

UNIVERSITE SAAD DAHLAB - BLIDA

Faculté des Sciences de l'Ingénieur

Département des Sciences de l'Eau et de l'Environnement

MEMOIRE DE MASTER

Filière: **Hydraulique**

Spécialité : **Sciences de l'Eau**

Thème:

**ETAT DE L'INTRUSION MARINE DANS LA BAIE D'ALGER
cas des champs de captage de Boueah et Hamiz**

Par

BENAICHE Billal

Devant le jury composé de :

I. ANSER	Maître de conférences, U. de Blida	Président
A. GUENDOUZ	Maître de conférences, U. de Blida	Examineur
M. OULARBI	Charge de cours, U. de Blida	Examineur
B. HADJ KADDOUR	Charge de cours, U. de Blida	Promoteur

Promotion 2010/2011

Remerciements

- Je tiens à remercier vivement tous ceux qui m'ont apportés un soutien pour l'élaboration de ce mémoire de fin d'étude , particulièrement ma famille.
- Tout ma gratitude pour mon promoteur MrB. HADJ KADDOUR pour ces judicieux conseils ainsi que sa disponibilité tout au long de l'élaboration de ce travail.
- Mon respect s'adresse aux membres de jury <<ANSER, GUENDOUIZ , OULARBI>>
- Je tiens à présenter par l'occasion tout mon respect à tous les enseignants et le chef de département Mr BENSALIA qui ont contribué à ma formation.
- Enfin un grand merci tout spécial à ma famille, à mes parents qui m'ont permis de poursuivre mes études, à mes frères et tous mes amis qui n'ont cessé de me soutenir et de m'encourager au cours de mes années d'études. Qu'ils trouvent ici l'expression de ma profonde reconnaissance.

Billal. BENAICHE

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail en signe de

Respect et de Reconnaissance à :

Mes parents pour leurs Sacrifices et leurs Soutien ;

Mes frères : Oussama, Hamza ;

Ma cousine : Faiza ;

Mes amis : Amine, Djamel, Boualem, Said, Kamel,

Mustapha , Billel , . . .

A tous ceux que j'aime

BENAICHE Billal

ملخص

الهدف الرئيسي لهذه الأطروحة هو القيام بمعاينة الوضعية الحالية لتقدم مياه البحر على مستوى الشريط الساحلي لمدينة الجزائر.

وقد بدأنا بتحديد الوضعية الجيومرفولوجية, الهيدرومناخية, الجيولوجية و الهيدروجيولوجية للمنطقة المدروسة.

بعد ذلك وبالاعتماد على معايير جيوفيزيائية, هيدروديناميكية و هيدروكيميائية توصلنا إلى خرائط مساعدة عن طريق نظام الاستعلام الجغرافي مبينة لمدى توسع الظاهرة المدروسة.

Résumé

L'objet principal de ce mémoire est de faire un constat sur l'état actuel de l'invasion marine dans la baie d'Alger.

En premier lieu, on a défini les contextes, géomorphologique, hydroclimatologique, géologique et hydrogéologique de la région d'étude.

Par la suite, en se basant sur des critères, géophysique, hydrodynamique et hydrochimique, on a des cartes assistées par Système d'Information Géographique (S.I.G) mettant en évidence l'ampleur du phénomène étudié.

Abstract

The principal purpose of this memory is to make a report of the actual marine intrusion state in the bay of Algiers.

Initially, we have defined geomorphological, hydroclimatological, geological and hydrogeological contexts of the studies area.

Then, while basing itself on geophysical, hydrodynamical and hydrochemical criteres, we could establish maps assisted by Geographical Information System (G.I.S) highlighting the extent of the studied phenomenon.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE

Page

CHAPITRE I : PRESENTATION DU PHENOMENE

Introduction.....	3
I-1- définition de l'intrusion marine	3
I-2- définition d'un biseau salé.....	3
I-3- description d'un aquifère côtier	3
I-4- Critères de reconnaissance de l'invasion marine.....	8
I-4-1- Critères géologiques.....	8
I-4-2 Critères hydrodynamiques.....	8
I-4-3- Critères géophysiques.....	8
I-4-4- Critères hydrochimiques	8
Conclusion.....	9

CHAPITRE II : ETUDE GEOMORPHOLOGIQUE ET HYDROCLIMATOLOGIQUE

Introduction.....	10
II-1- Etude géomorphologique.....	10
II-1-1- Situation géographique.....	10
II-1-2- Situation de la région d'étude.....	11
II-1-3- Aspects généraux sur la zone de l'étude.....	12
II-1-3-1-Aspect hydrographique	12
II-1-4- Unités géomorphologiques.....	12

II-1-5- Réseau hydrographique.....	14
II-1-6- Les paramètres géomorphologiques.....	14
II-1-6-1- Paramètres géométriques.....	14
a- La surface.....	14
b- Le périmètre.....	14
II-1-6-2- Paramètres de forme.....	14
II-1-6-3- Les paramètres de relief.....	15
II-2- Etude hydroclimatologique.....	16
II-2-1- Paramètres climatologiques.....	16
II-2-1-1- Réseau pluviométrique	16
II -2-1-2- Les précipitations	17
II-2-1-3- Précipitations mensuelles et annuelles..	17
II-2-1-4- Evaluation de la lame d'eau précipité	20
a-La méthode arithmétique.....	20
b - La méthode des polygones de Thiessen	21
c- Méthode des isohyètes.....	22
II-2-2- Les températures.....	23
II-2-3- Evapotranspiration ou déficit d'écoulement.....	24
II-2-3-1- Calcul de l'ETP	24
II-2-3-2-Evapotranspiration réelle (ETR)	25
II-3- Bilan hydrologique.....	27
II-3-1- Estimation de la lame ruisselée.....	27
II-3-2- Estimation de l'infiltration.....	28
Conclusion.....	29

CHAPITRE III : ETUDE GEOLOGIQUE

Introduction	30
III-1- Cadre général.....	30
III-2- Stratigraphie et lithostratigraphie.....	30
III-2-1- Miocène et formations plus anciennes.....	32
III-2-1-1- les Miocène.....	32
III-2-1-2- les formations plus anciennes.....	32
a. Roches éruptives de tertiaire.....	32
b. Poches métamorphiques.....	32
III-2-2- Le pliocène.....	32
III-2-2-1- Plaisancien.....	34
III-2-2-2- L'Astien.....	34
III-2-3- le villafranchien.....	34
III-2-4- Le Soltano-Tensifien.....	34
III-2-5- le Rharbien-Actuel.....	35
III-3- Evolution paléogéographique et tectonique.....	35
III-3-1- à l'Eocène.....	35
III-3-2- au Miocène.....	35
III-3-3- au pliocène	35
III-3-4- Au plaisancien.....	36
III-3-5- à la fin de l'astien.....	36
III-3-6- Au quaternaire.....	36
Conclusion.....	39

