

Higher National School of Hydraulic

The Library

Digital Repository of ENSH



المدرسة الوطنية العليا للري

المكتبة

المستودع الرقمي للمدرسة العليا للري



The title (العنوان):

Etat de la pollution des nappes aquifères du bassin
Mediterraneen contaminees par les eaux de mer.

The paper document Shelf mark (الشفرة) : 6-0017-17

APA Citation (توثيق APA):

Chaoua, Ouissem (2017). Etat de la pollution des nappes aquifères du bassin
Mediterraneen contaminees par les eaux de mer[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Digital Repository of ENSH aims to limit scientific production, whether published or unpublished (theses, pedagogical publications, periodical articles, books...)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 بثه 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

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Département Hydraulique Urbaine

MEMOIRE DE MASTER

Pour l'obtention du diplôme de Master en Hydraulique

OPTION : Conception Des Systèmes d'alimentation en eau potable

THEME :

Etat de la pollution des nappes aquifères du bassin méditerranéen contaminées par les eaux de mer

Présenté par :

Melle : CHAOUA OUISSEM

DEVANT LES MEMBRES DE JURY:

	Nom et Prénom	Grade	Qualité
M^{me}	MEDDI Hind	M.C.A	Présidente
M^r	AMMARI Abdelhadi	M.C.B	Membre
M^r	BOUFEKANE Abelmadjid	M.A.A	Membre
M^{me}	HOULI Samia	M.A.A	Membre
M^{me}	DJOUDAR Dahbia	M.C.B	Promotrice

Avril 2017

Dédicace

Je dédie ce modeste travail ma chère mère,

à mon père qui m'ont toujours soutenu

Et aidé à affronter les difficultés,

Et spécialement à ma sœur « AMINA »

À mes très chères sœurs et à mes chers frères, à toute ma famille

Pour tous ce qui ont fait pour que je puisse les honorer, et leur

patience durant ma vie.

REMERCIEMENTS :

Avant tout, je remercie DIEU qui a illuminé mon chemin et qui m'a armé de courage pour achever mes études.

Mes remerciements aussi a :

Très spécialement ma sœur, ma deuxième maman « **Amina** » qui a toujours été mon ange gardien, mon âme sœur. Sa tendresse, son attention mon toujours comblé.

Ma mère, son sacrifice, son affection profonde m'ont permis de devenir ce que je suis. **A mon père**, mon idole, mon guide, mes exemples de courage, je ne saurais jamais exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours eu pour toi.

Je remercie mes frères Yazid, Nadir et Abderrahmane, et ma sœur Naouel pour leurs encouragements.

Un grand MERCI à ma promotrice : **Mme D.DJOU DAR** de m'avoir orienté par ses conseils judicieux dans le but de mener à bien ce travail.

Mes remerciements vont enfin à toute personne qui a contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

ملخص

تخضع المناطق الساحلية للبحر الأبيض المتوسط لتأثيرات المناخ والضغطات البشرية. في حالة المياه الجوفية الساحلية فإن أبرز المخاطر الناجمة عن ذلك هو خطر تسرب مياه البحر. في هذه الدراسة قمنا بجمع نتائج تطبيق عدة منهجيات هيدروديناميكية, هيدروكيميائية والنظائر على المياه الجوفية الساحلية لبعض دول البحر الأبيض المتوسط من أجل تحديد حالة تسرب مياه البحر في هاته السنوات الأخيرة و ذلك لمقارنة مدى خطورة هذه الظاهرة بين ضفتي الشمال والجنوب للبحر الأبيض المتوسط. من خلال هذا البحث المتواضع تمكنا من تسليط الضوء على خطورة هذه الظاهرة على الضفة الجنوبية أكثر مما كانت عليه في الشاطئ الشمالي للبحر الأبيض المتوسط. **الكلمات المفتاحية:** المناطق الساحلية للبحر الأبيض المتوسط, تسرب مياه البحر, هيدروديناميكية, هيدروكيميائية, النظائر, المقارنة, شمال/جنوب البحر الأبيض المتوسط.

Résumé

Les zones littorales méditerranéennes sont soumises aux incidences des conditions climatiques et des pressions anthropiques. Dans le cas des aquifères côtières, la vulnérabilité qui en découle est accentuée par le risque de l'intrusion marine.

Dans cette étude il est nécessaire de rassembler les résultats de l'application conjointe de plusieurs méthodologies hydrodynamiques, hydrochimiques et isotopiques aux aquifères côtières de quelques pays du pourtour méditerranéen pour établir l'état de l'intrusion marine durant ces dernières années. Et ce pour mettre en évidence l'ampleur de ce phénomène par une étude comparative entre les deux rives nord et sud de la méditerranée.

A travers cette modeste recherche nous avons pu mettre en exergue la gravité de ce phénomène au niveau de la rive sud plus qu'au niveau de la rive nord de la méditerranée

Mot clés : Littorales méditerranéennes, intrusion marine, hydrodynamiques, hydrochimiques, isotopiques, étude comparative, Nord/Sud méditerrané.

Abstract

The Mediterranean coastal areas are submitted to high climatic and human constraints. In the case of coastal aquifers, their vulnerability is enhanced by marine intrusion risks.

In this study, we collect the results of a multidisciplinary study based on hydrodynamic, hydrochemical and isotopic approaches to the coastal aquifers of some Mediterranean countries to establish the state of marine intrusion in recent years. The study aims also to make a comparative analysis of the vulnerability of this phenomenon between the northern and southern shores of the Mediterranean basin.

Through this modest research we have been able to highlight the gravity of this phenomenon at the level of the southern shore more than at the level of the northern shore of the Mediterranean.

Keywords: Mediterranean coastal, marine intrusion, hydrodynamic, hydrochemical, isotopic, comparative analysis, North/South Mediterranean

SOMMAIRE:	PAGES
INTRODUCTION GENERALE	
CHAPITRE I : Spécifique et problématiques des aquifères côtiers méditerranéens	
I.1 Intrusion marine	1
I.2 Origines de l'intrusion marine en zone côtière	2
I.2.1. Changement climatique	2
I.2.2. Le facteur anthropique	3
2.2.1. Pompages excessifs	3
2.2.2. Puits mal positionné	4
I.2.3. Facteur géologique	5
I.3 Modélisation de la sensibilité des aquifères côtiers à l'échelle métropolitaine	5
I.4 Indicateurs de caractérisation de la salinité	6
I.4.1. Conductivité électrique, résistivité électrique et salinité	7
I.4.2. Ratios molaires entre substances chimiques	8
I.4.3. Diagrammes	9
I.4.5. Eléments traces et indicateurs isotopiques	10
I.4.6. Méthodes géophysiques	10
I.5 Impact de l'intrusion marine :	10
I.5.1 Effet sur l'économie	10
I.5.2 Effet sur la santé des consommateurs	11
I.6 Conclusion	12
CHAPITRE II : Etude bibliographique	
II.1 Introduction	13
II.1 Le Maroc	14
II.1.1 Évaluation de la vulnérabilité à l'intrusion marine de la nappe phréatique de Smir	14
II.1.2 L'application de la méthode de GALDIT aux aquifères de Smir	15
II.2 Algérie	18
II.2.1 La baie d'Alger (la Mitidja Orientale)	18
II.2.2 La nappe de Guerbes (Annaba)	21

2.2.1 Suivi de la conductivité	22
2.2.2 La méthode des rapports	22
II.3 Tunisie	24
II.3.1 La plaine du Cap Bon	24
II.3.2 La Côte orientale	24
3.2.1 Suivi du niveau piézométrique	25
3.2.1 Suivi de la salinité en profondeur	25
3.2.3 Suivi des résistivités	26
3.2.4 Suivi des Chlorures	26
II.4 Lybie	27
II.4.1 La plaine de Jifarah	27
II.5 Palestine	30
II.5.1 La nappe phréatique de Gaza	30
II.6 Italie	33
II.6.1 Source de la Mortola	33
II.7 Espagne	36
II.7.1 L'aquifère de Motril-Salobreña	36
II.8 Conclusion	39

CHAPITRE III : Etude comparative entre les deux rives Nord/Sud

III.1 Introduction	40
III.2 Changement climatique	40
III.3 Le dynamique démographique	46
III.4 Demande en eau	48
III.5 L'exploitation des ressources en eau	51
III.6 Conclusion	54

CONCLUSION GENERALE

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

LISTE DES FIGURES	PAGES
Partie I	
Figure I.1 Simulation de l'augmentation de températures et de précipitations en Méditerranée	1
Figure I.2 Salinisation du puits par l'eau marine dans le cas d'un puits mal positionné	3
Figure I.3 Salinité de différentes eaux de mer	4
Figure I.3 (a) Coupe schématique perpendiculaire au littoral selon le principe de Ghyben-Herzberg et (b) Impact d'un pompage sur l'interface eau douce/eau salée selon le principe	6
Figure I.4 Evolution de la salinité en fonction de la conductivité électrique et de la température	8
Partie II	
Figure II.1 (a) Situation des aquifères du littoral de Tétouan. Extraite de la carte géologique d'olivier (1984) et du SDAULT (1998) (b) Aquifère et merja de Smir	14
Figure II.2 Indice de GALDIT des aquifères de Smir selon le scénario du niveau marin actuel (2007)	17
Figure II.3 Situation géographique de la Mitidja orientale	18
Figure II.4 Situation géographique de la nappe de Guerbes	21
Figure II.5 Localisation du Cap Bon (nord-est de la Tunisie) et limites des nappes	24
Figure II.6 Carte d'iso-valeur des chlorures de la nappe de Korba de juin 2006 (en ppm)	26
Figure II.7 Localisation et carte géologique générale de la zone d'étude.	27
Figure II.8 Situation de la bande de Gaza (Palestine)	30
Figure II.9 La situation de la source de Mortola (Italie).	33
Figure II.10 Situation géographique de l'aquifère de Motril-Salobreña.	36
Partie III	
Figure III.1 Changement de climat dans les pays méditerranéens	41

Figure III.2 Précipitations moyennes et annuelles au niveau du pourtour méditerranéen	43
Figure III.3 Précipitations annuelle moyenne rapportées à la superficie des pays méditerranéens	44
Figure III.4 L'état des données dans Nord-Est de la méditerranée	44
Figure III.5 L'état des données dans le Sud de la méditerranée	45
Figure III.6 Population en méditerranée 1990-2020	46
Figure III.7 Demande totale en eau par secteur d'utilisation (période 2005-2007)	50
Figure III.8 Demandes en eau actuelles, totales et par secteur sur le bassin méditerranéen	50
Figure III.9 Indice d'exploitation des ressources renouvelables au niveau des pays et bassins versants	

LISTE DES TABLEAUX	PAGES
Tableau I.1 : Résistivité des formations en fonction de leur nature lithologique	7
Tableau I.2 : Conductivité électrique pour différentes eaux	8
Tableau I.3 : Composition typique de l'eau de mer	9
Tableau II.1 : Tableau récapitulatif des points d'eau et des débits extraits réalisés en 1997 Complété en 2001/2002 dans la plaine de la Mitidja (ANRH)	19
Tableau II.2 : Valeurs des rapports caractéristiques par rapport à la distance à la mer	23
Tableau II.3 : Tableau récapitulatif des niveaux piézométriques (1963-2008).	26
Tableau III.1 : Population des pays méditerranéens	47
Tableau III.2 : Demande en eau, totale et par secteur, période 2000-2005	49
Tableau III.3 : Ressources et demandes en eau (totales et par habitant), indice d'exploitation, Période 2000-2005	53

« Enfin la terre est formée d'une substance perméable, étroitement jointe aux rivages de la mer, qu'elle entoure d'une ceinture adhérent de toutes parts ; en conséquence se produit un double mouvement des eaux terrestres qui se déversent dans la mer et de l'eau salée qui rentre dans la terre. »

Lucrèce, Chant VI De rerum natura

INTRODUCTION GENERALE :

L'eau est une ressource socio-économique vitale limitée. Elle fait l'objet d'une demande croissante à des besoins domestiques et industriels, ce qui menace la pérennité des eaux souterraines et a des conséquences pour l'agriculture, la foresterie, l'industrie et les réserves d'eau potable. Il est essentiel que les ressources en eau soient gérées de manière stratégique et durable. 70 % de la superficie de terre est occupée par l'eau avec seulement 2.5 % de qualité douce, et dont 22 % provient des eaux souterraines.

L'importante disparité de la répartition des ressources en eau, couplée aux nombreux phénomènes climatiques, aux situations démographiques et aussi à la surexploitation des eaux souterraines associés qui affectent une région, font du bassin méditerranéen l'une des zones du monde les plus vulnérables au risque d'intrusion marine.

Ce phénomène d'invasion marine, qui peut s'étendre sur plusieurs kilomètres à l'intérieur des terres est d'un grand risque pour les régions côtières tributaires des eaux souterraines pour leur approvisionnement en eau. Sous certaines conditions, l'eau salée se propage à l'intérieur des terres et contamine les eaux de la nappe située à proximité de la mer. Par ailleurs, l'invasion des eaux douces par les eaux salées aura pour effet une dégradation des sols et une salinisation par suite des irrigations avec ces eaux.

L'objectif de notre travail est de présenter l'état actuel de la salinité des eaux des aquifères côtiers de quelques pays méditerranéens afin de mettre en exergue le degré de la salinité dans ces zones côtières menacées à titre de comparaison

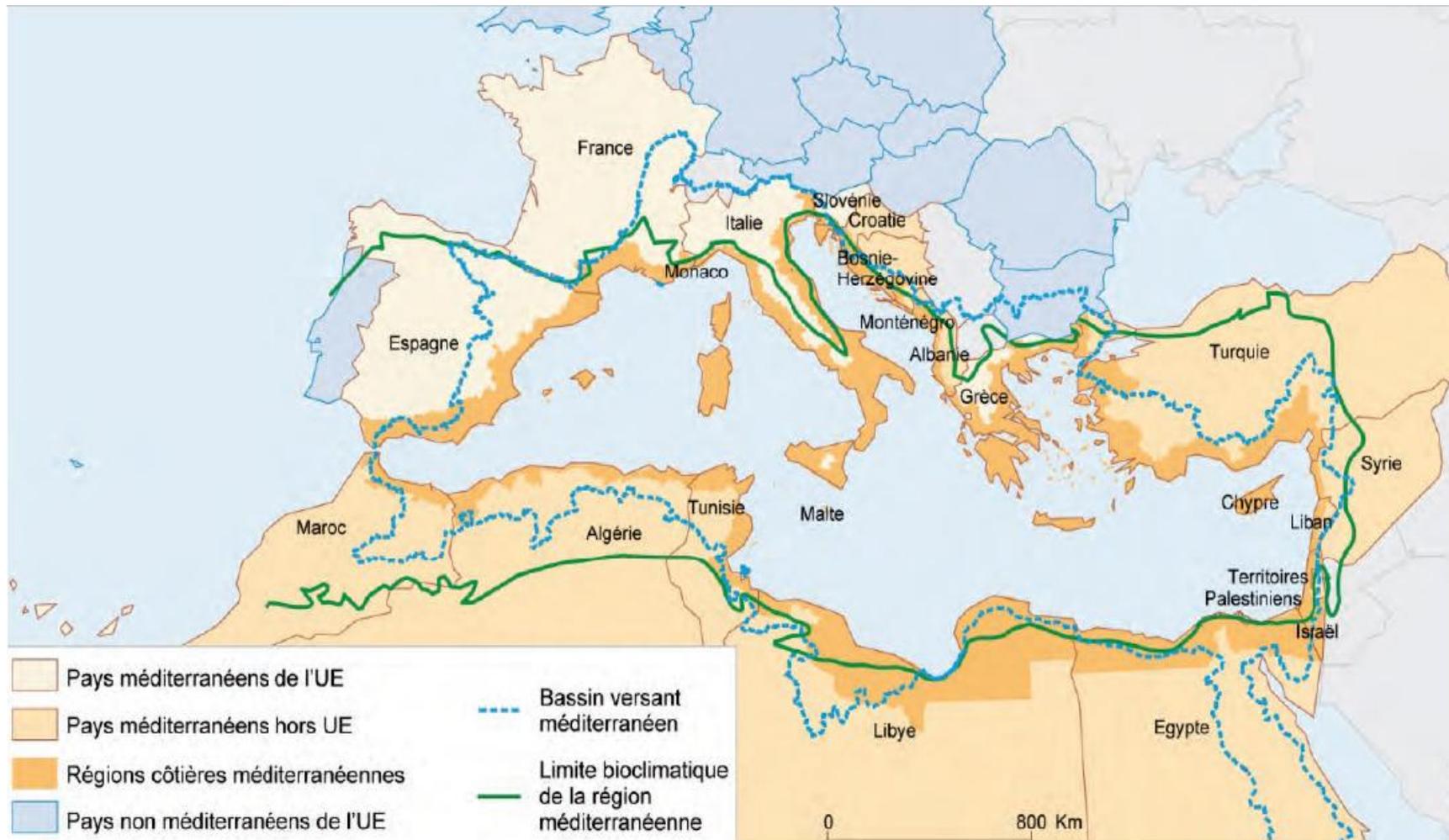


Figure. Un espace méditerranéen à plusieurs dimensions

(PNUE/PAM-Plan Bleu, 2009)

CHAPITRE I

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1 Intrusion marine

Les aquifères littoraux sont donc en contact avec l'eau salée d'origine marine, qui envahit plus ou moins les formations géologiques côtières, l'eau douce d'une densité moindre que l'eau salée (1,025 kg/L en moyenne pour l'eau salée contre 1 kg/L pour l'eau douce) « flottant » sur l'eau salée. L'intrusion d'eau salée prend la forme d'un biseau plongeant vers l'intérieur des terres, appelé communément « biseau salé », et constitue une interface entre l'eau salée et l'eau douce. Cette interface va évoluer au cours du temps en fonction de la recharge par les précipitations, de l'exploitation de l'aquifère et du niveau marin ; les premières recherches correspondant à celles de Ghyben (1889) et Herzberg (1901) à la fin du 19^{ème} siècle.

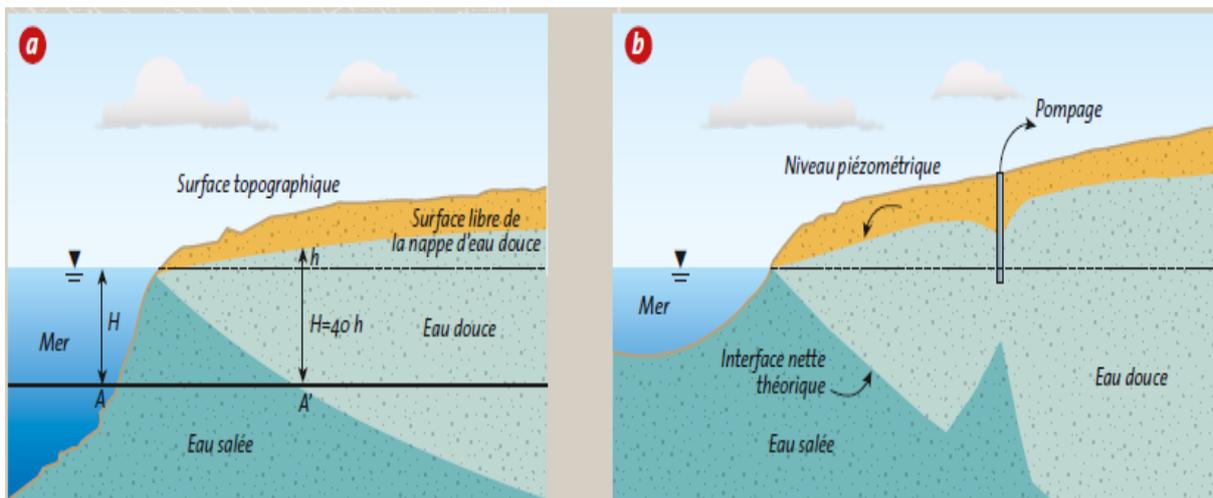


Figure I.1. (a) Coupe schématique perpendiculaire au littoral selon le principe de Ghyben-Herzberg et (b) Impact d'un pompage sur l'interface eau douce/eau salée selon le principe de Ghyben-Herzberg.

Frissant et Bodéré (2009)

Le niveau piézométrique est l'altitude du niveau d'eau souterraine à l'équilibre avec la pression atmosphérique mesurée dans un forage. Il s'élève vers l'intérieur des terres, sous l'influence de la recharge par les précipitations, de la topographie et des propriétés physiques des terrains. Ce niveau peut être modifié par les pompages, créant localement des cônes de dépression piézométrique autour des forages et faisant remonter le biseau salé (**Figure 1.b**). (Dörfliger.N, Augéard.B ,2013)

De manière simplifiée, la position de cette interface eau douce/eau salée peut être approximée en considérant les rapports de masse volumique de l'eau douce et de l'eau salée (solution analytique développée par Ghyben 1888, et Herzberg 1901). Ainsi, en un point quelconque de l'aquifère, l'interface se situe sous le niveau de la mer à une profondeur égale à 40 fois l'élévation du niveau piézométrique situé au-dessus du niveau de la mer (**Figure 1.a**). (Dörfliger.N, Augéard.B ,2013)

Des cas de salinisation des aquifères côtiers ont été documentés sur pratiquement tous les continents: sur la côte atlantique américaine (Barlow, 2003; Smith, 1988; 1994; Snyder *et al.*, 2004), en Californie (Cardona *et al.*, 2004), en Corée (Park *et al.*, 2005), au Japon (Hiroshiro *et al.*, 2006), aux Pays-Bas (Oude Essink, 2001; Post, 2004), en Afrique du Nord et autour du bassin Méditerranéen (Paniconi *et al.*, 2001; Petalas & Lambrakis, 2006), en France (Barbecot *et al.*, 1997; De Montety *et al.*, 2008). Les aquifères insulaires des atolls coralliens de l'Océanie ainsi que les Îles méditerranéennes sont aussi sous étroites surveillances (UNESCO, 1991; White & Falkland, 2010; Kampioti & Stephanou, 2002). Si aucun cas d'intrusion saline majeure n'a encore été observé dans les aquifères côtiers de l'Est du Canada et du Québec, des intrusions salines ponctuelles sont enregistrées à l'Île-du-Prince-Édouard (Barlow & Reichards, 2010), des cônes de remontées salines ont été mis en évidence sous certains puits aux Îles-de-la-Madeleine (Gilliand, 1971) et une migration du front salin vers l'intérieur des terres a aussi été rapportée pour l'Île du Cap-aux-Meules aux Îles-de-la Madeleine (Comte, 2008).

