportionnelle à la perméabilité intrinsèque  $k$  du sol qui est elle-même fonction de la porosité du sol et d'autre part, inversement proportionnelle à la viscosité dynamique du fluide (l'eau)<sup>2</sup>

**Profondeur du plan d'eau (Depth of groundwater Level above sea) :**

C'est la profondeur du plan d'eau par rapport au zéro de la mer. C'est un facteur déterminant dans l'évaluation de l'intrusion marine puisqu'il détermine la pression hydraulique capable de pousser le front salé ( SAIDI S,2011) .Tel que défini par l'équation de Ghyben –Herzebeg , pour chaque mètre d'eau douce stockée au dessus du

niveau de la mer ce sont 40 mètres d'eau douce qui sont présents sous l'interface eau douce eau salée ainsi définie .( Traverse .S et al,2014)

Dans l'attribution des notes pour le paramètre « L »de GALDIT, il faut considérer la variation du niveau du plan d'eau (pour une longue période). Généralement, on considère surtout les valeurs du plan d'eau les plus faibles du fait qu'elles fournissent une vulnérabilité élevée.

- **Distance par rapport à la côte** (Distance from the coastline):

La distance de l'aquifère par rapport à la mer est aussi un critère important de la vulnérabilité en général l'impact de l'intrusion saline décroît en s'éloignant de la côte . ».( SAIDI,2011)

La distance à la côte est mesurée perpendiculairement par rapport à la côte pour des points d'eau situés au niveau d'une image géo référencée par le logiciel « ArcGis » .

**Remarque :** Il faut noter que ce paramètre doit être pris en considération avec prudence dans le cas d'aquifère Karastiques côtiers ; l'intrusion saline dépend de la présence de conduits Karastiques . Ce paramètre n'est peut être pas directement transposable pour ce type d'aquifère.( Dorfliger N et al ,2011)

- **Impact de l'état de l'intrusion marine existante (Impact of existing status of seawater intrusion) :**

La zone d'étude considérée peut être plus ou moins déjà affectée par une intrusion marine et l'équilibre hydraulique naturel entre l'eau douce et l'eau salée peut être déjà modifiée .Cet état doit être pris en compte lors de la cartographie de la vulnérabilité à l'intrusion marine .Dans cette méthode , Chachadi et Labo-Ferreira (2001) ont proposé d'utiliser le ratio  $Cl/(HCO_3^{-1} + CO_3^{2-})$  comme critère d'évaluation de l'intrusion marine dans l'aquifère côtier .L'ion chlorure est dominant dans l'eau de mer et peu présent dans les eaux souterraines alors que c'est l'inverse pour le bicarbonate ,si le ratio est supérieur à 2 ppm (ou milléquivalent par million ) l'intrusion est élevée et un ratio inférieur à 1 montre que l'intrusion marine est très faible .

• **L'épaisseur de la nappe phréatique (T)**

L'épaisseur saturée d'un aquifère, joue un rôle important dans la détermination de l'ampleur et de la magnitude d'intrusion saline dans les régions côtières. Il est bien établi que plus l'épaisseur de la nappe aquifère est grande, plus l'extension des apports de l'intrusion saline est importante et vice versa.

Selon (Bear et Verrujit ,1987 ;in Dorfliger N et al ,2011), les équations suivantes permettent de définir la longueur de l'extension d'un biseau salé pour un aquifère captif ou libre :

➤ Aquifère libre :  $L = K B^2 / 2q(\delta)$  pour  $L > B$  .....(4.1)

Avec K : conductivité hydraulique

B : l'épaisseur de la zone saturée de l'aquifère

$\delta = (\rho_{\text{eau douce}} / \rho_{\text{eau de mer}} - \rho_{\text{eau douce}}) = 4$  avec  $\rho_{\text{eau}}$  : la densité de l'eau )

➤ Aquifère captif :  $q = [KB^2 / 2L][(1 + \delta) / \delta^2] - WL / 2$ . .....(4.2)

Avec W : est la recharge naturelle de l'aquifère.

L'intrusion est prédominante au cours des périodes où la recharge est nulle .Ainsi lorsque  $W=0$  ; il est possible de décrire l'équation comme suit :

:  $q = [KB^2 / 2L][(1 + \delta) / \delta^2]$  ou  $L = K B^2 / q^2 * 0.0257$ . .....(4.3)

Considérant des valeurs identiques de K et B dans les 2 équations, les longueurs calculées sont pratiquement identiques.

Ainsi plus l'épaisseur de l'aquifère est importante, plus l'extension de l'intrusion marine l'est.

## 4.2 Méthodologie d'évaluation de la vulnérabilité

- ❖ Le principe d'attribution de la classe de vulnérabilité repose sur trois composantes :

**Pondération** : un poids est attribué à chacun des six paramètres pris en considération, en fonction de son importance relative à l'intrusion marine. Un poids allant de 1 (influence faible ou moindre) à 4 (grande influence) est proposé par les concepteurs.

**Notation (ou rang)** : une valeur de 1 à 10 est attribuée à chaque paramètre en fonction des attribues (plus la valeur est importante plus la vulnérabilité est grande) par exemple les valeurs attribuées sont obtenues à partir de tables de correspondance entre les caractéristiques hydrogéologiques locales et la valeur du paramètre.

**Classification** : la classification des aquifères côtiers par rapport à l'intrusion marine est déterminée par un indice de vulnérabilité final correspondant à la somme pondérée et normée des notes de rang attribuées aux six paramètres selon la formule suivante

$$\text{Indice GALDIT} = \frac{\sum_{i=1}^6 P_i R_i}{\sum_{i=1}^6 P_i} \dots \dots \dots (4.4)$$

Ou ;  $P_i$  est le poids à accorder (1 à 4) à chaque paramètre  $i$ .

$R_i$  : est le rang ou la notation accordée à chaque paramètre (2.5 à 10) .(Dorfliger N et al ,2011)

**Tableau 4.1:** Tableau de synthèses des poids et rangs de la méthode de GALDIT (Chachadi, 2005 in Saliha Najib et al ,2012)

Paramètre	Poids	Rangs			
		Très faible 2.5	Faible 5	Moyen 7.5	Elevé 10
Type d'aquifère	<b>1</b>	Contraint, barrière imperméable ou recharge // à la côte	Semi captif	Libre	Captif
Conductivité hydraulique (m/j)	<b>3</b>	<5	5-10	10-40	>40
Profondeur de plan d'eau (m)	<b>4</b>	>2	1.5-2	1-1.5	<1
Distance par rapport à la côte (m)	<b>4</b>	>1000	750-1000	500-750	<500
L'impact de l'état de l'intrusion saline	<b>1</b>	<1	1-1.5	1.5-2	>2
Epaisseur de la nappe	<b>2</b>	<5	5-7.5	7.5-10	>10

LA multiplication des paramètres permet de définir l'indice de GALDIT (IG) selon l'expression suivante :

$$IG = (1*G) + (3*A) + (4*L) + (4*D) + (1*I) + (2*T).....(4.5)$$



Cette équation ainsi que les valeurs des différents paramètres pris en considération sont intégrés dans un SIG (système d'information géographique) qui permet de spatialiser les différentes informations sous forme de couches (al Karkouri et al, 2014). La superposition des couches à l'aide du SIG (dans notre étude on a utilisé ARCGIS 10.4) ; permet de produire une carte de la vulnérabilité à l'intrusion marine.

