



UNIVERSITE CADI AYYAD  
Faculté des Sciences et  
Techniques  
Marrakech  
Département des Sciences de la  
Terre



UNIVERSITE CHOUAIB DOUKKALI  
Faculté des Sciences El Jadida



Office National de l'Eau Potable  
El Jadida



En hommage au professeur *Abdelhay BELKABIR*

## MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

LICENCE es SCIENCES ET TECHNIQUES

« Eau et Environnement »

Intitulé :

***MISE EN EVIDENCE DE L'INTRUSION MARINE VERS LES  
AQUIFERERS COTIERS DE LA ZONE COMPRISE ENTRE EL  
JADIDA ET OUALIDIA (MAROC)***

Présenté par : HADDANI Hind

Encadré par : A. YOUNSI

D. CHAFIKI

Soutenu le 28 juin 2010

Membres de jury :

Mr. YOUNSI  
Mr. CHAFIKI  
Mr. TAOUIL  
Mr. AIT ADDI

Professeur FS El Jadida  
Professeur FST Marrakech  
Professeur FST Marrakech  
Professeur FST Marrakech

Encadrant  
Encadrant  
Examinateur  
Examinateur

Année universitaire 2009-2010

## Dédicaces

*Je dédie ce modeste mémoire à :*

*Mes parents ;*

*Mon frère Adnane ;*

*Mes tantes Hakima & Aicha ;*

*Mon oncle Saïd ;*

*Mon cousin Achraf ;*

*Mes cousines Ihssane & Imane;*

*Mes frères et soeurs ami(e) s ;*

*Tous ceux qui me sont chers.*

## Remerciements

*Au terme de la rédaction de ce modeste mémoire, c'est un devoir agréable d'exprimer en quelques lignes la reconnaissance que je dois à tous ceux qui ont contribué de loin et de près à sa réalisation.*

*J'adresse ma profonde gratitude et remerciements à Monsieur le Professeur Abdelkader YOUNSI de la Faculté des Sciences d'El Jadida en acceptant de diriger ce travail, pour son encadrement fructueux, pour son aide précieuse, pour ses orientations, pour sa patience. Qu'il trouve ici l'expression de ma sincère reconnaissance.*

*Par la même volonté et la même chaleur, je remercie Monsieur le Professeur Driss CHAFIKI de la Faculté des Sciences et Techniques de Marrakech pour son encadrement fructueux, son suivi au cours de mon stage, sa générosité et sa sympathie. Qu'il trouve ici l'expression de ma reconnaissance.*

*Je souhaite également adresser tous mes remerciements à Monsieur Abdelkrim BOUAASSRI chef de service à l'ONEP d'El Jadida et Monsieur Abdel Rahman FARKHI agent à l'ONEP, pour leur accueil, leur écoute, leur gentillesse et leur aide.*

*Mes remerciements vont aussi à tout le personnel de la station de traitement des eaux « Sidi Daoui » et spécialement aux membres du laboratoire, en particulier Monsieur AbdelRazzaq BELBAHLOUL et Monsieur Mohamed BOURBOUH, pour leur suivi avec intérêt important, sympathie, et leur amical soutien.*

*Je tiens à remercier également le responsable du laboratoire de la RADEEJ, Monsieur Mohamed SOUROUR, pour sa serviabilité.*

*Mes remerciements s'adressent à tous les Professeurs du département des Sciences de la Terre de la Faculté des Sciences et Techniques de Marrakech.*

***A la mémoire du Professeur Abdelhay BELKABIR  
qui nous a quitté prématurément***

# Sommaire

Dédicaces	
Remerciements .....	3
Introduction générale.....	6

## PREMIER CHAPITRE :

### Synthèse bibliographique sur les aspects de pollution des eaux souterraines

I. Introduction.....	9
II. Origines de la salinité des eaux souterraines en zones côtières.....	9
II.1- Intrusion marine.....	10
II.1.1- Généralités.....	10
II.1.2- Facteurs déterminants dans l'évolution de l'intrusion marine.....	10
a) Profondeur de la nappe .....	11
b) Débit de la nappe .....	11
c) La perméabilité.....	11
d) Géométrie de l'aquifère et topographie du substratum .....	11
II.1.3- Conclusion .....	12
II.2- Embruns marins .....	12
II.3- Lixiviation.....	13
II.4- Évaporation et Recyclage des eaux .....	13
II.5- Salage des routes .....	14
II.6- Eaux usées et lixiviats des décharges incontrôlées .....	14
III. Epuration naturelle .....	15

## DEUXIEME CHAPITRE :

### Présentation de la zone d'étude

I. Géographie physique et humaine.....	17
I.1- Situation géographique.....	17
I.2- Géomorphologie.....	17
II. Cadre socio-économique.....	18
II.1- Population.....	18
II.2- Végétation et agriculture.....	19
II.3- Industrie.....	19
II.4- Tourisme et pêche .....	19

<b>III. Cadre climatologique</b> .....	19
<b>III.1- Précipitations</b> .....	19
<b>III.2- Température</b> .....	20
<b>III.3- Type de climat</b> .....	20
<b>IV. Cadre géologique</b> .....	21
<b>IV.1 - Lithostratigraphie</b> .....	22
<b>IV.1.1- Le Paléozoïque</b> .....	23
<b>IV.1.2- Le Permo-Trias</b> .....	23
<b>IV.1.3- Le Jurassique</b> .....	23
<b>IV.1.4- Le Crétacé</b> .....	23
<b>IV.1.5- Le Tertiaire</b> .....	23
<b>IV.1.6- Le Plioquaternaire</b> .....	23
<b>IV.1.7- Le Quaternaire</b> .....	24
<b>IV.1.8- Géologie de la région étudiée</b> .....	24
<b>a) Zone 1</b> .....	24
<b>b) Zone 2</b> .....	25
<b>V. Hydrogéologie</b> .....	25
<b>V.1- Introduction</b> .....	25
<b>V.2- Hydrogéologie de la région d'étude</b> .....	25
<b>V.2.1- Terrains aquifères de la région étudiée</b> .....	25
<b>V.2.2- Profondeur des eaux souterraines de la zone étudiée</b> .....	28
<b>a) Réseau de mesure et relevés piézométriques</b> .....	28
<b>b) Profondeur des eaux souterraines</b> .....	29

## TROISIEME CHAPITRE :

### Mise en évidence de l'intrusion marine dans la zone d'étude

<b>I. Introduction</b> .....	31
<b>II. Méthodologie de travail</b> .....	31
<b>II.1- Présentation de la station de Sidi Daoui et du laboratoire de la RADEEJ</b> .....	31 Erreur ! Signet non défini.
<b>II.2- Réseau de mesure et matériel utilisé</b> .....	32
<b>II.3- Méthodes d'analyse</b> .....	32
<b>II.3.1- Paramètres physiques</b> .....	32
<b>II.3.2- Paramètres chimiques</b> .....	32
<b>a) Les chlorures (Cl<sup>-</sup>)</b> .....	32
<b>b) La dureté (calcium+magnésium)</b> .....	33
<b>c) Le calcium (Ca<sup>2+</sup>)</b> .....	33
<b>d) Le magnésium (Mg<sup>2+</sup>)</b> .....	33
<b>III. Résultats et discussions</b> .....	33
<b>III.1- Analyse des résultats physico-chimiques</b> .....	33
<b>III.1.1- Conductivité électrique</b> .....	33
<b>III.1.2- Température</b> .....	34
<b>III.1.3- pH</b> .....	34
<b>III.1.4- Chlorures (Cl<sup>-</sup>)</b> .....	34
<b>III.1.5- Calcium (Ca<sup>2+</sup>) et magnésium (Mg<sup>2+</sup>)</b> .....	34
<b>III.2- Aspect qualitatif des eaux des puits suivis</b> .....	34

<b>III.3- Mise en évidence des mécanismes de l'intrusion marine.....</b>	<b>35</b>
<b>Introduction .....</b>	<b>35</b>
<b>III.3.1- Conductivité électrique (CE).....</b>	<b>35</b>
<b>III.3.2- Traceurs chimiques de la salinité des eaux souterraines .....</b>	<b>36</b>
<b>a)Evolution en fonction de la distance par rapport à la mer des Chlorures</b>	<b>36</b>
.....	
<b>b)Evolution en fonction de la distance par rapport à la mer des Calcium</b>	<b>38</b>
<b>et Magnésium.....</b>	<b>38</b>
<b>IV. Conclusion.....</b>	<b>39</b>
<b>Conclusions générales et recommandations .....</b>	<b>40</b>
<b>Liste des illustrations.....</b>	<b>42</b>
<b>Références bibliographiques.....</b>	<b>43</b>

# INTRODUCTION GENERALE

Généralement, les activités humaines et particulièrement agricoles ont tendance à se développer de préférence à proximité des cours d'eau et mieux encore en bord de mer. Ces franges côtières constituent des secteurs privilégiés, particulièrement en pays arides et semi-arides. En effet, le long de ces côtes se développent des plaines à remplissage alluvionnaire, caractérisées par des réservoirs aquifères dont les niveaux piézométriques sont très proches d'un sol généralement très fertile.

Au cours de ces dernières années, l'exploitation des ressources en eau souterraines s'est intensifiée, afin de répondre à une demande en eau croissante liée principalement à une multiplication des activités socio-économiques et à un essor démographique important. Ceci s'est répercuté sur la ressource en eau par une baisse continue du niveau piézométrique des nappes et par une augmentation de leur salinité dont les sources principales sont : l'intrusion marine vers les aquifères côtiers, l'utilisation des fertilisants et des pesticides,...

La région étudiée qui est comprise entre El Jadida et Oualidia, fait partie de ces plaines côtières. C'est une zone qui connaît actuellement un grand développement des activités agricoles, industrielles, maritimes et une expansion démographique. Ce développement a été accompagné par une demande en eau de plus en plus forte. Ce qui a engendré une surexploitation des nappes côtières et une dégradation de leur qualité.

En effet, tout prélèvement intense d'eau douce au niveau d'un champ de captage de l'aquifère côtier, provoque une diminution du débit des eaux souterraines et un abaissement de la surface piézométrique. Il existe par conséquent un danger d'avancée vers les terres du biseau d'eau salé, et une salinisation des eaux souterraines qui se chargent progressivement en sels minéraux et peuvent atteindre des teneurs anormalement élevées.

Les objectifs de ce travail qui porte sur l'étude des mécanismes de salinisation des eaux souterraines, sont :

- ❖ Déterminer la nature et le degré de la minéralisation des eaux souterraines côtières.
- ❖ Mettre en exergue les sources potentielles de la salinité des eaux souterraines.
- ❖ Identifier les secteurs vulnérables à la salinité.
- ❖ Mettre en évidence les facteurs déterminants dans l'évolution de cette salinité.

Dans le cadre de ce mémoire, et pour résoudre la problématique posée et répondre aux objectifs fixés, nous avons pu réaliser les travaux suivants :

- ❖ Recherche bibliographique sur notre sujet.
- ❖ Stage aux laboratoires de Sidi Daoui et de la RADEEJ d'El Jadida sur les méthodes d'analyses physico-chimiques et bactériologiques.

- ❖ Choix d'un réseau de points de mesure répartis sur des alignements orthogonaux par rapport à la ligne de rivage : trois alignements ont été choisis de 4 à 7 puits chacun dans la bande littorale comprise entre El Jadida et Oualidia, soit au total 18 puits.
- ❖ Campagne sur le terrain de relevés piézométriques sur ces 18 puits.
- ❖ Campagne sur le terrain d'échantillonnage d'eau souterraine et de mesures physiques in situ (température, conductivité électrique, pH).
- ❖ Analyses chimiques des eaux de ces puits, au laboratoire de la RADEEJ et de la station de traitement des eaux d'El Jadida.
- ❖ Traitement des données des analyses physico-chimiques des 18 puits suivis.

Ce mémoire comportera trois chapitres, qui seront comme suit :

- ❖ Le premier chapitre présentera une synthèse bibliographique sur les aspects de la pollution des eaux souterraines en zones côtières, agricoles, industrielles et surpeuplées.
- ❖ Le second chapitre sera consacré à une présentation de la zone d'étude sur les plans géographique, socio-économique, climatique, géologique et hydrogéologique.
- ❖ Le dernier chapitre portera sur les travaux pratiques réalisés pour mettre en évidence les mécanismes de salinisation des eaux souterraines de la zone comprise entre El Jadida et Oualidia : sources potentielles des fortes salinités, facteurs déterminants dans l'évolution spatiale de ces dernières,...

# ***PREMIER CHAPITRE***

---

**SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES ASPECTS DE  
POLLUTION DES EAUX SOUTERRAINES**

## I. Introduction

Les eaux souterraines constituent une réserve d'eau très fortement sollicitée. C'est de l'eau pure, normalement protégée par les terrains qui la recouvrent. Lorsque la pollution y pénètre, en particulier par infiltration massive, elle est plus ou moins retardée, et non pas directe et rapide comme dans le cas des eaux de surface. Par contre, la contamination est beaucoup plus longue à disparaître en raison de la lenteur de la circulation de l'eau souterraine. Dans le cas des terrains karstiques, les caractéristiques de la pollution peuvent être semblables à celles des eaux superficielles.