Dans de nombreux cas, comme dans l'Est du Canada, le secteur contaminé par l'eau salée se limite à de petites parties d'un aquifère et à des puits particuliers, ce qui a peu ou pas d'effet sur l'ensemble des approvisionnements en eau souterraine. Dans d'autres cas, comme en Floride ou encore autour du bassin méditerranéen, la salinisation de la nappe d'eau est régionale et a entraîné la fermeture de puits et l'installation de dispositifs et d'aménagements spécifiques (aménagement pour aider à l'infiltration des eaux de surface et à la recharge locale de la nappe, extraction locale des eaux salées, *etc.*). La variabilité des contextes géologiques, la distribution spatiale de l'eau salée et l'historique des prélèvements d'eau souterraine et du drainage des eaux de surface se sont traduits par une variété de types d'intrusion d'eau salée dans les aquifères

côtiers. Dans certains cas, la salinisation s'est produite le long de forages non tubés ou dans des puits abandonnés, mal construits ou corrodés qui permettent une migration verticale des eaux salées vers l'aquifère sus-jacent.

I.2 Origines de l'intrusion marine en zone côtière

Parmi les raisons qui peuvent expliquer ce phénomène on a :

I.2.1. Changement climatique

Il est largement établi qu'une hausse de la température de l'air induit une plus forte Évapotranspiration et que l'infiltration des précipitations, étant dépendante du type d'événement pluvieux (durée, intensité et fréquence), une réduction de la recharge des aquifères serait probable dans le contexte des changements climatiques.

En effet, dans son quatrième rapport paru en 2007 (GIEC, 2007), le Groupe d'expert Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC) combine 25 modèles climatiques globaux afin d'évaluer les impacts du changement climatique aux horizons 2050 et 2100. Selon leurs travaux, une hausse des températures de +2 à 3 °C est à prévoir en région méditerranéenne à l'horizon 2050, puis de +3 à 5 °C à l'horizon 2100. Ainsi, les événements précipitants seraient moins fréquents mais plus intenses, tandis que les périodes de sécheresse seraient plus courantes et plus longues. La distribution spatiale et temporelle des précipitations s'en verra donc modifiée (Milano, 2010, in GEB, 2010).

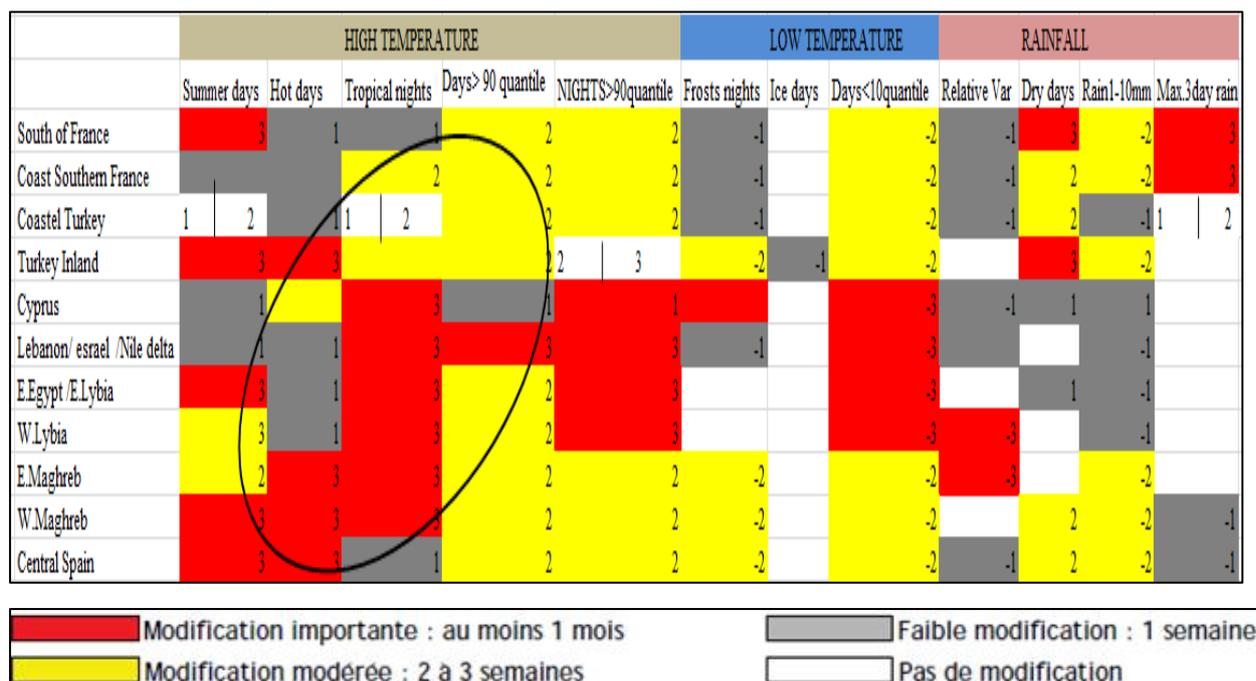


Figure I.2. Simulation de l'augmentation de températures et de précipitations en Méditerranée (Giannakopoulos et al., WWF Report 2005, in GEB, 2010)

I.2.2. Le facteur anthropique :

Le facteur anthropique correspond à la surexploitation d'un aquifère et de puits mal positionnés.

2.2.1. Pompages excessifs :

On parle de surexploitation lorsque les prélèvements d'eau excèdent la recharge et conduit à un abaissement du niveau piézométrique. Durant les 30 à 40 dernières années, le développement socio-économique et agricole des zones littorales a entraîné une forte augmentation des prélèvements d'eau à cause de l'augmentation des populations sur le littoral principalement en période estivale. (BOUDERBALA .A, 2015)

Dans ce cas on parle alors de phénomène « d'upconing ». Il s'agit d'une remontée de l'interface directement vers le puits de pompage engendrée par une baisse de la pression hydrostatique (rabattement). Cette remontée est accompagnée alors d'un avancement profond du biseau salé vers l'intérieur du continent. La zone de transition devient également plus importante, et peut par la suite s'aggraver et engendrer une pollution de l'aquifère.

➤ L'évolution de la population entre 2007 et 2040, estimée selon les tendances observées par l'INSEE sur les départements littoraux et leurs communes, permet d'évaluer la densité attendue des communes littorales en 2040 (Dörfliger ,2011). Ainsi, les communes dont la population doublerait en 2040 se concentrent surtout sur la côte sud-ouest de la Méditerranée (Languedoc-Roussillon). Les prélèvements d'eau pour ces populations peuvent accentuer les risques d'intrusion saline.

➤ Ainsi, la population méditerranéenne « pauvre en eau »: la Chypre, l'Egypte, le Maroc et la Syrie (PNUE / PAM-Plan Bleu, 2009, in GEB, 2010), s'élevant actuellement à 180 millions d'habitants, pourrait atteindre 250 millions d'habitants en 2025 (Blinda, 2009, in GEB, 2010). La population en situation de « pénurie », c'est-à-dire disposant de moins de 500 m³/hab./an (en 2005, il s'agissait de l'Algérie, d'Israël, de la Lybie, de Malte, de la Tunisie, et des Territoires Palestiniens (Milano, 2010, in GEB, 2010), pourrait passer dans le même temps de 60 à 80 millions d'habitants (Blinda, 2009, in GEB, 2010).

2.2.2. Puits mal positionné

Si un ouvrage de captage est réalisé trop profond (la crépine est près de la zone de transition), donc l'eau pompée sera saumâtre et impropre à la consommation dès le début de son exploitation. Par ce que la crépine va se retrouver directement dans la zone où l'eau est salée. De plus, pendant la saison sèche, puisque la nappe ne se recharge pas, on a alors une avancée de

l'intrusion saline dans la nappe ce qui augmente le risque d'avoir un puits situé dans la zone de transition. (BOUDERBALA .A, 2015)

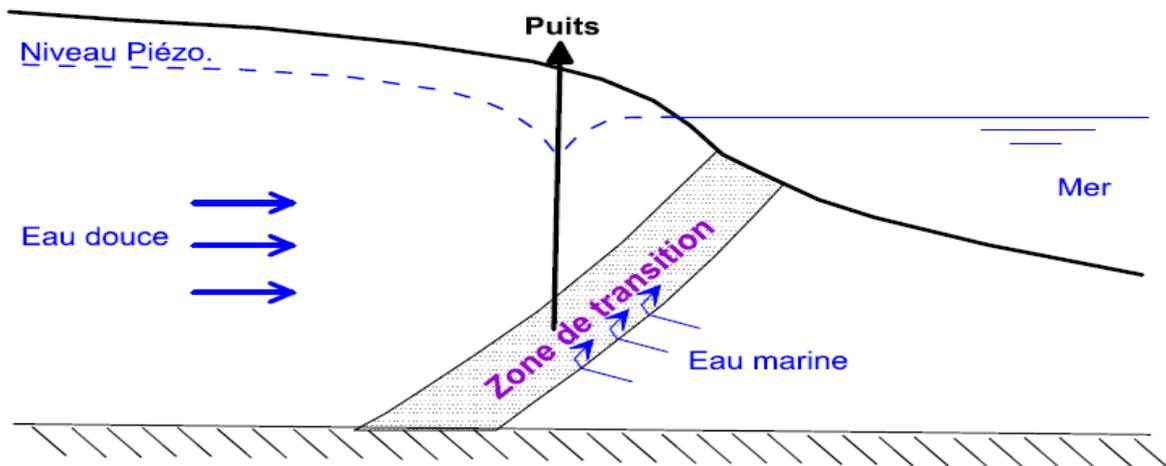


Figure I.3. Salinisation du puits par l'eau marine dans le cas d'un puits mal positionné (Cormerais et Vo Ngoc 2011, in Bouderbala .A, 2015, in BOUDERBALA .A, 2015)

I.2.3. Facteur géologique

✓ Changement de la capacité de réserve des aquifères côtiers

Associée aux changements climatiques, une augmentation globale du niveau moyen des océans de 0,18 à 0,59 m au cours du prochain siècle (IPCC, 2007) met encore plus en péril les aquifères côtiers et insulaires. L'élévation du niveau marin peut entraîner non seulement l'inondation, mais aussi l'érosion de la côte qui mènent à une perte de territoire et donc à une diminution de la capacité de réserve des réservoirs souterrains et du volume d'eau douce disponible dans l'aquifère.

I.3. Modélisation de la sensibilité des aquifères côtiers à l'échelle métropolitaine

Vis-à-vis de l'intrusion saline d'origine naturelle a été estimée à partir des informations sur la nature des formations géologiques rencontrées, notamment leur perméabilité (informations issues de la base de données des systèmes aquifères – BDLISA, in Nathalie Dörfliger, Bénédicte Augéard, 2013). Cinq classes de sensibilité se sont distinguées :

« **Sensibilité faible** » : cette classe regroupe les entités de nature imperméable. Ces formations non aquifères sont en général des couches argileuses pouvant constituer une barrière de protection pour une aquifère sous-jacente ou situé en amont hydraulique vers l'intérieur des terres.

« **Sensibilité faible à moyenne** » : les entités de nature semi-perméable sont en général des sédiments plus ou moins argileux, avec une circulation d'eau restreinte mais pouvant comporter localement des aquifères plus perméables. C'est notamment le cas pour des structures multi-couches présentes dans des zones de deltas ou de bassins sédimentaires. Des formations de socle,

avec des perméabilités faibles ainsi que des aquifères compartimentés, mais localement semi-perméables font également partie de cette classe. Ces aquifères sont en général sensibles à des intrusions salines par biseau salé.

« **Sensibilité moyenne** » : les entités caractérisées par une perméabilité moyenne à élevée, peuvent correspondre à des aquifères sédimentaires (craies non karstifiées mais fissurées ; aquifères poreux avec une forte perméabilité), ou à des aquifères de socle (horizon d'altérites et horizon fissuré) au niveau de la zone de contact avec présence de sources côtières.

« **Sensibilité variable – karstique** » : les aquifères karstiques de cette classe sont caractérisés par une forte hétérogénéité de la distribution des vides et des fissures ; des vides de type conduit peuvent trouver place au niveau du littoral et s'organiser dans l'espace. Un aquifère karstique côtier constitue un aquifère d'une sensibilité variable d'autant plus s'il y a des sources sous-marines étagées, mais il peut aussi être dans la classe "forte - avérée". Une sensibilité forte peut être attribuée à des zones particulières, zones de cavités et de sources. L'exploitation de forages ou de puits en zones karstiques induit des phénomènes imprévisibles en terme d'intrusion saline, certains pompages étant sans effet alors que d'autres provoqueront des intrusions conséquentes. Il faut donc étudier ces zones de manière spécifique.

« **Sensibilité forte-avérée** » : cette classe comprend les secteurs caractérisés par la prédominance d'alluvions perméables et l'existence de nappes d'accompagnement de rivière. Ces secteurs sont confrontés à l'intrusion combinée du biseau salé et du rentrant salé dans les cours d'eau pouvant donner lieu à de petits biseaux salés le long des cours d'eau dans les aquifères de part et d'autre. De plus cette classe comprend les aquifères pour lesquels les intrusions salines sont existantes et où il y a un risque important d'aggravation liée aux conditions d'exploitation selon les informations des études régionale.

I.4. Indicateurs de caractérisation de la salinité

Différentes classifications ont été développées pour définir le degré de salinité de l'eau. La classification utilisée par l'USGS définit l'eau douce comme une eau ayant une concentration en solides totaux dissous (STD) inférieure à 1 000 mg/L tandis que l'eau salée a une concentration en STD supérieure à 1 000 mg/L (Figure 6). Une eau saumâtre est définie par une concentration en STD comprise entre 1 000 mg/L et 35 000 mg/L (concentration moyenne de l'eau de mer), une saumure quand la concentration en STD dépasse celle de l'eau (Barlow, 2003)

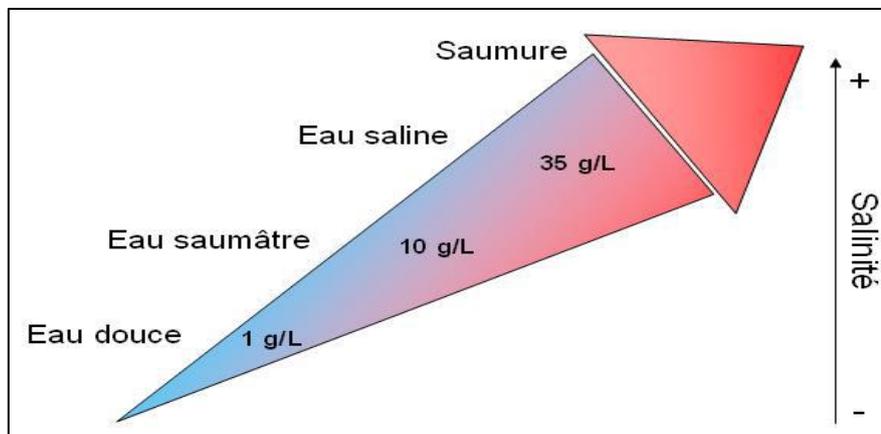


Figure I.4. Salinité de différentes eaux de mer

Pour caractériser le degré de salinité d'une eau, différents indicateurs sont utilisés. Ceux-ci sont présentés ci-après.

I.4.1. Conductivité électrique, résistivité électrique et salinité

Les mesures les plus simples à réaliser et les plus couramment utilisées sont les mesures de conductivité électrique (sur site) et les analyses (généralement au laboratoire) de concentration en chlorures. La conductivité électrique ($\mu\text{S}/\text{cm}$), qui mesure l'aptitude d'un matériau à permettre le passage d'un courant électrique, permet d'évaluer la présence de fluide peu résistant comme l'eau salé.

Tableau I.1. Résistivité des formations en fonction de leur nature lithologique (Frissant et al., 2005, in GDS, 2014)

Nature lithologique	Résistivité $\Omega \cdot \text{m}$
Marnes	0,5 à 100
Argiles (eau douce)	10 à 100
Argiles (eau salée)	1 à 10
Schistes	50 à 1000
Calcaires	100 à 5000
Grès	60 à 10000
Quartzites	20000
Granites	300 à 15000
Roches éruptives compactes	500 à 20000
Roches éruptives altérés	50 à 500
Alluvions, sables, graviers	100 à 1000
Sols argileux	10 à 20
Sables et graviers saturés d'eau douce	50 à 500
Sables et graviers saturés d'eau salée	0,5 à 5

Tableau I.2. Conductivité électrique pour différentes eaux (Aquatechnique, 2005, in GDS, 2014)

Type d'eau	Conductivité électrique ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
Eau pure	0,055
Eau distillée	0,5
Eau de Montagne	1
Eau courante	500 à 800
<i>Maximum pour l'eau potable</i>	<i>1055</i>
Eau de mer	56 000
Saumure	100 000

La conductivité électrique et la température peuvent être utilisées pour déterminer la salinité de l'eau (Frissant et al. 2005, in GDS, 2014)

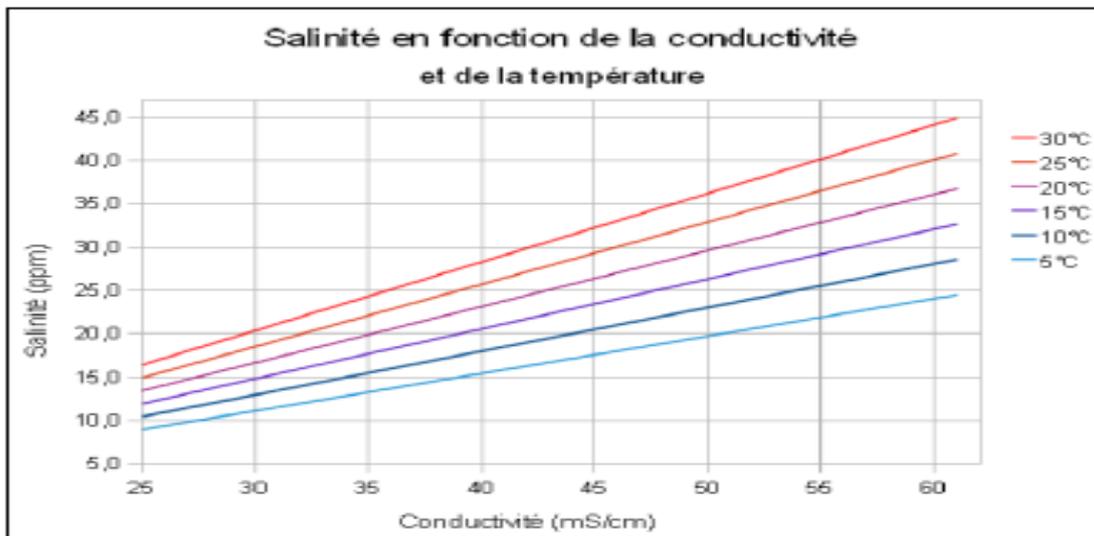


Figure I.5. Evolution de la salinité en fonction de la conductivité électrique et de la température
(Bouchard, 2010, in GDS, 2014)

I.4.2. Ratios molaires entre substances chimiques :

Parmi les ratios fréquemment utilisés, on peut citer les ratios calcium/magnésium, bicarbonate/chlorure ou sodium/chlorure.

**Tableau I.3 : Composition typique de l'eau de mer
(Callandar et al., 2011, in GDS, 2014)**

<i>Cations</i>	
Sodium (Na ⁺)	10,500 mg/L
Magnesium (Mg ²⁺)	1,350 mg/L
Calcium (Ca ²⁺)	410 mg/L
Potassium (K ⁺)	390 mg/L
<i>Anions</i>	
Chloride (Cl ⁻)	19,000 mg/L
Sulphate (SO ₄ ²⁻)	2,700 mg/L
Bicarbonate (HCO ₃ ⁻)	142 mg/L
Bromide (Br ⁻)	67 mg/L
Nitrate (NO ₃ ⁻)	0.67 mg/L
Total Dissolved Solids (TDS)	35,900 mg/L
Electrical Conductivity	4,800 mS/m

I.4.3. Diagrammes :

D'après (Dörfliger et Y. Caballero S. Traverse, J. Chastanet, D. Vanden Berghe, A. Roger, L. Dufond, 2014), il existe 4 diagramme sont :

✓ **Diagramme de Piper :**

Le diagramme de Piper représente l'abondance relative des anions et des cations, chacun sur un diagramme triangulaire. Leur distribution est combinée sur un diagramme en losange qui rassemble la somme des cations monovalents (Na + K), celle des cations bivalents (Ca+Mg) et les bicarbonates plus les carbonates (HCO₃ + CO₃) et (Cl + SO₄ + NO₃).

✓ **Diagramme de Stiff :**

Dans le diagramme de Stiff, les abondances relatives des ions sont placées sur le même graphique : anions d'un côté (Na+K, Cl, Ca, Mg) et cations (SO₄, HCO₃+CO₃) de l'autre

✓ **Diagramme de Durov**

Ce diagramme, similaire au diagramme de Piper, inclut par ailleurs des informations additionnelles concernant le pH et les Solides dissous totaux.