CHAPITRE IV : ETUDE HYDROGEOLOGIQUE

Introduction.....	40
IV-1- Présentation des aquifères de la Mitidja.....	40
IV-1-1 Aquifère de l’Astien	41
IV-1-2 Aquifère quaternaire	41
IV-2- Etude des caractéristiques hydrodynamiques.....	43
IV-2-1-Transmissivité.....	43
IV-2-2-Le coefficient d’emmagasinement	44
IV-2-3- Perméabilité Verticale	45
IV-3- Les mécanismes d'alimentation et d'écoulement des nappes.....	45
IV-3-1- L'aquifère Astien.....	45
IV-3-1-1 Ecoulement de la nappe de l'Astien.....	45
IV-3-1-2 Les exhaures et les pertes de l'aquifère de la Mitidja.....	46
IV-3-2- Bilan entrant et sortant des aquifères.....	46
IV-3-2-1- Bilan d'eau de la nappe de l'Astien.....	46
IV-3-2-2- Bilan d'eau de la nappe de la Mitidja.....	47
Conclusion.....	49

CHAPITRE V : INVASION MARINE

Introduction.....	50
V-1- Exploitation de la nappe.....	50
V-2- Historique de l’intrusion marine dans la baie d’Alger.....	51
V-2- 1- Approche directe de l’invasion saline par la géophysique	52
V-2- 1- 1- La résistance transversale (Rt)	52

V-2- 1- 2- Les coupes géoélectriques interprétatives.....	54
V-2- 2- Approche directe par la piézométrie	55
V-2- 3- Approche indirecte par la Chimie.....	56
V-2- 3-1- Faciès chimique.....	56
V-2- 3- 2- Résidu-Sec.....	57
V-3- Inventaire des points d'eau dans la baie d'Alger.....	58
V-4- Approche de l'intrusion marine.....	59
V-4-1- Approche géophysique	59
V-4-1-1- Interprétation de la carte des résistances transversales.....	59
V-4-1-2- interprétation de carte d'interface eau douce\eau salée d'après la compagne géophysique réalisée en 2002.....	60
V-4-2- Approche hydrodynamique	61
V-4-2-1- Elaborations des cartes piézométriques	61
V-4-2-2- Interprétation des cartes piézométriques	68
V-4-3- Approche hydrochimique	71
V-4-3-1-Interprétation des cartes de Résidu sec, conductivité électrique.....	71
V-4-3-2- Interprétation des Cartes d'isoteneurs en Chlore et en Sodium.....	74
V-4-3-3- rapport de Tood (rCl^-/HCO_3^-).....	75
V-5- Contrôle et lutte contre l'intrusion des eaux salées.....	79
V-5-1- Modification du pompage	79
V-5-2- Recharge artificielle.....	79
V-5-3- ligne de rabattement parallèle à cote	79
V-5-4- Barrière artificielle du substratum.....	80
Conclusion.....	80

CONCLUSION GENERALE ET RECOMMANDATION

LISTE DES TABLEAUX

Page

Tableau II-1 : paramètres géométriques des sous bassins versants	14
Tableau II-2 : Paramètres de forme et de relief des deux sous bassins versants (Oued El Hamiz et Oued El Harrach)	15
Tableau II-3 : Caractéristiques des stations pluviométriques.....	16
Tableau II-4 : Précipitations mensuelles et annuelles (1980-2008).....	17
Tableau II-5 : Calcul de la lame précipitée de la période (1980-2008) par la méthode arithmétique.....	21
Tableau II-6: Calcul de la lame précipitée par méthode Thiessen période (1980-2008)....	21
Tableau II-7: Résultats obtenus par la méthode des Isohyètes.....	22
Tableau II-8: Résultats obtenus par les 3 méthodes	23
Tableau II-9: Mensuelles des températures moyennes, maximales et minimales Période (sept 1980-aout 2008) Dar El Beida.....	23
Tableau II-10: Détermination de l'ETP par la méthode de Thornthwaite période (1980-2008).....	25
Tableau II-11: Résultats de l'ETR par la formule de Coutagne.....	26
Tableau II-12: Billan hydrique de C.W Thornthwaite à la station de Dar El Beida (1980-2008).....	26
Tableau II-13 : Récapitulatif des résultats d'ETR par les différentes méthodes Pour la période (1980-2008).....	26
Tableau II-14: Valeurs de la lame d'eau ruisselée (1980-2008)	27

Tableau II-15: Récapitulations des différentes composantes du bilan hydrologique dans la station de Dar El Beida (1980-2008).....	28
Tableau III-1: Log Lithostratigraphique Synthétique de la Mitidja Est d'après Benziada 1994.....	37
Tableau III-2 : Récapitulation des différents stades d'évolution de la Mitidja.....	38
Tableau IV-1 : Classification du potentiel aquifère des grandes formations Mac Donald (1992).....	43
Tableau IV-2: Transmissivité dans la Mitidja.....	44
Tableau IV-3: Coefficient d'emménagement dans la Mitidja.....	44
Tableau IV-4: Coefficient d'éménagement Mac Donald (1992).....	44
Tableau IV-5 : Perméabilité verticale Mac Donald (1992).....	45
Tableau IV-6: Bilan d'eau de la nappe de l'Astien.....	47
Tableau IV-7: Débits entrants de la nappe de la Mitidja	48
Tableau IV-8 : Débits sortants de la nappe de la Mitidja.....	48
Tableau V-1 : Tableau récapitulatif des points d'eau et des débits extraits réalisés en 1997 complétés en 2001/2002 dans la plaine de la Mitidja.(ANRH ,2002)	50
Tableau V-2 : Résultats des analyses hydrochimiques au niveau de la baie d'Alger (année 2008).....	76
Tableau V-3 : Nature de la contamination par l'eau de mer en fonction du rapport de Todd.....	77
Tableau V-4 : Fréquence des échantillons.	77

LISTE DES FIGURES

Page

Figure I -1: Schéma théorique de l'invasion marine le long du littoral pour une nappe libre. corriger eau salée(D'après Ghyben-Herzberg).....	4
Figure I -2 : Etude mathématique de l'interface. (D'après M.K.Hubbert).....	5
Figure I -3 : Situation naturelle de l'interface eau douce / eau de mer	6
Figure I -4 : Forage d'exploitation qui attire l'interface par pompage.....	7
Figure I -5 : Forages contaminés par les eaux salées	7
Figure II-1 : Situation géographique générale de la plaine de la Mitidja	10
Figure II-2 : Situation géographique de la zone d'étude.....	11
Figure II-3 : Orographie et hydrographie de la plaine de Mitidja Est.....	13
Figure II-4 : Carte de la répartition des stations pluviométriques.....	17
Figure II-5: Carte pluviométrique de la Mitidja (ANRH 2008).....	18
Figure II-6 : Précipitations moyennes mensuelles période (1980 -2008).....	19
Figure II-7 : Précipitations moyennes annuelles période (1980-2008).....	19
Figure II-9: Graphe des Températures moyennes mensuelles de Dar El Beida pour la période (1980-2008).....	24
Figure III-1 : Carte géologique de la Mitidja (ANRH Alger).....	31
Figure III-2 : Coupes géologiques au niveau de la Mitidja Est (Bennie and partners, 1983).....	33