Si cette eau se répartit sur des grandes étendues où elle est souvent accessible avec un coût d'exploitation relativement faible, elle n'en est pas pour autant inépuisable. La preuve c'est que ces ressources en eau souterraine deviennent insuffisantes, en particulier dans les zones surpeuplées et se caractérisant par une intense activité socio-économique.

Dans ce chapitre, nous exposerons des considérations générales sur la pollution des eaux souterraines, comment la pollution pénètre jusqu'aux nappes, comment elle s'y propage, quelles sont les diverses origines de la pollution, quels sont les facteurs déterminants dans cette pollution, quelles sont les mesures nécessaires pour examiner la qualité de l'eau souterraine en relation avec la pollution ?

## II. Origines de la salinité des eaux souterraines en zones côtières

Dans la région étudiée et de manière générale dans les zones côtières irriguées et à climat aride et semi-aride où l'on observe une intensification des activités socio-économiques et essor démographique important, les sources potentielles des fortes salinités des eaux souterraines (figure 1) peuvent être soit naturelles (intrusion marine, embruns marins, lixiviation des roches réservoirs, évaporation), soit anthropiques (surfertilisation, pesticides, eaux usées, lixiviats des déchets solides, salage des routes, émissions gazeuses), soit encore une combinaison des sources naturelles et anthropiques (Andreasen et Fleck, 1997 ; Younsi, 2001).

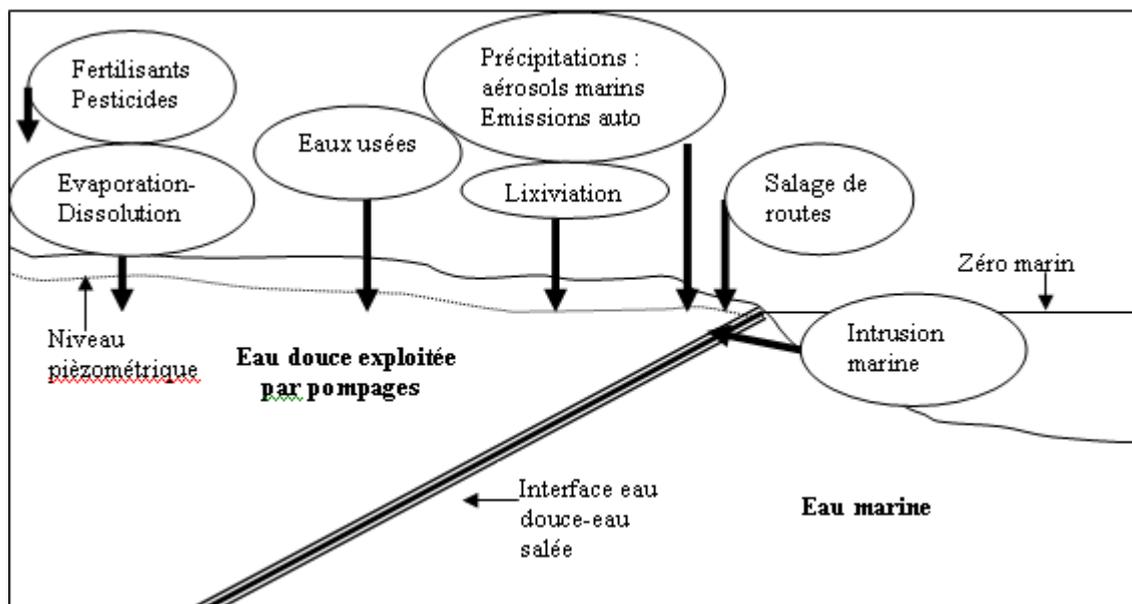


Figure 1 : Sources potentielles des salinités des eaux souterraines côtières (Younsi, 2001).

## II.1- Intrusion marine

### II.1.1- Généralités

Le phénomène d'invasion marine pourrait présenter une origine majeure des fortes salinités des eaux souterraines dans les régions côtières 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.

En l'absence de perturbation (surexploitation par exemple), la pénétration du niveau de la mer à l'intérieur des terres est naturellement régie par une différence de masse volumique ( $25 \text{ kg/m}^3$ ) entre deux eaux : l'une salée et marine, plus dense et donc plus assujettie aux forces gravitationnelles ; l'autre plus ou moins « douce » provenant de l'infiltration des précipitations et constituant ainsi une nappe côtière s'écoulant vers la mer.

La transition entre l'eau douce et l'eau salée de la mer s'effectue brusquement sur une certaine épaisseur ne dépassant pas quelques mètres. Les deux liquides miscibles se trouvent ainsi séparés par une zone qui est souvent assimilée à une interface abrupte limitant un biseau d'eau salée, dont la pente est inclinée vers le continent (figure 2).

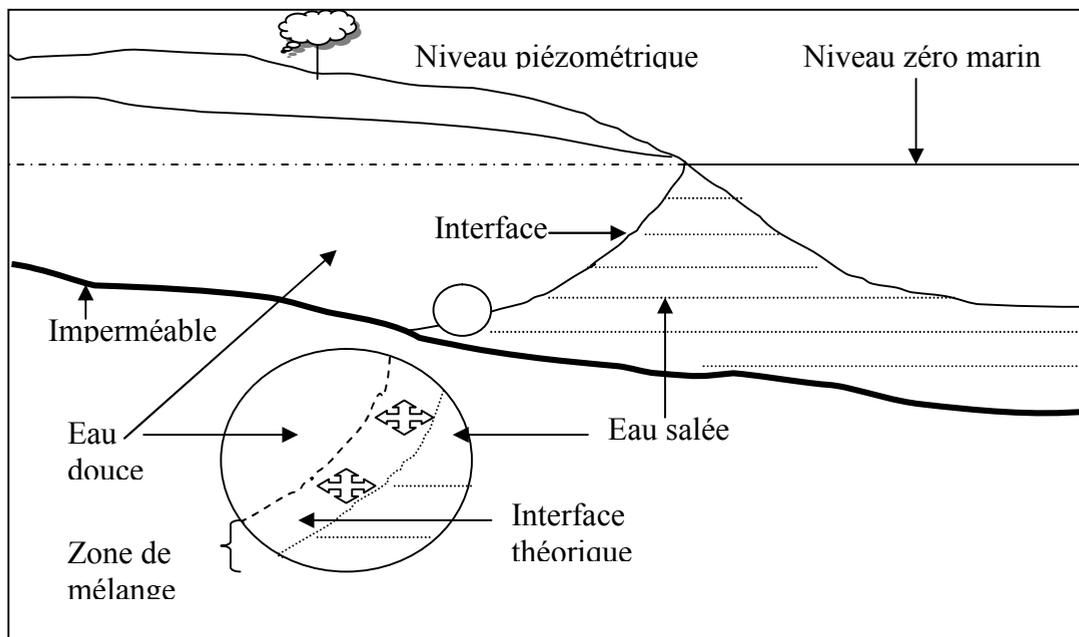


Figure 2 : Représentation schématique de l'interface « eau douce-eau salée »

### II.1.2- 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) : 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.

### **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.

### II.1.3- 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.

### II.2- Embruns marins

Les embruns marins sont des aérosols enlevés par le vent à la crête des vagues. Ils contiennent donc une forte concentration en sels minéraux, surtout le chlorure de sodium.

Ils constituent une source naturelle potentielle de la salinisation des eaux souterraines côtières. Ces embruns chargés en cristaux de NaCl, vont se déposer sur les sols. Pendant la période pluvieuse où l'on observe une recharge efficace de la nappe, les eaux infiltrées vont lessiver les cristaux de sels et les entraîner jusqu'à la nappe ; ce qui engendre une pollution de celle-ci (figure 3).

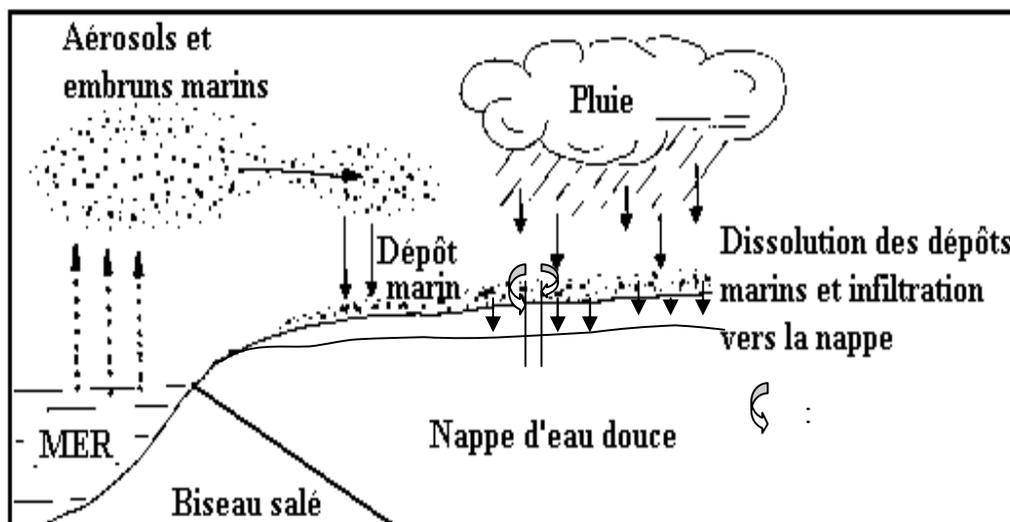


Figure 3 : Dissolution des sels issus des embruns marins (Younsi, 2001).

### ***II.3- Lixiviation***

La dissolution de la roche réservoir pourrait constituer une autre source de salinité des eaux souterraines. Elle dépend principalement de la composition lithologique, la porosité et la perméabilité des terrains aquifères. Plusieurs facteurs jouent un rôle essentiel dans la mise en solution des éléments chimiques de la roche réservoir par l'eau souterraine (figure 4) :

- ✚ la perméabilité ou la vitesse de circulation de l'eau dans le terrain : plus l'eau circule lentement dans une formation, plus sa minéralisation augmente ;
- ✚ les facteurs physiques tels que la température et la pression qui influencent de manière significative les échanges eau- roche ;
- ✚ la nature de la roche réservoir et de celle de la zone non saturée ;
- ✚ l'importance de la surface de contact « eau-roche » et la durée de contact entre l'eau et la matrice de l'aquifère ;

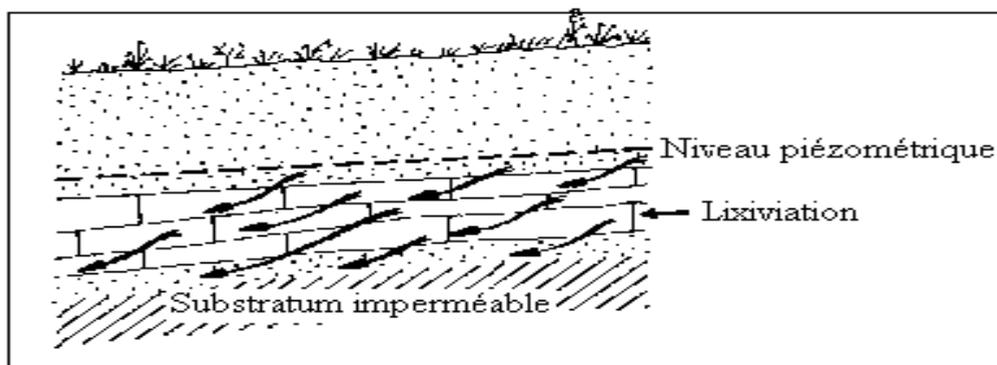


Figure 4 : Exemple de source naturelle de salinité des eaux souterraines : lixiviation.

### ***II.4- Evaporation et recyclage des eaux***

Retenons que la salinité des eaux souterraines augmente avec l'aridité du climat, c'est-à-dire avec l'évaporation, dont l'effet augmente au fur et à mesure que la profondeur de la nappe est faible (figure 5).

Par ailleurs, le recyclage des eaux de drainage chargées en sels, est favorisé par la faible profondeur de la nappe dans ces zones côtières. En règle générale, plus la nappe est profonde et d'un écoulement rapide, mieux elle sera protégée contre toute contamination diffuse

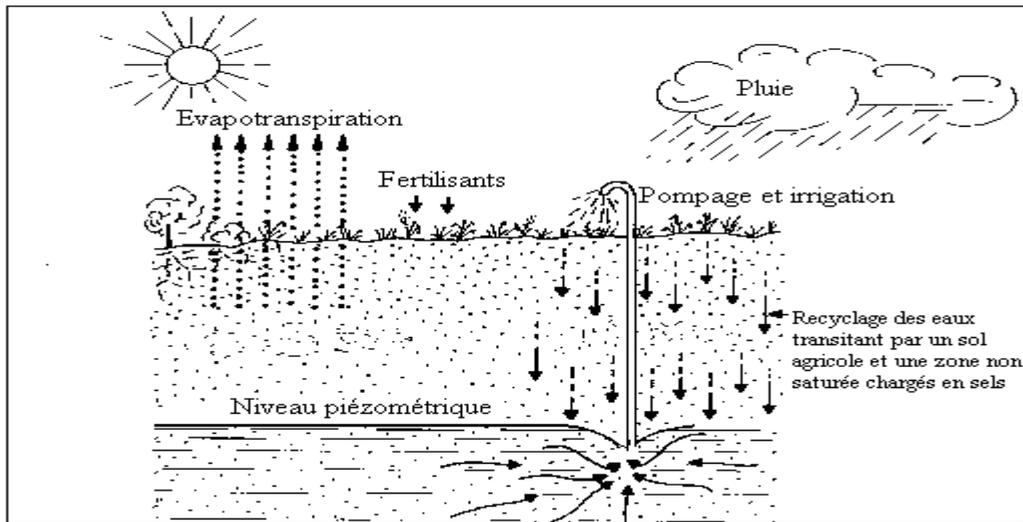


Figure 5 : Sources naturelles et anthropiques de salinité : évaporation et recyclage des eaux d'irrigation.