✓ **Diagramme de Schoeller**

Ce diagramme visualise chaque échantillon sur une ligne, ce qui permet de comparer visuellement différents échantillons d'eau

I.4.5 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 $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$, du soufre ou de l'oxygène des sulfates, du Strontium sont utilisés dans l'analyse de l'origine de la salinité.

I.4.6 Méthodes géophysiques

Encore appelées carottages géophysique, sont des mesures des paramètres physiques effectués dans des forages. Celles qui présente un intérêt direct dans la localisation du biseau salé ce sont les diagraphies électriques, la diagraphie de résistivité par induction et celle de la conductivité de l'eau en forage.

I.5 Impact de l'intrusion marine

I.5.1 Effet sur l'économie

La modélisation hydrogéologique d'un aquifère littoral peut être utilisée pour comprendre l'intrusion saline et tester différents scénarios. Ces scénarios permettent par exemple d'explorer l'impact des modifications de changement de niveau marin ou l'impact d'une évolution des prélèvements. Cependant, la réalisation d'une modélisation hydrogéologique nécessite de disposer d'une connaissance suffisante tant du point de vue de la géométrie que des paramètres physiques du réservoir souterrain. L'acquisition de données nécessite des investigations géophysiques ou la réalisation de forage avec des essais de pompages et des caractérisations hydrochimiques ; elle peut donc, en fonction des connaissances initiales et des enjeux, être coûteuse en temps et en argent.

La mise en exploitation des nappes côtières nécessite une bonne gestion de la ressource en eau afin d'éviter tout genre de pollution. Lorsqu'une pollution de l'eau douce par une eau salée par exemple a lieu, il est en général difficile d'en faire disparaître les effets (BRGM 1996; Kouzana et al. 2007 ; Djabri et al. 2011, in Gwénaëlle.C et al, 2012). Il est alors préférable d'essayer de prévoir les risques d'intrusion marine, ce qui nous place directement devant un double problème complexe, associant la notion de quantité à celle de qualité (Pulido-Bosch et al. 1991 ; Hsissou et al. 1997, in Gwénaëlle.C et al, 2012).

I.5.2 Effet sur la santé des consommateurs

Processus et transformations chimiques du mélange eau douce/eau salée

L'effet le plus visible d'une intrusion saline dans un aquifère côtier ou insulaire est l'établissement d'un gradient de salinité de la côte vers l'intérieur de l'aquifère. La salinité, ou la concentration en ions chlorure (Cl^-) dans les eaux, sont un indice de cette pénétration. Le seuil de concentration des ions (Cl^-) fixé par l'Agence de Protection de l'Environnement est de 0,5 g/l pour que l'eau soit potable (la concentration de l'eau de mer est de 30 à 35 g/l). Par ailleurs, la salinisation de la masse d'eau entraîne tout un cortège de réactions chimiques et de processus dont il faut tenir compte puisqu'ils peuvent affecter la qualité de l'eau souterraine. Ces processus incluent des échanges ioniques entre les composés majeurs de l'eau douce (calcium, Ca^{2+} , et ion bicarbonate HCO_3^-) et ceux de l'eau de mer (chlorure (Cl^-), sodium Na^+ et magnésium Mg^{2+}), mais aussi des processus de précipitation et dissolution ou encore de réduction et d'oxydation. La formation de composés organo-halogénés est une autre conséquence importante à l'intrusion d'eau salée. Les composés organo-halogénés sont des hydrocarbures halogénés de formule brute $\text{C}_x\text{H}_y\text{X}_z$, X correspondant à un élément du groupe chimique des halogènes : fluor (F), chlore (Cl), brome (Br) ou iode (I). Ces composés formés à partir de substitutions entre les éléments halogénés de l'eau de mer et les composés organiques présents dans l'eau souterraine sont des produits non **miscibles** plus denses que l'eau et constituent une source importante de contamination, surtout par les trihalométhanes (THM) dont le trichlorométhane. Ces composés organo-halogénés sont sous haute surveillance dans les eaux de consommation des aquifères côtiers car ils sont reconnus comme **cancérogènes**. (Gwénaëlle.C et al, 2012)

I.6 CONCLUSION

Face à l'augmentation des populations sur le littoral principalement en période estivale lorsque les ressources en eau sont au plus bas, et au changement climatique, les ressources en eau souterraine sont au centre des préoccupations pour les années à venir. Les eaux souterraines sont, dans les terrains en continuité entre terre et mer, en équilibre fragile face aux intrusions salines. L'objectif de notre travail est de présenter l'état actuel de la salinité des eaux des aquifères côtiers de quelques pays méditerranéens afin de mettre en exergue le degré de la salinité dans ces zones côtières menacées à titre de comparaison.

CHAPITRE II

ETAT DE L'INTRUSION MARINE DANS QUELQUE PAYS DU BASSIN MEDITERRANEEN

II.1 INTRODUCTION

Les impacts du changement climatique, tels que la diminution des précipitations et la modification prévue du niveau de la mer, pourraient amplifier la salinisation des aquifères côtiers. Ainsi, les activités anthropiques (telles que le cumul des prélèvements destinés à l'eau potable pendant la saison touristique et les forages affectés à l'irrigation) couplées aux aléas climatiques pourraient fragiliser de plus en plus les aquifères côtiers, et entraîner un impact négatif, du fait de l'augmentation de la salinité, d'une part sur la qualité des ressources en eau souterraine et d'autre part sur la qualité des ressources agricoles et la composition de la flore et de la faune à proximité du littoral (Niazi, 2007). Les aquifères côtiers constituent souvent une importante source d'eau douce, en provenance de l'infiltration des précipitations. Leur stock présente une très grande inertie en raison de la lenteur des écoulements qui les affectent. Leur surexploitation affecte la qualité et la quantité de l'eau. Ceci induit la baisse des niveaux piézométriques et l'intrusion d'eaux marines (Niazi, 2007). La salinisation des aquifères côtiers est un risque hydrogéologique majeur touchant les régions littorales, souvent densément peuplées et fortement tributaires des eaux souterraines (Cheng, 2003, in Niazi, 2007).

Les zones littorales du bassin méditerranéen sont particulièrement sensibles à ce phénomène. Quelques pays touchés par ce problème feront l'objet de la présente étude.

II.1 LE MAROC

Le Maroc est un pays assez aride, bien que dans la moitié septentrionale l'aridité soit moins marquée. Très souvent les eaux souterraines constituent la seule source d'approvisionnement en eau pour les usages domestiques, agricoles ou industriels, provoquant quelquefois des processus de surexploitation et/ou de dégradation de la qualité de l'eau. Le littoral marocain ouvert sur la Méditerranée s'étend sur plus de 500 km, d'Est en Ouest.

II.1.1 Évaluation de la vulnérabilité à l'intrusion marine de la nappe phréatique de Smir

Tous les aquifères côtiers de Tétouan jouent un rôle très important dans l'approvisionnement en eau douce et risquent tous d'être affectés par une intrusion saline s'ils subissent une surexploitation. Mais vu la non disponibilité de données en nombre suffisant, sur les nappes de Fnidek, Négro et Azla, nous traiterons que celles de Smir au Nord et Martil-Alila au Sud.

Le bassin de l'oued Smir à l'embouchure présente une superficie de 74 Km². Sa puissance atteint 25 mètres (Stitou, 2002, in Niazi, 2007)

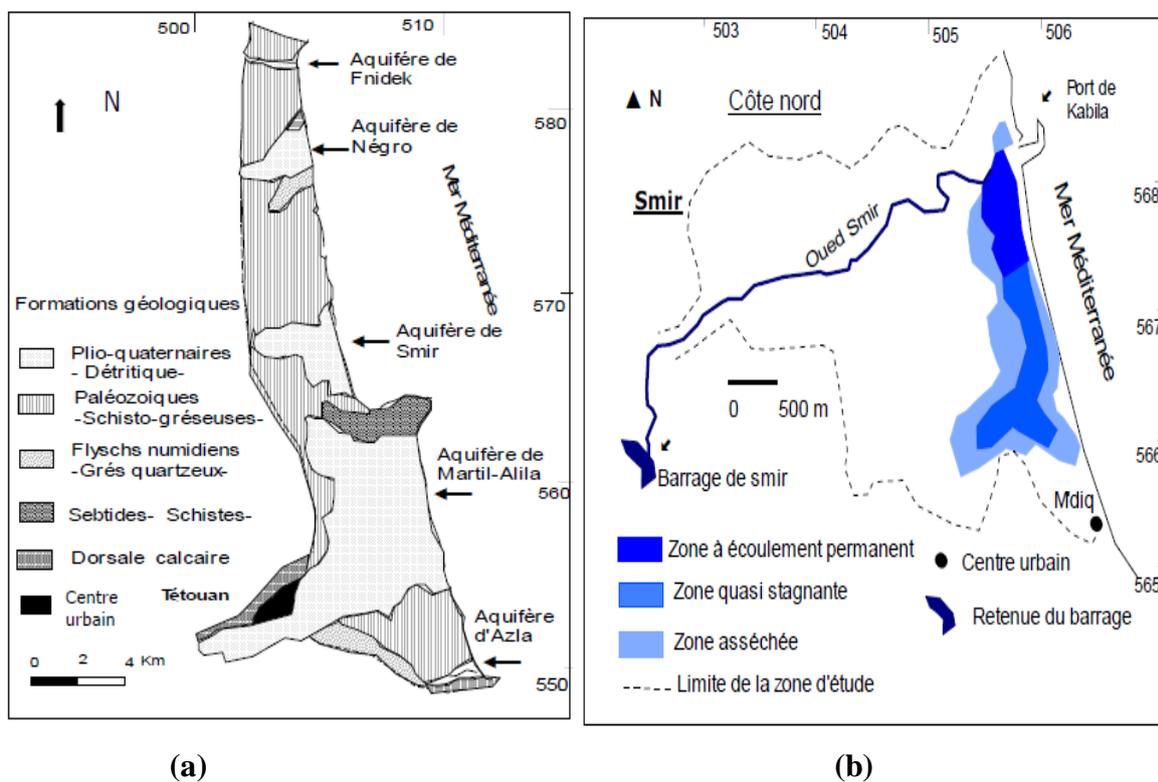


Figure II.1 (a) Situation des aquifères du littoral de Tétouan. Extraite de la carte géologique d'olivier (1984) et du SDAULT (1998) (b) Aquifère et Merja de Smir (NIAZLS, 2007)

Chaque état hydrogéologique d'un aquifère côtier est inhérent aux caractéristiques physiques qui affectent la possibilité de l'intrusion saline. Selon (Chachadi et Lobo Ferreira ,2001 in Niazi, 2007), les plus importants facteurs qui contrôlent l'intrusion de l'eau de mer sont :

- Le type d'aquifère : confiné ou non confiné.
- La conductivité hydraulique de l'aquifère.
- La profondeur de la nappe en dessous du niveau de la mer.
- La distance par rapport au rivage.
- L'impact de l'intrusion saline présente dans la zone d'étude.
- L'épaisseur de la nappe phréatique.

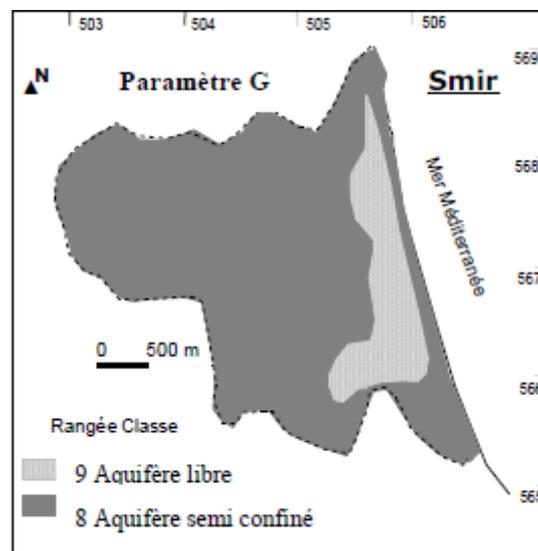
II.1.2 L'application de la méthode de GALDIT aux aquifères de Smir

A- La représentation graphique des six paramètres de GALDIT

L'impact de chacun des six paramètres précités de l'intrusion de l'eau de mer a été décrit par (Chachadi et Lobo-Ferreira, 2001 in Niazi, 2007) :

Paramètre 1 : le type d'aquifère (G)

Dans la nature, G, il faut connaître la disposition et le type de nappe de la zone d'étude. Les estimations sont généralement comme suit: un aquifère libre (non confiné) (9), confiné (10), et semi confiné (8). Pour la nappe de Smir, l'écoulement de l'eau souterraine est de type non-confiné (libre) à l'aval, alors qu'il est semi confiné (semi captif) en amont. Le paramètre G de GALDIT est estimé, respectivement, à 9 et 8

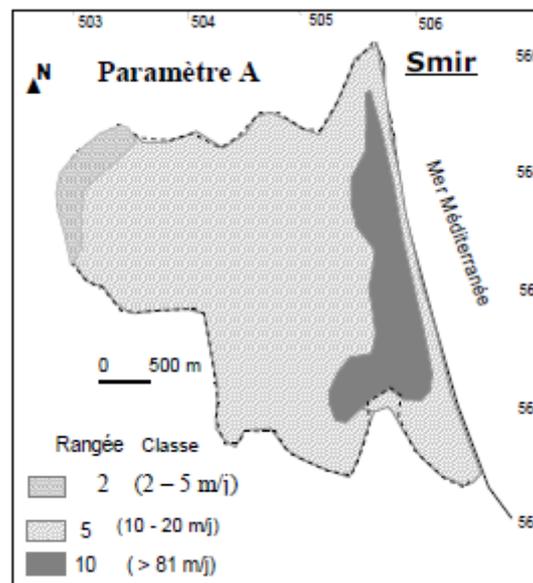


-a-

Figure II.2: Représentation du paramètre G dans les aquifères de Smir (NIAZI.S, 2007)

Paramètre 2: la conductivité hydraulique de l'aquifère (A) : Ce paramètre est utilisé pour mesurer le taux de courant d'eau dans la nappe aquifère. Le mouvement de l'eau de mer vers la terre est influencé par la conductivité hydraulique : pour une conductivité plus élevée, l'intrusion de l'eau de mer serait plus significative. Conductivité hydraulique a été estimée à partir des mesures de transmissivité relatives aux pompages réalisées par la DRH et l'épaisseur Correspondante. Basé sur les données utilisées par (Stitou, 2002, in Niazi, 2007) :

- Les valeurs dans l'aquifère de Smir varieraient de 2 à 4 m/j ($2,3 \cdot 10^{-5}$ à $4,6 \cdot 10^{-5}$ m/s) dans la partie orientale de ce système, entre 10 et 20 m/j ($12 \cdot 10^{-5}$ à $23 \cdot 10^{-5}$ m/s) dans le secteur central, et supérieur à 100 m/j ($116 \cdot 10^{-5}$ m/s) dans la partie aval



-a-

Figure II.3: Représentation du paramètre A dans les aquifères de Smir (NIAZIS, 2007)

Paramètre 3: La cote de la nappe en dessous du niveau de la mer (L) :

Dans les estimations de (L), l'examen de la variation temporelle à long terme des niveaux de la nappe dans la région est important. Généralement les valeurs qui concernent les cotes minimales d'eau en important. Généralement les valeurs qui concernent les cotes minimales d'eau en dessous du niveau de la mer restent les plus significatives, car elles fourniraient la plus forte vulnérabilité possible à cette intrusion d'eau marine. Les rangées de (L) ont pour valeurs : 10 pour les niveaux inférieurs à 1m, 6 pour les classes de 1 à 2 m, et 2 pour des cotes supérieures à 2 m.

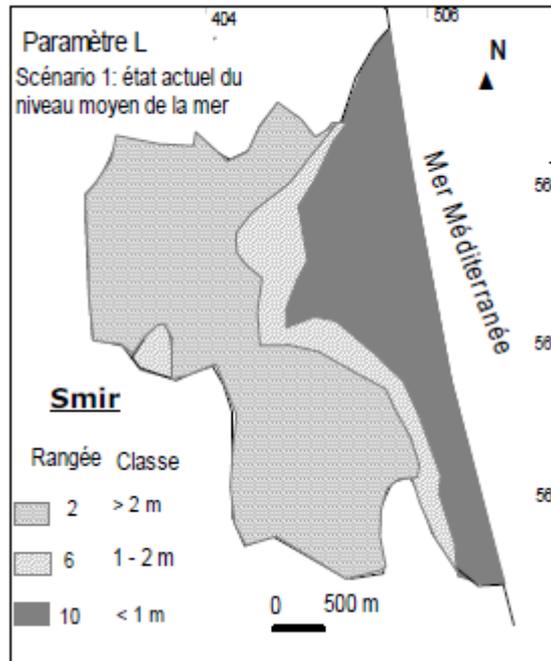


Figure II.4 : Représentation du paramètre L dans les aquifères de Smir

Paramètre 4 : La distance par rapport au rivage (D) :

L'impact de l'intrusion de l'eau de mer diminue généralement quand on se déplace du rivage vers l'intérieur. Ce paramètre a été estimé suivant trois distances (500 m, 750 m et 1000 m) perpendiculaires à la ligne de côte et aux cours d'eau des oueds, Les valeurs dans l'aquifère de Smir sont : 10 dans la partie orientale de ce système, entre 6 et 3 dans le secteur central, et 2 dans la partie aval.

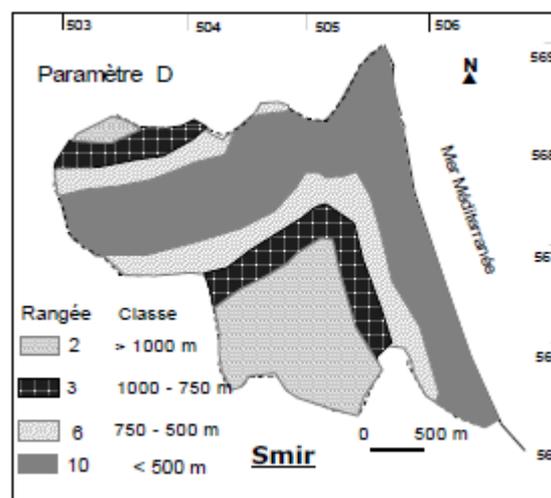


Figure II.5: Représentation du paramètre D dans les aquifères de Smir (NIAZIS, 2007)

Paramètre 5 : L'impact de l'intrusion saline présente dans la zone d'étude (I) : Pour évaluer ce paramètre, le rapport de $Cl^- / HCO_3^- + CO_3^-$ est déterminé dans les secteurs où les concentrations de ces deux anions sont disponibles. Le secteur littoral de Smir est déjà affecté par la salinisation due particulièrement à l'invasion marine (Stitou, 2002 in Niazi, 2007). En outre, les fortes valeurs du paramètre (I) enregistrées dans la partie nord-ouest et au Sud sont la conséquence de l'infiltration des eaux usées et du retour à la nappe des eaux d'irrigation. Il y a deux catégories d'eau dans l'aquifère de Smir : les eaux minéralisées dans le secteur côtier et les eaux douces dans le reste

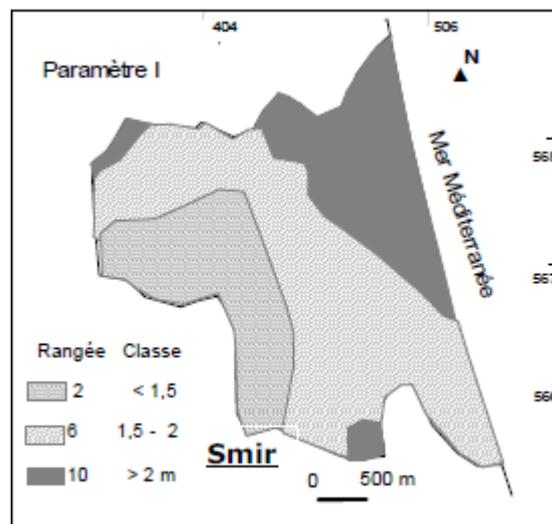


Figure II.6: Représentation du paramètre I dans les aquifères de Smir (NIAZI.S, 2007)

Paramètre 6 : L'épaisseur de la nappe phréatique (T) : ou 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. Le système d'aquifère de Smir est de nappe dont l'épaisseur maximale atteint les 25 mètres, donc une valeur de 10 a été estimée pour l'aquifère

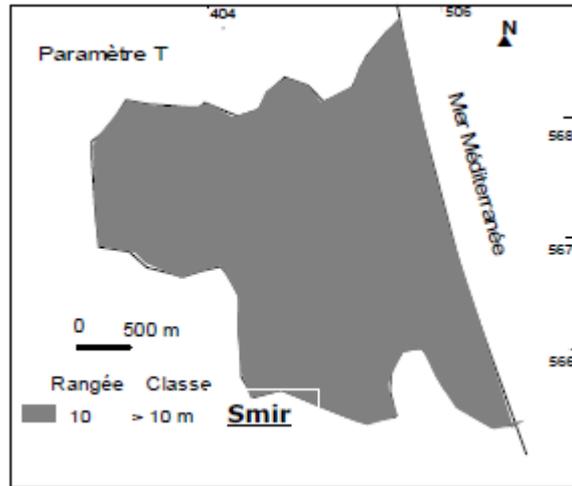


Figure II.7 : Représentation du paramètre T dans les aquifères de Smir (NIAZIS, 2007)

**B- L'indice de GALDIT sous les conditions actuelles du niveau de la mer (2007)
L'état actuel du niveau de la mer (2007)**

L'aquifère de Smir montre une forte vulnérabilité de toute la partie aval, avec une intrusion plus importante aux alentours de l'embouchure de l'oued Smir. Selon la méthode de GALDIT, le front salé se trouve pratiquement à une distance de la côte de 800 m et 1300 m [1], ces valeurs sont à peu près similaires à celles estimées par (Stitou 2002, in Niazi, 2007) – 800 m et 1500m- Il correspond à un indice supérieur à 90 (classe très vulnérable).