Pour raisons de lisibilité de la carte les résultats sont classés selon les 3 classes principales proposées par (Chachadi et al, 2005). Une fois que l'indice GALDIT est obtenu ; il est possible d'identifier les zones qui sont susceptibles d'être affectées par une intrusion marine potentielle (tableau 4.2)

**Tableau 4.2 :** Classes de vulnérabilité GALDIT (Chachadi, 2005 in Saliha Najib et al, 2012)

Classe de vulnérabilité	Indice GALDIT
Vulnérabilité forte	>7.5
Vulnérabilité moyenne	5-7.5
Vulnérabilité faible	<5

#### 4.2- L'application de la méthode GALDIT au massif dunaire de Boutheldja :

##### 4.2.1 Paramètre (G) (type d'aquifère) :

L'aquifère peut être confiné, semi confiné ou libre. Ainsi, la vulnérabilité à l'intrusion marine dépend du type d'aquifère. Dans ce cas, l'aquifère est dans sa totalité libre, de ce fait le paramètre (G) GALDIT, représenté sur la figure 4.1 est estimé à 7.5.

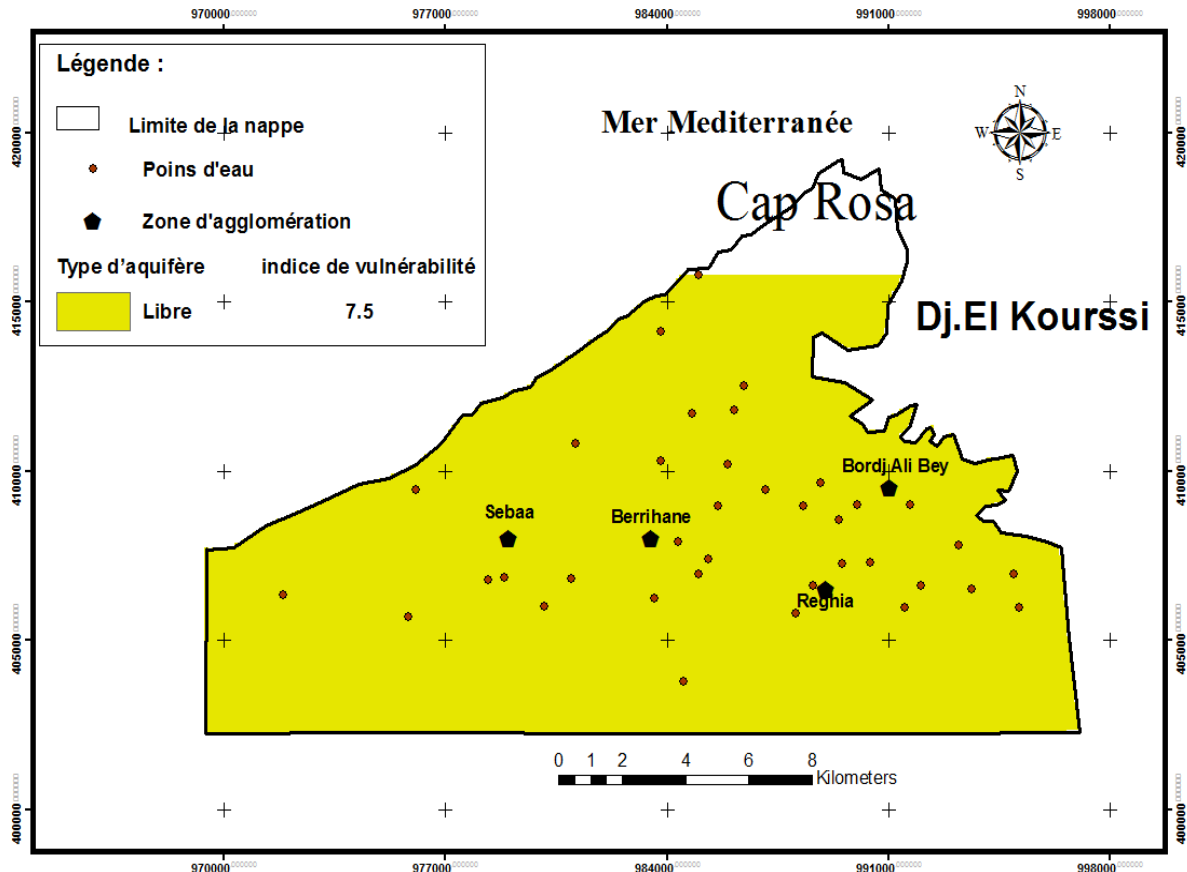
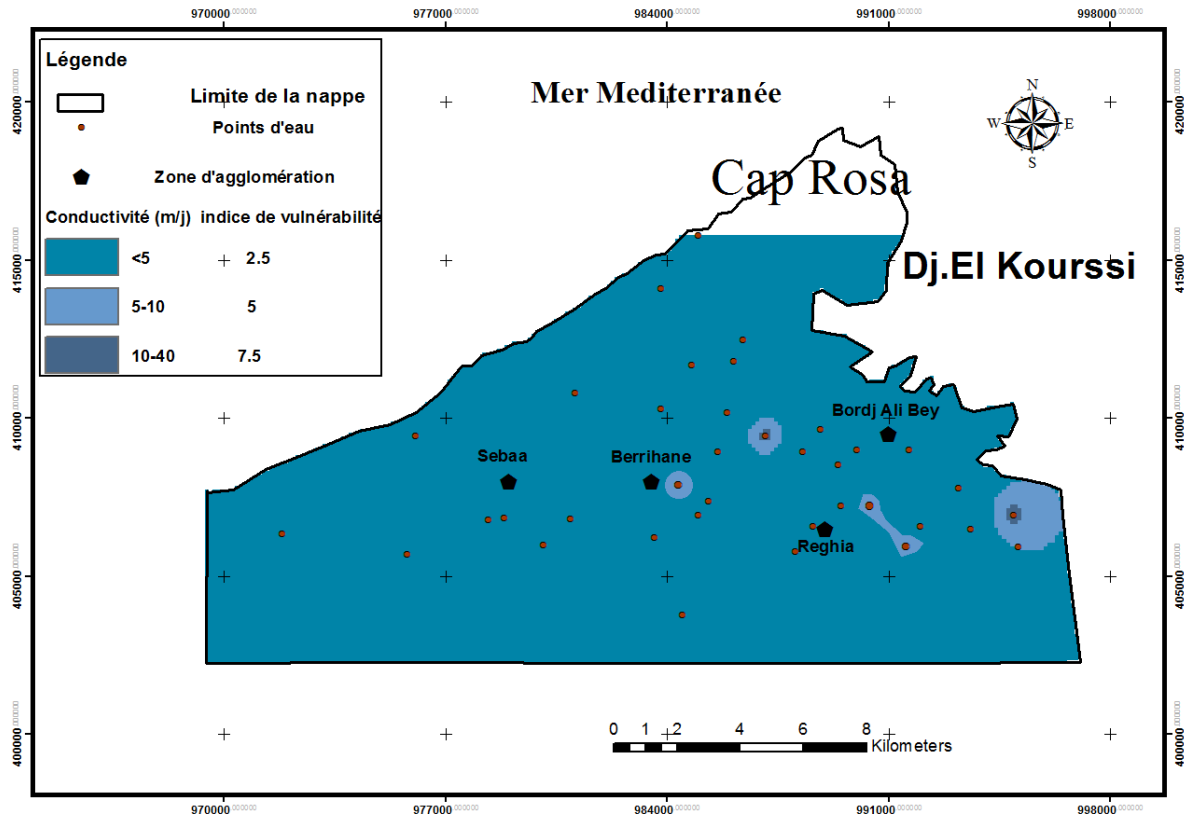