## II.5- Salage des routes

Dans le domaine routier, le salage est l'action de répandre un fondant routier, du sel en l'occurrence, sur la chaussée afin de faire fondre la pellicule de glace ou de neige compactée.

Ce n'est pas le salage lui-même qui pose problème mais le ruissellement de la neige fondue une fois que l'épisode de froid est passé.

Les "fondants routiers" sont constitués à 98% de chlorure de potassium. C'est un problème ponctuel, localisé, sur quelques semaines dans l'année, mais qui est non négligeable sur l'environnement. Dans certaines zones de montagne, qui sont salées chaque année, on peut parler de pollution saisonnière chronique.

## ***II.6- Eaux usées et lixiviats des décharges incontrôlées***

Les rejets des eaux usées non contrôlées et qui sont des eaux riches par divers éléments chimiques polluants jouent sur la qualité des eaux souterraines, peuvent engendrer des nuisances importantes, en l'occurrence être à l'origine des teneurs élevées des sels et de la matière organique dans les eaux souterraines. Cela est favorisé par la faible profondeur des nappes en zone côtière.

Par ailleurs, les nappes côtières sont aussi très sensibles à la pollution par les lixiviats des décharges incontrôlées. Ces lixiviats présentent une charge polluante minérale et organique très forte.

### III. Epuration naturelle

L'épuration naturelle, ou autoépuration, des eaux souterraines est un phénomène extrêmement complexe mais très efficace qui mène à la banalisation de certains polluants toxiques, par des mécanismes qui ont lieu lors de l'interaction des polluants avec les gaz, l'eau, les sols, les roches, la flore et la faune. Cette autoépuration dépend des facteurs suivants :

#### **Phénomènes physiques :**

- Echange gazeux : décomposition aérobie des polluants organiques, élimination de substances polluantes ( $N_2$ ,  $NH_3$ ,  $H_2S$ ).
- Filtration : combine des forces physiques et chimiques, elle est active en milieu poreux.
- Rétention capillaire : les forces de capillarité fixent l'eau fortement avec les polluants qu'elle contient.
- Désintégration radioactive : les polluants radioactifs se désintègrent selon leur décroissance radioactive très variable.

#### **Phénomènes chimiques :**

- Mise en solution et cristallisation : les polluants sont soit dissous, soit cristallisés et fixés selon la loi d'action de masse.
- Réaction acide –base : la mobilité (par solubilité) des substances croit lorsque le pH diminue.
- Réactions d'oxydoréduction : elles sont souvent induites par les micro-organismes.
- Complexation : le Pb, le Cd, et le Zn peuvent devenir très mobiles en milieu réducteur en formant des complexes organiques (aval des décharges).
- Adsorption-désorption : l'adsorption peut être physique ou chimique. Elle peut être réversible.

#### **Phénomènes biologiques :**

- Epuration par les plantes : lorsque les nappes montent, durant une partie de l'année, les racines peuvent directement puiser des substances nutritives qui peuvent être des polluants.
- Transformation et dégradation microbienne : dans les sols, les micro-organismes catalysent les réactions redox ; cela provoque la transformation accélérée des polluants dissous ou en suspension dans l'eau.

En fait les mécanismes d'autoépuration ont surtout lieu dans la zone non saturée et la dilution (ou mise en solution) en zone saturée ne fait que compléter ces mécanismes.

# ***DEUXIEME CHAPITRE***

---

## **PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE**

# I. Géographie physique et humaine

## I.1-Situation géographique

La région étudiée fait partie du bassin Sahel Doukkala qui appartient à la Méséta du Maroc occidental, compris entre la latitude 32°15' et 33°15' et la longitude 7°55' et 9°15'. Le secteur étudié s'étend entre El Jadida au Nord Est, Oualidia au Sud Ouest et l'Océan atlantique au Nord et à l'Ouest (figure 6). Il constitue une frange côtière d'une longueur de 70 km et d'une largeur d'environ 2 km, soit une superficie de 140 km<sup>2</sup>.

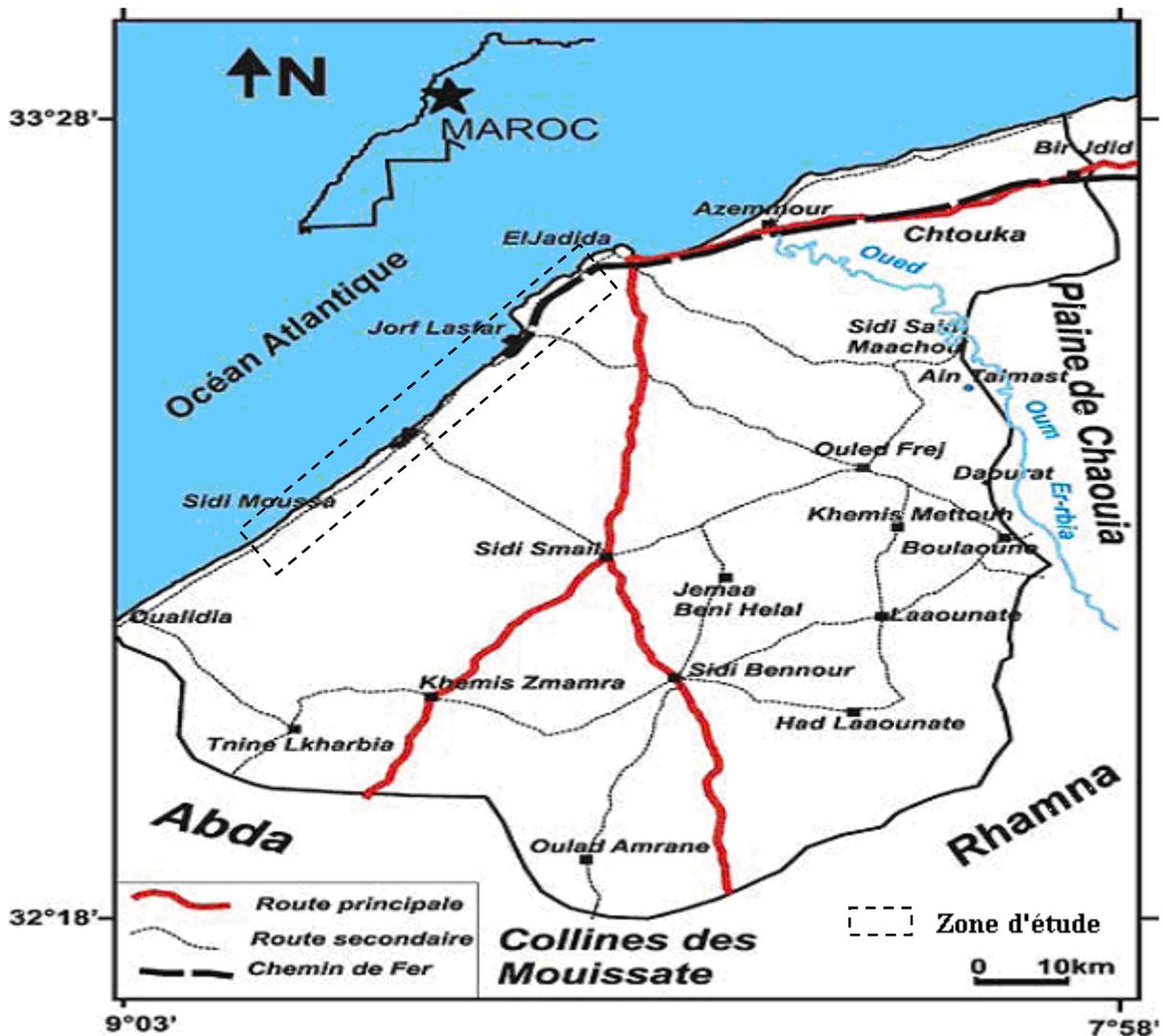


Figure 6 : Situation géographique de la région d'étude.

## I.2- Géomorphologie

Nous pouvons distinguer deux grandes unités dont chacune est caractérisée par des aspects particuliers et différents (figure 7) :

- ❖ **Doukkala** : C'est une vaste étendue (2500 km<sup>2</sup>) limoneuse inclinée (2à 3%) du Sud-Est au Nord-Ouest, avec une altitude qui décroît de 300 m en bordure des Rhamna à 120 m au pied du Sahel.

❖ **Sahel** : situé entre les Doukkala et la cote avec une superficie de l'ordre de 4200 km<sup>2</sup>, et s'étend sur 30 à 50 km de profondeur à partir du rivage. Une étroite frange côtière sous forme de gouttière de quelques kilomètres de large contraste avec le reste du Sahel, c'est l'Oulja. Elle correspond à la plateforme d'abrasion de la mer <Ouljienne> et est bordée à l'Est par une importante falaise morte (Ferré, 1969, In El Achheb, 2002), et protégée de l'Océan par un cordon dunaire. Une partie de cette zone est envahie par les eaux marines qui forment les lagunes de Oualidia et Sidi Moussa.

La région étudiée fait partie de cette deuxième unité morphologique (Sahel) du bassin des Doukkala.

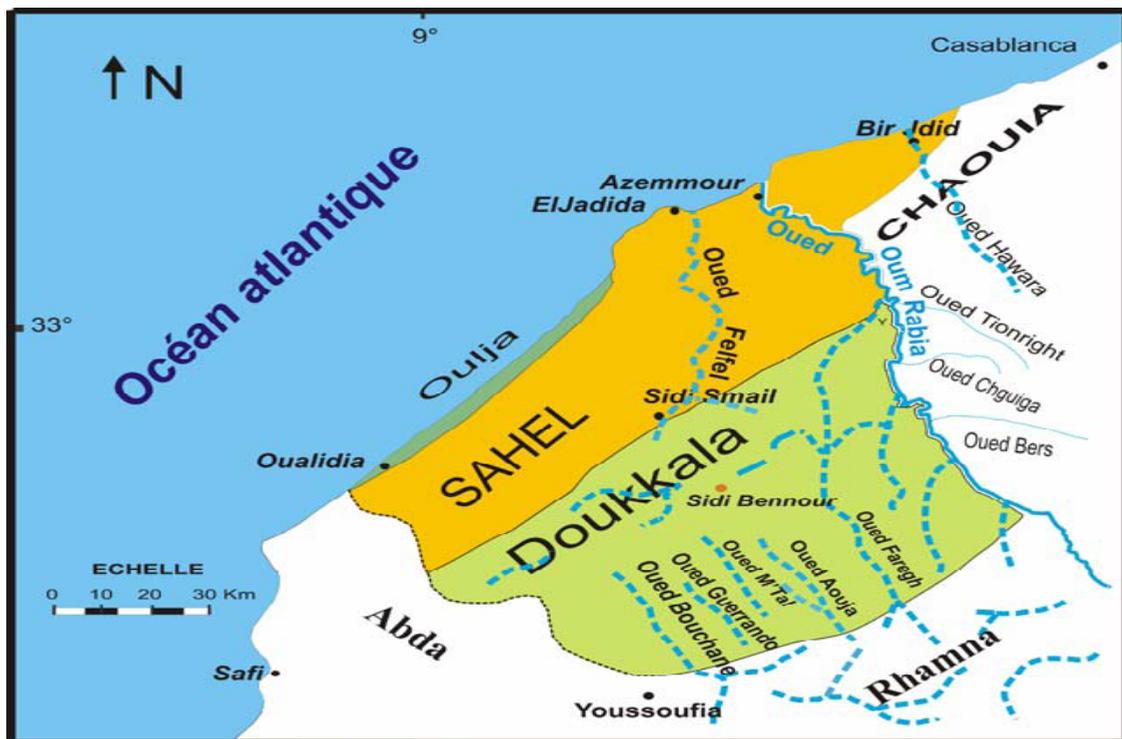


Figure 7 : Géomorphologie et hydrologie du bassin Sahel-Doukkala (d'après l'esquisse géomorphologique de Ferré et Ruhard, 1975).

## II. Cadre socio-économique

### II.1- Population

La population de la province d'El Jadida, s'élève à environ 1 103 032 habitants dont 70% en milieu rural. La densité de population est de 162 habitants au km<sup>2</sup>, c'est l'une des densités les plus fortes du Maroc. La ville d'El Jadida comporte 148 000 habitants, sans compter le nombre important des touristes qu'elle reçoit annuellement.