Figure IV-1 : Fonctionnement des nappes de la Mitidja (M. Engalenc Géohydraulique 1971).....	40
Figure V-1 : Carte des résistances transversales (1978)	53
Figure V-2 : Carte des résistances transversales (1992).....	53
Figure V-3 : Coupe géoélectrique interprétatives avec comparaison entre les année 1978 et 1992.....	54
Figure V-4 : Carte piézométrique de la baie d'Alger (1983).....	55
Figure V-5 : Carte piézométrique de la baie d'Alger (1992).....	56
Figure V-6 : Carte des résidus secs (novembre 1983).....	57
Figure V-7 : Carte de répartition du résidu sec (Juillet 1992).....	57
Figure V-8 : Carte de situation des piézomètres de contrôle dans la baie d'Alger.....	58
Figure V-9 : Carte de résistivité transversales de la baie d'Alger Toubal (1998).....	59
Figure V-10 : Carte d'interface eau douce\eau salée compagne (ANRH,2002).....	60
Figure V-11 : Carte piézométrique(Novembre 2002).....	62
Figure V-12 : Carte piézométrique des hautes eaux (avril 2005).....	63
Figure V-13 : Carte piézométrique des basses eaux (septembre 2005).....	64
Figure V-14 : Carte piézométrique des hautes eaux (Avril 2008).....	65
Figure V-15 : Carte piézométrique des bases eaux (Septembre 2008).....	66
Figure V-16 : Carte piézométrique (avril 2010).....	67
Figure V-17: Chronique piézométrique des 23 piézomètres de l'ANRH et du pz Sur le champs captant du Hamiz.....	70

Figure V-18 : Carte des résidus secs se la nappe côtière de la baie d'Alger (Juillet 2002).....	71
Figure V-19 : Carte de répartition du résidu sec (mai 2006).....	72
Figure V-20 : Carte de répartition de la conductivité électrolytique (mai 2006).....	72
Figure V-21 : Carte de conductivité des eaux souterraines 2009.....	73
Figure V-22 : Carte d'iso concentration de Cl (mai 2006).....	74
Figure V-23 : Carte d'iso concentration de Na (mai 2006).....	74
Figure V-24 : Carte de l'interface eau douce eau salée (juillet 2002) (ANRH,2002).....	75
Figure V-25 : Carte de rapport de Todd, mai 2006.....	78

INTRODUCTION GENERALE

Les changements climatiques accompagnés de sécheresses prolongées ont-ils créé une rupture de l'interface eau douce eau salée, entraînant par la même occasion l'apparition du biseau salé ?

L'Algérie à l'instar de tous les pays riverains de la Méditerranée, a connu une sécheresse au cours des deux dernières décennies. Ce manque d'eau a entraîné une sollicitation très accrue des nappes. La surexploitation de ces dernières, aussi bien pour l'irrigation que pour l'alimentation quotidienne des populations rurales, provoquerait un rabattement important du niveau piézométrique, une inversion du sens d'écoulement souterrain et par conséquent des problèmes d'intrusion marine vers l'aquifère côtier, surexploité surtout pendant les saisons sèches. Ce phénomène va engendrer une pollution des eaux de la nappe par une augmentation de la salinité.

Cette surexploitation des nappes a entraîné une augmentation de la minéralisation, ce qui a amené les gestionnaires à procéder au mélange des eaux des champs captant avec celles des barrages pour atténuer la salinité.

Compte tenu du contexte socioéconomique qu'occupe la région d'Alger, elle est donc très touchée par ce phénomène. Nous allons essayer de démontrer la présence de biseau salé et son extension sur le terrain et aborder ce phénomène en établissant un constat sur l'état de l'invasion marine dans une partie très sensible de cette région (la baie d'Alger).

Pour mener à bien notre travail nous allons adopter la méthodologie suivante :

1. Présentation du phénomène de l'intrusion marine.
2. Etude géomorphologique et hydro climatologique.
3. Etude géologique.
4. Etude hydrogéologique.
5. Invasion marine.

Dans le premier chapitre (présentation du phénomène), on donnera quelques définitions concernant le phénomène ainsi que des exemples et l'impact de ce phénomène sur la qualité des eaux.

La géomorphologie est basée essentiellement sur l'étude des différents paramètres physiographique et morphologique ayant une influence sur l'écoulement dans le bassin. L'étude hydro climatologique porte sur l'analyse et l'interprétation des différents paramètres hydroclimatologiques dans le but d'estimer le bilan hydrologique.

Dans l'étude géologique, une synthèse géologique fait à partir des travaux effectués sur la Mitidja, permettre de définir la structure et la nature des formations géologiques.

L'étude hydrogéologique consiste à définir les aquifères de la nappe de la Mitidja.

Dans le dernier chapitre (invasion marine), on va faire une approche sur l'état de l'invasion d'eau salée dans la baie d'Alger en se basant sur des critères hydrodynamiques, hydrochimiques et géophysiques.

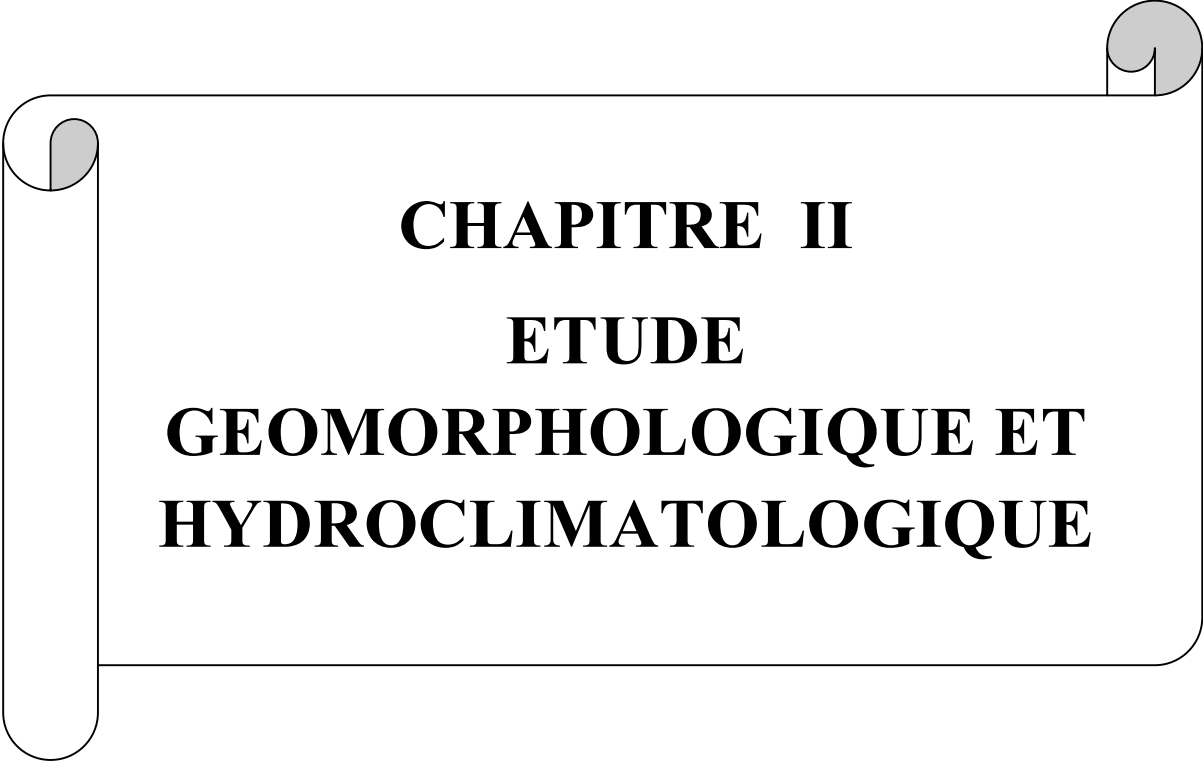
Enfin, on terminera par une conclusion générale où on vas synthétiser les résultats obtenus afin de nous permettre de proposer des recommandations et des solutions potentiels aux problèmes de l'invasion marine.