Figure 4.1 Type d’aquifère du massif dunaire de Boutheldja

4.2.2. Conductivité hydraulique ou « Aquifer conductivity » (A) :

La carte de conductivité hydraulique a été établie par interpolation des données de conductivité du massif dunaire de Boutheldja (Annexe 2). Les valeurs de conductivité varieraient de 0,03 à 30.24 m/jour. La conductivité hydraulique de l’aquifère est faible dans la majeure partie de l’aquifère (< 5m/j) ce qui correspond à la classe très faible et à un rang égale à 2.5 pour la quasi-totalité de l’aquifère. Aussi un rang faible égale à 5 est attribué à des zones dont la conductivité varie entre (5-10 m/j), ce degré de vulnérabilité moyenne s’étend sur une très faible superficie 1 à 2% seulement de la superficie totale, elle se situe au sud de Bordj Ali Bey, et à l’ouest de Bordj Ali Bey et au nord Est de Berrihane et à l’extrême Est du côté de djebel El Kourssi. La superficie restante et englobant la précédente, un rang de l’ordre de 7.5 lui a été attribué pour une conductivité variant entre (10-40 m/j), donc vulnérabilité moyenne à forte selon la classification GALDIT (Figure 4.2).



**Figure 4.2:** Conductivité hydraulique de l'aquifère du massif dunaire de Boutheldja selon la méthode GALDIT.

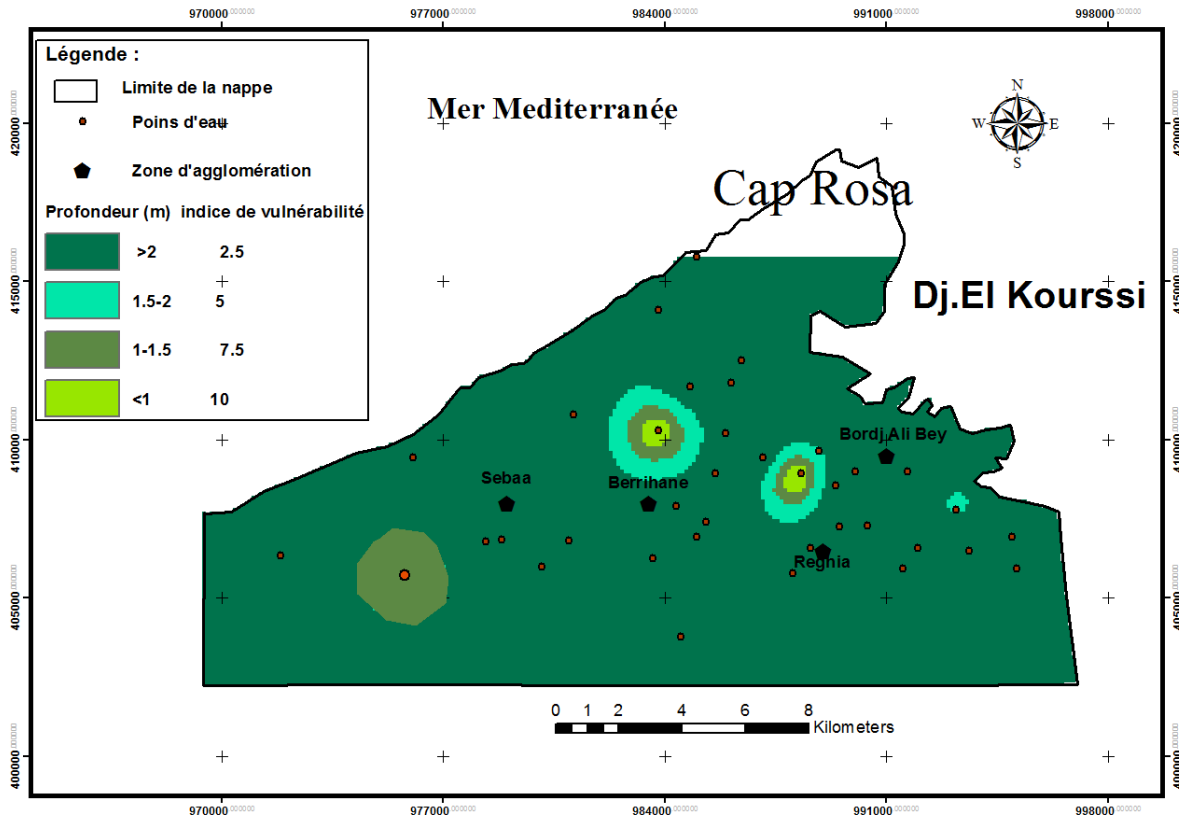
#### 4.2.3. Profondeur du plan d'eau ou « Aquifer Level» (L) :

Ce facteur détermine la pression hydraulique capable de pousser le front salé. Les profondeurs du plan d'eau de l'aquifère de Boutheldja varieraient de 0.54 à 40 m (voir annexe 2).