## ***II.2- Végétation et agriculture***

La majorité de la zone est irriguée par pompage privé des eaux souterraines et les cultures les plus pratiquées sont de type maraîcher (tomate, pommes de terre, piment, carottes, navet...).

## ***II.3- Industrie***

La région est l'une des plus importants pôles industriels du Maroc. L'image de cette région se caractérise par le poids des industries chimiques (complexe OCP de Jorf Lasfer) et agro-alimentaires (sucreries, unités laitière,...). En plus de ces branches, la région est connue aussi par ses industries de textile, de conserves de poissons, de plastique et produits pharmaceutiques. Une autre activité importante exercée dans cette zone est l'extraction du sel marin dans des marais salants de la bande côtière (Oulja).

Sur le plan économique, le complexe de Jorf Lasfar est le premier pôle industriel du pays, il comporte les installations de l'Office Chérifien des Phosphates (OCP), une centrale thermique et de nombreuses grandes industries de transformation (SONACID,...).

## ***II.4- Tourisme et pêche***

Vu sa situation géographique et ses potentialités touristiques naturelles et culturelles (plusieurs plages, monuments historiques et Moussems), la région connaît une importante activité touristique surtout pendant la période estivale. Nous signalons le grand Moussems de Moulay Abdellah qui est très célèbre et qui se tient annuellement en été. Il reçoit à peu près 80 000 touristes. Aussi, près de 200000 vacanciers résident quotidiennement à Sidi Bouzid durant les 3 mois d'été.

Le secteur de la pêche est relativement vital surtout pour la population de la commune de Moulay Abdellah et Douar Ouled El Ghadban et vers la ville d'Oualidia. La majorité des pêcheurs utilisent des moyens traditionnels, sans oublier les ramassages des algues marines.

## **III. Cadre climatologique**

Cette étude climatologique s'est basée sur les données de la station météorologique de la ville d'El Jadida. Ces données se rapportent à une série de 31 ans allant de 1977 à 2007.

### ***III.1- Précipitations***

Les précipitations sont très irrégulières d'une année à l'autre. Leur répartition au cours de l'année n'est pas homogène, elle dépend de plusieurs facteurs qui sont la latitude, la continentalité (Ouadia, 1998).

La pluviométrie moyenne annuelle est de 389 mm. Les mois les plus pluvieux sont Novembre, Décembre et Janvier, de 68 à 75 mm (figure 8) et les moins pluvieux sont Juin, Juillet, Août et Septembre.

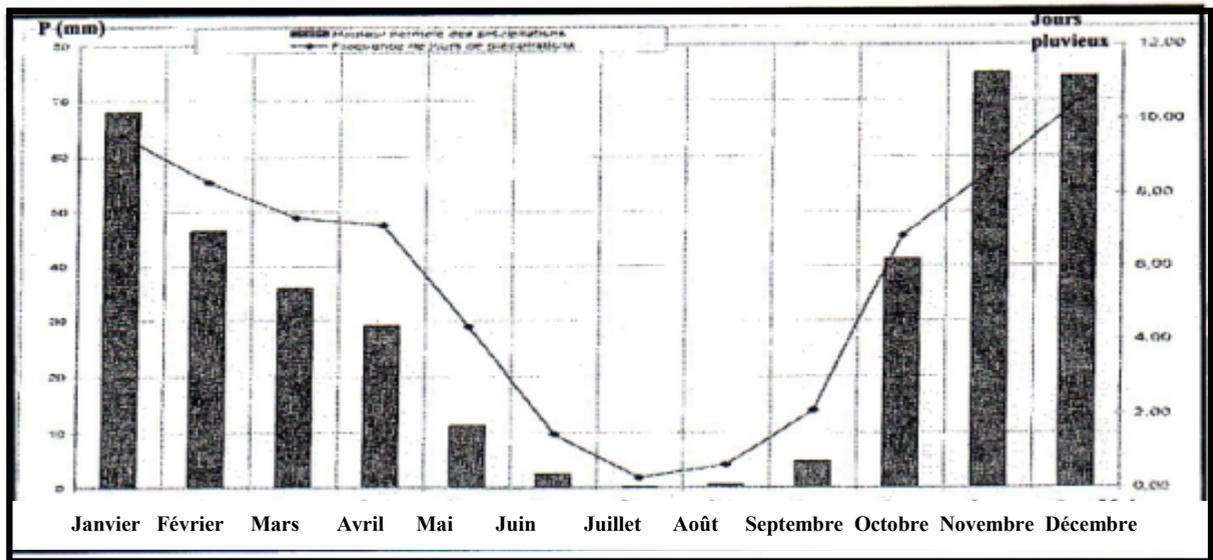


Figure 8 : Variation des précipitations moyennes mensuelles de 1977 à 2007 (Station météorologique d'El Jadida).

### III.2- Température

Dans le bassin Sahel-Doukkala, la température semble être un facteur climatique beaucoup plus régulier que les précipitations (Ouadia, 1998).

La température moyenne annuelle est 17,7°C, avec un maximum de 21°C et un minimum de 14°C. La figure 9 montre que les moyennes mensuelles interannuelles les plus élevées, sont enregistrées aux mois de Juillet, Août et Septembre. Quant aux moyennes mensuelles interannuelles les plus faibles, sont enregistrées aux mois de Décembre, Janvier et Février.

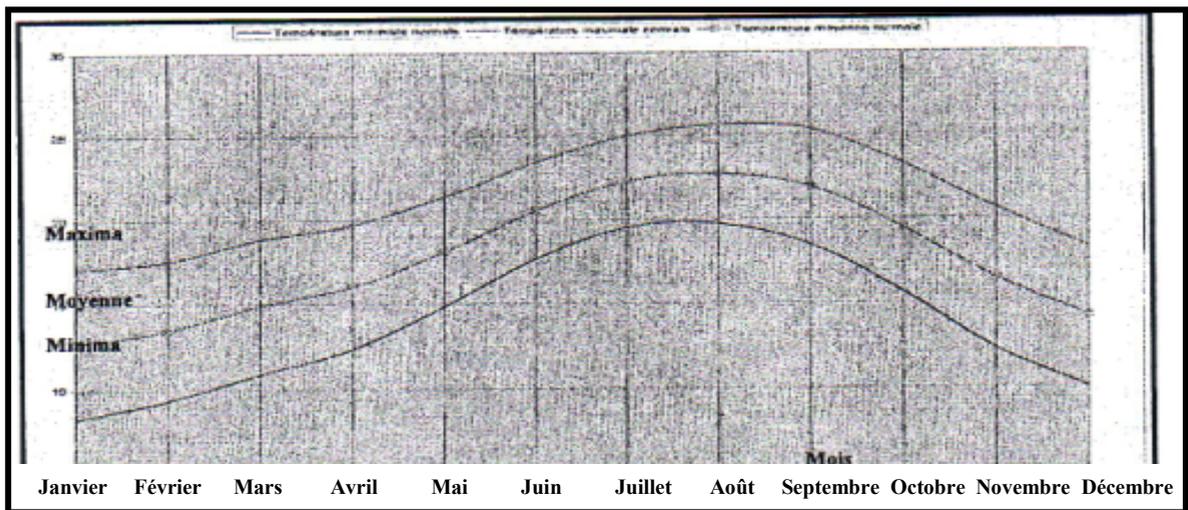


Figure 9 : Variation des températures moyennes mensuelles de 1977 à 2007 (Station météorologique d'El Jadida).

### III.3- Type de climat

Le report de la valeur calculée de l'indice de Maronne sur le graphique de la figure 10 montre que le climat de la région étudiée est du type semi-aride.

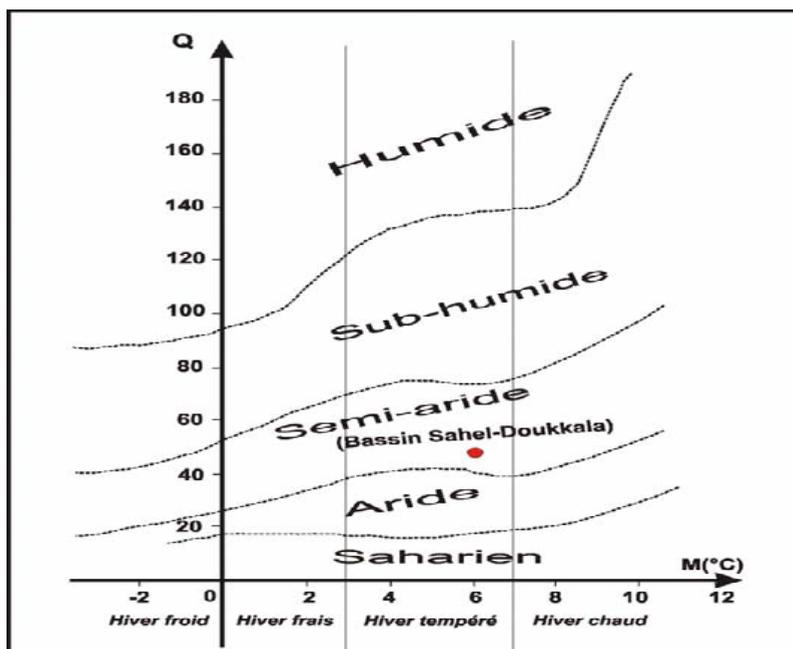


Figure 10 : Diagramme d'Emberge montrant les différents étages bioclimatiques du Sahel-Doukkala

Quant aux vents les plus fréquents dans la zone d'étude, ils proviennent principalement du Nord-Est et vont vers le Sud-Ouest, avec des vitesses modérées entre 3 et 6 m/s.

A l'issue de cette étude climatologique, il en ressort que la lame d'eau qui atteint réellement la nappe et permet son alimentation, est de l'ordre de 12 à 15 % des précipitations totales, soit 47 à 57 mm.

#### IV. Cadre géologique

Le Sahel-Doukkala fait partie de la grande unité géologique nommée « Méséta marocaine occidentale ». Celle-ci comporte des séries sédimentaires sub-tabulaires d'âge mésozoïque et cénozoïque reposant sur des terrains paléozoïques fortement plissés lors de l'orogénèse hercynienne (figure 11).

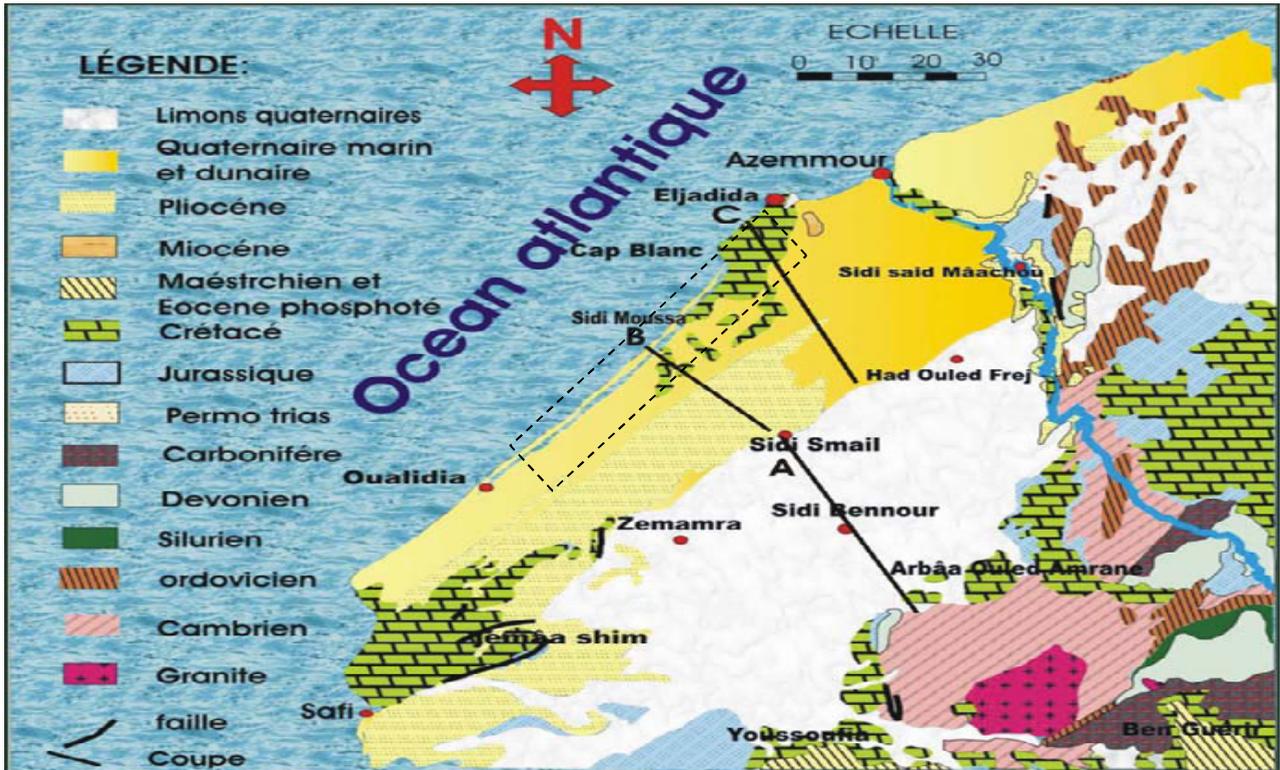


Figure 11 : Carte géologique simplifiée de la région étudiée (tirée de la carte géologique du Maroc à 1/1000000) (Laaziz, 2005).