**INTRODUCTION
GENERALE**



CHAPITRE I
PRESENTATION DU
PHENOMENE

A decorative border resembling a scroll, with a vertical strip on the left and a horizontal strip at the top. The scroll is outlined in black and has a light gray shadow on the inner edge of the top and left curves.

CHAPITRE II
ETUDE
GEOMORPHOLOGIQUE ET
HYDROCLIMATOLOGIQUE



CHAPITRE III
ETUDE GEOLOGIQUE

A decorative frame resembling a scroll, with a vertical strip on the left side and rounded corners. The text is centered within the frame.

CHAPITRE IV
ETUDE HYDROGEOLOGIQUE



CHAPITRE V
INVASION MARINE



**CONCLUSION GENERALE
ET RECOMMANDATION**

Introduction

Depuis plus de deux décennies il a été constaté, que ce soit à l'est ou à l'ouest, une forte intrusion saline dont on a essayé d'expliquer le phénomène et pour laquelle on souhaiterait apporter des solutions. Les raisons majeures de ce phénomène sont la conjonction d'une surexploitation de la plaine pour toutes sortes de besoins, agricole, industriels et autres.

Les aquifères côtiers sont fragilisés par des prélèvements massifs concentrés sur une courte période de l'année, avec le cumul des prélèvements destinés à l'eau potable pendant la saison estivale et les forages destinés à l'irrigation ainsi que ceux utilisés pour l'industrie.

I-1- Définition d'un biseau salé

Le contact entre la mer et une nappe d'eau dans un aquifère poreux s'appelle l'interface eau douce/eau salée.

Généralement cette interface est en bordure de mer, mais elle peut se déplacer à l'intérieur des terres en cas d'exploitation trop important de la nappe ou de précipitations insuffisantes dues à un changement climatique.

Cette limite peut être plus ou moins franche (sur quelques mètres) ou progressive (plusieurs dizaines de mètres). [19]

I-2- Définition de l'intrusion marine

Des pompages excessifs d'eau douce peuvent entraîner des dépressions, comblées par les eaux de mer voisines. L'eau de mer pénètre par le sous-sol par effet de contraste de densité entre l'eau douce continentale et l'eau salée (l'eau de mer contient en moyenne trente grammes de sel par litre et est donc plus dense et plus lourde que l'eau douce). Ce phénomène est connu sous le nom d'intrusion du biseau salé ou intrusion marine.[18]

I-3- Description d'un aquifère côtier

Les aquifères côtiers sont en général, en communication avec la mer. Ce sont des systèmes globaux aquifères/mers. Le niveau piézométrique de la nappe d'eau douce étant au-dessus de celui de la mer, l'eau douce s'écoule vers cette dernière et il s'établit un équilibre hydrostatique qui se traduit par une zone limite. Cette dernière est matérialisée par une interface eau douce/eau salée, dont la position est imposée par la différence d'altitude (différence de charge) entre le niveau piézométrique et le niveau moyen de la mer (cote zéro).[13]

Dans les conditions naturelles, sans perturbations, un état d'équilibre s'établit entre les eaux douces et les eaux salées. La zone de contact sera stationnaire et située au sein de l'aquifère.

Les aquifères littoraux poreux ont été étudiés à la fin du XIX^{me} siècle par Ghyben et Hezberg. L'eau douce, plus légère, flotte sur l'eau de mer avec un contact incliné assimilé à un plan, dont la position est liée à la différence de densité des deux milieux.

La loi de Ghyben-Herzberg définit la position du contact entre deux milieux à l'équilibre : (voir Figure I-1.)

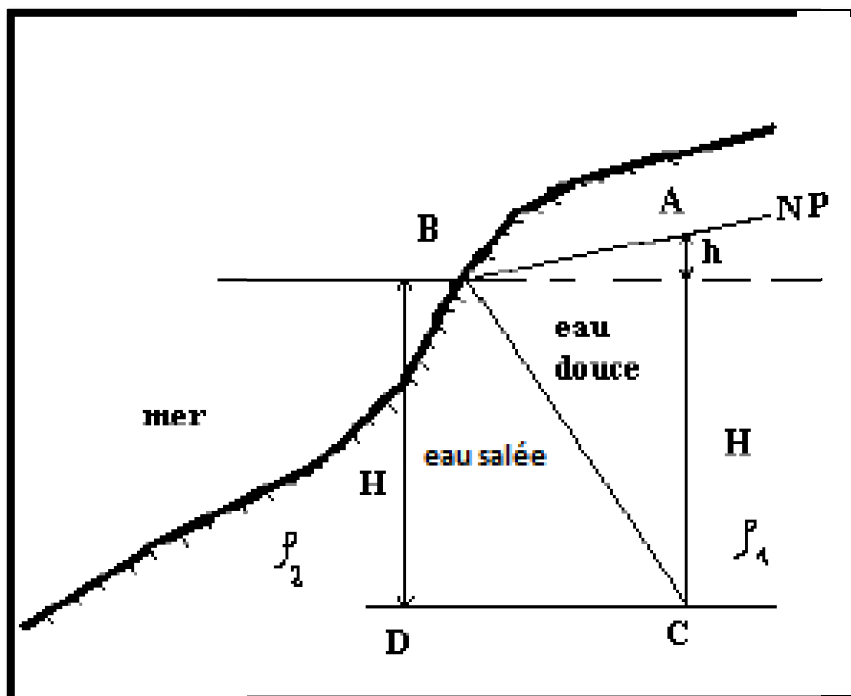


Figure I -1: Schéma théorique de l'invasion marine le long du littoral pour une nappe libre.(D'après Ghyben-Herzberg)

NP : niveau piézométrique ;

BC: interface ;

H : niveau de l'eau salée ;

ρ_1 : densité de l'eau douce ;

ρ_2 : densité de l'eau salée ;

h : charge hydraulique ;

P_D : la pression hydrostatique au point D. ($P_D = \rho_2 \times g \times H$) ;

P_C : la pression hydrostatique au point C. ($P_C = \rho_1 (H + h) g$).

En hydrostatique $P_C = P_D$ (C et D au même niveau)

Donc la profondeur du biseau salé est :

$$H = \frac{\rho_1 \times h}{\rho_2 - \rho_1}$$

Dans la réalité, un mélange se produit par diffusion et le système n'est pas statique, car l'aquifère s'écoule et son niveau piézométrique change ainsi que la mer est soumise à l'oscillation de la marée. Les deux milieux peuvent se mélanger et forment une frange d'eau saumâtre d'épaisseur variable et l'interface réelle étant donc une courbe qui se situe plus profondément que la droite théorique de Ghyben-Herzberg.

Cela a conduit M.K.Hubbert (Figure I -2) à chercher une solution mathématique plus appropriée, il a étudié dans une coupe transversale, deux lignes équipotentiels séparées d'une distance ds .