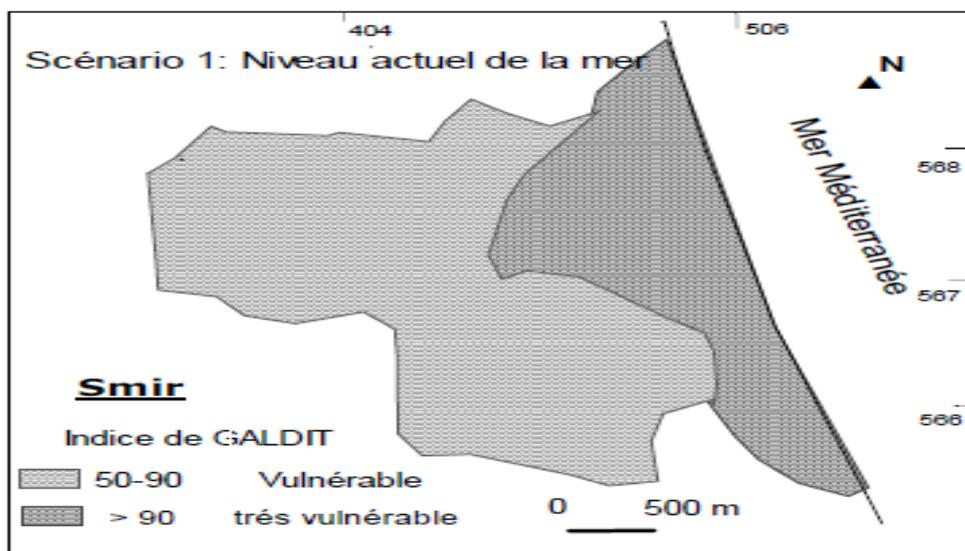


Figure II.8. Indice de GALDIT des aquifères de Smir selon le scénario du niveau marin actuel (NIAZIS, 2007)

✚ Dans l'aquifères de Smir, la position de l'intrusion saline est variable d'un secteur à l'autre, cela est en relation directe avec les changements lithologiques et la situation des oueds. Cette nappe phréatique connaisse déjà un début d'intrusion saline démontrée par plusieurs analyses d'eaux souterraines (DRHL, 1988 ; Stitou, 2002; Hilali, 2002, in Niazi, 2007); et d'après la méthode adoptée dans cette étude, il est certain que les valeurs de recul de l'interface eau douce -eau salée et la salinisation des eaux souterraines augmenteront progressivement avec les perspectives de l'élévation du niveau marin. Cette étude permet aussi d'évaluer l'impact négatif d'une surexploitation de ces nappes phréatiques qui affecterait le niveau régional des aquifères (baisse de la cote piézométrique) et provoquerait le même effet : une avancée de l'intrusion saline.

II.2 ALGERIE

II.2.1 La baie d'Alger (la Mitidja Orientale)

L'Algérie, en contact avec le bassin méditerranéen et le Sahara, est située au Nord de l'Afrique entre le Maroc et la Tunisie avec lesquels elle forme le Maghreb. Vaste territoire de 2,4 millions de km², elle offre des paysages diversifiés qui s'étendent de la mer Méditerranée au Nord, jusqu'au Sahara central au Sud. Néanmoins, elle est caractérisée par de multiples contrastes physiques, climatiques et humains.

La région d'étude occupe la partie septentrionale de la Mitidja Orientale, d'une superficie d'environ 1140Km². Elle est limitée par la mer méditerranée au nord, la limite géologique étanche au Nord-est, l'Oued El Harrach à l'Ouest et l'Oued El Hamiz à l'Est. Elle s'étend au Sud à quelques 15km de la côte La Mitidja couvre seulement 3% de la surface totale de l'Algérie du Nord, mais, il est estimé qu'elle représente 10% environ de ses ressources en eau de surface et près de 20% de ses ressources en eaux souterraines (Sir Mac Donald, Partners limited, 1992, in DROUCHE .A, 2012). Elle représente le coeur de l'agriculture régionale.



La démographie dans la plaine de la Mitidja orientale, connaît un accroissement graduel et continu. Cette population se concentre dans les grandes villes notamment à Réghaïa, Rouiba, El Hamiz, Dar El Beida, Bab Ezzouar, El Harrach, Baraki et Les Eucalyptus. 17 Vers la fin du dernier siècle le niveau des eaux souterraines dans la plaine de la Mitidja orientale a

considérablement baissé suite à un pompage excessif. A partir des années 2000, l'état s'est engagé dans une nouvelle stratégie pour réduire la surexploitation en multipliant les ressources en eaux afin de satisfaire les besoins croissant des citoyens. (DROUCHE .A, 2012)

La prolifération des forages et de la sécheresse persistante de ces deux dernières décennies ont entraîné des rabattements importants dans certaines régions qui ont pour conséquence la diminution des débits dans les forages.

Tableau II.1 : Tableau récapitulatif des points d'eau et des débits extraits réalisés en 1997 Complété en 2001/2002 dans la plaine de la Mitidja (ANRH). (DJOUDAR, 2008)

Usages	Nombre d'ouvrages inventoriés		Débits (m ³ /an)	
	Forages	Puits	Forages	Puits
AEP	578	10	144585350,68	25511,58
Irrigation	3172	157	124438806,1	2616907,8
Industrie	162	5	872532,4	17928
Non utilisé	281	/	/	/
Total par type d'ouvrage	4193	172	269896689,18	2660347,38
total	4365		272557036,56	

Afin de pouvoir faire un constat sur l'état de l'invasion marine dans la baie d'Alger, le travail de (DJOUDAR, 2008) est basé sur différentes approches comme :

✓ **L'inversion de l'écoulement souterrain**

D'après des cartes piézométriques celle des basses eaux 2002 hautes eaux 2005 et basses eaux 2005, que Une inversion du sens de l'écoulement. En atteste les valeurs des courbes hydro-isohypses qui augmentent du sud vers le Nord reflétant le déplacement du front Eau douce / eau salée de la mer vers le continent.

- Un dôme piézométrique au Sud-Est situé entre El Hamiz et Benzerga due au pompage intensif des champs captant (Bouriah et Hamiz).avec des valeurs négatives en dessous du niveau référence 0 de la mer s'étalent jusqu'à plus de 3km à l'intérieur du continent..
- Le cordon dunaire et le léger soulèvement du substratum semblent freiner l'extension de l'invasion marine à l'Ouest, jouant ainsi le rôle de barrière hydraulique.

✓ **Approche Hydrochimique de l'invasion marine**

L'évaluation chimique des eaux souterraines de la baie d'Alger s'est basée sur les données hydrochimiques de la campagne du mois de mai 2006 effectuée sur 28 points d'eau seulement.

Les mesures montre les résultats suivantes :Pour les **Résidu sec, conductivité électrique** En 1983 puis en 1992, les travaux de (AC .Toubal) ont permis la délimitation de deux zones

contaminées par l'eau de mer : la première dans le secteur compris entre Bordj El Bahri, Ben Zerga et Bateau cassé ou le résidu sec atteint 15g/l, alors qu'en 1983 il oscillait entre 800 et 6800 mg/l, en corrélation avec une conductivité électrique relativement élevée oscillant entre 1,5 et 6m.S/cm. et la deuxième dans la région centrale situé entre le Lido et Verte Rive, la progression du front salé en direction de Dar El Beida se confirme vue l'existence d'une anomalie à 1400 mg/l (En 2006, le même schéma se dessine, les mêmes régions sont affectées par l'intrusion marine). **Les concentrations en sodium et chlorures** sont généralement comprises entre 4 et 19 meq/l. La région de Benzerga près du champ de captage de Boureah accuse un accroissement des concentrations en sodium et chlorure atteignant 20meq/l. **Le rapport de Todd** est supérieur à l'unité au niveau de la bande littorale en allant d'Est en Ouest. **Et pour le Faciès chimiques selon diagramme de piper** 71,43% des échantillons sont chlorurée et sulfatée calcique et magnésienne et 28,57% représente les échantillons chlorurée sodique et potassique ou sulfatée sodique et carbonatée sodique et potassique.

✚ La combinaison des résultats obtenus par les différentes cartes chimiques et piézométriques montrent qu'il y a un inversion totale du sens d'écoulement des eaux de la mer vers le continent atteignant les champs de captages de Boureah et menaçant aussi le champ de captage de Hamiz (-16m en dessous de niveau de mer) et d'autre part qu'une frange contaminée par l'eau de mer a progressé depuis 1992 atteignant en 2006 les points d'eau situés à plus de 2km à l'intérieur du continent . Ces résultats donnent un aperçu qui nous dit que la baie d'Alger est touchée par le phénomène d'intrusion marine mais selon l'étude géophysique réalisé par (ANRH 2002 ,in Djoudar, 2008) ,et d'après l'étude de (DJOUDAR et TOUBAL) la distance atteinte par le front salé à l'intérieur du continent n'a pas changé depuis 1992, ce qui n'est pas logique, sachant que notre pays vit une sécheresse ces deux dernières décennies, par conséquent une exploitation intensive des eaux de la nappe alluviale, ne cesse d'augmenter et donc une progression de la langue d'eau salée qui dépasserai en principe les 1km500.

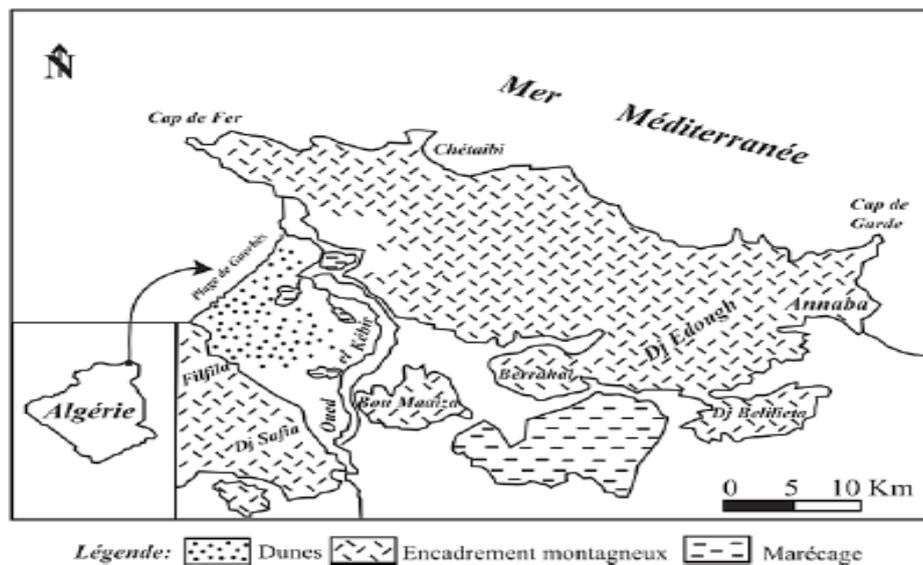
II.2.2 La nappe de Guerbes (Annaba)

La plaine d'Annaba

La plaine d'Annaba se situe au Nord-Est de l'Algérie (figure 2). Elle est limitée au Nord par la mer Méditerranée, à l'Ouest par le massif de Beleita (287 m) et de Boukhadra (152 m), au Sud par la chaîne numidique orientale (1411 m) et à l'Est par l'oued Bounamoussa. La région possède un climat de type méditerranéen avec deux saisons, l'une sèche et l'autre humide. L'historique des précipitations révèle une baisse assez sensible des précipitations; on passe de 1000 mm/an à 500 mm/an. (DJABRI.L et al, 2013)

La nappe de Guerbes

La région de Guerbes fait partie de la côte orientale algérienne. Elle est située entre les monts de Filfila et Safia au sud-ouest, les massifs de Cap de Fer et l'Edough au nord-est et ceux de Bou Maiza et Berrahal au sud-est (figure 1). Le climat de la zone d'étude est de type méditerranéen, la pluviométrie est de l'ordre de 750 mm an-1 et la température moyenne annuelle est de 18°C. La démographique et l'agriculture génèrent une demande en eau importante, conduisant à des pompages intensifs entraînant une surexploitation de la nappe et par conséquent une dégradation de la qualité des eaux (augmentation de la minéralisation). (DJABRI.L et al,2001)



**Figure II.10 Situation géographique de la nappe de Guerbes
(Conférence Méditerranéenne Côtière et Maritime
EDITION 2, TANGER, MAROC ,2011)**

En Algérie, les travaux effectués par DJABRI (1996) et HANI (2003), mettent en évidence la salinité des eaux dans deux aquifères à climat et géologie contrastés : nappe alluviale de Tébessa (semi-aride) et nappe superficielle d'Annaba-Boucheougouf-Guelma

HADJSAID (2007) a combiné les données géophysiques et chimiques pour expliquer la qualité des eaux de la région de Guerbes.

Alors DJABRI et al, On utilisé les données hydrogéologiques et hydrochimiques :

- L'outil hydrogéologique; la description de l'aquifère. Elaborée à partir des données de forages et de puits. Les caractéristiques hydrodynamiques T (Transmissivité), K (conductivité hydraulique), S (coefficient d'emmagasinement) et les cartes piézométriques, donnent un aperçu sur la nature de la nappe.

- Les analyses d'eau donnent un aperçu sur la qualité des eaux. Les paramètres physiques ont été mesurés sur le terrain à l'aide d'un appareil multi paramètres WTW.

- L'analyse chimique de l'eau réalisée par la méthode de spectrophotométrie

d.1 Hydrochimie

2.2.1 Suivi de la conductivité

La carte des conductivités montre que les zones les plus chargées se localisent au centre et au sud de la zone d'étude. Par contre au niveau du secteur côtier les conductivités sont de l'ordre de 1000 $\mu\text{S cm}^{-1}$. Cette répartition est influencée par la piézométrie. (DJABRI.L et al, 2001)

2.2.2 La méthode des rapports

Pour expliquer les origines de cette salinité, ils ont utilisé .La méthode des rapports car reste la plus efficace et la plus simple à réaliser, Les puits analysés sont situés à différentes distances de la mer. (DJABRI.L et al, 2001)

Tableau II.2: Valeurs des rapports caractéristiques par rapport à la distance à la mer (DJABRIL et al, 2001)

<i>Puits</i>	<i>Distance à la mer (km)</i>	<i>Mg²⁺/Ca²⁺</i>	<i>SO₄²⁻/Cl</i>	<i>Cl/σ</i>
		<i>Valeur seuil = 4,5</i>	<i>Valeur Seuil = 0,1</i>	<i>Valeur Seuil = 0,307</i>
<i>S1</i>	2,7	3	0,05	0,32
<i>P7</i>	2,75	3,4	0,15	0,29
<i>S2</i>	3,33	1,9	0,06	0,28
<i>S0</i>	5,21	3,9	0,2	0,18
<i>P6</i>	5,7	6,2	0,2	0,27
<i>S3</i>	6	3,8	0,1	0,36
<i>P10</i>	6,45	3,7	0,37	0,13
<i>P13</i>	8	2,5	0,01	0,21
<i>S4</i>	8,1	2,5	0,17	0,26
<i>173</i>	8,19	2,1	0,34	0,2
<i>P5</i>	9	4,7	0,6	0,11
<i>P14</i>	9,6	2,9	0,35	0,09
<i>34</i>	9,68	1,9	0,3	0,13
<i>P15</i>	10,3	2	0,12	0,18
<i>113</i>	11,65	3,5	0,05	0,2
<i>129</i>	12,7	3,8	0,06	0,34

Ça permet de constater l'influence marine sur la qualité des eaux. A partir des valeurs obtenues, tel que si : $Mg^{2+}/Ca^{2+}=4,5$, $SO_4^{2-}/Cl=0,1$; $Cl-/conductivité =0,307$. Ainsi, si $Cl-/conductivité <0,307$ les chlorures ont une origine marine, mais si $Cl-/conductivité >0,307$ les chlorures n'ont pas une origine marine (DJABRIL et al, 2001). Alors :

- ✓ Le rapport Mg^{2+}/Ca^{2+} : seul deux points indiquent une salinité influencée par la mer, c'est le cas des points P5 et P6, d'autres points présentent une forte valeur du rapport oscillant entre 3,5 et 3,9 ce qui semble indiquer un mélange des eaux traduisant diverses origines de la salinité.
- ✓ Le rapport SO_4^{2-}/Cl : 70%, des échantillons indiquent une origine marine des chlorures, ce qui implique une salinité marine des eaux.
- ✓ Le rapport $Cl-/conductivité$: 82% des échantillons, montrent un rapport inférieur 0,307 ce qui implique une origine marine des chlorures
- ✚ La combinaison des résultats obtenus par les différentes méthodes montre une salinité due probablement à l'intrusion marine.

II.3 TUNISIE

La Tunisie est un pays aride à semi-aride sur les trois quarts de son territoire et se caractérise par la rareté de ses ressources en eau et par une variabilité accentuée du climat dans l'espace et dans le temps. Il reçoit en moyenne des précipitations annuelles de 36 milliards de m³ alors que le potentiel en eau est de 4,6 milliards de m³ : 2,7 milliards de m³/an (58%) pour les eaux de surface et 1,9 milliards de m³/an (42%) pour les nappes.

II.3.1 La plaine du Cap Bon

La péninsule du Cap Bon, région littorale de la Tunisie du nord-est, se caractérise par des traits physiques typiquement méditerranéens. D'une superficie totale de 2 830 km², elle se présente comme une région de plaines, de bas plateaux et de collines, dominée par des reliefs montagneux. Le réservoir des six nappes du Cap Bon (Grombalia, Côte orientale, Takelsa, Tazoghane, El Houaria, Hammamet- Nabeul).

II.3.2 La Côte orientale

La nappe de la Côte orientale, située au nord-est du pays, s'étend sur une superficie d'environ 475 km² et une longueur d'environ 45 km. Le climat semi-aride de la région se caractérise par une pluviométrie moyenne annuelle comprise entre 400 et 500 mm. L'été est chaud et sec, l'hiver froid et humide. L'évaporation mensuelle est importante (autour de 1 300 mm/an), alors que l'humidité mensuelle se situe entre 68 et 76 %.

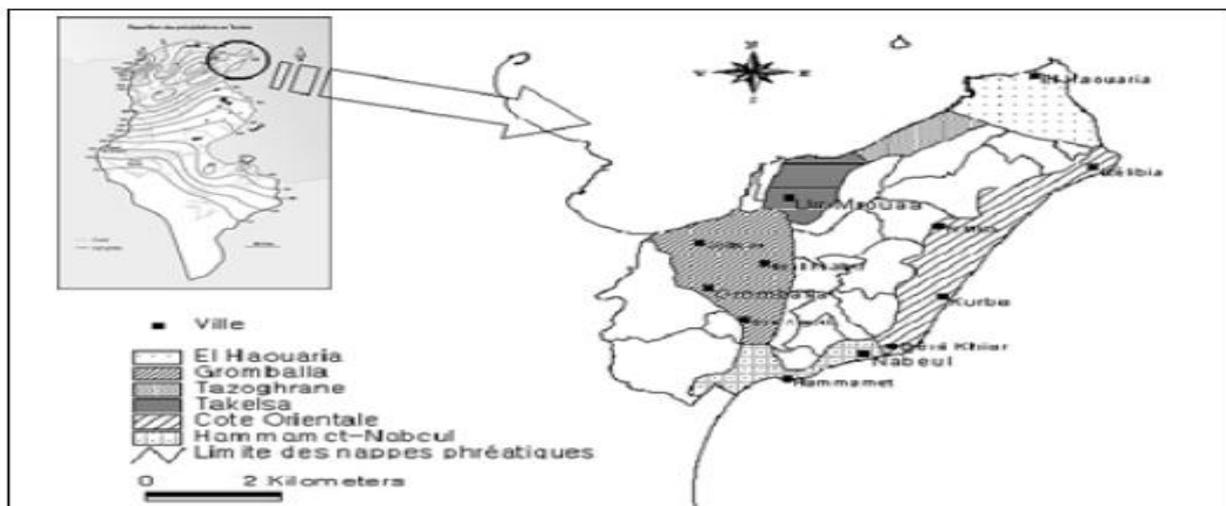


Figure II.11. Localisation du Cap Bon (nord-est de la Tunisie) et limites des nappes phréatiques. (Chattouti F., 2006)

Le système aquifère : est exploité par 9 239 puits de surface, dont 6 069 sont équipés de pompes. Si les ressources totales sont estimées à 50 Mm³/an, l'exploitation a dépassé 54 Mm³/an, ce qui aboutit à un taux de prélèvement de 108%. Le taux de renouvellement des

réserves hydriques est de 0,01. Le déficit de 4 Mm³ traduit la surexploitation intensive de la réserve régulatrice annuelle, ce qui se marque par la baisse continue du niveau piézométrique et l'intrusion du biseau salé le long de la côte (Chattouti, 2006). ‘‘Par exemple d’après le bilan 2000 des ressources en eau des nappes phréatiques du gouvernorat de Nabeul, les ressources renouvelables des aquifères phréatiques sont estimées à 181 Mm³/an et leur exploitation a 249 Mm³/an (CRDA, 2004, in Chattouti, 2006). ‘‘

3.2.1 Suivi du niveau piézométrique

Tableau II.3: Tableau récapitulatif des niveaux piézométriques (1963-2008). (Gaaloul.N, Rekaya.M, Jlassi.F, 2008)

Année	1963-1996	2002	2004	2006	2008
Niveau piézométrique	5 m	- 5 m	1 :-15m 2 :-5	1 : 0 à - 15 m 2 :25m	La poursuite de la diminution du niveau est plus liée à la réalisation de nouveaux puits et à l’approfondissement des puits existants qu’à l’augmentation des volumes pompés suite à l’électrification de plusieurs puits
Région	Tefelloune et Diarr El Hojjaj	El Mida - Tefelloune nord de Korba	1 : El Mida-Tafelloune 2 : nord de Korba	1 : zone entre Korba et le sud de Menzel Temime 2 : zone située à l’ouest de la nappe, vers la région de Somâa	

3.2.1 Suivi de la salinité en profondeur

Des campagnes de mesures de la salinité à différentes profondeurs ont été effectuées dans les piézomètres Lebna 1, Tafelloune 1 et Tafelloune 2

- à Lébna 1 : la salinité passe de 1,34 g/l à 18 m à 1,63- 1,65 g/l à 40 m de profondeur ;
- à Tafelloune 1 : la salinité évolue de 10 g/l à 15 m jusqu’à 29,48 g/l à 45 m ;
- à Tafelloune 2 : la salinité passe de 3,86 g/l à 15 m jusqu’à 9,17 g/l à 40 m.