#### IV.1 - Lithostratigraphie

Le domaine d'étude comporte deux entités géologiques bien différenciées (figure 12), le socle primaire et la couverture formée par des terrains secondaires, tertiaires et quaternaires.

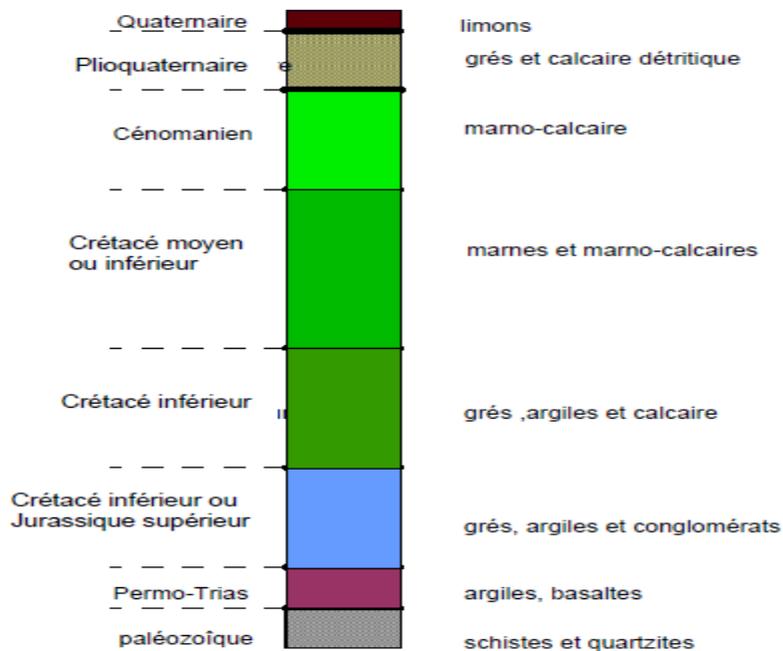


Figure 12 : Log stratigraphique synthétique du bassin Sahel-Doukkala (El Achheb, 1993).

#### **IV.1.1- Le Paléozoïque**

Il est constitué de schistes acadiens ou ordoviciens et de quartzites aux quelles s'associent des grès attribués à l'Acadien et à l'Ordovicien (El Achheb 2002). Les terrains primaires n'apparaissent que dans la portion la plus interne et la plus élevée (massif des Rehamna), notamment dans la vallée de l'Oum Erabia. Partout ailleurs, ils sont masqués par des dépôts postérieurs, à l'exception du pointement d'El Jadida où Yovanovich (1936) a signalé la présence d'une rhyolite surmontée par des dolomies attribuées au Cambrien (Gigout1952).

#### **IV.1.2- Le Permo-Trias**

Dans la plaine des Abda-Doukkala, le Permo-Trias apparaît dans la vallée de l'oued Oum-Erabia, sous forme de dépôts d'argile et de pélites rouges associées à des coulées basaltiques.

#### **IV.1.3- Le Jurassique**

Il est caractérisé par des calcaires et des marno-calcaires jaunâtres, avec la présence des lits argileux, contenant de nombreux bancs ou lentilles de gypses.

#### **IV.1.4- Le Crétacé**

Les dépôts crétacés sont importants pour l'hydrogéologie car ils forment le substratum des terrains plioquaternaires aquifères des Doukkala, et que certains niveaux renferment les nappes les plus importantes du Sahel.

Le Cénomaniens affleure au niveau des collines des Aounates, dans le sud et le sud-ouest d'El Jadida (zone étudiée) et à la base de la vallée de l'oued Oum-Erabia.

#### **IV.1.5- Le Tertiaire**

Le Miocène affleure au sud Est d'El Jadida, constitué essentiellement par des dépôts marno-sableux jaunes ou roses et des argiles rouges.

#### **IV.1.6- Le Plioquaternaire**

A cette époque une nouvelle transgression marine plus importante a recouvert presque toute la région et arrivée jusqu'aux pieds des R'hamna. La régression qui a suivie a été marquée par la formation des dunes côtières formées par le même matériel ce qui rendu difficile de distinguer entre les dépôts marins et dunaires. La puissance du Plioquaternaire est très variable, elle est de 10 à 60 m. Les différents faciès qui constituent les dépôts plioquaternaires sont :

- conglomérat grossiers qu caractérisent l'ancienne embouchure de Oum Erabia ;
- calcaires détritiques lumachéliques de couleur jaunâtre et très poreux ;
- sable jaune grossier ;
- calcaire recristallisés, très dur, presque blanc avec abandonce de ciment blanc ;
- calcaire à grain fin, sans fossiles, c'est le faciès dunaire du Sahel (El Achheb, 2002).

#### IV.1.7- Le Quaternaire

Les dépôts quaternaires sont divisés en deux types (Ouadia, 1998) :

- dépôts quaternaires littoraux essentiellement marins déposés sur la bande littorale atlantique. Ces formations sont constituées de bas en haut par :
  - conglomérat à galet et graviers assez arrondis ;
  - lumachelles à coquilles généralement brisées ;
  - calcarénite à ciment calcaire.
- les dépôts quaternaires de l'arrière pays : il y a deux formations, les limons inférieurs ou anciens et supérieurs ou récents ;

#### IV.1.8- Géologie de la région étudiée

Dans la région étudiée, nous pouvons distinguer deux entités caractérisée chacune par une lithostratigraphie : Zone 1 située entre El Jadida et Sidi Moussa et Zone 2 comprise entre Sidi Moussa et Oualidia.

##### a) Zone 1

Elle est caractérisée du bas vers le haut, par les formations stratigraphiques suivantes (figures 13):

- ✓ des rhyolites précambriennes qui affleurent à El Jadida (pointement d'El Jadida) ;

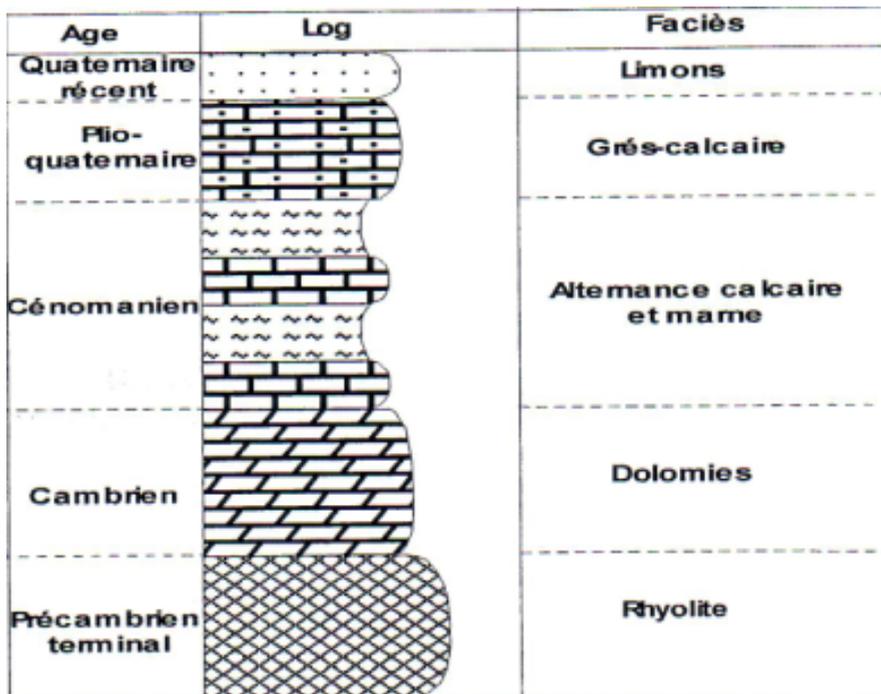


Figure 13 : Schéma montrant le log stratigraphique synthétique de la région d'El Jadida

- ✓ des terrains dolomitiques azoïques et monoclinaux, d'âge cambrien ;
- ✓ des intercalations de marnes et de calcaire fissurée ; d'âge cénomanien ;
- ✓ des formations calcaires d'âge quaternaire, à fissuration verticale.

## **b) Zone 2**

La description stratigraphique des terrains rencontrés au Sud Ouest de la zone (entre Sidi Moussa et Oualidia), peut être résumée du bas vers le haut comme suit :

- ✓ le Précambrien : de faciès rhyolitique ;
- ✓ le Cambrien : de faciès dolomitique ;
- ✓ le Crétacé inférieur : il est composé principalement par des niveaux d'argiles bleues d'âge hautérvien inférieur, des terrains calcaires fissurés d'âge hautérvien supérieur
- ✓ le Plioquaternaire : il est caractérisé par un faciès gréso-calcaire.

## **V. Hydrogéologie**

### ***V.1- Introduction***

Dans cette partie, nous allons décrire les caractéristiques hydrogéologiques des divers niveaux aquifères, nous pouvons par exemple citer la nature lithologique de ces terrains aquifères et celle du substratum, leur perméabilité, leur porosité efficace, écoulement ...

En effet, la perméabilité joue un rôle très important dans le mécanisme de migration du front salin et dans la propagation de tous les éléments chimiques polluants provenant soit du lessivage des engrais soit du lixiviat des décharges. Une faible perméabilité pourrait atténuer l'effet de contamination du système aquifère.

### ***V.2- Hydrogéologie de la région d'étude***

#### **V.2.1- Terrains aquifères de la région étudiée**

##### **↳ Le Plioquaternaire**

C'est un aquifère à porosité et perméabilité d'interstice constitué par des formations gréso-calcaires, déposés lors d'une série de transgression et de régression. Il renferme une nappe à surface libre. Son substratum correspond aux niveaux des argiles rouges l'Hautérvien supérieur. Toutefois, il joue le rôle d'un drain hydraulique, en se laissant ainsi traverser librement par les eaux pluviales, celles-ci permettent d'alimenter l'aquifère sous-jacent du Cénomaniens (figure 15).

##### **↳ Le Cénomaniens**

Il est constitué par des calcaires à perméabilité de fissures. Il contient une nappe libre, principalement exploitée dans la région côtière comprise entre El Jadida et Ouled Ghanem. Son substratum correspond aux dolomies cambriennes. Sa perméabilité dépend de son degré de fissuration.

##### **↳ L'Hautérvien**

C'est un aquifère à porosité et perméabilité de fissures. La nappe qui y circule, est captive. Le toit est formé par les argiles rouges de l'Hautérvien supérieur et le mur est constitué par les argiles bleues. Cet aquifère est principalement sollicité à des profondeurs importantes, dans la partie comprise entre Sidi Moussa et Oualidia, loin du rivage.

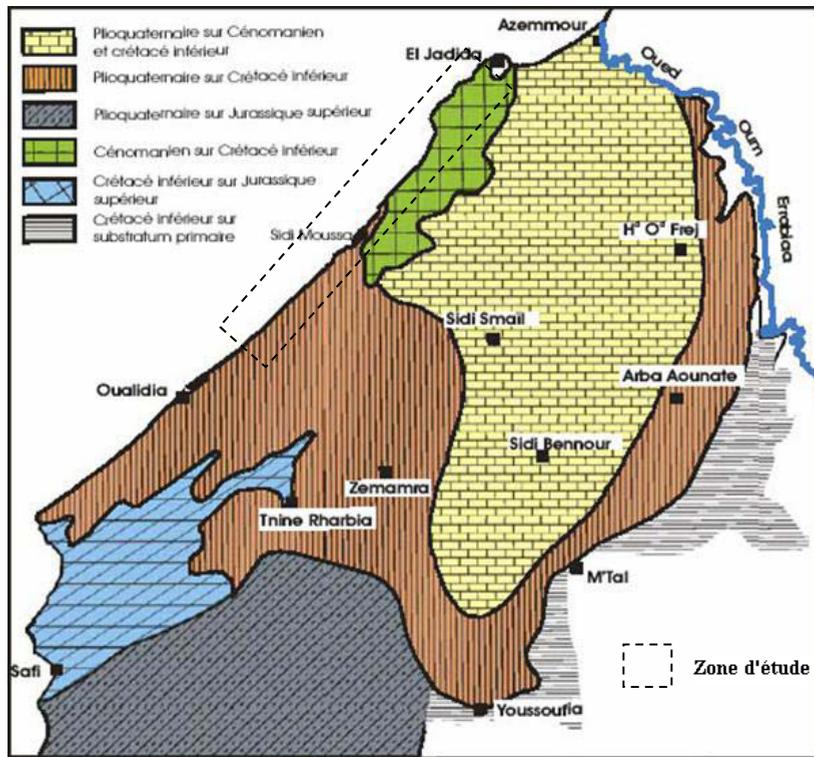


Figure 14 : Carte d'extension des principales formations aquifères (El Achheb, 2002).