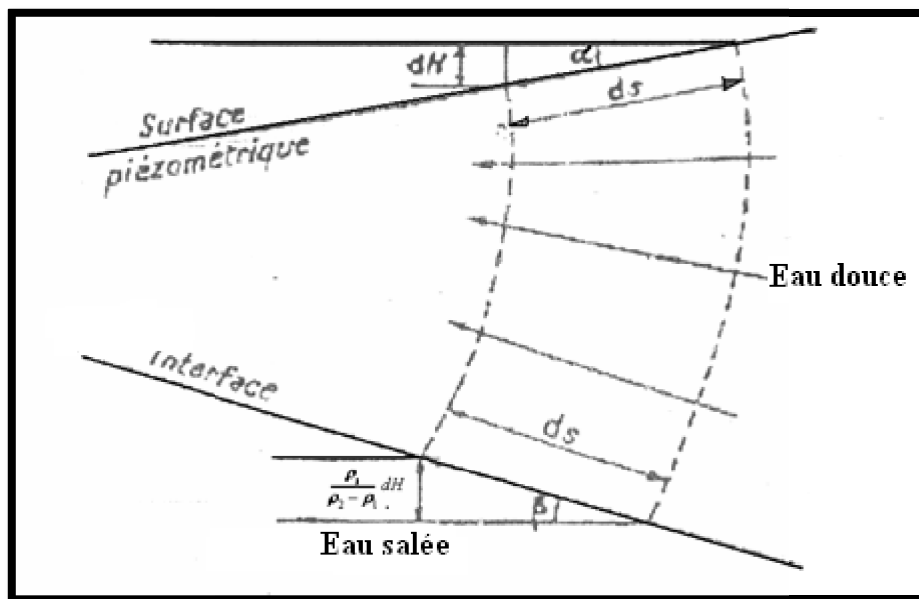


Figure I -2 : Etude mathématique de l'interface. (D'après M.K.Hubbert)

- α : Pente de la surface piézométrique de la nappe en écoulement.

D'après Darcy : $\sin \alpha = \frac{dH}{ds} = \frac{v}{k}$

La charge correspondante à l'intervalle ds , le long de l'interface eau douce/ eau salée est :

$$\frac{\rho_1}{\rho_2 - \rho_1} dH$$

- β : angle de l'interface horizontale.

$$\sin \beta = \frac{\rho_1 \times v}{\rho_2 - \rho_1} \times \frac{v}{k}$$

Comme les droites convergent vers la mer, la vitesse v décroît dans cette direction, donc l'interface est une courbe concave.



Figure I -3 : Situation naturelle de l'interface eau douce / eau de mer.[17]

Les problèmes posés par l'exploitation d'un aquifère côtier sont en général délicat, ils associent la notion de quantité à celle de qualité. L'expérience a montré que des captages entrepris sans discernement ont pu, dans certains cas, entraîner des pollutions par l'eau de mer dont il a été très difficile sinon impossible de se débarrasser par la suite.

Le problème est d'autant plus important que les zones côtières constituent souvent en pays aride des secteurs privilégiés du point de vue climatique où la demande en eau est généralement grande impliquant une motivation particulière pour tenter d'y mobiliser l'eau.

Toute exploitation intensive, peut entraîner l'abaissement de la surface piézométrique qui pourrait atteindre des côtes inférieures au niveau de la mer, ce qui provoque une rupture de l'équilibre existant entre les deux fluides et engendre une intrusion saline à l'intérieur de la nappe. Cette intrusion peut se traduire par une avancée pouvant atteindre plusieurs kilomètres.[17]

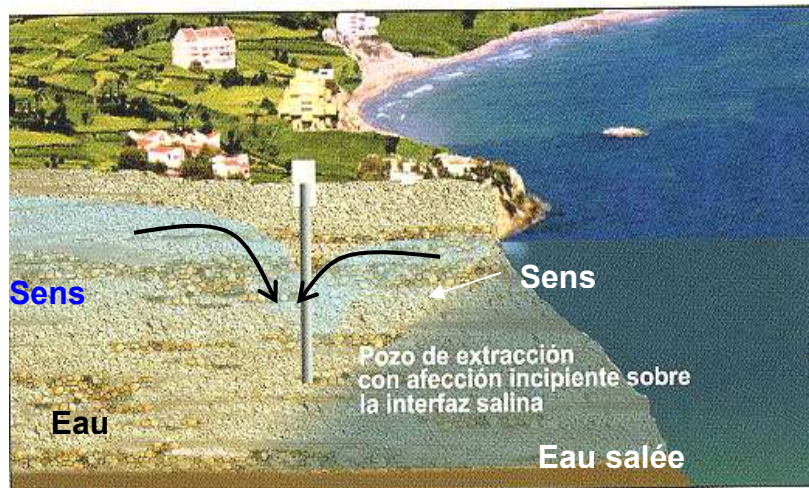


Figure I -4 : Forage d'exploitation qui attire l'interface par pompage.[17]



Figure I -5 : Forages contaminés par les eaux salées.[17]

Le même phénomène commence à prendre une ampleur assez inquiétante au niveau de la baie d'Alger. Il est utile de signaler que dès 1970, des chercheurs hydrogéologues ont mis l'accent sur la nécessité d'étudier les risques d'invasion d'eau salée dans la nappe de la Mitidja.[17]

Beaucoup de pays, ayant des aquifères côtiers, sont touchés par ce phénomène, comme les USA et particulièrement en Californie où 13 nappes ont été envahies par l'eau de mer et 60 étaient menacées. Le Japon, la Hollande, l'Allemagne, l'Italie, le Maroc (côté atlantique), et l'Espagne ne sont pas non plus épargnés donc ce n'est pas un phénomène nouveau et il n'est pas le propre de l'Algérie.

1-4- Critères de reconnaissance de l'invasion marine

Il existe différents critères qui nous permettent d'identifier le cas d'une intrusion marine :

I-4-1- Critères géologique

La description géologique complète (lithologie, stratigraphie) et la définition des limites géologiques de l'aquifère (mur et toit) dans la zone littorale permettent de préjuger de l'existence du biseau salé.

La connaissance de la géologie fine sur le littoral sur un profil terre-mer permet d'optimiser la gestion des aquifères côtiers d'une part et de mieux appréhender les problèmes d'intrusion saline d'autre part.

I-4-2 Critères hydrodynamiques

L'établissement d'une carte piézométrique permet de définir le sens de l'écoulement qui peut s'avérer significatif de l'intrusion marine (cas d'écoulement de la mer vers la nappe).

1-4-3- Critères géophysique

L'étude de la résistivité permet une meilleure approche du problème de l'invasion marine, et dans certains cas d'identifier la zone de contact eau douce/eau salée.

Pour suivre ces évolutions et les risques de salinisation, des mesures par (log de conductivité) sont effectuées sur les forages et piézomètres proches de la côte.

Comparable à la mise en œuvre pour les plans d'eau, les mesures de conductivité (bon marqueur de la salinité) sont réalisées à différentes profondeurs.

I-4-4- Critères hydrochimiques

L'analyse hydrochimique des éléments majeurs (Na^+ , Cl^- , HCO_3^- ...etc.) et l'étude de certains rapports caractéristiques comme le rapport de Todd ($r_{\text{Cl}}/r_{\text{HCO}_3}$) sont caractéristiques de l'invasion marine.

Conclusion

L'intrusion marine est donc un phénomène qui se produit au niveau des aquifères côtiers.

La principale cause est l'exploration irrationnelle de la nappe d'eau douce pour l'alimentation en eau potable, l'irrigation ainsi que pour l'industrie.

Plusieurs critères sont utilisés pour la reconnaissance de l'intrusion marine : géologiques, hydrodynamiques, géophysique et hydrochimique.