La carte obtenue comporte les 4 classes suivantes :

- Une classe de vulnérabilité très faible avec des profondeurs élevées supérieur à 2 m (entre 2 et 40 m) dans la majeure partie de l'aquifère ce qui correspond à un rang égal à 2.5.
- Une classe de faible vulnérabilité avec des profondeurs variant de 1.5 à 2 m ce qui correspond à un rang égal 5. Notons que cette classe de vulnérabilité occupe une faible superficie, au Nord de Berrihane, et à l'ouest de Bordj Ali Bey.
- Une classe moyenne avec des profondeurs variant de 1 à 1.5 m avec un rang égal à 7.5. Elle est incrustée dans la plage précédente au nord de Berrihane à l'ouest de Bordj Ali Bey et aussi on la retrouve au sud ouest de Sebaa.

- Une classe de forte vulnérabilité avec des profondeurs < 1 et un rang égal à 10. Elle est incrustée dans les plages précédentes au nord de Berrihane à l'ouest de Bordj Ali Bey



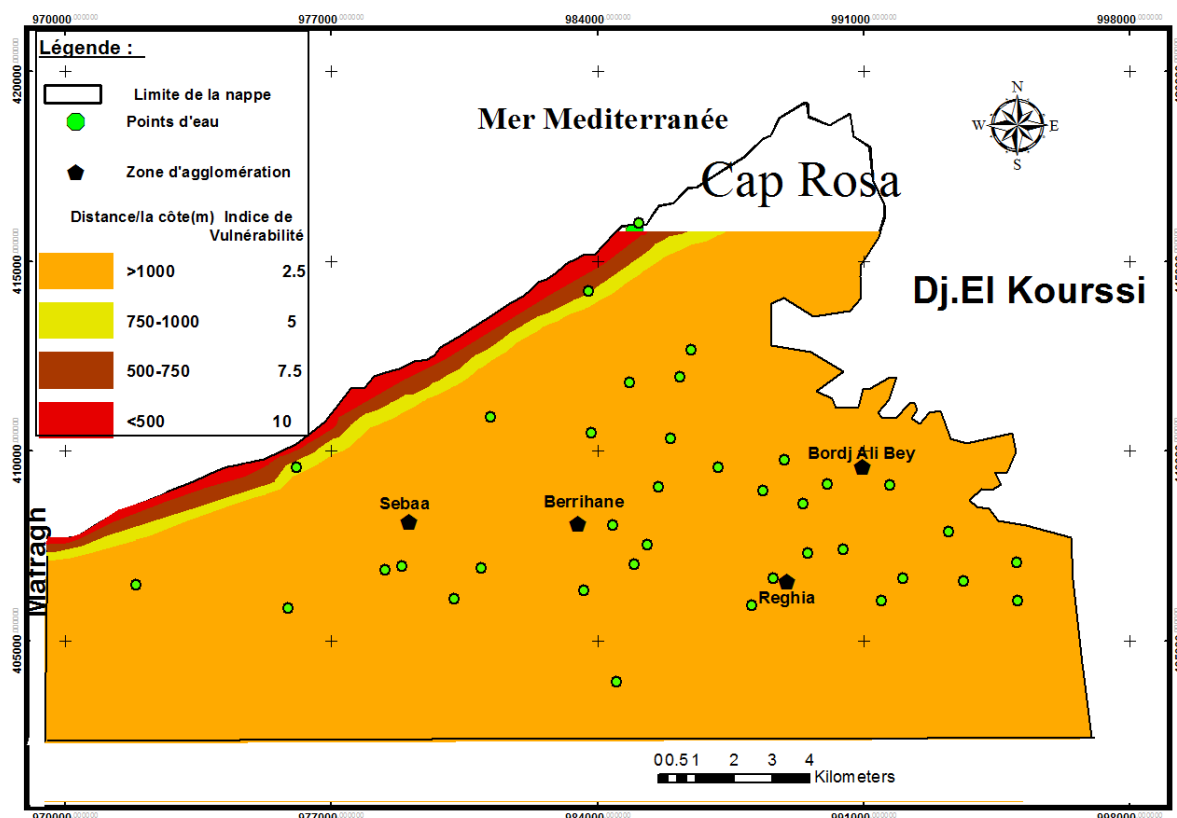
**Figure 4.3.** Carte des profondeurs du plan d'eau du massif dunaire de Boutheldja selon la méthode GALDIT.

**4.2. 4. Distance à la côte ou « Distance from the shore» :**

Les distances ont été calculées à l'aide de logiciel ARCGIS 10.4. Ce paramètre a été estimé suivant trois distances (500 m, 750 m et 1000 m) perpendiculaires à la ligne de côte.

Un rang maximal de 10 est adopté pour la distance inférieure à 500 m de la côte, alors que le minimum (2.5) est attribué pour toutes les distances supérieures à 1000 m. Les valeurs de 5 et 7.5 sont données, respectivement, aux distances de 750 à 1000 et de 500 à 750m.

La répartition du paramètre ( D ) GALDIT de l'aquifère du massif dunaire de Boutheldja est représentée sur la figure 4.4



**Figure 4.4 :** Carte de la distance du point d'eau de la nappe du massif dunaire de Boutheldja à la côte.

La carte Fig N°4.4 met en évidence quatre plages de vulnérabilité et qui sont réparties comme suit :

-une plage de faible vulnérabilité avec un rang de l'ordre de 2.5, elle occupe la majeure partie de la zone d'étude

-une plage de moyenne vulnérabilité avec un rang de 5, en parallèle avec une autre plage de forte vulnérabilité dont le rang est de l'ordre de 7.5 .Ces deux plages encadrent parallèlement au rivage, selon une direction WSW-ENE, une autre plage de très forte vulnérabilité avec un rang de l'ordre de 10.Ces trois dernières classes de vulnérabilité s'étendent suivant l'axe qui va de la Mafragh à Cap Rosa.