La salinité est donc plus importante en profondeur qu’en surface ce qui confirme l’intrusion marine observée le long de la nappe côtière du Cap-Bon.

3.2.3 Suivi des résistivités

Deux campagnes de sondages électriques réalisées en 1993 et en 1995 par les services de la Direction générale des ressources en eaux ont confirmé l’évolution des biseaux salés dans la bande côtière. Dans la région intéressant la lagune de Korba et Diar EL Hajjaj, les sondages réalisés en 1993 montrent des résistivités apparentes comprises entre 20 et 40 ohm.m, confirmant qu’il s’agit de la zone la plus touchée par l’intrusion marine. Les profils

géophysiques réalisés en 1995 montrent une généralisation de cette intrusion. (Gaaloul.N, Rekaya.M, Jlassi.F, 2008)

3.2.4 Suivi des Chlorures

L'interprétation des résultats de plusieurs études a montré que les zones à fortes salinités de Diar el Hajej, Garaet Sassi et Tazerka-Korba sont probablement contaminées par les eaux marines. Cette hypothèse d'intrusion marine est justifiée par les fortes teneurs en chlorures, par la présence des réactions d'échanges cationiques inverses et par une piézométrie négative. (Kouzana.L, Ben Mammou.A. Gaaloul.N ,2007).

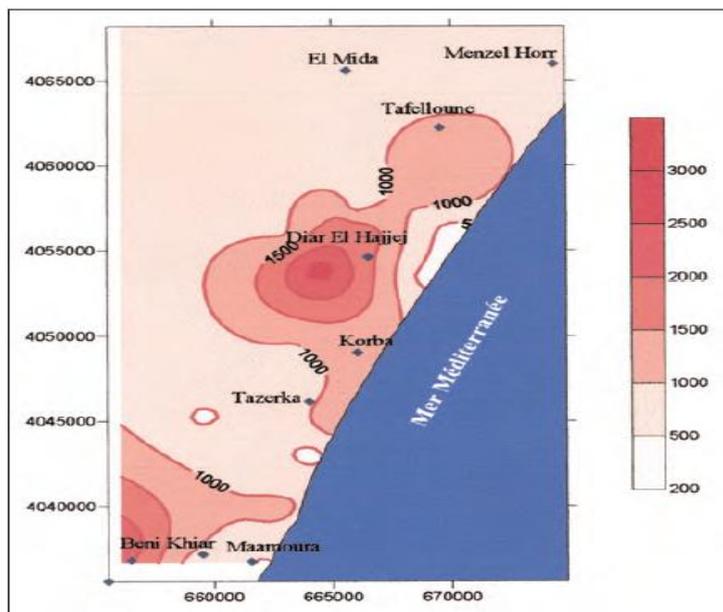


Figure II. 12 Carte d'iso-valeur des chlorures de la nappe de Korba de juin 2006 (en ppm)

(Kouzana.L, Ben Mammou.A. Gaaloul.N ,2007)

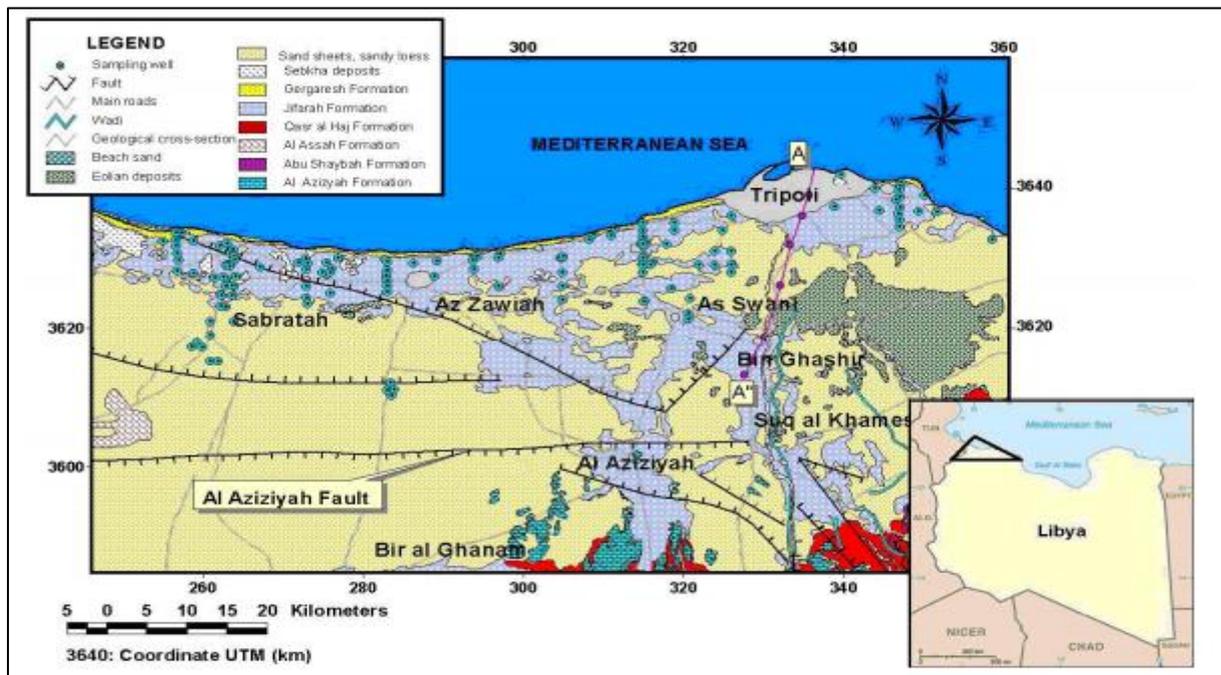
Les conditions climatiques et pédologiques de la nappe de la Côte orientale sont à l'origine d'une exploitation intensive des eaux souterraines aux fins d'irrigation. Ceci pose le problème de la protection de la nappe contre l'invasion saline et la contamination des eaux douces : étant directement ouvert sur la mer.

Dès les années 70, la nappe de la Côte orientale a connu un déséquilibre entre la recharge et l'exploitation, les prélèvements ayant dépassé le taux de renouvellement des réserves. La surexploitation de la nappe s'est soldée par des dépressions piézométriques qui se sont accentuées et élargies au fil du temps, ce qui a engendré l'inversion du gradient hydraulique et l'envahissement local de la frange côtière par les eaux marines

II.4 LYBIE

II.4.1 La plaine de Jifarah

La zone d'étude couvre la partie côtière de la plaine de Jifarah au nord-ouest de la Libye. La plaine de Jifarah est une zone plane de forme triangulaire d'environ 20 000 km². Elle est bordée par la mer Méditerranée au nord, la frontière tunisienne à l'ouest et la frontière de Jebel Naffusah au sud et à l'est. La zone côtière étudiée est une bande côtière d'environ 105 km de long et 18 km de large au nord du centre de Jifarah, comprenant la ville de Tripoli, où se concentrent plus de 50% de la population du pays.



La principal aquifère utilisé par la population de la plaine est l'aquifère Miocène Supérieur-Quaternaire, qui est appelé l'aquifère supérieur. Les eaux souterraines de l'aquifère supérieur sont surtout déversées par les puits de pompage et, dans une certaine mesure, les pertes par les sebkhas, en plus de la fuite vers l'aquifère inférieur. Dans le Jifarah, il y a plus de 30 000 puits d'abstraction. Des centaines de puits sont forés chaque année pour répondre à la demande croissante. Les puits sont répartis sur les parties où les activités agricoles sont plus intensives. La recharge disponible dans la plaine a été calculée à $633,55 \times 10^6 \text{ m}^3 / \text{an}$. La décharge de $1433,33 \cdot 10^6 \text{ m}^3 / \text{an}$ est plus de deux fois supérieure à la recharge. Cela montre clairement une situation déséquilibrée qui entraîne un déclin important du niveau d'eau et une détérioration de la qualité de l'eau. (Al Farrah.N, Martens.N.Walraevens.K ,2010)

Sur tous les échantillons prélevés. Les résultats montrent que: les plages de température sont comprises entre 18 et 26 ° C, la plage de pH est de 6,71 à 9,94, la conductivité entre 510

et 15 à 650 $\mu\text{S} / \text{cm}$ (25°C), la gamme TDS de 360-11,141 mg / l et la plage de concentration de Cl est de 2-5285 mg / l. Dans une proportion de 61% des échantillons, la concentration de Cl a dépassé la valeur OMS (1984) pour l'eau potable standard (250 mg / l) et dans 26% des échantillons, la concentration de Cl a dépassé la valeur OMS (1984) pour la valeur maximale admissible (600 mg / l). Les caractéristiques des résultats analytiques hydrochimiques sont résumées dans le tableau 1. Cette concentration élevée de Cl est probablement due au mélange avec de l'eau de mer, des concentrations élevées de chlorure se produisent dans tous les puits à quelques kilomètres de la côte et la concentration de Cl diminue progressivement vers le sud, pour la plupart des échantillons, où des teneurs élevées en Cl^- , SO_4^{2-} , Mg^{2+} et Na^+ sont principalement dues à un mélange avec de l'eau de mer et / ou à un remontage d'eau salée profonde. Cela est dû à la surexploitation de l'aquifère supérieur et à la pénurie de précipitations.

Ratio ionique

Le mélange conservateur d'eau de mer et d'eau douce devrait afficher une augmentation linéaire de Na^+ et de Cl^- (Sanchez Martos et al. 1999, in Al Farrah.N, Martens.N, Walraevens.K ,2010). Les rapports Na / Cl vont de 0,38 à 1,68. 74% des échantillons d'eau souterraine étaient inférieurs ou légèrement supérieurs au rapport de l'eau de mer de la Méditerranée (0,88). Les valeurs baissées par rapport au rapport de l'eau de mer méditerranéenne résultent de l'échange de cations lorsque l'eau de mer pénètre dans les aquifères d'eau douce.

Un autre rapport ionique utile est Cl / HCO_3 . Le rapport Cl / HCO_3 varie entre 0,48 et 26,5. L'effet de la salinisation peut être classé en utilisant le rapport Cl / HCO_3 , comme suit: $<0,5$ pour les non affectés, 0,5-6,6 pour les légèrement et moyennement affectés et $> 6,6$ pour les fortement affectés (Revelle, 1941; Todd, 1959, in Al Farrah.N, Martens, Walraevens .K ,2010). 23% des eaux souterraines étaient fortement affectées par l'eau salée et 77% étaient légèrement ou moyennement affectées.

Depuis la classification de diagramme de piper, Bien que différents faciès hydrochimiques aient été observés, les types CaCl et NaCl sont dominants. De grandes proportions des eaux souterraines sont de type NaCl, ce qui indique généralement une forte influence de l'eau de mer (Pulido Leboeuf, 2004, in Al Farrah.N, Martens N. Walraevens. K, 2010) ou un déversement d'eau salée profonde.

✚ En conclusion, des chutes de nappes phréatiques ont été enregistrées le long de la côte en raison de la surexploitation de l'aquifère a contribué à la détérioration de la qualité de l'eau

par intrusion marine et à l'exposition de l'eau saline profonde. L'aquifère montre une augmentation de la salinisation qui a atteint un niveau alarmant dans de nombreux endroits (La production agricole est touchée et des dégâts ont été causés à la terre supérieure dans plusieurs zones) tel que la majorité des eaux souterraines (80%) montre une composition qui est indicative d'une intrusion d'eau de mer selon la classification de Stuyfzand. Les types d'eau qui sont indicatifs de l'intrusion d'eau salée sont NaCl, MgCl et CaCl. CaCl est le type d'eau typique apparaissant pendant les processus de salinisation, en raison de l'échange de cations.

II.5 PALESTINE

II.5.1 La nappe phréatique de Gaza

« La nappe phréatique a été tellement exploitée que c'est de l'eau salée qui coule aujourd'hui au robinet. «95% de l'eau ne correspond pas aux standards de l'eau potable et, en 2016, ce sera 100%» assure Monther Shoblak, le directeur général du service des eaux de Gaza »

La nappe de Gaza s'étend sur une superficie de 365 km². Elle constitue la seule source naturelle d'eau pour répondre à une forte demande de la population estimée à 1,5 million d'habitants, avec une densité très élevée de l'ordre de 4100 personnes par kilomètre carré.

À première vue, les problèmes paraissent insurmontables. La seule source d'eau naturelle est l'aquifère côtier formé par des couches de sédiments imprégnés d'eau qui se trouve à quelques dizaines de mètres sous terre. Il est principalement alimenté par les 20 à 40 cm d'eau tombant chaque année sur les 360 km² de la bande de Gaza et par des eaux d'écoulement provenant d'Israël. La majeure partie des précipitations s'évapore, le reste s'infiltré dans le sol sableux et rejoint l'aquifère. Au total, la nappe se recharge chaque année de 75 à 125 millions de mètres cubes (Mm³). (Kaldy, Pierre, 2007)

A Gaza, la superficie territoriale est petite et les précipitations sont faibles. On estime que seulement 35 millions de mètres cube pénètrent le sol pour gagner la nappe phréatique. Vu l'accroissement de la population (de 50 000 personnes avant 1948, elle est passé à 1,2 million aujourd'hui, ce qui correspond à 29 mètres cube d'eau par habitant et par an !), cette nappe d'eau est surexploitée, et 70 % de ses ressources sont endommagées. Les Israéliens pompent de façon trop importante près de la bande de Gaza (près de 5000 puits de pompage, en grande majorité à but agricole) et assèchent les puits palestiniens où l'eau disponible est saumâtre et désormais polluée. et il faut noté ainsi, selon le scénario « pessimiste », si la surexploitation des ressources continue, à l'horizon 2020, il faudra trouver d'autres sources en eau car le potentiel hydrique de la nappe sera épuisé et la dépression s'enfoncera à près de 200 m du niveau de la mer.

Selon l'Autorité palestinienne, les Israéliens ont pompé dans les nappes aux abords immédiats de la bande de Gaza, causant ainsi la forte salinisation actuelle des puits joutons que 31 % des communautés palestiniennes ne sont pas raccordées , elles se retrouvent souvent non alimentées, soit du fait de camions citernes bloqués aux check points, soit parce que l'eau est saumâtre comme à Gaza et sur l'aquifère oriental en Cisjordanie et aussi Il n'existe pas de

rivière dans la bande de Gaza, mais un wadi qui rassemble les eaux de plusieurs wadi dans la région. Les Israéliens ont établi de petites digues sur ces wadi et la seule eau qui coule désormais dans le Wadi Gaza est celle usée et non recyclée de la ville de Gaza.... La Bande de Gaza a d'ores et déjà reçu un certain soutien international pour résoudre en partie la crise de l'eau (dessalage, importation d'eau et lutte contre la pollution), mais cela reste insuffisant par rapport à la demande locale.... Donc l'origine de ce problème ce n'est pas seulement la surexploitation mais c'est du politique israélienne. (André, Rousseau, 2007)

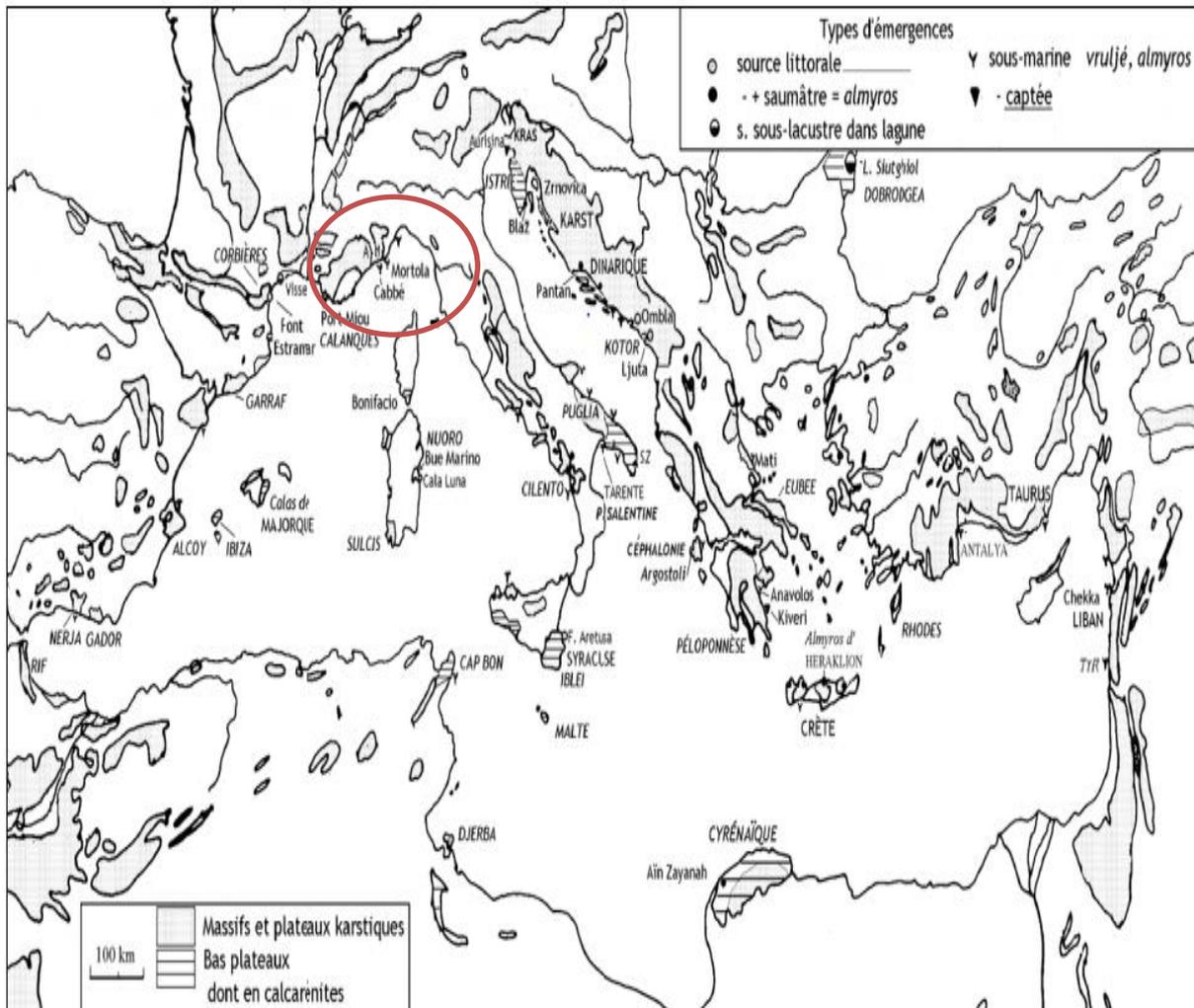
Le seul débouché naturel de la couche aquifère se fait vers la Méditerranée et constitue une barrière cruciale contre l'intrusion des eaux marines. Si les prélèvements annuels n'étaient que de 100 Mm³, la nappe pourrait durer sans fin. Mais les 4 000 puits creusés sur le territoire, trop nombreux, soutirent jusqu'à 160 Mm³ par an. Cette surconsommation de 60 Mm³ par an fait baisser la nappe phréatique qui se trouve parfois maintenant à 13 mètres sous le niveau de la mer. Les eaux salées de la Méditerranée et des poches de saumure plus en profondeur viennent combler le vide créé par les prélèvements. «L'intrusion de l'eau de mer est bien avancée, confirme Ahmad al-Yaqoubi, l'hydrologue qui dirige l'Agence palestinienne de l'eau, notamment dans les zones côtières et vers le sud.» La nappe phréatique de Gaza, dont dépendent les 1,5 million d'habitants de la bande de Gaza pour l'eau potable et l'agriculture, risque de connaître une forte dégradation en raison d'une surexploitation et d'une contamination aggravée par le récent conflit. (André, Rousseau, 2007)

✚ Donc les études ont permis de montrer qu'une surexploitation de la nappe induit une intrusion d'eau de mer vers les centres de pompage majeurs et que plus de 70% de l'aquifère représentent des eaux saumâtres ou salines et moins de 30% sont de l'eau douce. Ainsi, l'intrusion d'eau de mer pose présentement le risque le plus important pour les structures municipales de distribution. En effet, Près de 90% des puits ont déjà une salinité supérieure au maximum recommandé par l'Organisation mondiale de la santé (OMS) et l'aquifère de Gaza pourrait s'avérer inutilisable dans les deux ou trois prochaines décennies selon un rapport de 2003 du Programme des Nations unies pour l'environnement.