Introduction

Ce chapitre comporte deux parties :

Une première partie (étude géomorphologique) ayant pour objet d'illustrer et de définir les paramètres physiques et géomorphologiques de la région d'étude. Ces paramètres ont une influence importante sur la circulation des eaux à l'intérieur du bassin.

Et une deuxième partie (étude hydroclimatologique), où on va étudier les paramètres hydroclimatologiques qui servent comme support pour le calcul du bilan hydrologique.

II-1- Etude géomorphologique

II-1-1- Situation géographique

La Mitidja est une dépression allongée d'Ouest en Est qui s'étend sur une longueur moyenne de 90 km depuis Hadjout à l'ouest jusqu'à la vallée de l'oued Boudouaou à l'Est, avec une largeur moyenne de 15 km environ, elle est la plus vaste plaine sub littoral, elle occupe une superficie d'environ 1450km² répartie entre les wilayas d'Alger, Blida, Tipaza et de Boumerdès.

Les limites de la nappe aquifère se confondent avec celles de la plaine de la Mitidja proprement dite et s'étendent depuis la région de Hadjout à l'Ouest jusqu'à la région de Réghaïa à L'EST.

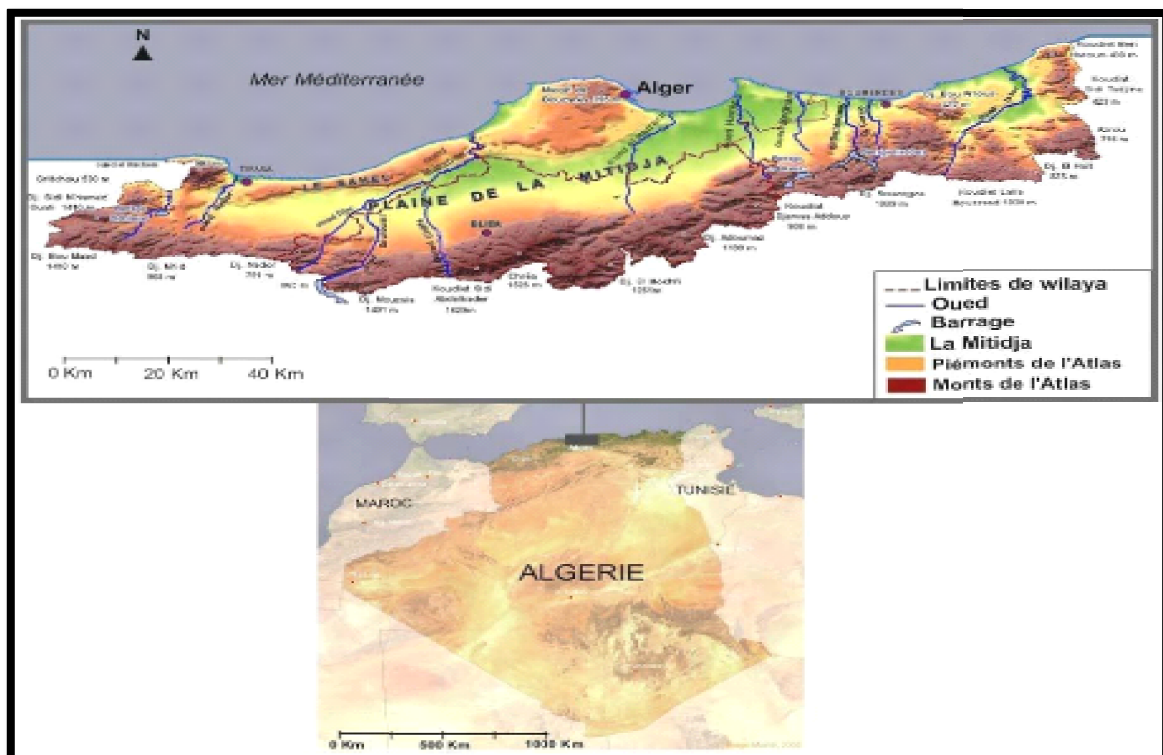


Figure II-1 : Situation géographique générale de la plaine de la Mitidja

II-I-2- Situation de la région d'étude

Dans notre étude on s'intéresse à la partie la plus touchée par l'intrusion marine. Il s'agit de la partie nommée « la baie d'Alger » .

La baie d'Alger est située dans la partie centrale de la côte algérienne. Elle s'inscrit en creux dans la plaine de Mitidja de forme semi-circulaire d'une superficie approximative de l'ordre de 180 Km² elle est limitée par :

- la mer méditerranée au Nord.
- la limite géologique étanche au Nord-est.
- l'Oued El Harrach à l'Ouest.
- l'Oued El Hamiz à l'Est.

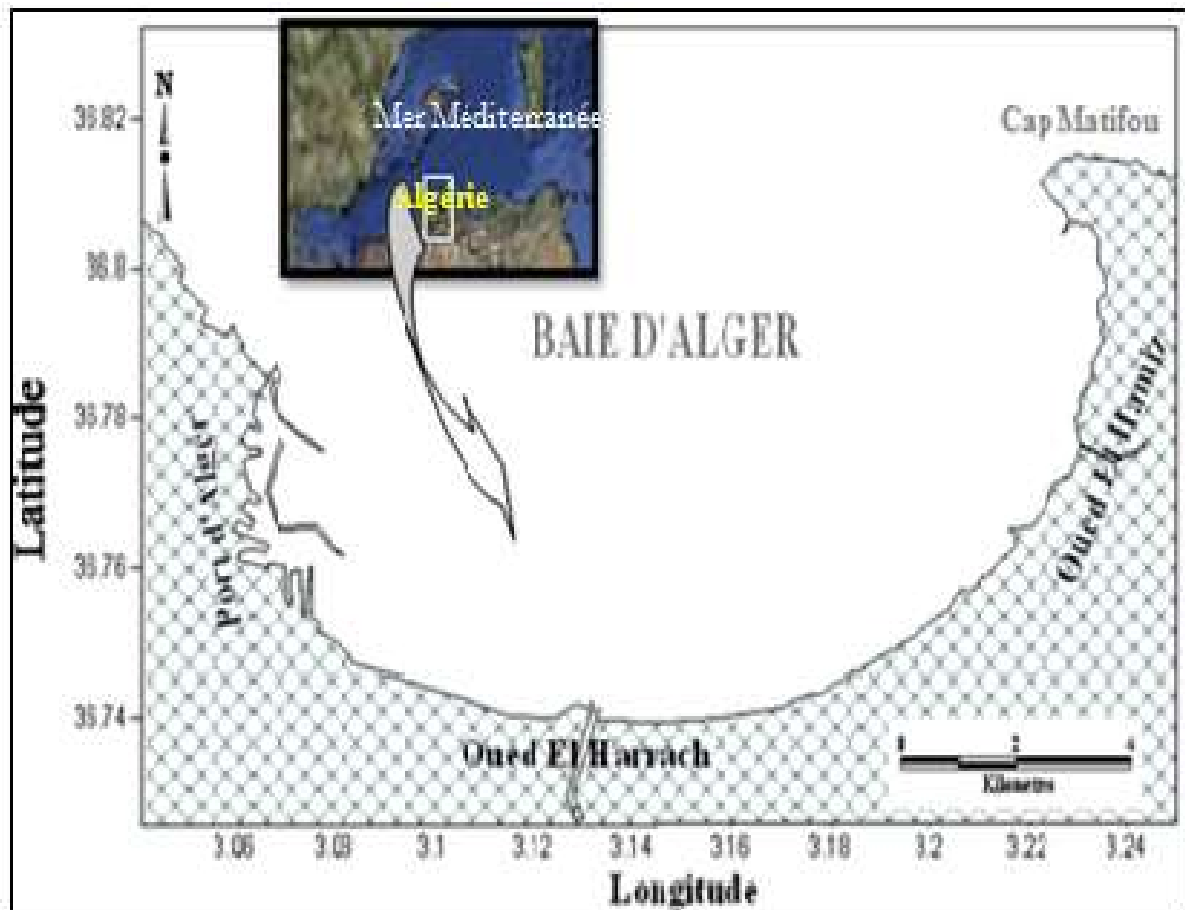


Figure II-2 : Situation géographique de la zone d'étude

II-1-3- Aspects généraux sur la zone de l'étude

II-1-3-1-Aspect hydrographique

La plaine de la Mitidja Est, est composée des sous bassins versants suivants :