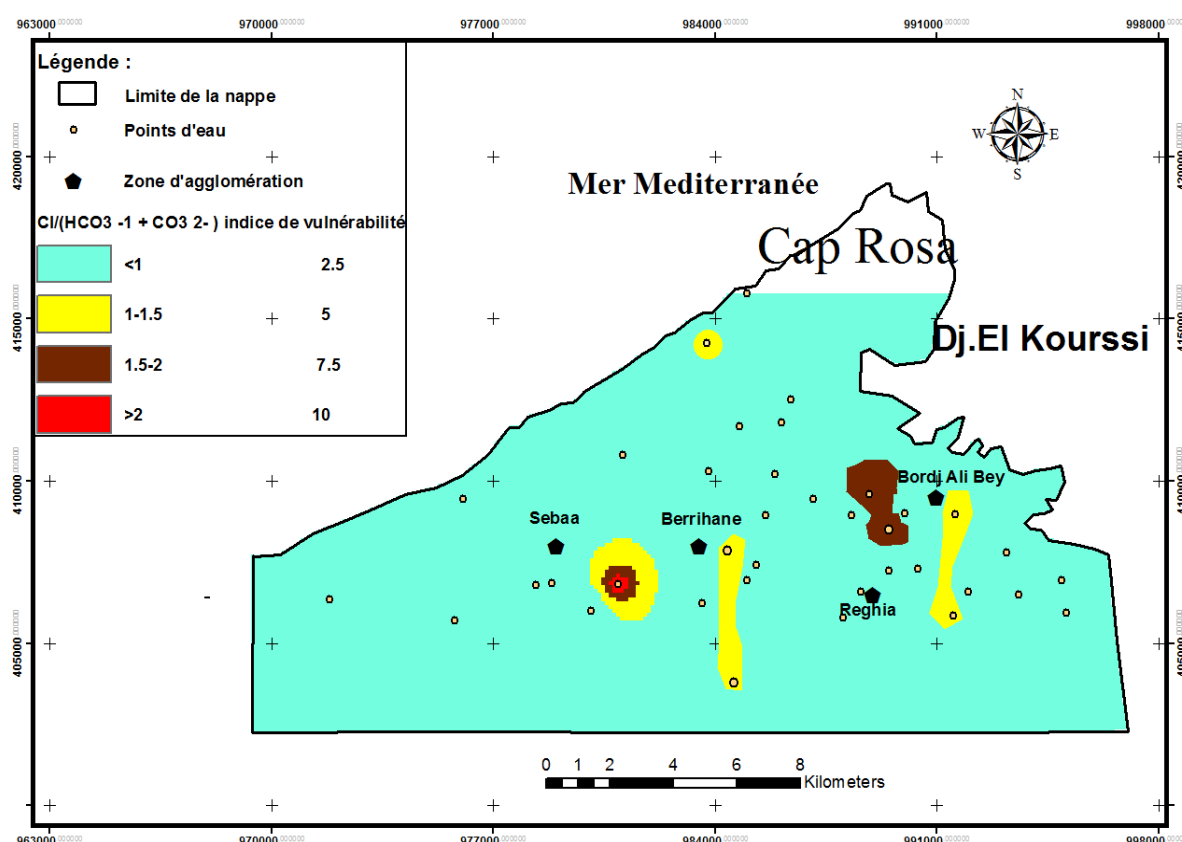
#### 4.2.5. Impact des intrusions marines existantes ou « Impact of existing intrusions » (I)

Selon la méthode GALDIT, les valeurs du rapport  $Cl/(HCO_3^{-1} + CO_3^{2-})$  de l'aquifère du massif dunaire de Boutheldja se répartissent sur quatre intervalles. A signaler

que dans le calcul de ces rapports (annexe 4.3), on a utilisé les analyses chimiques relatives de l'année 2005 (source ANRH, ANNABA).

Les valeurs du rapport  $Cl/(HCO_3^{-1} + CO_3^{2-})$  de l'aquifère sont faibles dans la majeure partie de l'aquifère ( $< 1$ ) ce qui correspond à la classe de vulnérabilité très faible et à un rang égale à 2.5 pour la quasi-totalité de l'aquifère .

Des valeurs de 5 et 7.5 sont données respectivement aux rapports de  $Cl/ (HCO_3^{3-} + CO_3^{3-})$  variant entre (1-1.5) et (1.5-2) . et un rang maximal de 10 est adopté pour un rapport plus grand que 2.

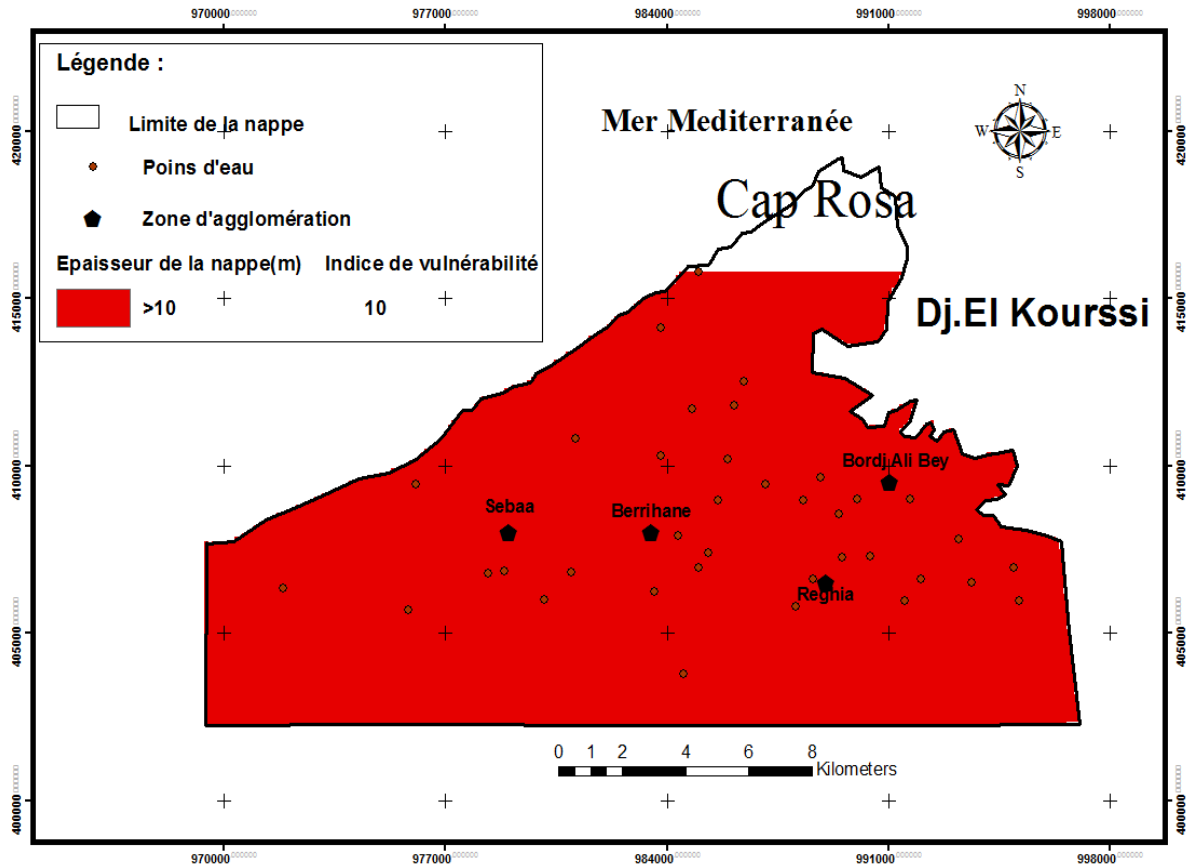


**Figure 4.5.** Carte montrant l'impact des intrusions marines existantes sur la qualité des eaux de la nappe du massif dunaire de Boutheledja par le rapport  $Cl/(HCO_3^{-1} + CO_3^{2-})$