# ***TROISIEMCHAPITRE***

---

**MISE EN EVIDENCE DE L'INTRUSION MARINE DANS LA  
ZONE D'ETUDE**

## V.2.2- Profondeur des eaux souterraines de la zone étudiée

### a) Réseau de mesure et relevés piézométriques

Dans le cadre de ce travail, nous avons effectué une sortie sur le terrain le 27/05/2010 (figure 16), et nous avons choisi 18 puits répartis sur trois alignements orthogonaux à la ligne de rivage (figure 17 et tableau 1). Ces puits sont destinés généralement à l'irrigation des cultures maraîchères et à l'abreuvement du cheptel et à l'alimentation de la population rurale.

Les relevés piézométriques ont été effectués sur ce réseau en utilisant le matériel suivant :

- Un GPS pour mesurer les coordonnées Lambert (X et Y) et l'altitude (Z).
- Une sonde piézométrique de 100 m pour déterminer les niveaux piézométriques.



Figure 15 : Photos montrant les mesures in situ et l'échantillonnage réalisés.



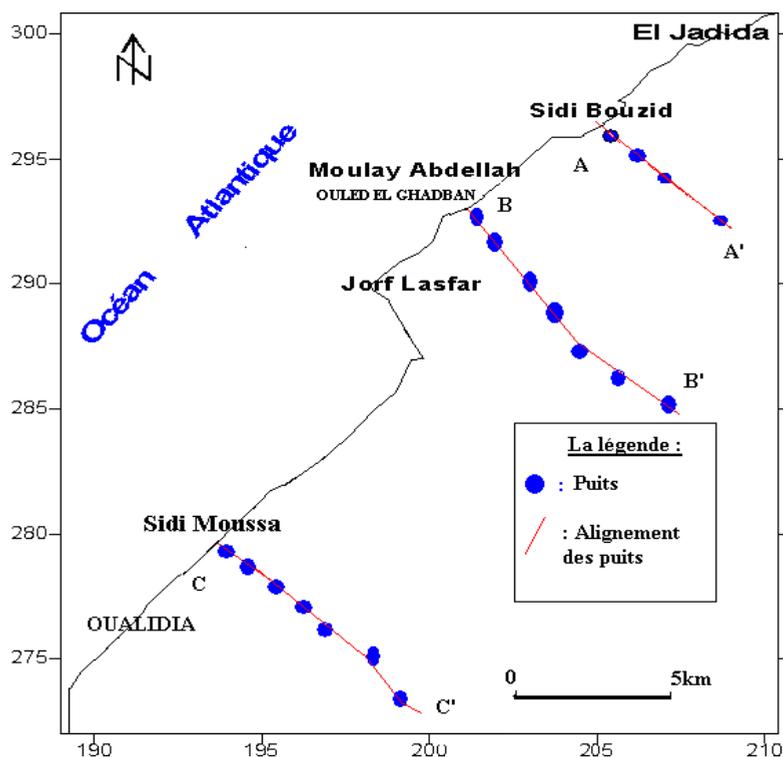


Figure 16 : Carte de situation géographique des puits suivis et des alignements choisis.

### *b) Profondeur des eaux souterraines*

L'étude de la profondeur de la surface piézométrique, a montré les résultats suivants :

- Pour la nappe cénomanienne (alignements AA' et BB') : la profondeur varie entre 6,10 m près de la côte et 42,5 m loin du rivage, avec une moyenne de 20.37 m.
- Pour la nappe plioquaternaire (alignements CC') : la profondeur ne dépasse pas 32 m.

Nous pouvons conclure que les deux nappes circulent à des profondeurs généralement faibles. Cela peut favoriser les phénomènes d'évaporation qui est facteur déterminant dans la concentration des sels dans les nappes libres, et rend par conséquent ces zones, des secteurs vulnérables à la pollution.

Les eaux souterraines de ces deux nappes circulent généralement du Sud-Est vers le Nord-Ouest, vers l'océan atlantique (exutoire principal de l'aquifère).

N° de puits	Coordonnées Lambert		Altitude (m)	Profondeur (m)	Distance à la mer (m)	Température (°C)	pH	CE (ms/cm)	Cl <sup>-</sup> (mg/l)	Ca <sup>2+</sup> (mg/l)	Mg <sup>2+</sup> (mg/l)	Alignements
	X	Y										
A1	33°13min128N	8°44min196N	14	9,8	250	20,9	7,39	2,81	660,3	168	30,15	SIDI BOUZID
A2	33°12min916N	8°34min986N	19	9,1	400	20,9	7,41	2,25	482,8	139,2	31,12	
A3	33°12min904N	8°33min945N	24	8,7	800	20,3	7,51	1,41	223,6	136	22,86	
A4	33°12min904N	8°33min876N	28	30	1000	21,5	7,6	1,26	216,5	184	44	
B1	33°10min627N	8°36min975W	9	En pompage	300	21	7,17	3,63	766,8	184	48,64	OULAD EL GHADBAN
B2	33°10min60N	8°37min500W	7	6,1	350	20,9	7,53	4	752,1	124	107	
B3	33°10min562N	8°36min958W	7	En pompage	450	21	7,13	3,54	731,3	176	48,64	
B4	33°10min528N	8°36min931W	9	En pompage	500	21,2	7,5	3,06	660,3	155,2	63,71	
B5	33°10min562N	8°36min803W	8	13,9	750	21,3	7,53	2,81	461,5	172,8	26,26	
B6	33°10min503N	8°36min725W	12	14,9	850	20,8	7,8	2,51	560,9	188	84	
B7	33°10min409N	8°36min454W	30	42,5	1200	21	7,54	4,25	1043,7	201	99	
C1	32°58min166N	8°45min988W	3	En pompage	200	20,5	7,26	5,61	1405,8	235,2	51,55	SIDI MOUSSA
C2	32°57min912N	8°45min950W	8	En pompage	300	21,8	7,65	3,41	745,5	187,2	66,15	
C3	32°57min824N	8°45min970W	9	En pompage	350	22,1	7,41	2,55	532,5	187,2	2,91	
C4	32°57min776N	8°45min777W	19	En pompage	500	22,2	7,51	2,35	493,4	156,8	11,67	
C5	32°57min821N	8°45min671W	31	En pompage	550	22,4	7,73	2,19	467,4	152,1	17,02	
C6	32°57min725N	8°45min564W	45	32	750	22,1	8,11	1,68	397,6	139,2	10,21	
C7	32°57min671N	8°54min438W	46	En pompage	850	23	7,47	2,02	386,9	187,2	6,8	

**Tableau 1** : Coordonnées et profondeur des puits échantillonnés dans le cadre du présent travail (campagne du mois de Mai 2010).

## I. Introduction

Dans cette partie portant sur la chimie des eaux de la région étudiée comprise entre El Jadida et Oualidia, nous allons définir les caractéristiques physico-chimiques des eaux souterraines circulant dans les terrains aquifères cénomaniens et plioquaternaires.

Pour répondre à cet objectif, nous avons effectué les travaux suivants :

- stage au sein du laboratoire de la station de traitement des eaux Sidi Daoui et visite du laboratoire de la RADEEJ ;
- campagne sur le terrain de mesures physiques in situ et de prélèvement d'échantillons d'eau de 18 puits ;
- analyses chimiques des échantillons d'eau ;
- interprétation des résultats physico-chimiques obtenus.

## II. Méthodologie de travail

### *II.1- Présentation de la station de Sidi Daoui et du laboratoire de la RADEEJ*



Le stage a été effectué au sein du laboratoire de la station de traitement des eaux Sidi Daoui qui appartient à l'Office National de l'Eau Potable (ONEP). Cette station est située à 27 km de la ville d'El Jadida et à 12 km d'Azemmour. Elle a été créée en 1953 par la société marocaine de distribution (SMD), dont le but d'approvisionner en eau potable la ville d'El Jadida, Azemmour, la pénitencerie agricole de l'Adir et le monde rural. En 1988, la SMD a cédé la station à l'Office National de l'Eau Potable, qui assure actuellement l'approvisionnement en eau potable, de la ville d'El Jadida, Azemmour, la pénitencerie agricole l'Adir, le grand complexe touristique de Mazagan et le monde rural, à partir de l'Oued Oum Erbia, par deux stations : station Daourat à partir du barrage El Massira et station Sidi Daoui par pompage direct à partir de l'Oued Oum-Erbia.

Le laboratoire d'analyse de la RADEEJ est située dans la ville d'El Jadida et fait plusieurs analyses physico-chimiques et bactériologiques de l'eau potable alimentant la ville d'El Jadida et Azemmour.

## ***II.2- Réseau de mesure et matériel utilisé***

Le même réseau des 18 puits (figure 17 et tableau 1) a aussi fait l'objet de prélèvements d'eau et de mesures physiques in situ. A cet effet, nous avons utilisé et manipulé le matériel suivant:

- Un conductivimètre multi-paramètres de type HACH, modèle 44600, pour mesurer la température et la conductivité électrique.
- Un pH-mètre WTW pH 522 avec électrode combinée pour mesurer le pH.

Les échantillons d'eau des 18 puits sont mis dans des flacons de 500 ml remplis à refus pour éviter les bulles d'air. Ces flacons ont été conservés à basse température (4°C) puis ramenés au laboratoire pour subir les analyses chimiques dans les 24 heures qui suivent. Ces analyses ont été effectuées au laboratoire de la RADEEJ et à la station de Sidi Daoui.

## ***II.3- Méthodes d'analyses***

### **II.3.1- Paramètres physiques**

Les analyses physiques ont été réalisés sur le terrain et ont porté sur les paramètres suivants : conductivité électrique, température et pH. La mesure de la température et de la conductivité électrique a été faite à l'aide d'un conductivimètre portable muni d'une électrode qu'on plonge dans un seau après l'avoir rincé et rempli d'eau à analyser. L'électrode doit être complètement immergée.

### **II.3.2- Paramètres chimiques**



Les analyses chimiques ont porté sur les paramètres suivants : chlorures, dureté de l'eau et calcium.

#### **a) Les chlorures (Cl)**

Le dosage des chlorures dans les eaux souterraines a été réalisé par la méthode volumétrique au nitrate mercurique en présence d'un indicateur coloré (le Diphénylcarbazonne). Le mode opératoire consiste à mettre dans un erlenmeyer :

- 100 ml d'eau du puits à analyser ;
- 0.5 ml du Diphénylcarbazonne ;
- 2 à 3 gouttes de l'acide nitrique pour l'obtention d'une couleur jaune ;
- Ajout du nitrate mercurique ( $\text{Hg NO}_3$ ) jusqu'au virage, de la couleur jaune à la couleur violet foncée ;

Pour trouver la concentration des chlorures contenue dans un échantillon d'eau, on note la valeur obtenue lors de l'apparition du violet et on la multiplie par 35,5 g (masse molaire du Cl<sup>-</sup>).

### **b) La dureté (calcium+magnésium)**

Le calcium et le magnésium présents dans l'eau sont complexés par l'EDTA. L'ajout de l'indicateur coloré, le noir d'Eriochrome T, donne une couleur rouge foncée ou violette en présence des ions calcium et magnésium.

A 100 ml d'eau à analyser, on ajoute 5 ml de la solution tampon, une petite spatule d'indicateur de noir Eriochrome et on titre par le EDTA au moyen de la solution complexométrique jusqu'au virage du rouge au bleu. Pour trouver la valeur exacte de la dureté de l'eau, nous avons utilisé la relation suivante :

$$TH = Tb * 0.4 \text{ (meq/l)}$$

TH : dureté de l'eau

Tb : tombée de burette

### **c) Le calcium (Ca<sup>2+</sup>)**

A 100 ml d'eau à analyser, on ajoute 5 ml de la solution de soude (NaOH), une petite spatule d'indicateur calcine HHSNN, et on titre au moyen de la solution complexométrique EDTA jusqu'au virage du rose au bleu royal. Pour obtenir la valeur du calcium en mg/l, nous avons utilisé la relation suivante :

$$\text{Calcium} = Tb * 8 \text{ (mg/l)}$$

### **d) Le magnésium (Mg<sup>2+</sup>)**

Après avoir déterminé la valeur du calcium, nous avons pu obtenir la concentration du magnésium contenue dans le même échantillon, par la relation suivante :

$$\text{Magnésium} = (Tb_{TH} - Tb_{Ca^{2+}}) * 12,16 * 0,4$$

## **III. Résultats et discussions**

### ***III.1- Analyse des résultats physico-chimiques***

#### **III.1.1- Conductivité électrique**

La conductivité électrique d'une eau est la conductance (inverse de la résistance). Elle est fonction de la concentration totale en ions dans l'eau, de leur mobilité, de leur valence et de la température. C'est un paramètre très important qui permet d'avoir rapidement une idée précise sur la minéralisation globale de l'eau.

Les valeurs de la conductivité électriques des eaux souterraines dans la zone d'étude varient entre 1.26 mS/cm dans la partie amont et 5.61 mS/cm en bordure de la mer. La valeur moyenne est de l'ordre de 2.85 mS/cm.

### **III.1.2- Température**

La température est le paramètre essentiel dans le fonctionnement des systèmes aquifères (Lallahem, 2002). Elle joue un rôle important dans la solubilité des sels et surtout des gaz et conditionne les équilibres de dissociation. Elle agit sur la conductivité électrique et le pH et permet la connaissance de l'origine des eaux souterraines et des éventuels mélanges. Elle est aussi très utile pour les études limnologiques.