1. Le sous bassin de l'oued El Harrach : s'étale sur une superficie de 1260km².

L'Oued El Harrach, qui représente l'un des principaux oueds qui sillonnent la Mitidja, prend sa source au Nord de l'Atlas Blidéen et se jette en mer Méditerranée après un parcours de 67km environ.

Il est formé par la confluence de deux principaux Oueds: l'Oued Okacha et l'Oued Mekka au Sud- Ouest de Hammam Melouane. Ces oueds sont en grande partie en liaison hydraulique avec la nappe de la Mitidja puisque leur eau peut s'infiltrer ou inversement drainer la nappe.

2. Le sous bassin de l'oued Hamiz : est situé à l'Est de la plaine. Celui de Reghaia, en raison de son faible superficie, est intégré au sous bassin du Hamiz.

Les principaux exutoires de la plaine de Mitidja Est sont représentés par l'oued El Harrach, Hamiz, Reghaia. Les oueds alimentent la nappe dans la zone libre du piémont et la drainent vers l'aval au niveau de la zone de recharge.

II-1-4- Unités géomorphologiques

Du Nord au Sud de la région de la Mitidja on peut définir trois unités géomorphologiques distinctes :

1. Le Sahel

Il correspond à un bombement anticlinal à pente faible parallèle à la mer avec une altitude de 200 m en moyenne et qui sépare la plaine de la mer.

2. La plaine

C'est une zone d'affaissement général suivant un axe orienté ENE-OSO.

3. L'Atlas blidéen

Il correspond à un massif montagneux orienté NE-SO, limitant au sud la plaine et atteignant une altitude d'environ 1600 m.

Il est le siège d'une érosion active due au ruissellement favorisé par le manque du couvert végétal.

L'orographie et l'hydrographie sont représentées dans la figure ci après

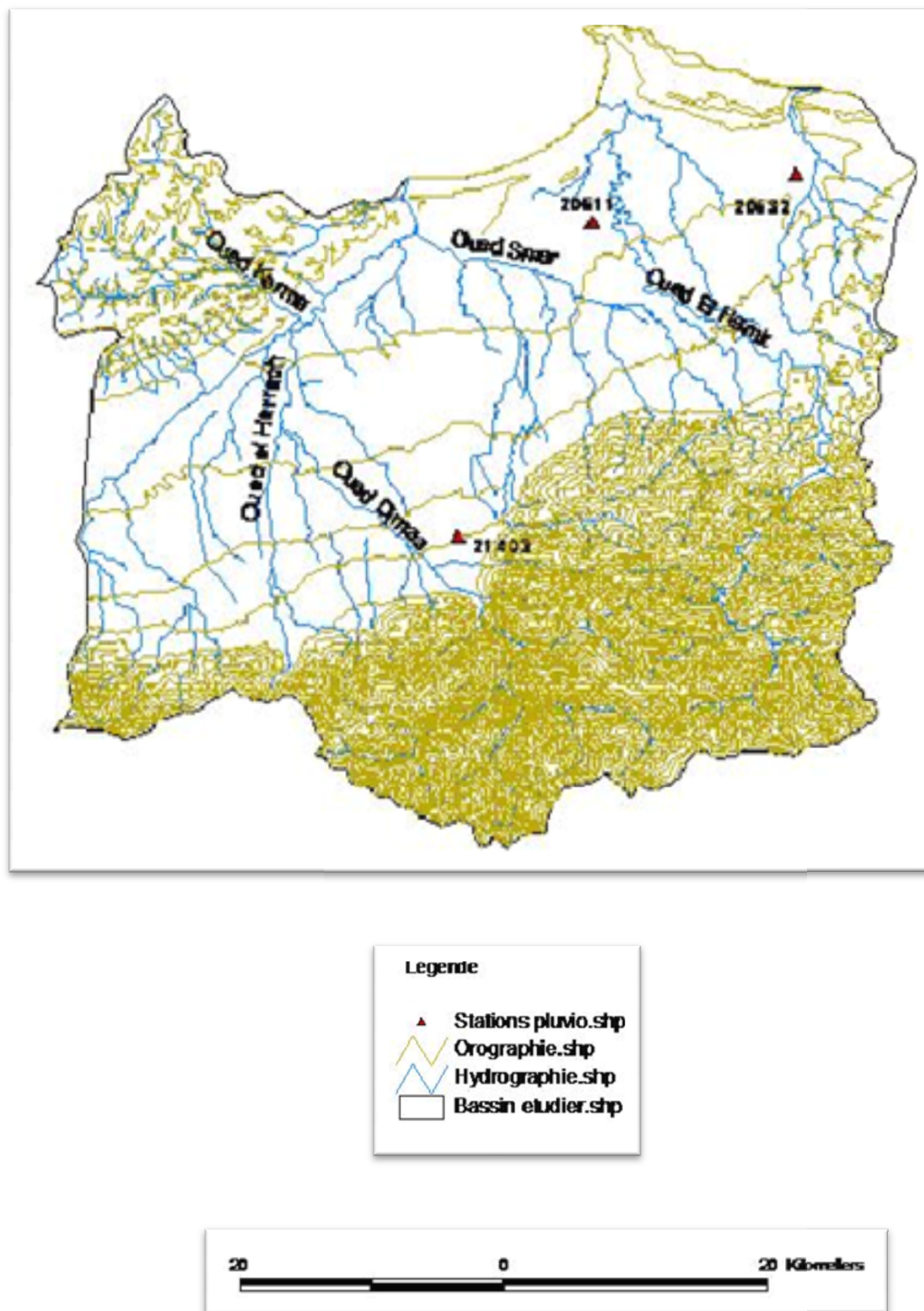


Figure II-3 : Orographie et hydrographie de la plaine de Mitidja Est (ANRH,Alger)

II-1-5- Réseau hydrographique

La plaine de la Mitidja Est est traversée par trois oueds importants :

1. Oued El Harrach
2. Oued Djemaa
3. Oued El Hamiz

II-1-6- Les paramètres géomorphologiques

II-1-6-1- Paramètres géométriques

a- La surface

La surface topographique est le paramètre le plus important, il permet de contrôler l'intensité de plusieurs phénomènes hydrologiques (apport, volume de précipitations ou infiltration...)