#### 4.2.6. Épaisseur de l'aquifère ou « Aquifer Thickness » (T) :

Les valeurs de l'épaisseur saturée de l'aquifère libre du massif dunaire de Boutheledja (Voir Annexe 2) sont toutes supérieures à 10 m et plus de 78% des ouvrages montrent une épaisseur saturée comprise entre 100 et 160 m. La valeur moyenne est de l'ordre de 119 m donc on attribue le rang le plus élevé (10) pour la totalité de l'aquifère.

A signaler que dans l'établissement de la carte d'épaisseur de l'aquifère du massif dunaire de Boutheldja selon la méthode GALDIT on a utilisé les valeurs de l'épaisseur saturée de quelques forages inventoriés dans le massif (Hani BOURBIA ,2011)



**Figure 4.6 :** Représentation du paramètre (T) l'épaisseur de l'aquifère du massif dunaire de Boutheldja selon la méthode de GALDIT.

#### 4.2.7. Calcul de l'indice de vulnérabilité GALDIT :

Chacun des six paramètres sera affecté par son propre poids selon la méthode GALDIT. L'indice de vulnérabilité de l'aquifère à l'intrusion marine a été évalué par la formule (N 4.5.)

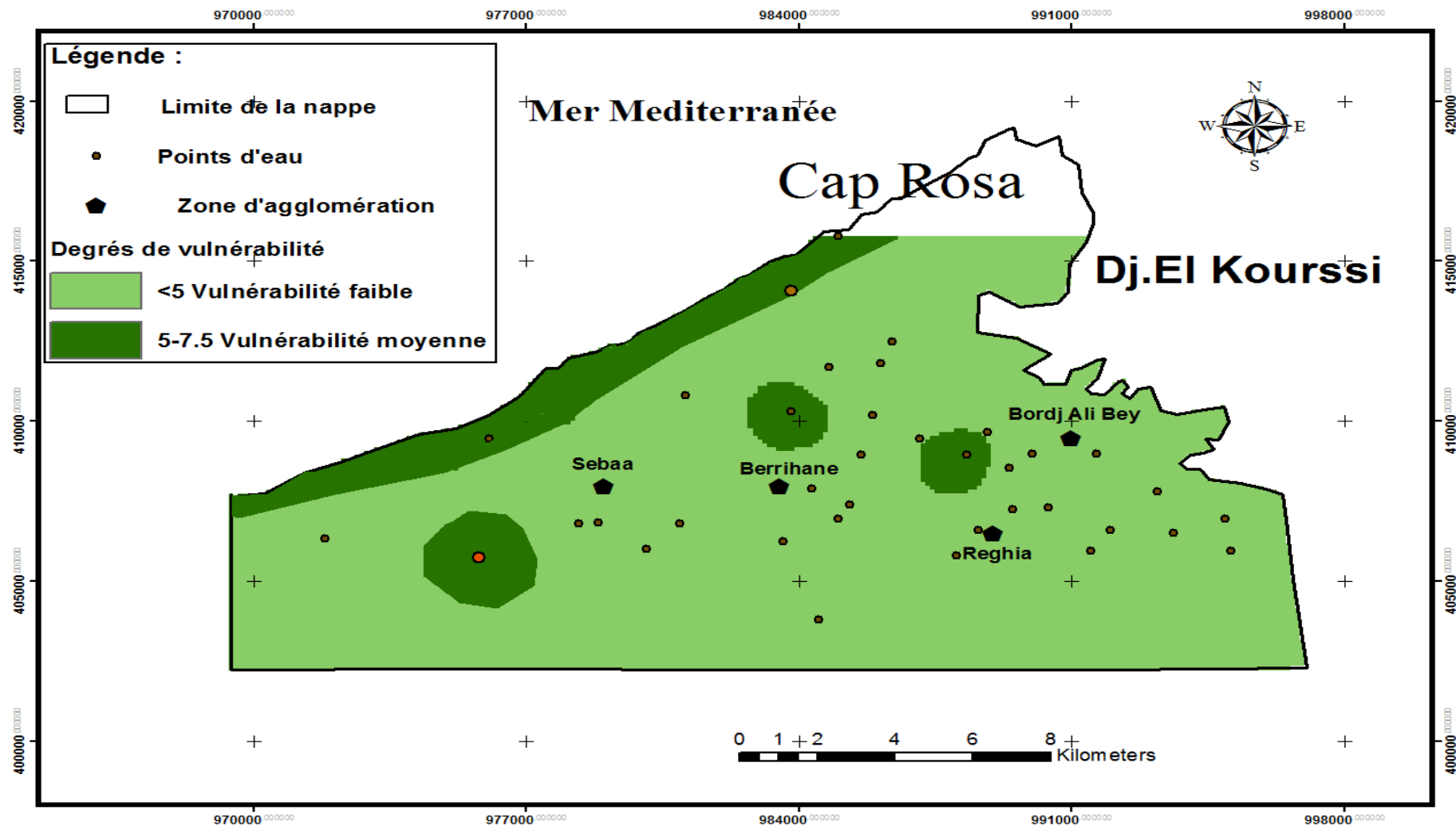
En superposant les différentes couches des paramètres définis pour l'aquifère moyennant le logiciel ARCGIS 10.4 et en calculant l'indice de vulnérabilité GALDIT, nous avons identifié les zones qui sont susceptibles d'être affectées par une intrusion marine .

En effet, la carte de vulnérabilité à l'intrusion marine de la nappe libre du massif dunaire de Boutheldja évaluée par la méthode GALDIT , montre que la zone côtière est à

**vulnérabilité moyenne.** Fort heureusement la plage de faible vulnérabilité occupe la majeure partie de la zone d'étude, notamment sur la côte .Figure 4.7

Néanmoins de petites superficies caractérisées par une vulnérabilité moyenne se localisent dans la partie centre au nord de Berrihane et au sud -ouest de Sebaa et à l'ouest de Bordj Ali Bey. Ces zones correspondent à des endroits où la profondeur du plan d'eau est très faible à faible avec une épaisseur importante de l'aquifère de type libre .