II.6 ITALIE

II.6.1 Source de la Mortola

La source **Polla Rovereto**, plus connue sous le nom de « **source de la Mortola** » fut découverte Par Rovereto en 1928 (Calvino et Stefanon, 1963, in PERRINE .FLEURY, 2005). Située en Italie à proximité de la frontière franco-italienne, à 800 m de la côte, elle s'écoule à une profondeur de 35 m. Etudiée dans les années 1960 par Calvino et Stefanon (1963, 1969), elle est caractérisée par une eau relativement douce toute l'année. Elle présente un exutoire principal et plusieurs sorties annexes distantes de quelques mètres. Elle s'écoule au travers d'un petit conduit bien individualisé.



**Figure II.15 La situation de la source de Mortola (Italie).
(PERRINE .FLEURY, 2005)**

Ce phénomène a pu être observé lors de la mise en place du système de captage de la source de la Mortola en juillet 2003. Avant le captage, la source de la Mortola s'écoulait naturellement à la cote – 36 m. Plusieurs petites sources annexes distantes de quelques mètres

s'écoulaient à une profondeur proche. L'eau qui s'écoulait au travers de l'ensemble des sources était douce, la salinité au cours de l'année étant inférieure à 1,5 g/l. La charge hydraulique de la Mortola était égale à la charge hydraulique des sources annexes, aux pertes de charge près (ces dernières sont considérées négligeables, les sources étant très proches les unes des autres). La charge hydraulique de l'eau douce de l'ensemble des sources était supérieure à la charge hydraulique de la mer car les sources coulaient en permanence. Mis en place en juillet 2003, le dispositif de captage se révéla dès le début inadapté au captage d'eau douce. En effet, l'eau conduite en surface était caractérisée par une forte conductivité. A la fin de juillet 2003, la conductivité électrique mesurée de façon ponctuelle à plusieurs reprises valait 22 mS/cm (soit une salinité d'environ 13 g/l), alors que l'eau écoulée à la source juste avant la mise en place du système de captage était douce avec une conductivité de l'ordre de 3 mS/cm, soit 1,5 g/l. (PERRINE .FLEURY ,2005)

D'après (PERRINE .FLEURY, 2005), La mise en place du dispositif de captage appelé « la Tulipe », et pour conséquence de remonter d'environ 10 m l'exutoire naturel de la source de la Mortola .Suite à cette mise en place, il a été constaté un réel changement dans le fonctionnement de la source. Il se traduit par la production d'eau saumâtre à la sortie du dispositif de captage et une aspiration d'eau de mer au niveau des sources annexes. Il y a deux hypothèses qui permettent d'expliquer les phénomènes observés :

➤ **La première** consiste à dire que la remontée de 10 m de l'exutoire naturel a pour effet d'augmenter le gradient de charge hydraulique au niveau de la source. Il s'ensuit une augmentation des débits d'eau douce à la source, avec création d'un rabattement de la nappe. Cependant deux remarques font qu'elle n'est pas valable. La première est que le rabattement de la nappe suite à la remontée de 10 m de l'exutoire devrait être d'environ 25 cm d'après la loi Ghyben Herzberg. Cette valeur est très forte et n'est pas compatible avec le temps écoulé avant l'intrusion d'eau de mer. La seconde remarque est que lors d'essais de mise en pression du système de captage (le dispositif est vanné, ce qui permet l'augmentation des pertes de charge dans le système de captage), l'eau circulant par la Tulipe devient douce, le débit transitant par le dispositif diminue et les petites sources fonctionnent à nouveau. Une nouvelle fois les inversions du gradient de charge hydraulique sont instantanées et montrent que les variations de charge hydraulique induites par la Tulipe sont locales.

➤ **la seconde** hypothèse qui consiste à considérer les variations de charge hydraulique localement au niveau du dispositif de captage. Ainsi, la remontée de l'exutoire suite à la mise

en place d'un ouvrage de grande hauteur crée une diminution du poids de la colonne d'eau de mer et donc une augmentation du gradient de charge hydraulique entre le nouvel exutoire et la mer. Il se produit une augmentation des débits à cet exutoire et un rabattement localisé dans le conduit. Ce rabattement a pour conséquence la diminution locale de la charge hydraulique et se traduit par une inversion du gradient de charge hydraulique entre le conduit et la mer au niveau des petites sources restées à une profondeur de 35 m. Du fait de l'inversion du gradient de charge hydraulique au niveau des petites sources restées ouvertes sur le milieu marin, c'est l'eau de mer qui pénètre dans le conduit.

II.7 ESPAGNE

Le sud de l'Espagne est l'un des lieux d'Europe où le risque potentiel de désertification est dû aux propriétés climatiques spéciales et à l'activité humaine développée dans cette zone. L'absence de l'eau est la cause principale des dangers croissants de jour en jour, donc les pompages et les actions hydrauliques sont fréquents. Ce type de problèmes entraîne une diminution de la qualité et la quantité des ressources en eau, et les zones côtières sont particulièrement sensible car il est nécessaire d'ajouter l'intrusion marine comme un autre risque pour la qualité des eaux souterraines.

II.7.1 L'aquifère de Motril-Salobreña

L'aquifère de Motril-Salobreña, d'une surface de 42 km², la structure géologique de ces Matériaux est très complexe. La frontière sud est marquée par la mer Méditerranée.

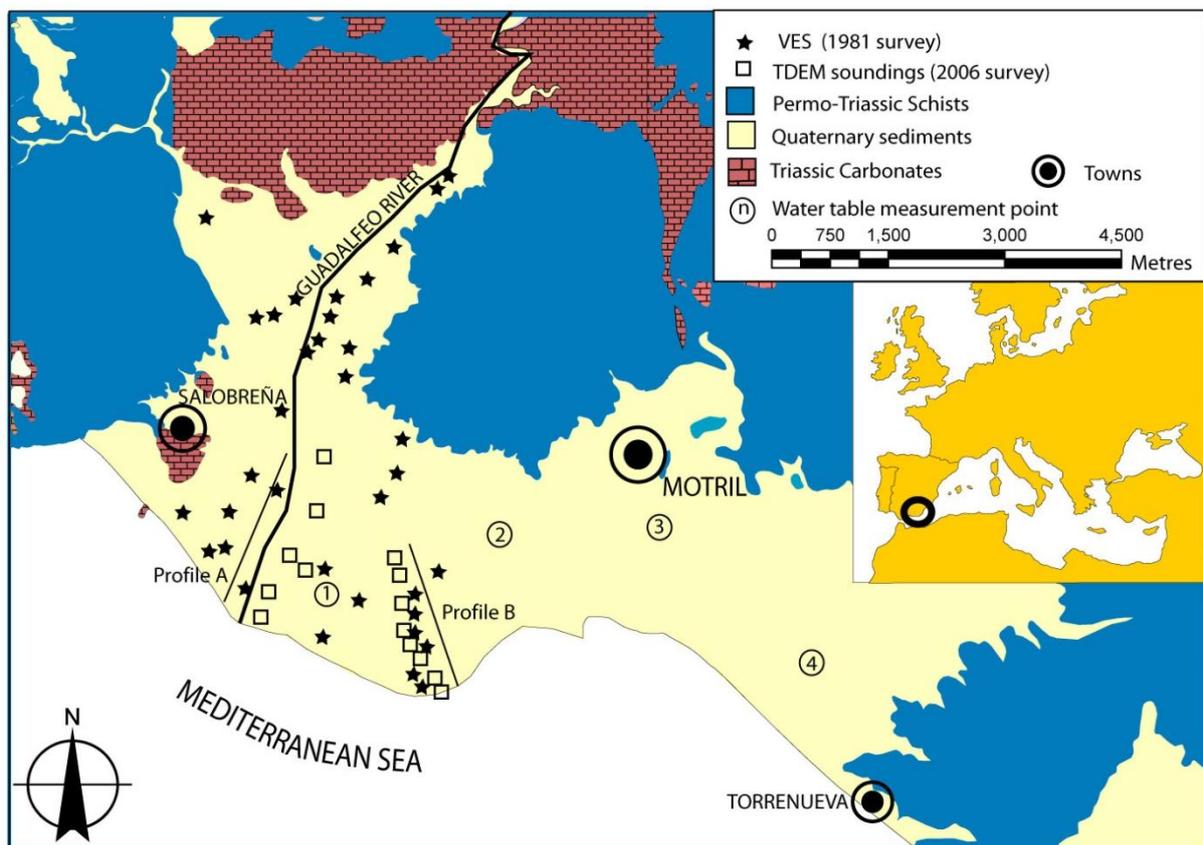


Figure II.16 Situation géographique de l'aquifère de Motril-Salobreña.

(Duque et al. 2008)

L'eau souterraine de l'aquifère côtier Motril-Salobreña (dans le sud de l'Espagne) souffre beaucoup. Des changements survenus au cours des vingt-cinq dernières années liés à certaines actions humaines. Ils affectent directement ou indirectement à la dynamique des eaux souterraines, et du fait du contact avec la mer méditerranéenne dans la limite sud de l'aquifère, pourrait changer l'emplacement du coin salin.

La population des principales villes de la région connaît une croissance continue à l'été, il atteint des maximums importants en raison du tourisme. En outre, il est prévu de logement développement avec des terrains de golf associés. Le stockage de l'aquifère est d'environ 250 Mm³ (Castillo, 1975; in Duque et al. 2008) avec des ressources annuelles de 35 Mm³, donc pour le moment, aucun problème dans alimentation en eau. Quoi qu'il en soit, il est essentiel de savoir si tous ces changements ont un impact sur les eaux souterraines de l'aquifère de Motril-Salobreña, en particulier celles liées à l'intrusion d'eau de mer avant que les effets ne commencent à affecter la population.

Méthode de détection de l'intrusion marine

La meilleure façon de détecter les Intrusion dans cet aquifère est les méthodes géophysiques en raison de la grande profondeur et l'absence de forages profonds .Alors une comparaison entre les résultats obtenus avec les méthodes électriques en 1981 (Geirnaert et al, 1981) et ceux acquis d'une manière très récente : enquête électromagnétique en 2006 (Duque et al. 2008) a été effectuer :

- Les enquêtes développées jusqu'en 1981 par différents projets ont utilisé des sondages électriques verticaux de différentes longueurs dans la zone occidentale de l'aquifère, 34 VES ont été organisés en deux profils perpendiculaires à la côte et deux autres parallèles à la côte. Les résultats (Geirnaert et al, 1981, in Duque et al,2008) ont indiqué une intrusion marine dans la VES la plus proche de la mer.
- En 2006, Duque et al, a conçu une enquête TDEM avec 28 points de mesure distribués en 4 Profils. Seulement 2 des profils étaient situés dans la zone ouest, de sorte qu'ils ont été choisis pour Comparer les résultats avec ceux de 1981 perpendiculaire à la côte.

La comparaison, après 25 ans, montre presque la même intrusion marine. Il est nécessaire de tenir compte de certaines différences dans l'interprétation des données dans les résultats de 1981 n'ont pas atteint de grandes profondeurs dans les points les plus proches de la côte, donc ils ont interprété une petite diminution des résistivités comme intrusion marine. Dans l'enquête de 2006, il a été possible d'atteindre 200 mètres de profondeur, donc des valeurs plus faibles ont été détectées qui peuvent être réellement liés à l'eau de mer.

La comparaison détaillée des sondages VES et TDEM montre une situation très similaire. Compte tenu des différences entre les techniques et dans l'emplacement des points

de mesure, donc ils sont supposés que l'intrusion saline est stable dans la zone ouest de l'aquifère de Motril-Salobreña.

L'intrusion marine est directement liée à la nappe phréatique; donc l'évolution de la nappe phréatique sera liée aux résultats géophysiques obtenus. La différence entre le niveau actuel et le niveau de la nappe phréatique de 25 ans montre que le niveau d'eau dans la nappe est réduits, dans les 2 derniers années, une diminution de la nappe phréatique se produisait mais ressemble à ce qu'il n'est pas affecté par l'intrusion marine parce que c'est une période de sécheresse, mais peut-être des actions humaines dans les derniers années commencent à affecter. (Carlos Duque1 et al, 2008)

✚ Donc comme conclusion, l'intrusion marine dans l'aquifère de Motril- Salobreña est stable depuis 1981 alors la situation dans les derniers 25ans et maintenant est très similaire. L'intrusion marine ne se développe pas d'une manière dangereuse, mais elle commence une période sèche avec une baisse de la nappe phréatique, alors il est compliqué de différencier l'activité humaine et les effets climatiques, toutefois, si la capacité de récupération de l'aquifère pendant les périodes de pluie est affectée par les changements dans la zone, il pourrait être le point de départ pour l'empiètement de l'eau salée. Une activité de surveillance adéquate sera possible pour quantifier et conseiller pour une gestion durable des ressources d'un des aquifères les mieux préservés du sud de l'Espagne.

II.8 CONCLUSION

Ces zones côtières du bassin méditerranéen cité ci-dessus présentent une vulnérabilité moyenne à forte d'après des résultats obtenus à partir d'études basées sur des approches et des méthodes différentes. Globalement, les pays du Sud et de l'Est de la Méditerranée apparaissent plus vulnérables que ceux de la rive Nord, du fait, d'une part, qu'ils soient plus exposés à l'accélération de la désertification et de l'aridité des sols, à l'augmentation de la raréfaction des ressources en eau et, d'autre part, qu'ils soient dotés de structures économiques qui dépendent plus fortement des ressources naturelles et même à cause des politiques..., cette dernière observation on va l'entamer dans le chapitre suivant qui portera sur une étude comparative des sévices de l'intrusion marine dans les aquifères du Nord et du sud de la méditerranée.

CHAPITRE III

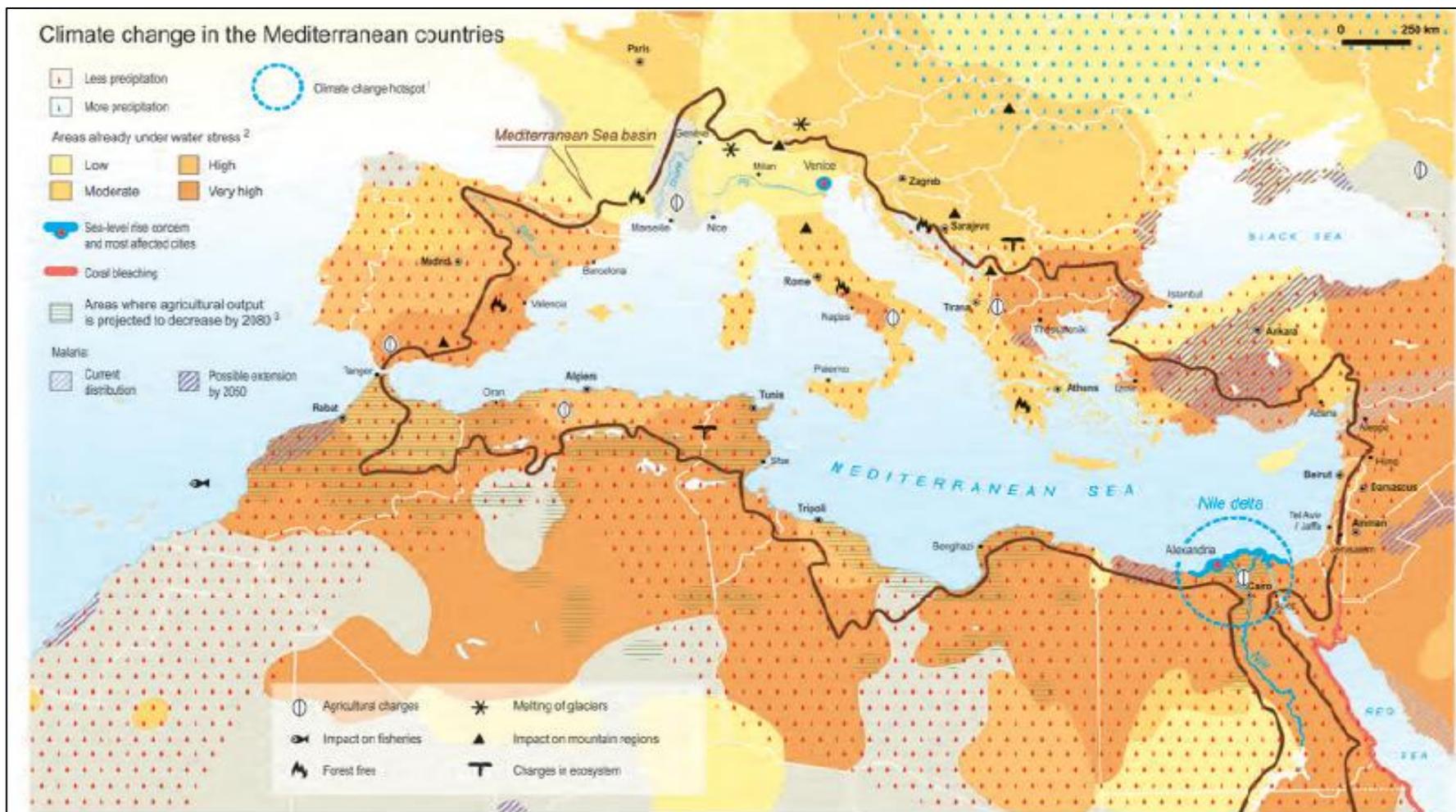
ETUDE COMPARATIVE ENTRE LES DEUX RIVES NORD/SUD

II.1 INTRODUCTION

L'importante disparité de la répartition des ressources en eau, couplée aux nombreux phénomènes climatiques, aux situations démographiques et aussi à la surexploitation des eaux souterraines associés qui affectent une région, font du bassin méditerranéen l'une des zones du monde les plus vulnérables au risque d'intrusion marine. Dans cette partie, on a abordé ce problème par une étude comparative de l'intrusion marine entre la rive nord et la rive sud de la méditerranée. Dans ce contexte, l'étude sera basée sur les causes qui participent dans le développement de ce phénomène qui sont décrites dans les parties ci-après de ce chapitre.

III.2 Changement climatique

Le bassin méditerranéen est un espace tricontinental, ouvert aux échanges avec les territoires eurasiatiques et africains. Le climat méditerranéen est un climat de transition entre le climat désertique du Sud et celui des moyennes latitudes du Nord. Il est caractérisé par deux saisons, pluvieuses en automne et au printemps et des sécheresses estivales. (Hypatie.N, 2012)



**Figure III.1 Changement de climat dans les pays méditerranéens.
(UNEP GRID-Arendal / Zoï à partir de IPCC, 2007)**

D'après Margat et Treyer (2004), la répartition des apports en pluie est très inégale et le volume total des précipitations sur le bassin est de $1100 \text{ km}^3 \cdot \text{an}^{-1}$ en moyenne sachant que les $2/3$ étant concentrés sur $1/5$ du bassin. La saison sèche structurelle (dite normale) peut durer d'un à deux mois au Nord et plus de quatre mois au Sud et à l'Est du bassin méditerranéen.

D'après Margat et Treyer (2004), Les précipitations génératrices d'écoulement sont très inégalement distribuées allant de moins de 10 mm dans les zones les plus arides du Sud à 2000 mm, localement, dans les Alpes au Nord. $620 \text{ km}^3 \cdot \text{an}^{-1}$ d'apports totaux de précipitations sont génératrices d'écoulement. A titre d'exemple, La précipitation au Nord peut atteindre 700 mm par an en moyenne et au Sud elle ne dépasse pas les 100 mm par an. (Hypatie.N, 2012)

D'après El-Bagouri (2007), la plupart des pays de la rive Sud connaissent des précipitations très variables et des périodes de sécheresse récurrentes plus ou moins graves ou longues. Les températures moyennes annuelles, ainsi que les températures maximales et minimales varient également et peuvent descendre au-dessous de zéro ou atteindre plus de $50 \text{ }^\circ\text{C}$ selon les saisons et les régions.