Les valeurs de la température varient entre 20,3 et 23 °C avec une moyenne de 21,3 °C. Tous les puits mesurés ont presque les mêmes grandeurs de température. En effet la majorité des puits présentent des profondeurs faibles, ce qui pourrait engendrer une concentration des eaux en sels par le phénomène d'évaporation (Younsi, 2001).

### **III.1.3- pH**

Le pH d'une eau est une indication de sa tendance à être acide ou alcaline et il est fonction de l'activité des ions hydrogènes  $H^+$  présents dans cette eau.

Le pH mesuré sur le terrain est généralement compris entre 7 et 8 avec un minimum de 7,13 et un maximum de 8,11 (puits à Sidi Moussa). Nous pouvons remarquer que les eaux souterraines de la région sont généralement neutres.

### **III.1.4- Chlorures (Cl)**

Ils accusent des concentrations qui diminuent au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la ligne du rivage. Ces concentrations s'échelonnent entre un minimum de 216,5 mg/l et un maximum de 1405,8 mg/l, avec une moyenne de l'ordre de 610.49 mg/l.

### **III.1.5- Calcium ( $Ca^{2+}$ ) et magnésium ( $Mg^{2+}$ )**

Généralement, les concentrations en calcium et magnésium sont très variables dans l'espace et d'un alignement à l'autre. Elles oscillent entre un minimum de 124 et 2,91 mg/l et un maximum de 235,2 et 107 mg/l respectivement en calcium et en magnésium. Les fortes teneurs en magnésium sont observées en bordure de la mer, contrairement à celles du calcium qui sont obtenues généralement au niveau des puits se trouvant en amont.

## ***III.2- Aspect qualitatif des eaux des puits suivis***

Tous les résultats physico-chimiques des 18 puits analysés ont été comparés avec les normes de potabilité édictées par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS, 1985), dans le but de se prononcer sur leur potabilité. Les résultats de cette comparaison sont consignés dans le tableau 2, sous forme de pourcentages. Il en ressort que la majorité des puits ont une conductivité électrique et des concentrations en chlorures qui dépassent les normes, ce qui rend les eaux de ces puits impropres à la consommation humaine.

Paramètre	Normes de potabilité OMS (1985)	% des puits dépassant les normes OMS
Cl <sup>-</sup>	200 mg/l	100%
Mg <sup>2+</sup>	50 mg/l	22,22%
Ca <sup>2+</sup>	270 mg/l	0%
CE	2.1 mS/cm	83.33%
pH	6,5 = pH = 9,2	0%

Tableau 2 : Aspect qualitatif des eaux des puits étudiés.

### III.3- Mise en évidence des mécanismes d'intrusion marine

#### Introduction

Pour montrer l'influence de l'éloignement de la côte sur la qualité de l'eau souterraine, nous avons effectué en Mai 2010 des analyses d'eaux souterraines prélevées des 18 puits répartis sur 3 alignements perpendiculaires à la côte (figure 17).

#### III.3.1- Conductivité électrique (CE)

Pour visualiser la minéralisation des eaux de la nappe dans notre zone d'étude, nous avons pu tracer des courbes de conductivité électrique du secteur de travail (figures 18, 19 et 20). L'analyse de ces courbes montre que la conductivité électrique des puits augmente au fur et à mesure que l'on se dirige vers la mer.

#### ❖ Sidi Bouzid

Dans cette région, la CE varie de 1.26 mS/cm à l'amont (à plus de 1 km par rapport au rivage) jusqu'à 2.81 mS/cm à moins de 250 m du rivage. Ceci dénote une éventuelle intrusion marine vers les eaux de la nappe (figure 18).

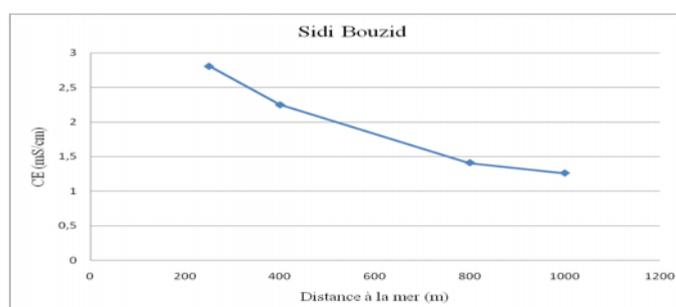


Figure 17 : Evolution de la conductivité électrique en fonction de la distance à la mer (Sidi Bouzid).

#### ❖ Ouled El Ghaban

Dans cette zone, les CE mesurées sur le terrain varient entre un minimum de 2.51 mS/cm à l'amont (figure 19) et un maximum de 4 mS/cm à proximité de la mer (moins de 300 m).

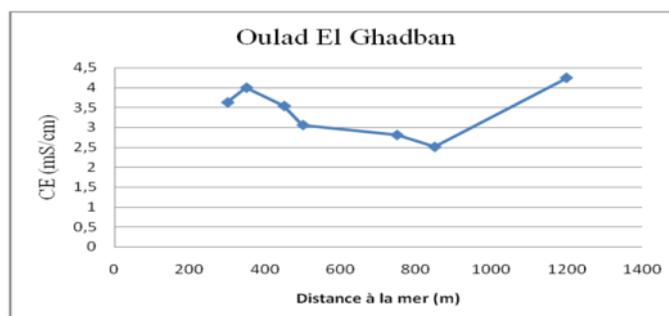


Figure 18 : Evolution de la conductivité électrique en fonction de la distance à la mer (Oulad El Ghadban).

**N.B** : Le puit N° 7 présente une anomalie qui ici indiquée par ce pic, et qui est due à une contamination de ce puit par des hydrocarbures issues de la pompe.

#### ❖ Sidi Moussa

A Sidi Moussa où l'on note des pompages intensifs des eaux souterraines pour l'irrigation des cultures maraîchères, l'évolution de la CE en profondeur a montré une diminution générale au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la côte (figure 20). A moins de 200 m de la ligne du rivage, la CE atteint 5.61 mS/cm, quant à la faible valeur, elle a été observée à l'extrême amont, elle est de 1.68 mS/cm.



Figure 19 : Evolution de la conductivité électrique en fonction de la distance à la mer (Sidi Moussa).

### III.3.2- Traceurs chimiques de la salinité des eaux souterraines

#### a) Evolution des chlorures en fonction de la distance à la mer

Les chlorures sont considérés comme les meilleurs traceurs d'une pollution par intrusion marine car ils se trouvent à des concentrations élevées dans les eaux de mer (19 à 20g/l) et ils ne subissent pas de transformations lors de leur transport. Les autres éléments sont aussi caractéristiques des mélanges eau douce- eau de mer (Younsi, 2001).

Les courbes de la figure 21, montrent que les teneurs en chlorures augmentent de façon générale en se dirigeant vers la mer. A proximité de celle-ci, les concentrations atteignent 660 mg/l pour l'alignement de Sidi Bouzid, 766 mg/l au niveau de l'alignement d'Oulad El Ghadban et 1405 mg/l à Sidi Moussa. Cette augmentation de la charge chlorurée des eaux en direction de la mer dénote une forte contribution des venues d'eau marine vers les nappes côtières sollicitées par des pompages intensifs pour l'irrigation et l'alimentation.

Les teneurs faibles sont observées à l'extrême amont, à des distances importantes du rivage, elles oscillent autour de la teneur moyenne de 200 mg/l.

En conclusion, cette évolution en profondeur des teneurs en chlorures est similaire à celle de la conductivité électrique, ce qui montre que celle-ci est déterminée essentiellement par les chlorures. Ces derniers peuvent provenir des sources potentielles suivantes :

- Une intrusion marine dans la bande littorale, le premier kilomètre.
- Lessivage des cristaux de sels des aérosols et embruns marins déposés sur le sol côtier.
- Recyclage des eaux d'irrigation à forte charge saline.

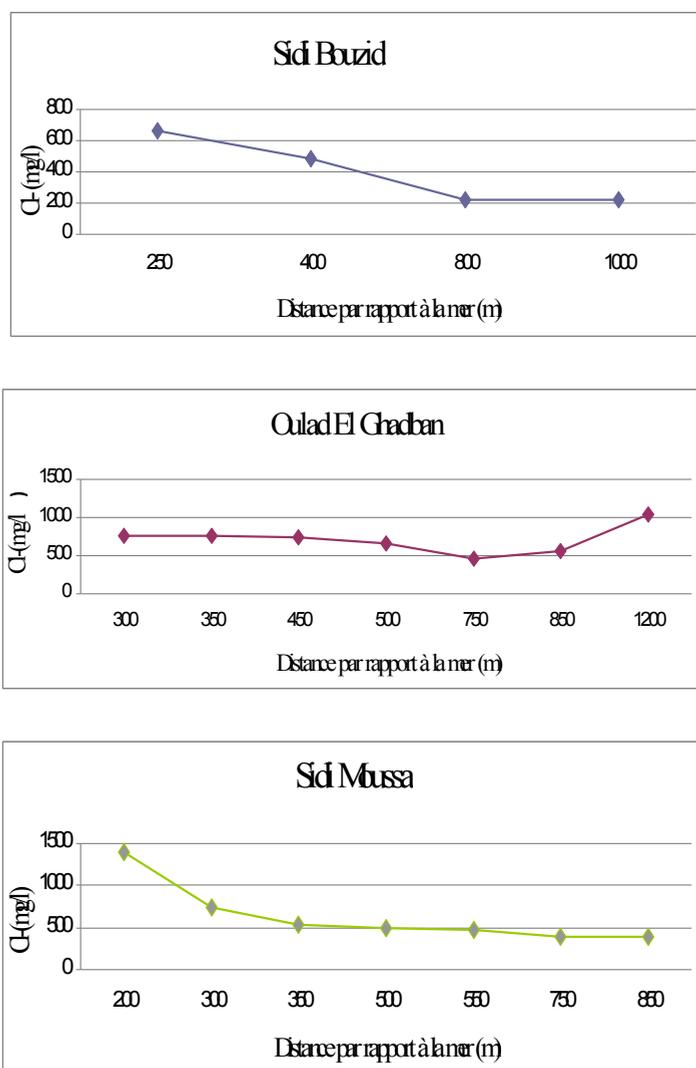


Figure 20 : Evolution des chlorures en fonction de la distance à la mer.

## b) Evolution du calcium et magnésium en fonction de la distance à la mer

Le calcium est un élément caractérisant les eaux douces ; il est lié généralement au lessivage des formations carbonatées. Dans la région étudiée, il provient de la dissolution des aquifères carbonatés du Plioquaternaire et du Cénomaniens (calcaire marneux et calcaire détritique). Par contre, le magnésium a pour origine principale le mélange des eaux salées marines riches en cet élément avec les eaux de la nappe.

L'examen des courbes des figures 22 et 23 montre que les concentrations du calcium varient de 124mg/l à côté de la mer à 235,2 mg/l vers l'amont et que celles du magnésium augmente de 2,91 mg/l vers l'amont jusqu'à 107 mg/l vers la mer. Ceci montre bien que l'eau douce naturelle non polluée est riche en calcium et très pauvre en magnésium, l'inverse pour l'eau polluée par l'eau de mer.

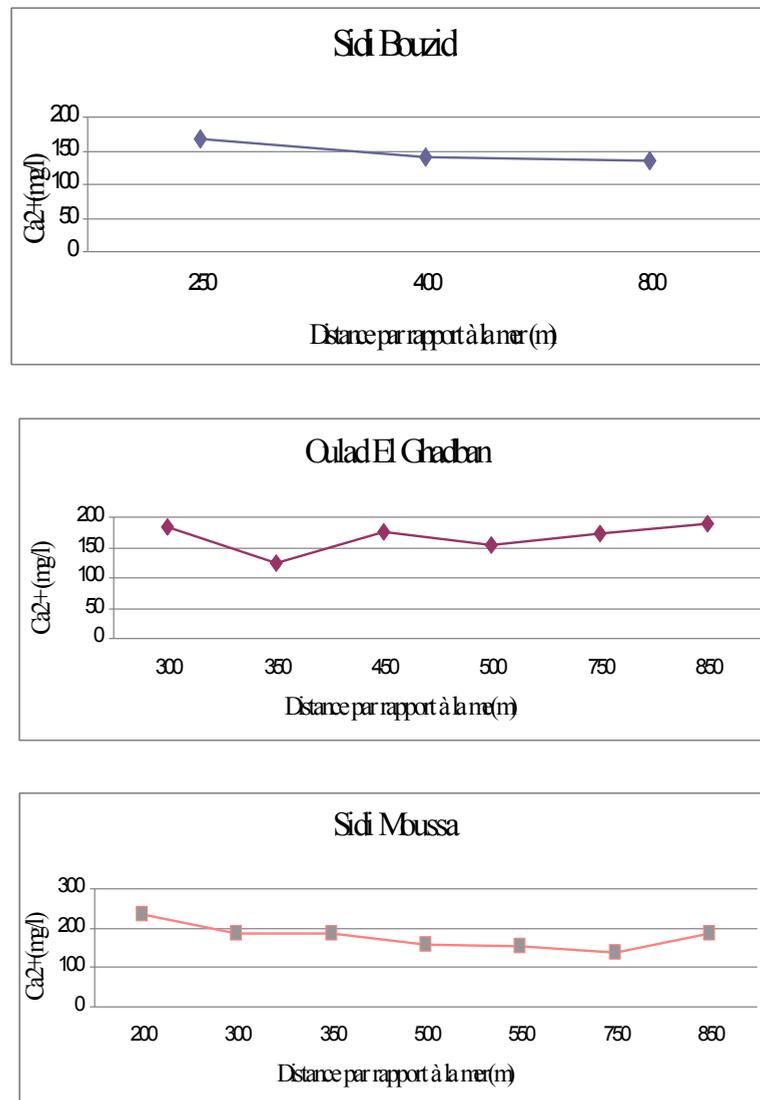


Figure 21 : Evolution du calcium en fonction de la distance à la mer.