**: Figure.4.7** Carte de vulnérabilité à l'intrusion marine de la nappe libre du massif dunaire de par la méthode GALDIT.

#### **4.2.8 Conclusion :**

Dans cette étude, la carte de vulnérabilité basée à la fois sur les caractéristiques hydrogéologiques et hydrochimiques du système aquifère et moyennant la méthode paramétrique a savoir la méthode GALDIT ; apparaît comme un moyen efficace pour la mise en évidence du phénomène de l'intrusion marine de la nappes côtière du massif dunaire de Boutheldja .

## **Conclusion Générale :**

La zone d'étude se localise dans la partie orientale de l'Algérie, à l'extrême Est de la plaine alluviale d'Annaba. Elle se situe dans le territoire de la wilaya d'El Tarf, répartie sur les communes de Bouteldja et Berrihane. Elle fait partie du bassin versant de la Mafragh d'une superficie d'environ 2660 Km<sup>2</sup>. Dans ses parties sud et est, cette zone est ceinturée par une zone montagneuse typique du tell algérien.

Le système se compose essentiellement d'une plaine alluviale résultant des dépôts de l'oued Kebir Est et de ses affluents sur une superficie de 40 Km<sup>2</sup> et d'un massif dunaire d'une superficie d'environ 160 Km<sup>2</sup>.

La région d'étude est soumise à un climat méditerranéen tempéré, il se caractérise par deux saisons l'une humide et douce allant du mois d'octobre jusqu'au mois de mai et l'autre chaude et sèche relativement courte durant les mois de juin, juillet, août et septembre.

Le massif dunaire de Boutheldja est connu comme un important réservoir souterrain capable de stocker les eaux dont l'infiltration est favorisée par de la nature du sol. Malheureusement, la nappe du massif dunaire est intensivement exploitée et même surexploitée pour répondre aux besoins de l'irrigation et l'AEP des deux wilayas : Annaba et El Tarf ce qui contribue à la dégradation quantitative et qualitative des eaux souterraines.

Ainsi l'approche de la vulnérabilité à la pollution des nappes constitue un outil efficace pour limiter et contrôler les risques de dégradation de la qualité des eaux souterraines, permettant donc de prendre des mesures de protection adaptées.

La méthode GALDIT a été sélectionnée, après avoir fait une étude bibliographique sur les différentes méthodes d'évaluation de la vulnérabilité à la pollution dédiées aux différents types de milieux aquifères.

Enfin le modèle GALDIT utilisé nous a permis de dresser une carte de vulnérabilité à l'intrusion marine de la nappe libre du massif dunaire de Boutheldja. Cette carte a mis en exergue que la zone côtière est à vulnérabilité faible et moyenne selon les endroits, mais heureusement la plage de faible vulnérabilité occupe la majeure partie de la zone d'étude.

Néanmoins de petites superficies caractérisées par une vulnérabilité moyenne se localisent dans la partie centre au nord de Berrihane et au sud-ouest de Sebaa et à l'ouest de

Bordj Ali Bey. Ces zones correspondent à des endroits où la profondeur du plan d'eau est très faible à faible avec une épaisseur importante de l'aquifère de type libre .

Enfin nous pouvons dire que cette modeste recherche nous a permis de dresser des documents fiables actualisables et révisables dans l'avenir en fonction des différentes campagnes de mesure qui seront programmées par les responsables des ressources en eau et de l'environnement .

## **Références bibliographique :**

**Al Karkouri .J,2014** :Cartographie de la vulnérabilité à l'intrusion marine de l'aquifère côtier de Mnasra (Littoral Du Gharb-Maroc –Nord –Occidental).Marine Scor Journal Vol 1.

**ATTOUL.B,2014** : 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. Thèse do Doctorat. Université d'Annaba.134 p

**Ben Hamouda .M ,2008**: Approche hydrogéochimique et isotopique des systèmes aquifères côtiers du Cap Bon : Cas des nappes de la cote orientale et d'El Haouaria, Tunisie. Thèse de Doctorat. Université du 7 Novembre a Carthage (Tunisie).240p .

**Bézélgues et al,2002** :Cartographie de la vulnérabilité des nappes de grande –terre et Marie Galante (Guadeloupe)-phase 1. BRGM/RP-51783-Fr.41p.

**Bouderbala . A,2015** :Contribution des méthodes hydrochimiques et géophysiques à l'acquisition de la minéralisation dans les zones côtières cas de la nappe alluviales de l'Oued Nador-Tipaza (Algérie).Thèse de Doctorat . Université Hassiba Benbouali de Chlef .212p.

**Djoudar.D,2014** : Approche méthodologique de la vulnérabilité de la ressource en eau souterraine en milieu fortement urbanise : exemple en Algérie des plaines littorales (Mitidja).Thèse de Doctorat. USTHB Alger,2014 .178p.

**Dorfliger .N et al ,2011** :Montée du niveau marin induite par le changement climatique conséquence sur l'intrusion saline dans les aquifères côtiers en Métropole .BRGM/RP-60829-Fr-Rapport final.301p.

**Douyemi Abdeldjabar et Khelaifa Salah : 2015** : Evaluation de la vulnérabilité à la pollution d'une nappe en milieu humide et comparaison des méthodes appliquées –Cas de la nappe libre de'El Taref (Nord-Est d'Algérie). Mémoire de Master .Université HAMMA LAKHDAR d'El-Oued.86 p.

**GUEZGOUZ.N, DJABRI .L, BOUHSINA .S ;2013** : Etude comparative de la vulnérabilité à l'intrusion marine par la méthode paramétrique: cas de la région de Annaba – Guerbes (N-E Algérie). Le Séminaire International sur L'Hydrogéologie et l'Environnement. Ouargla (Algérie).3p

**Haddani . H,2010** : Mise en évidence de l'intrusion marine vers les aquifères côtiers de la zone comprise entre El Jadida et Oualidia (Maroc).Mémoire de fin d'étude Universié CADI AYYAD Faculté des Sciences et Techniques Marrakech (Maroc ).43p.

**Haddouche .A,2011** :Etude comparative sur la vulnérabilité à la pollution des aquifères dans un milieu contrastes :Mitidja Est et Oued Miya .Mémoire de Magister .USTHB Alger.136p.