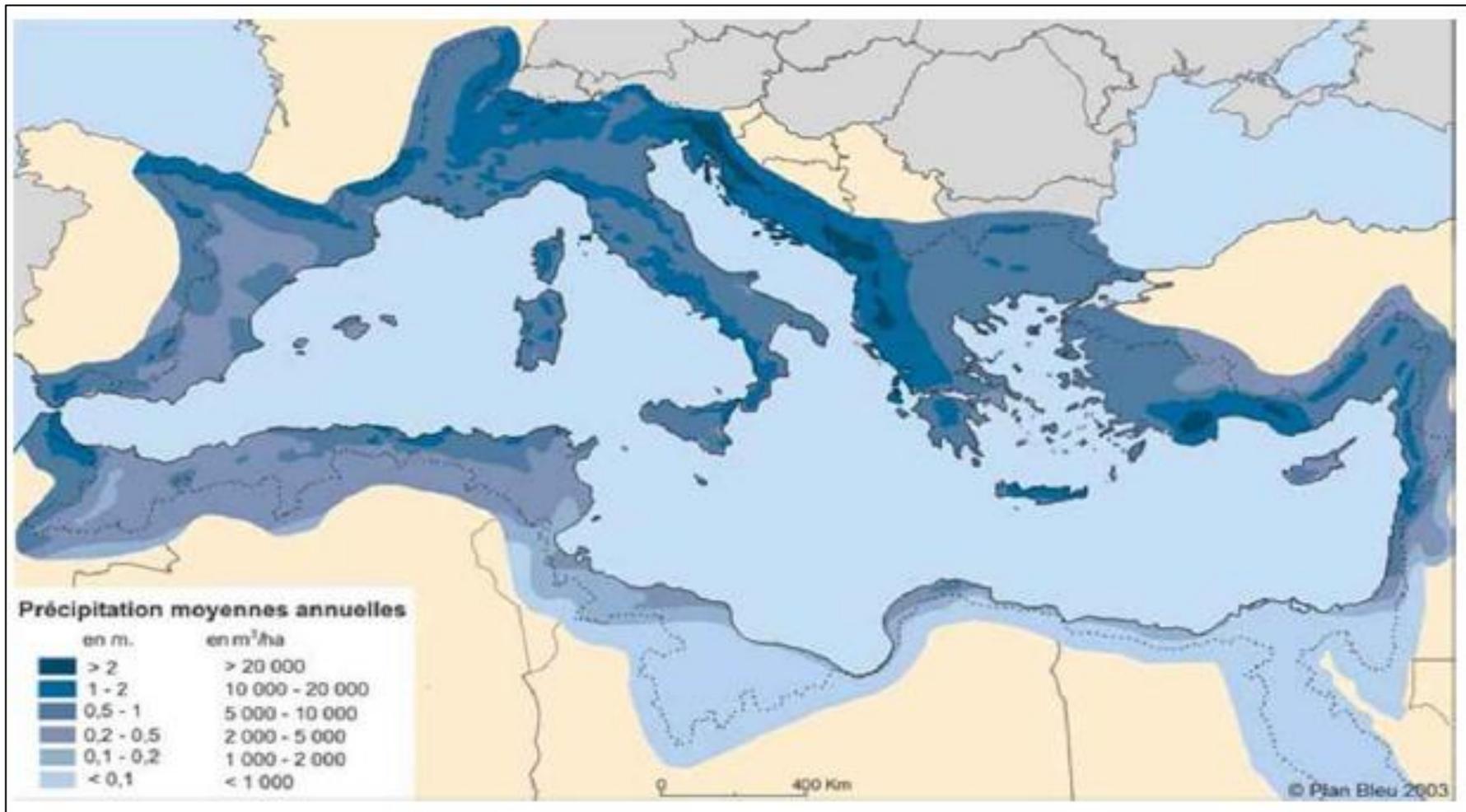


Figure III.2 Précipitations moyennes et annuelles au niveau du pourtour méditerranéen (Plan bleu, 2003)

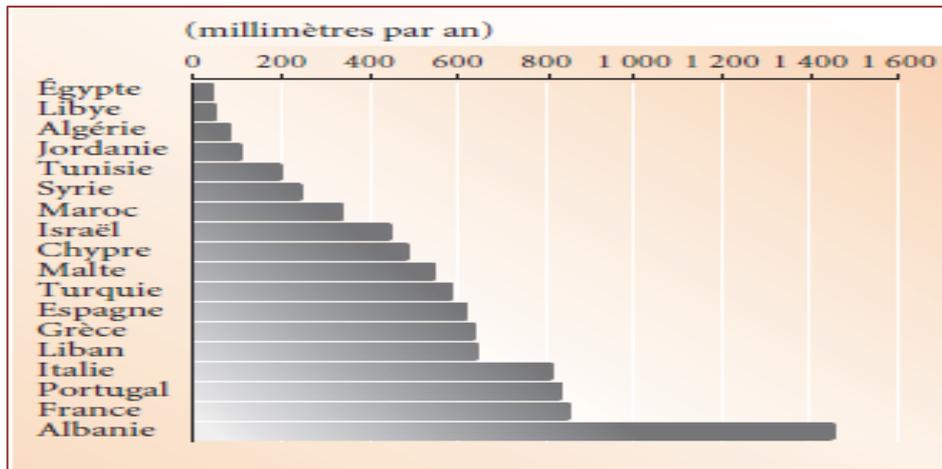
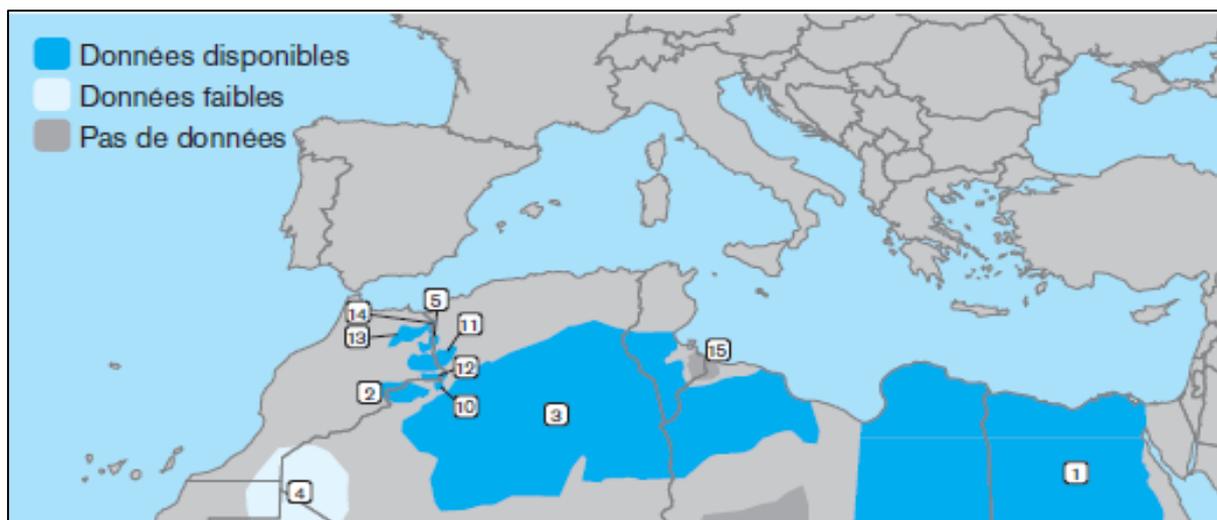


Figure III.3 Précipitations annuelle moyenne rapportées à la superficie des pays méditerranéens (FAO-Aquastat, 2003)

Par conséquent, le climat de la région méditerranéenne est caractérisé par une diversité importante, avec des régions hyper-arides et très humides. Les précipitations sont notamment inégalement réparties à travers la région et sont également caractérisées par une variabilité intra et inter annuelle importante. Ces caractéristiques des précipitations influencent la géographie et les régimes des écoulements, qui sont ainsi également variables dans l'espace et le temps.



Figure III.4 L'état des données dans Nord-Est de la méditerranée (UNEP GRID-Arendal / Zoï, 2009)



**Figure III.5 L'état des données dans le Sud de la méditerranée
(UNEP GRID-Arendal / Zoï, 2009)**

Ainsi, le bassin méditerranéen est particulièrement sensible aux modifications climatiques (Milano, 2010). Les zones méditerranéennes les plus vulnérables devraient être celles de l'Afrique du Nord voisines de zones désertiques, les grands deltas, les zones côtières des rives Nord et Sud du bassin ainsi que les zones à forte croissance démographique et socialement vulnérables. Globalement, les pays du Sud et de l'Est de la Méditerranée apparaissent plus vulnérables que ceux de la rive Nord, du fait, d'une part, qu'ils soient plus exposés à l'accélération de la désertification et de l'aridité des sols, à l'augmentation de la raréfaction des ressources en eau et d'autre part, qu'ils soient dotés de structures économiques qui dépendent plus fortement des ressources naturelles (PNUE/PAM-Plan Bleu, 2009).

En particulier des pays Arabes de la rive Sud. Bien qu'encore difficilement quantifiables à des échéances précises, les effets du changement climatique global sur le cycle de l'eau – précipitations, évaporation, écoulement – devraient très vraisemblablement appauvrir les ressources en eau, et plusieurs pays du Sud ont déjà récemment révisé à la baisse leurs estimations de ressources (moins 20 % en Algérie et moins 25 % au Maroc) (PNUE/PAM-Plan Bleu, 2009).

Cependant, un certain consensus existe autour de la présomption d'un plus grand contraste du climat. Au Sud, le risque d'un climat plus aride ne peut être exclu et il aurait pour double effet, au cours du XXI^e siècle, de réduire les ressources et d'amplifier les besoins en eau en augmentant l'évaporation et en aggravant les sécheresses. A titre d'exemple, au Nord serait plutôt à craindre un climat plus contrasté, plus pluvieux en hiver, plus sec en été et plus

irrégulier Ceci ne serait pas non plus sans conséquences sur le régime des eaux et pourrait aussi accentuer les besoins en eau en saison estivale.

III.3 Le dynamique démographique

La méditerranée comptait 285 millions d’habitants en 1970 et 378 millions d’habitants en 1990. En 2005, la taille démographique du bassin atteignait 454 millions d’habitants (soit 7 % de la population mondiale sur 6,3 % des surfaces émergées du globe) et devrait se situer autour de 520 millions à l’horizon 2020. Le doublement démographique n’est donc pas loin de se réaliser en l’espace d’un demi-siècle. (Mediterra ,2008)

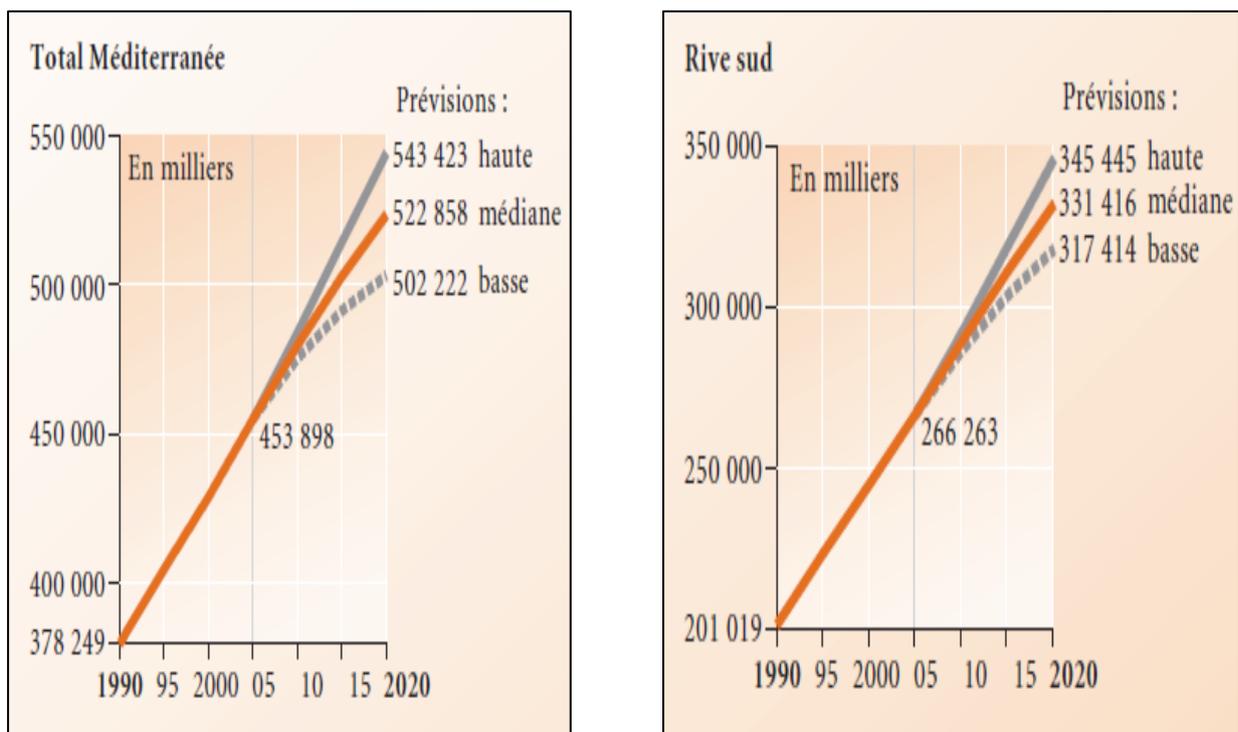


Figure III.6 Population en méditerranée 1990-2020 (ONU, 2009, in Mediterra, 2008)

Tableau III.1 : Population des pays méditerranéens (WDI et Plan Bleu, 2008)

Pays	1980	1985	1990	1995	2000	2005	2006
Espagne	37 386	38 408	38 836	39 387	40 263	43 398	44 121
France	53 880	55 170	56 735	57 844	58 896	60 873	61 257
Italie	56 434	56 593	56 719	56 846	56 949	58 607	58 843
Grèce	9 643	9 934	10 161	10 634	10 918	11 104	11 147
Monaco						33	33
Malte	364	344	360	378	390	404	406
Chypre	513	542	580	651	694	758	771
Slovenie	1 901	1 973	1 998	1 990	1 989	2 001	2 007
Croatie	4 588	4 701	4 780	4 670	4 503	4 443	4 441
Bosnie-Herzégovine	3 914	4 122	4 308	3 421	3 787	3 915	3 926
Monténégro	576	576	587	623	670	608	601
Albanie	2 671	2 957	3 289	3 150	3 080	3 154	3 172
Turquie	44 484	50 286	56 154	61 737	67 420	72 065	72 975
Syrie	8 971	10 815	12 721	14 610	16 511	18 894	19 408
Liban	2 785	2 891	2 974	3 491	3 772	4 011	4 055
Israël	3 878	4 233	4 660	5 545	6 289	6 924	7 049
Territoires Palestiniens			1 970	2 396	2 966	3 626	3 775
Égypte	43 674	49 186	55 137	60 648	66 529	72 850	74 166
Libye	3 063	3 850	4 364	4 833	5 346	5 918	6 039
Tunisie	6 384	7 260	8 154	8 958	9 564	10 029	10 128
Algérie	18 811	22 097	25 283	28 265	30 506	32 854	33 351
Maroc	19 380	21 779	24 167	26 435	28 466	30 143	30 497
Totaux							
Rive Nord	171 870	175 320	178 354	179 594	182 138	189 297	190 725
Rive Sud et Est	151 429	172 398	195 584	216 917	237 368	257 313	261 442
Méditerranée	323 299	347 718	373 938	396 512	419 505	446 610	452 167
Monde	4 431 033	4 823 325	5 263 924	5 676 845	6 076 654	6 461 660	6 538 083
Rapports							
Rive Nord / Méditerranée	53%	50%	48%	45%	43%	42%	42%
Rive Sud et Est / Méditerranée	47%	50%	52%	55%	57%	58%	58%
Méditerranée / Monde	7,3%	7,2%	7,1%	7,0%	6,9%	6,9%	6,9%

Seules les populations de la rive Sud augmentent actuellement, enregistrant une progression de 65 % entre 1990 et 2020, tandis que les pays méditerranéens du Nord atteignent à peine les 8 % de croissance démographique. La méditerranée est coupée en deux avec un Nord où la population n'augmente presque plus (+14 millions de personnes entre 1990 et 2020) et un Sud où la démographie explose (+130 millions de personnes).

Ainsi lorsque le Nord de la méditerranée compte un habitant de plus, le Sud en compte 10 nouveaux, avec en perspective un équilibre démographique bousculé : si jusque dans les années 1980, on avait à peu près un méditerranéen du nord pour un méditerranéen du Sud, en 2020, deux tiers des méditerranéens seraient localisés sur la rive Sud.

III.4 Demande en eau

Une grande partie de la population du bassin se concentre dans l'espace littoral avec des conséquences sur l'économie des ressources en eau : les demandes sont fortement concentrées et sont souvent supérieures aux ressources locales disponibles, ce qui conduit à faire appel aux ressources de l'intérieur des terres.

La demande d'eau a doublé au cours de la deuxième partie du XXe siècle, avec une augmentation supérieure à 50 % au cours des 25 dernières années. Il existe des différences entre régions : au Nord, décélération depuis les années 80, à l'Est et au Sud, croissance accélérée avec une augmentation de 70 % pendant le dernier quart de siècle. Les demandes ont été croissantes dans tous les secteurs. L'agriculture, avec une croissance linéaire, reste dominante, mais sa part est passée de 75 % dans les années 50 à 60 % aujourd'hui. La part des collectivités et de l'énergie a augmenté et la demande industrielle a ralenti.

De même que les apports, les demandes sont inégalement réparties entre pays et secteurs d'utilisation. Les pays les plus demandeurs sont par ordre d'importance l'Egypte, l'Italie, l'Espagne, la Turquie, et la France, les trois premiers pays regroupant 69% du total. Dans l'ensemble, entre 1950-2000 les demandes en eau par habitant ont augmenté de 63% au Nord, 20% à l'Est et ont diminué de 35% au Sud. Par grande région, à l'Est, les demandes par tête sont les plus faibles, et celles du Sud sont un peu supérieures à celles du Nord en raison de l'importance de l'irrigation en Egypte. (Hypatie.N, 2012)

Tableau III.2 : Demande en eau, totale et par secteur, période 2000-2005 (Plan bleu, 2008)

Pays	Demande totale	Eau potable	Irrigation	Industrie	Energie	Eau potable	Irrigation	Industrie	Energie
	(km ³ /an)		(km ³ /an)			(%)			
Espagne	37,070	5,300	24,160	1,440	6,170	14,3	65,2	3,9	16,6
France	34,960	6,200	4,100	3,380	21,280	17,7	11,7	9,7	60,9
Italie	41,982	7,940	20,136	7,986	5,919	18,9	48,0	19,0	14,1
Grèce	7,800	1,250	6,300	0,130	0,120	16,0	80,8	1,7	1,5
Malte	0,058	0,031	0,024	0,003		53,4	41,4	5,2	
Chypre	0,253	0,067	0,182	0,004		26,5	71,9	1,4	
Slovenie	0,894	0,187	0,007	0,080	0,620	20,9	0,8	8,9	69,4
Croatie	0,375	0,314	0,001	0,050	0,010	83,7	0,3	13,3	2,7
Bosnie-Herzégovine	0,930	0,230	0,600	0,100		24,7	64,5	10,8	
Monténégro	0,050	0,050				100,0			
Albanie	1,700	0,460	1,050	0,190		27,1	61,8	11,2	
Turquie	40,100	6,000	30,100	4,000		15,0	75,1	10,0	
Syrie	16,690	1,426	14,669	0,595		8,5	87,9	3,6	
Liban	1,400	0,450	0,940	0,010		32,1	67,1	0,7	
Israël	1,950	0,712	1,129	0,113		36,5	57,9	5,8	
Territoires Palestiniens	0,280	0,125	0,155			44,6	55,4		
Égypte	70,430	4,760	58,800	2,200	4,670	6,8	83,5	3,1	6,6
Libye	4,260	0,600	3,540	0,120		14,1	83,1	2,8	
Tunisie	2,457	0,406	1,918	0,133		16,5	78,1	5,4	
Algérie	6,270	1,330	3,940	0,800	0,200	21,2	62,8	12,8	3,2
Maroc	9,488	0,855	8,475	0,158		9,0	89,3	1,7	
Totaux et moyennes									
Rive Nord	126,072	22,029	56,560	13,363	34,119	17,5	44,9	10,6	27,1
Rive Sud et Est	153,325	16,664	123,666	8,129	4,870	10,9	80,7	5,3	3,2
Méditerranée	279,397	38,693	180,226	21,492	38,989	13,8	64,5	7,7	14,0
Rapports									
Rive Nord / Méditerranée	45%	57%	31%	62%	88%				
Rive Sud et Est / Méditerranée	55%	43%	69%	38%	12%				

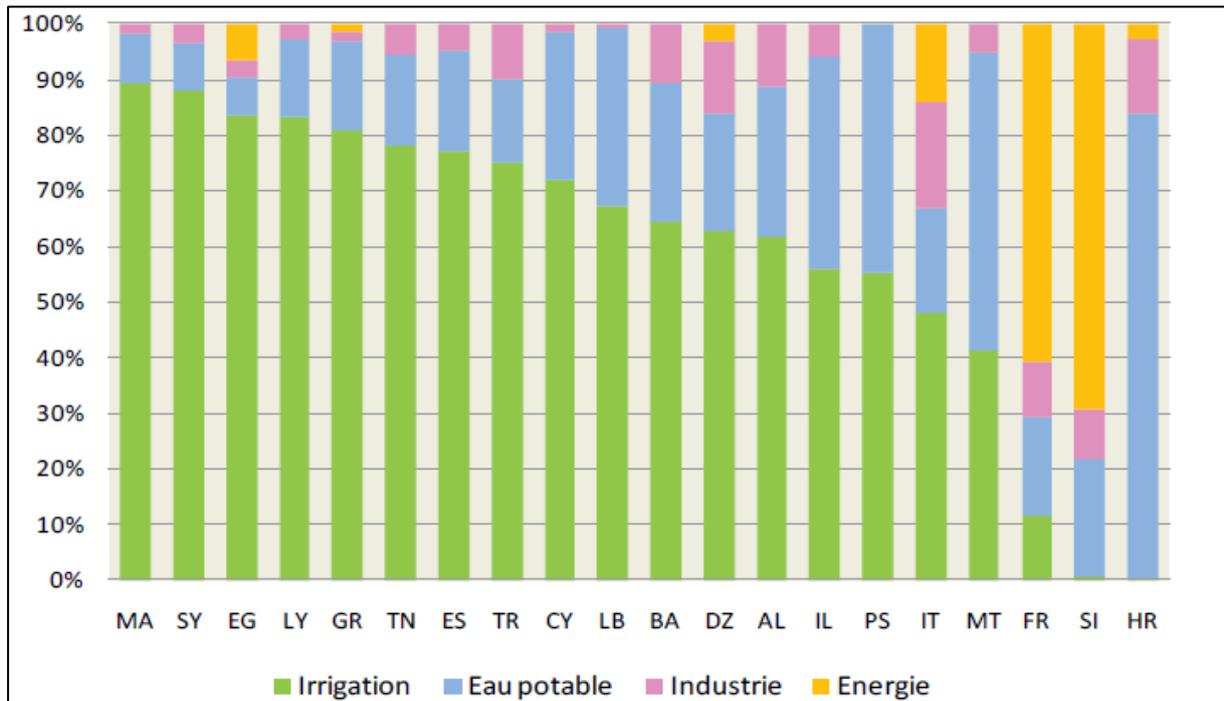


Figure III.7 Demande totale en eau par secteur d'utilisation (période 2005-2007)
(Margat et Treyer, 2007, in Hypatie.N, 2012)