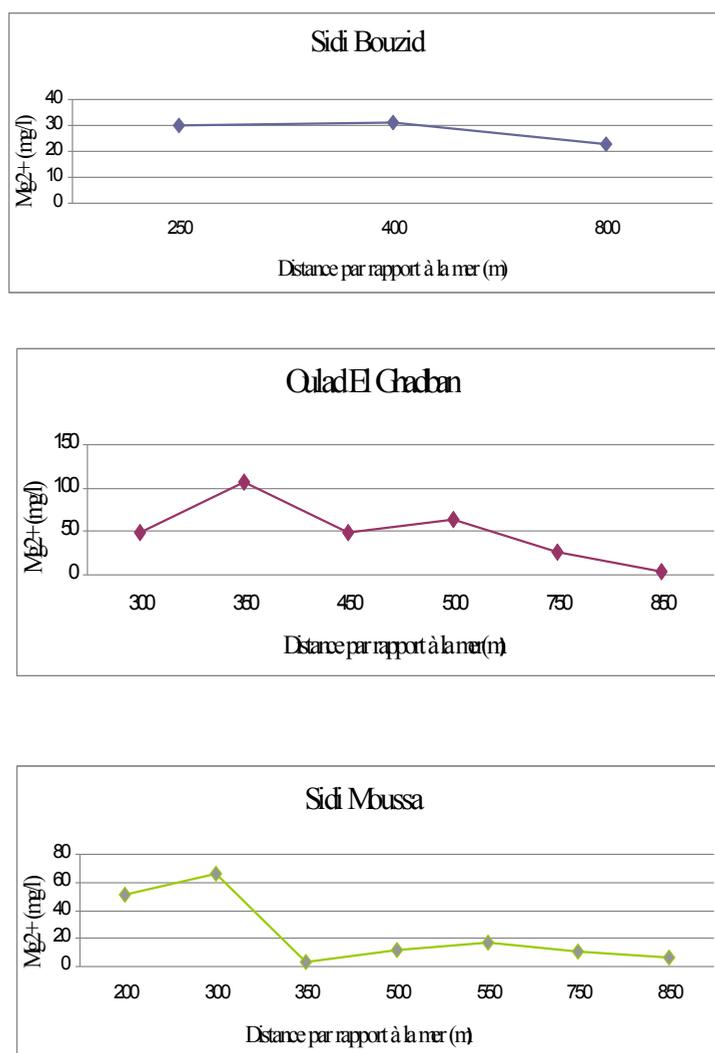


Figure 22 : Evolution du magnésium en fonction de la distance à la mer.

#### IV. Conclusion

Les différentes courbes d'évolution des CE, Cl<sup>-</sup>, Ca<sup>2+</sup> et Mg<sup>2+</sup> montrent que ces éléments accusent des valeurs importantes dans les eaux souterraines étudiées. L'évolution spatiale de ces éléments en direction de la mer, montre que les valeurs de CE, deviennent de plus en plus élevées. Ceci indique une potentielle invasion marine vers l'aquifère côtier. Ce phénomène est favorisé par les pompages intensifs des nappes côtières surtout pendant les périodes sèches, la topographie du substratum qui plonge en dessous du niveau de la mer, la perméabilité de l'aquifère, la faible épaisseur de la zone saturée et la faible productivité aquifère dans ces secteurs côtiers.

## **CONCLUSIONS GENERALES ET RECOMMADATIONS**

L'utilisation des traceurs de salinisation (CE, Cl<sup>-</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>) a montré une meilleure adaptation de ces outils à un aquifère côtier, vulnérable et surexploité, en zone agricole et semi-aride.

Plusieurs sources de salinisation des eaux souterraines ont été énumérées dont la plus importante correspond au phénomène de l'intrusion de la nappe par des eaux marines salées. Ce phénomène peut être favorisé par les pompages intensifs et fréquents dans l'aquifère côtier, la bonne perméabilité et la côte du substratum inférieure au zéro marin. Cette surexploitation de la nappe est à la suite de l'intensification des superficies irriguées et à l'essor démographique important dans cette zone côtière.

A des distances supérieures à 2 km de la côte, les sources potentielles des fortes salinités liées surtout aux chlorures, sont plutôt naturelles (embruns marins lessivés par les eaux d'infiltration) et anthropiques (fertilisants et pesticides lessivés par les retours d'eau vers la nappe), ou une combinaison de celles-ci avec la source marine. Les incidences de ce phénomène de recyclage des eaux de drainage sont accentuées par celui d'évaporation. Ces deux phénomènes sont favorisés par la faible profondeur de la nappe surtout dans les secteurs côtiers et la partie orientale.

L'étude de la source potentielle des fortes salinités liée aux intrusions marines, a montré une chute importante de la charge saline avec la distance à la mer.

## **RECOMMANDATIONS**

Un certain nombre de recommandations peuvent être proposées afin de stopper la dégradation des eaux souterraines et de mettre en place un dispositif de surveillance, ainsi :

- arrêter immédiatement les nouveaux creusements de puits dans les secteurs côtiers surtout de la partie SW où l'intrusion marine est incontestée et modérer les pompages dans les puits déjà existants dans ces mêmes secteurs ;

- installer un réseau de piézomètres sans pompage le long de la côte pour contrôler la progression du biseau d'eau salée vers les terres. Ces puits témoins doivent être parfaits et les mesures à effectuer sont la piézométrie, les isotopes stables, les traceurs de pollution (Cl<sup>-</sup>, Br<sup>-</sup>, leur rapport, ..). Dans le cas d'une intrusion marine incontestée, il faut réaliser des profils en profondeur de la salinité ;

- effectuer des enquêtes exhaustives chaque année pour estimer les superficies irriguées et les débits des pompages et établir des cartes de distribution spatiale de ces superficies et débits. Ceci pourrait aider à exiger une autorisation pour tout nouveau futur creusement de puits et à regrouper éventuellement les agriculteurs sous forme de petites associations ayant chacune un puits ou deux pour une bonne gestion des ressources en eau ;

- adopter de nouvelles techniques d'irrigation (le goutte à goutte par exemple) plus économiques de l'eau (pas de pertes par évaporation, fuites,...) que le système « gravitaire », le plus répandu dans la région. A cet effet, il faut prévoir des aides financières pour l'agriculteur ;

- améliorer le réseau des observations météorologiques qui ont un rôle primordial dans la région et installer des lysimètres pour étudier l'infiltration efficace et les processus de migration des sels vers la nappe ;

- raisonner les apports en engrais azotés pour éviter les surfertilisations très répandues dans la région ;

- éviter de laisser les sols nus pendant plusieurs mois par l'étude de nouveaux plans d'assolement ;

- maîtriser le stockage et l'utilisation des déjections animales ;

- examiner les possibilités et les moyens de recharger la nappe en commençant par effectuer des études géologiques, géophysiques et hydrogéologiques plus détaillées de cet aquifère hétérogène. Cette recharge pourrait être effectuée soit à partir des eaux de l'oued Oum-er-Rbia, soit à partir des eaux usées épurées. Ces données vont servir à améliorer le calage du modèle hydrodynamique et hydrodispersif très utile pour simuler de nouveaux scénarios d'exploitation et simuler la propagation des polluants vers la nappe à court et à moyen terme.



## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

**Andreasen D.C et Flek W .B., (1992)-** Use of bromide : chloride ratio to differentiate potential sources of chlorides in a shallow, unconfined aquifer affected by brackish – water intrusion. Hydrogeology journal, V .5n°, 1997.

**Chofqui A., (2004) -** Mise en évidence des mécanismes de contamination des eaux souterraines par les lixiviats d'une décharge incontrôlée (El Jadida-Maroc) Géologie, Hydrogéologie, Géoelectricité, Géochimie et Epidemiologie.Doc Univer.

**El achhab A. (1993) -** Etude hydrogéologique et hydrochimique de la plaine des Doukkala. Thèse de 3<sup>ème</sup> cycle, Fac. Sc. Semlalià-Marrakech.

**El achhab A., (2002) \_**Contribution a l'étude de la minéralisation et identification des sources de contamination des eaux souterraines. Application au système aquifère du bassin Sahel Doukkala (Maroc). Doctorat d'Etat. Université Chouaib.

**Ferré M. et Ruhard J.P. (1975) -** Ressources en eau t. 2, (Plaines et bassins du Maroc atlantique) ; les bassins des Abda-Doukkala et du Sahel d'Azemmour à Safi. Not. Mém. Serv. Géol. Maroc, n°231, pp. 261-298.

**Gigout M. (1952) -** Les ressources en eau souterraine des Doukkala et Abda (Maroc Occidental) Rapp. Inéd., seconde thèse.

**Hsissou Y., (1999) -** Impact de l'environnement naturel et anthropique sur la qualité des eaux alluviales en zone semi aride : cas de la plaine de Souss (Maroc) . Thèse d'état, Faculté des Sciences Agadir.

**Laaziz Y. (2005) -** Synthèse des études relatives aux formations Sahel-Doukkala (lithostratigraphie et géologie).Rapport inéd. D.E.S.A., Faculté des Sciences, El Jadida.

**Lallahem S. (2002) -** Structure et modélisation hydrodynamique des eaux souterraines : applications à l'aquifère crayeux de la bordure Nord du bassin de Paris. Doc. Univ, EUDIL. Lille. France, 218p.

**Ouadia M. (1998) -** Les formations plio-quatérnaires dans le domaine mésétien occidental entre Casablanca et Safi: Géomorphologie, Sédimentologie, Paléoenvironnements quaternaires et Evolution actuelle. Thèse d'Etat es Sciences. Univ. Mohammed V. Rabat, 319 p.

**Younsi A. K. (2001) -** Méthodologie de mise en évidence des mécanismes de salure des eaux souterraines côtières en zone semi-aride irriguée (Chaouia côtière, Maroc). Thèse de Doctorat d'Etat es Science, Univ. Chouaib Doukkali, El Jadida.

## Liste des illustrations

- Figure 1 : Sources potentielles des salinités des eaux souterraines côtières (Yousi, 2001).
- Figure 2 : Représentation Schématique de l'interface « eau douce-eau salée ».
- Figure 3 : Dissolution des sels issus des embruns marins (Younsi, 2001).
- Figure 4 : Source naturelle de salinité des eaux souterraines : lixiviation.
- Figure 5 : Sources naturelles et anthropiques de salinité : évaporation et recyclage des eaux d'irrigation.
- Figure 6 : Situation géographique de la région d'étude.
- Figure 7 : Géomorphologie et hydrologie du bassin Sahel-Doukkala (d'après l'esquisse géomorphologique de Ferré et Ruhard, 1975).
- Figure 8 : Variation des précipitations moyennes mensuelles de 1977 à 2007 (Station météorologique d'El Jadida).
- Figure 9 : Variation des températures moyennes mensuelles de 1977 à 2007 (Station météorologique d'El Jadida).
- Figure 10 : Diagramme d'Emberge montrant les différents étages bioclimatiques du Sahel-Doukkala
- Figure 11 : Carte géologique simplifiée de la région étudiée (d'après la carte géologique du Maroc à 1/1000000) (Laaziz, 2005).
- Figure 12 : Log stratigraphique synthétique du bassin Sahel-Doukkala (El Achheb, 1993).
- Figure 13 : Schéma montrant le log stratigraphique synthétique de la zone d'El Jadida.
- Figure 14 : Carte d'extension des principales formations aquifères (El Achheb, 2002)
- Figure 15 : Photos montrant les mesures in situ et l'échantillonnage.
- Figure 16 : Carte de situation géographique des puits suivis et des alignements choisis.
- Tableau 1 : Coordonnées et profondeur des puits choisis (campagne de Mai 2010).
- Tableau 2 : Aspect qualitatif des eaux des puits étudiés.
- Figure 17 : Evolution de la conductivité électrique en fonction de la distance à la mer (Sidi Bouzid).
- Figure 18 : Evolution de la conductivité électrique en fonction de la distance à la mer (Oulad El Ghadban).
- Figure 19 : Evolution de la conductivité électrique en fonction de la distance à la mer (Sidi Moussa).
- Figure 20 : Evolution des chlorures en fonction de la distance à la mer.
- Figure 21 : Evolution du calcium en fonction de la distance à la mer.
- Figure 22 : Evolution du magnésium en fonction de la distance à la mer.