**Haeid .N, 2015** : Evaluation quantitative d'une réalimentation de la nappe libre du massif dunaire de Bouteldja dans la région de Bordj Ali Bey et son impact sur la qualité des eaux souterraines. Thèse de Doctorat. Université d'Annaba.166p

**Hani.B,2011** : Faisabilité de l'implantation de bassins d'alimentation d'un aquifère. Cas du massif dunaire de Bouteldja ». (Extrême Nord orientale Algérien). Mémoire de Magister. Université d'Annaba.124p.

**Kaid Rasso.K ,2009**: Etude des interactions entre les eaux souterraines et les eaux de surface dans le bassin cotier d'Oualdia .Thèse de doctorat .Universié CADI AYYAD Faculté des Sciences et Techniques Marrakech (Maroc).193p.

**Kherici. N, 1993** :Vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines d'un système de nappe superposée en milieu industriel et agricole (Annaba- la Mafragh)N-E Algérien. Doctorat d'Etat,Université d'Annaba

**Louda, I, 2016** : Application de la méthode PRASTCHIM pour la caractérisation de la vulnérabilité des eaux souterraines de la vallée du Haut Sébaou .Mémoire de master, ENSH,150p.

**Niazi.S,2007** : Evaluation des impacts des changements climatiques et de l'élévation du niveau de la mer sur le littoral de Tétouan (Méditerranée occidentale du Maroc):Vulnérabilité et Adaptation. Thèse de Doctorat. Université Mohammed V – Agdal- Faculté des sciences de Rabat (Maroc) .233p.

**Ramdani .A, 1996** : Hydrogéologie et modélisation de la nappe dunaire de Bouteldja. Mémoire de Magister. Université d'Annaba, 138 p.

**Saadali .B, 2007** :Etude de la qualité des eaux des sources issues du massif dunaire de Boutheldja (Algérie extrême Nord orientale .Mémoire de Magister. Université d'Annaba.84p.

**Saidi S., 2011**: Contribution des approches paramétriques, cartographiques et statistiques à l'étude de la vulnérabilité du système aquifère phréatique de Mahdia (Tunisie orientale). Thèse de doctorat. Faculté des sciences de Sfax, département des sciences de la terre (Tunisie). 255p

**Saliha .N et al,2012**: Application of the method GALDIT for the cartography of groundwaters vulnerability : Aquifer of Chaouia Coast (Morocco) .University Chouaïb Doukkali (Morocco), Alexandru Ioan Cuza” University of Iași.

**Traverse.S,2014** : Nouvelles approches et capteurs innovants pour la connaissance et le suivi des aquifères côtiers. Application à la surveillance des intrusions salines dans le bassin sédimentaire du Roussillon (France) -Tâche 4 – ARH –GRAIN D'SEL.65p.

## Annexe

**Annexe 1** : La transmissivité de quelques forages inventoriés dans le massif dunaire de Bouteldja (Haied N,2015)

Forage	Coordonnées		Transmissivité en ( $10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )
	X	Y	
6902	993.200	407.800	1.03
6906	987.100	409450	3
6907	985.900	410.200	/
6909	985600	408.950	0.5
6910	988.300	408.950	4
6911	986.400	412.500	7.3
6912	990.000	409.000	4
6917	990.400	407.300	10
6918	991.500	405.950	4
6919	991.650	409.000	4
6920	993.600	406.500	6
6921	984.780	411.690	0.5
6925	994.950	406.950	2
B1	881.800	410.800	0.25
B3	980.950	406.820	1.4
B4	980.100	406.000	0.5
B6	986.100	411.800	0.95
B5	983.600	406.250	/
B7	987.700	410.300	/
B8	988.850	409.650	1
B9	989.400	408.550	2.8
B10	984.350	407.900	1.5
B11	989.500	407.250	2.5
B12	988.600	406.600	0.5
B13	992.000	406.600	/
B14	985.000	406.950	0.8
B17	985.300	407.400	0.27
B18	975.800	405.700	0.62
B20	978.350	406.800	0.18
A5	978.850	406.850	2
B13	992.000	406.600	3
P19	983.800	414.100	3.1
6923	995.100	405.900	1.3
565	988.050	405.800	/

## Annexe

**Annexe 2** : Caractéristiques hydrodynamiques de quelques forages inventoriés dans le massif dunaire de Bouteldja

Forage	x	y	Profondeur du plan d'eau /nivrau de mer(m)	Epaisseur (m)	conductivité (m/j)	Cl/ (HCO <sup>3-</sup> + CO <sup>3-</sup> )
p19	983800	414100	10	120.02	1.56	1.2
b1	981100	410800	40	161.4	0.03	0.43
b3	980950	406820	6.52	145.4	1.81	10.41
b4	980100	406000	6	108.05	0.84	0.12
b5	983600	406250	10.75	126.33	0.72	0.43
b6	986100	411800	7	217.55	0.41	0.19
b7	983800	410300	0.54	139.4	1.56	0.16
b8	988850	409650	1.5	157.92	0.76	1.66
b9	989400	408550	13.56	170.48	1.47	1.7
b10	984350	407900	6.55	145.02	6.26	1.38
b11	989500	407250	8.62	145.15	0.86	0.29
b12	988600	406600	16.57	85.82	3.11	0.29
b13	992000	406600	6.98	172.05	0.51	0.21
b14	985000	406950	7	132.18	0.68	0.97
b15	971850	406350	13	189.1	1.30	0.4
b17	985300	407400	8	151.19	1.64	0.25
b18	975800	405700	1	111.36	1.12	0.3
n19	976050	409450	3	151	0.95	0.4
b20	978350	406800	7.43	160.52	1.04	0.16
6902	993200	407800	1.85	174.92	0.86	0.47
6906	987100	409450	7.87	119.87	13.96	0.16
6907	985900	410200	25	173.8	1.81	0.13
6909	985600	408950	6.25	140.19	3.28	0.25
6910	988300	408950	0.96	164.34	2.42	0.19
6911	986400	412500	8	116.18	2.68	0.31
6912	990000	409000	18	157.18	2.68	0.3
6917	990400	407300	4.96	98.5	8.64	0.5
6918	991500	405950	30	151.52	6.32	1.2
6919	991650	409000	13.71	136.43	3.36	1.21
6920	993600	406500	14.58	101.46	0.84	0.4
6921	984780	411690	9.46	149.25	3.46	0.52
6925	994950	406950	19.33	86.98	30.24	0.6
a5	978850	406850	27	163.87	1.30	0.4
s3	984500	403800	35	105	1.30	1.3
565	988050	405800	7	109.16	1.12	0.18
6923	995100	405950	8	104.61	9.42	0.29