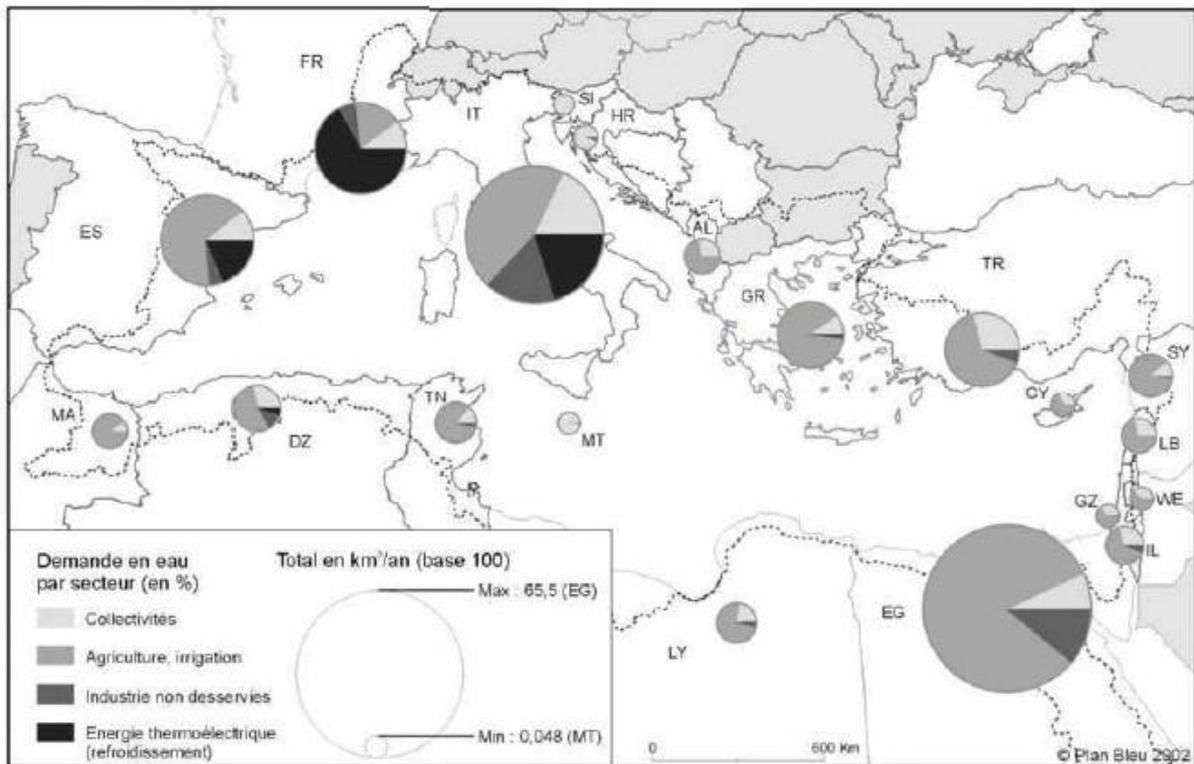


Figure III.8 Demandes en eau actuelles, totales et par secteur sur le bassin méditerranéen
(Margat et Treyer, 2007, in Mediterra, 2008)

Au cours de ces cinquante dernières années la demande en eau, tout secteur d'activité confondu, a doublé pour atteindre 280 km³/an en 2007. L'agriculture reste le premier consommateur d'eau avec 64 %, suivi par l'industrie (y compris le secteur énergétique) à 22 % et le secteur domestique avec 14 %. La part de l'eau d'irrigation est supérieure à 50 % dans tous les pays à l'exception des pays de l'Est adriatique et de la France, elle peut atteindre près de 90 % en Syrie et au Maroc. Selon les techniques d'irrigation et les conditions climatiques, la demande en eau d'irrigation varie de 5000 m³/habitant/an au Nord à peu près du double (9600 m³/habitant/an) au Sud. Si la demande totale en eau par habitant au Sud et à l'Est reste légèrement inférieure à celle du Nord avec respectivement 600 m³/habitants/an et 680 m³/habitant/an, la demande en eau potable par habitant varie quant à elle d'environ 65m³/habitant/an (175 litres/jour) au Sud et à l'Est à près de 120 m³/habitant/an (330 litres/jour) au Nord. (PNUE/PAM-Plan Bleu, 2009)

III.5 L'exploitation des ressources en eau

L'augmentation de la demande en eau, que ce soit pour les besoins agricoles ou pour les besoins industriels et domestiques, exerce une pression de plus en plus sensible sur les ressources en eau. Par ailleurs, les aquifères côtiers constituent souvent une importante source d'eau douce, en provenance de l'infiltration des précipitations. Dans la plupart des pays méditerranéens, les prélèvements en eaux souterraines répondent largement à la demande en eau potable et contribuent dans une mesure plus variable à l'alimentation en eau d'irrigation. Dans de nombreux pays du sud tels que l'Algérie, la Libye, la Tunisie, dans les Territoires palestiniens, à Chypre et à Malte, les eaux souterraines prélevées représentent une part importante de l'eau d'irrigation. En Méditerranée, les eaux souterraines jouent ainsi un rôle important dans les économies de l'eau régionale et nationale et sont la principale source d'alimentation en eau dans un tiers des pays. Pratiquement dans tous les pays, la plupart de l'eau prélevée est employée pour l'irrigation : de 80 à 90 % en Espagne, à Chypre, en Syrie, en Libye, en Tunisie et au Maroc ; plus de 50 % en Italie, en Grèce et en Turquie. L'eau prélevée est ensuite employée pour fournir de l'eau potable. Cette utilisation occupe parfois même la première place (France, Egypte). (PNUE/PAM-Plan Bleu, 2009)

L'accroissement des prélèvements en eau dans une région globalement défavorisée en précipitations exerce une pression évidente sur les ressources hydriques naturelles. Ce niveau de pression peut être mesuré par un indice d'exploitation, exprimé en pourcentage, défini par le rapport entre le volume moyen des ressources hydriques naturelles renouvelables :

$I = V_{\text{prél}} / V_{\text{disp}}$ (%) tel que si : $I < 25\%$ exploitation négligeable, $25\% < I < 50\%$ exploitation acceptables, $50\% < I < 75\%$ exploitation élevée, $I > 75\%$ surexploitation. (Mediterra ,2008)

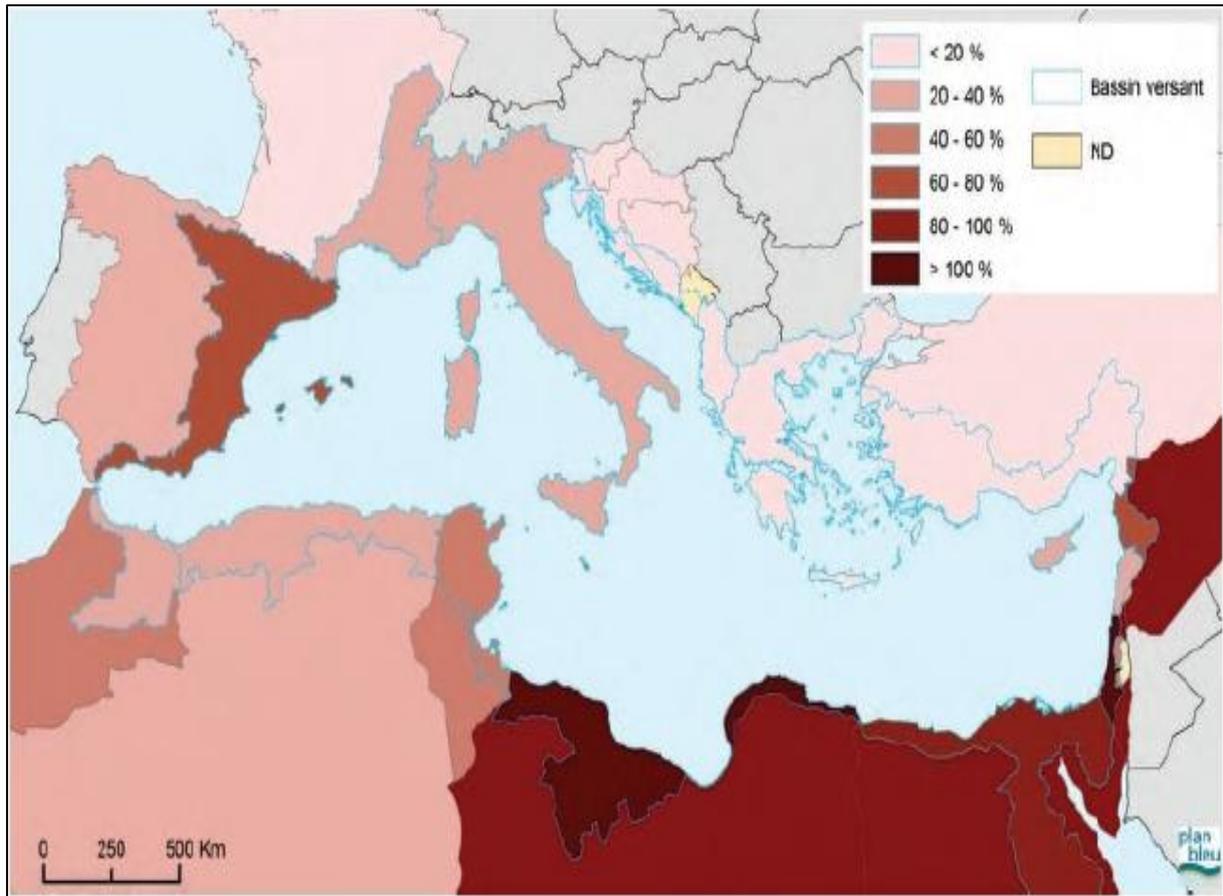


Figure III.9 Indice d’exploitation des ressources renouvelables au niveau des pays et bassins versants, (Plan bleu, 2005)

Pour toutes les régions côtières de la méditerranée, l’indice est plutôt élevé, surtout au Sud et à l’Est. Les pressions qui résultent de l’exploitation des eaux souterraines sont variées, souvent lourdes, voire excessives dans de nombreux cas. La surexploitation est fréquente et va en augmentant, notamment dans le cas des aquifères côtiers, où elle s’est traduite par l’intrusion d’eau de mer. Ce processus va être difficile à inverser, aussi bien dans le sud que dans le nord. Si l’on considère aussi bien cette surexploitation que le prélèvement des « eaux fossiles », on peut dire que près d’un cinquième des prélèvements actuels en eaux souterraines dans les pays méditerranéens ne sont pas durables. La région affectée par l’intrusion d’eau de mer s’est étendue depuis le nord de l’Égypte jusqu’à l’Est de la Libye. (Hypatie.N, 2012)

Tableau III.3 : Ressources et demandes en eau (totales et par habitant), indice 'exploitation, Période 2000-2005 (Plan bleu, 2005)

Pays	Ressources en eau naturelles renouvelables RENr (a)	Ressources en eau naturelles renouvelables et exploitables (RENE)	Demande totale	Prélèvements dans les eaux naturelles renouvelables (b)	Indice d'exploitation (b)/(a)	RENr par habitant	RENE par habitant	Demande totale en eau par habitant	Demande en eau potable par habitant
	(km ³ /an)					(m ³ /hab)			
Espagne	111,5	46,3	37,070	37,070	33,2	2 612	1 085	868	96
France	200,0	100,0	34,960	34,950	17,5	3 312	1 656	579	103
Italie	191,3	110,0	41,982	41,983	21,9	3 323	1 911	729	138
Grèce	74,3	29,0	7,800	7,800	10,5	6 715	2 713	705	113
Malte	0,0	0,0	0,058	0,032	97,0	82	50	145	77
Chypre	0,8	0,5	0,253	0,220	27,5	944	654	306	81
Slovénie	31,9	15,0	0,894	0,894	2,8	15 959	7 511	448	94
Croatie	71,4	20,0	0,375	0,375	0,5	16 073	4 502	84	71
Bosnie-Herzégovine	37,5	15,0	0,930	0,930	2,5	9 592	3 837	238	59
Monténégro	15,7	7,0	0,050	0,050	0,3	25 000	7 962	80	80
Albanie	41,7	13,0	1,700	1,700	4,1	13 401	4 178	546	148
Turquie	213,6	112,0	40,100	40,100	18,8	2 977	1 561	559	84
Syrie	18,2	16,0	16,690	16,700	91,8	980	861	898	77
Liban	4,4	1,8	1,400	1,400	31,8	1 246	494	395	127
Israël	1,9	1,6	1,950	1,724	90,7	274	230	287	104
Territoires Palestiniens	0,8	0,7	0,280	0,220	27,5	214	202	80	36
Égypte	56,8	50,0	70,430	55,500	97,7	782	688	970	66
Libye	0,6	0,5	4,260	0,500	83,3	105	87	742	105
Tunisie	4,2	3,2	2,457	1,730	41,2	403	313	247	41
Algérie	11,7	6,0	6,270	4,490	38,4	361	185	194	41
Maroc	20,7	11,9	9,488	9,415	45,5	694	399	318	29
Totaux et moyennes									
Rive Nord	740,0	359,0	126,072	111,574	15,1	3 957	1 920	674	111
Rive Sud et Est	342,0	214,0	153,325	133,479	39,0	1 327	830	595	66
Méditerranée	1082,0	572,0	279,397	245,052	22,6	2 433	1 286	628	85
Rapports									
Rive Nord / Méditerranée	68%	63%	45%	46%		163%	149%	107%	130%
Rive Sud et Est / Méditerranée	32%	37%	55%	54%		55%	65%	95%	78%

III.6 CONCLUSION

L'espace méditerranéen constitue une véritable interface entre pays du Nord et du Sud.

- ✓ le Nord du bassin riche en eau (globalement), développé, à faible croissance des populations et des demandes en eau, à pressions faibles à modérées (en quantité) sur les ressources en eau.
- ✓ le Sud du bassin pauvre en eau, peu développé, à forte croissance des populations et des demandes en eau, à pression forte, parfois déjà excessive, sur les ressources.

Les contrastes sont marqués entre les deux rives, notamment sur le plan démographique, changement climatique, la demande en eau et l'exploitation des ressources en eaux souterraines. En somme, c'est là où les disponibilités en eau sont les plus fortes et rendent encore possible une augmentation des prélèvements que les demandes croissent le moins vite. C'est là, au contraire, où les ressources sont les plus rares et sont déjà les plus exploitées que les demandes croissent le plus ». Cette étude comparative entre deux rives montre la supposition dans la partie précédente et que les pays du Sud de la Méditerranée apparaît plus vulnérables à l'intrusion marine que ceux de la rive Nord.

CONCLUSION GENERALE

Au terme de notre étude on peut conclure l'importance de faire une étude comparative de l'intrusion marine dans les côtières méditerranéens, en se basant sur plusieurs critères dépendant du changement climatique, le nombre de population, la demande en eau, activité anthropique et la surexploitation des ressources souterraines, à travers cette étude et d'après plusieurs recherches et rassembler les résultats de l'application conjointe de plusieurs méthodologies hydrodynamiques, hydrochimiques et isotopiques, on a pu savoir l'état de ce phénomène dans quelques pays du côtier méditerranéen comme l'Algérie, la Tunisie, l'Espagne...etc.

Les aquifères côtiers sont particulièrement vulnérables face aux développements des activités anthropiques. Aux risques d'épuisement et de dégradation qualitative de la ressource, se superpose le risque d'intrusion marine, phénomène quasi irréversible. Cette étude nous a donc permis de faire ressortir la différence entre les causes qui participent dans le développement de ce phénomène au niveau des deux rives Nord/Sud.

Les contrastes sont marqués entre les deux rives, notamment sur le plan démographique, changement climatique, la demande en eau et l'exploitation des ressources en eaux souterraines tel que le Nord riche en eau , développé, à faible croissance des populations et des demandes en eau, à pressions faibles à modérées (en quantité) sur les ressources en eau , et un Sud pauvre en eau, peu développé, à forte croissance des populations et des demandes en eau, à pression forte, parfois déjà excessive, sur les ressources. Ce constat général prend toute son importance dans les pays du Sud de la Méditerranée. Donc à travers cette modeste recherche nous avons pu mettre en exergue la gravité de ce phénomène au niveau de la rive sud plus qu'au niveau de la rive nord de la méditerranée.

REFERENCE

Al farrah.N, Martens.N. Walraevens.K.(2010). Hydrogeological and Hydrogeochemical Investigation of the Coastal Area of JIFARAH Plain, NW Libya.160-174 p

Bouderbala .A(2015). Contribution des méthodes hydrochimiques et géophysiques a l'acquisition de la minéralisation dans les zones côtières cas de la nappe alluviale de l'oued Nador - Tipaza (Algérie).Doctorat en hydraulique. Université Hassiba Benbouali de Chlef.227p

Carlos Duque1 et al, (2008, 23-27 Juin), Evolution of the Marine Intrusion Using Geophysical Methods after 25 Years in the Motril-Salobreña Aquifer (Southern Spain).68-71p

Chattouti F., 2006 : Etude des fluctuations piézométriques des nappes phréatiques et profondes de la plaine côtière de la Côte orientale du Cap Bon (nord-est de la Tunisie). Mémoire de Mastère. FSB et l'INRGREF, 124 p.

Djabri.L, GUEZGOUZ.N, BOUHSINA.S, HADJ- SAID.S, HANI.A, PULIDO BOSCH.A, DJABRI.Y, (2001), Origines de la salinité des eaux dans la zone littorale Annaba Guerbes (Algérie).257-262p

Djabri.L et al, (l'Algérie, un pays en voie de développement, a-t-elle déjà développé un biseau sale ?) IGM Madrid (2003). 309-317p

Djoudar.D (2014) Approche méthodologique de la vulnérabilité de la ressource en eau souterraine en milieu fortement urbanisé (exemple en Algérie des plaines littorales (Mitidja)). Doctorat en sciences. USTHB.196p

Dörfliger.N et Caballero.Y , Traverse.S, Chastanet.J, Vanden Berghe.D, Roger.A, Dufond .L, (Février 2014).Etat de l'art concernant les systèmes de surveillance et d'alerte. Comprendre et modéliser, vers la surveillance et l'alerte.65p

Drouiche .A(2012) contribution spécifique a la pollution par les éléments en traces métalliques et les hydrocarbures cas de la nappe d'eau souterraine de la Mitidja. Magister en Sciences de la terre .USTHB/ Bab Ezzouar.183p

Gaaloul.N, Rekaya.M, Jlassi.F. (2008). (géologue n°159) Salinisation des eaux souterraines de la nappe phréatique de la Côte orientale au nord-est de la Tunisie.59-63p

GEB, 2010, Séminaire international sur la gestion des aquifères côtiers sur la rive sud du bassin méditerranéen (30 juin au 1 juillet 2010, Maroc) .96p

Gwénaëlle Chaillou , Thomas Buffin-Bélangier et Richard St-Louis), 2012, La gestion durable des ressources en eau souterraine aux Îles-de-la-Madeleine est un enjeu majeur pour le développement économique, touristique et humain.Université du Québec à Rimouski.3-28p

Hilali, M. (2002)- Hydrologie et modèles de l'invasion marine dans les aquifères: Applications dans les cas de Martil et du Sahel- Maroc. Doctorat en Sciences appliquées. Ecole Mohammedia des Ingénieurs.

Hypatie Nassopoulos. Les impacts du changement climatique sur les ressources en eaux en Méditerranée. Economies et finances. Université Paris-Est, 2012. Français. <NNT : 2012PEST1045>. <pastel-00838516> 22 p

Kaldy, Pierre, (2007,15Oct.), L'avenir incertain de la nappe phréatique de GAZA, LE FIGARO KOUZANA.L, BEN MAMMOU.A. GAALOUL.N. (2007). Seawater intrusion and salinization in a coastal water table (Korba, Cap-Bon, Tunisia)

Mediterra 2008.Les futures agricoles et alimentaire en Méditerranée/Centre international de hautes études agronomiques méditerranéennes. Paris : Presses de sciences Po, 2008.373p

Nathalie Dörfliger, Bénédicte Augeard, Avril 2013, Quels outils pour caractériser l'intrusion saline et l'impact potentiel du niveau marin sur les aquifères littoraux ? 6p

Nathalie Doriger. Entre terre et mer, les eaux souterraines du littoral. Géosciences, 2013, 74-81p.

Niazi.S (2002) 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 .Doctorat en Géosciences de l'Environnement. Université Mohammed V –
AGDAL.296p

Perrine.Fleury (2005). Sources sous-marines et aquifères karstiques côtiers méditerranéens.
Fonctionnement et caractérisation, Doctorat en Sciences de la Terre, Université Paris VI – Pierre
et Marie Curie, p57-69

PNUE/PAM-Plan Bleu : Etat de l'environnement et du développement en Méditerranée.
PNUE/PAM-Plan Bleu, Athènes, 2009.208p

Projet ALIANCE. Nouveaux instruments d'exploration et de suivi hydrogéophysique du sous-sol
pour l'étude des intrusions salines dans les aquifères côtiers. Support de communication orale,
Atelier à Strasbourg, 18-20/01/2006, 25 p.

Toubal, A-C., (1998) Apport de la géophysique à l'étude des problèmes d'hydrodynamique et
d'invasion marine en milieu souterrain. Exemple des plaines d'Annaba, de la Mitidja et de la baie
d'Alger. Thèse de Doctorat d'état. IST/USTHB/Bab Ezzouar.236p

REFERENCE WEBOGRAPHIQUE

André, Rousseau, « L'eau, enjeu central de l'occupation de la Palestine », < www.voltairenet.org
>, (consulté le 10 Mai 2007).