- Elle peut être déterminée en utilisant un planimètre sur cartes topographiques.

b- Le périmètre

Le périmètre correspond à la limite extérieure du bassin

De la même façon que précédemment on calcule le périmètre, en utilisant un curvimètre.

Tableau II-1 : paramètres géométriques des sous bassins versants

Sous bassins versants	Code	Surface (Km ²)	Périmètres (Km)
Oued El Hamiz	02-06	283,21	102,11
Oued El Harrach	02-14	1236,28	188,17

Source : ANRH

II-1-6-2- Paramètres de forme

La forme du bassin versant influence fortement l'écoulement global et notamment le temps de réponse du bassin versant. C'est la configuration géométrique projetée sur un plan horizontal. Un bassin versant peut donc se présenter sous deux formes : allongée et ramassée.[8]

II-1-6-3- Les paramètres de relief

Le relief est défini comme étant la variation des altitudes ; ces variations influent sur des facteurs comme l'écoulement, les précipitations, la végétation etc.

Les paramètres de forme et de relief des deux sous bassins versants (Oued El Hamiz et Oued El Harrach) sont indiqués dans le tableau suivant :

Tableau II-2 : Paramètres de forme et de relief des deux sous bassins versants (Oued El Hamiz et Oued El Harrach).[14]

Paramètres	Paramètres de forme			Paramètres de relief	
	Indice de compacité Gravelius (Kc)	Longueur de rectangle équivalent (Km)	Largeur du rectangle équivalent (Km)	Altitude moyenne (m)	Indice de pente globale (Ig) m/Km
Sous Bassins versants					
El Hamiz	1.7	38.45	7.36	325.3	19.5
El Harrach	1.5	78.30	15.80	430	13.8

- L'indice de compacité (Kc) varie entre 1.7 et 1.5 ce qui traduit une allure allongée des bassins.

- Les valeurs des pentes globales montrent que les deux sous bassins versants ont un relief faible, traduisant ainsi une infiltration favorable au dépend du ruissellement traduisant ainsi un temps de ruissellement long, ce qui indique une bonne possibilité d'infiltration des eaux superficielles.

II-2- Etude hydroclimatologique

Le climat se définit comme étant l'ensemble des phénomènes météorologiques qui caractérisent l'état de l'atmosphère et de son évolution en un lieu donné.

Cette partie a pour but l'analyse des paramètres climatologiques : P, T, ETP, ETR, lame ruisselée et lame infiltrée intervenant dans l'établissement du bilan hydrologique.

II-2-1- Paramètre climatologique

II-2-1-1 Réseau pluviométrique

Les quatre stations qui ont été retenues non seulement en fonction de leur bonne répartition dans le sous bassin versant de la Mitidja Est mais aussi de la fiabilité de leurs données. Nous avons donc choisi les stations et les postes suivants : l'Arbaa, Dar El Beida, Hamiz barrage et Reghaia.

Tableau II-3 : Caractéristiques des stations pluviométriques

station	Code ANRH	Coordonnées		
		Longitude	Latitude	Altitude(m)
Arbaa	02-14-03	3°09' E	36°43N	100
Dar El Beida	02-06-11	3°15' E	36°43'E	24
Hamiz Barrage	02-06-02	3°21'E	36°36'N	130
Reghaia	02-06-32	3°20'E	36°48'N	20

Source : ANRH

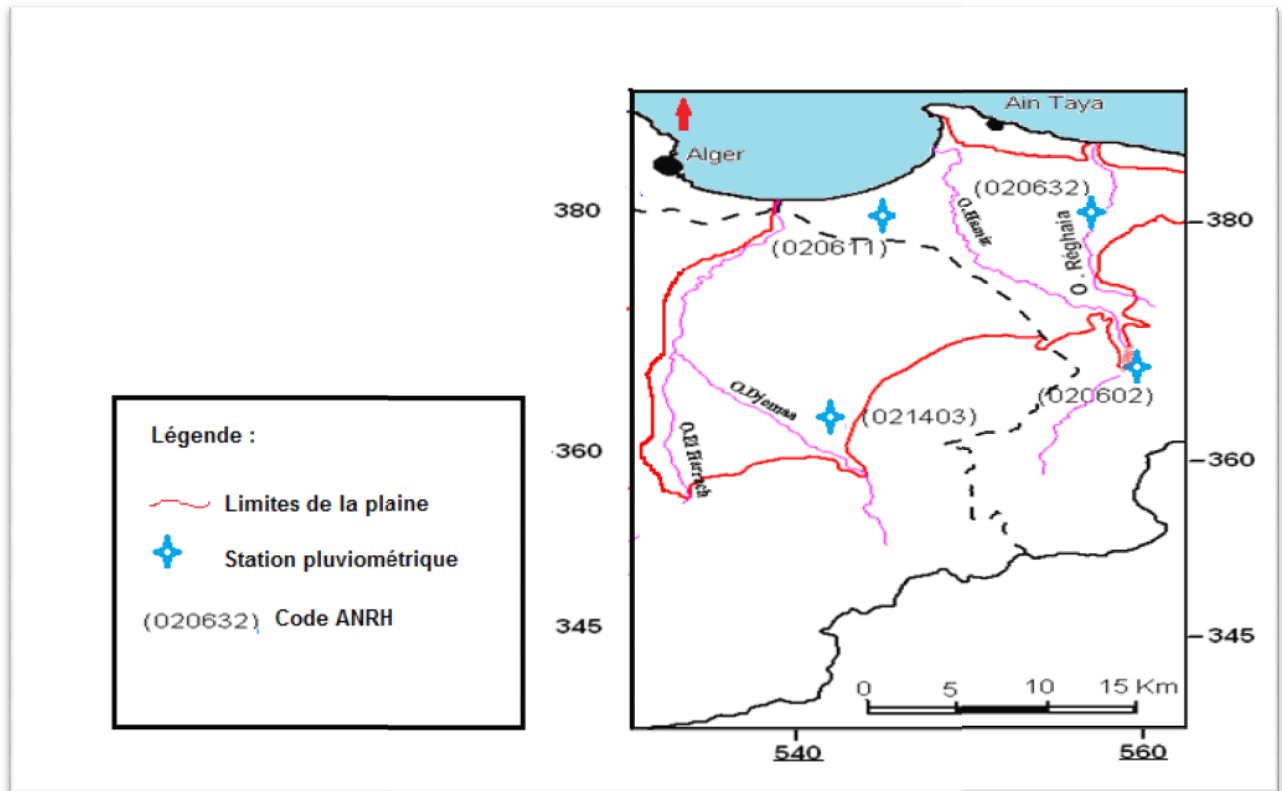


Figure II-4 : carte de la répartition des stations pluviométriques (ANRH)

II -2-1-2- Les précipitations

Les précipitations moyennes mensuelles sur une période d'observation de 28ans (1980 à 2008) pour les quatre stations sont représentées dans le tableau II-4 (Les séries pluviométriques sont représentées dans l'Annexe).

II-2-1-3- Précipitations mensuelles et annuelles

Les précipitations moyennes mensuelles et annuelles observées à chaque station durant la période allant de 1980 à 2008 sont données dans le tableau suivant

Tableau II-4 : précipitations mensuelles et annuelles (1980-2008)

Stations	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	année
L'Arbaa	29	55,9	85,2	117,8	98,3	78,1	70,3	62,2	50,2	9,1	3,5	4,2	659,7
Dar El Beida	27,9	60,1	80,8	102,5	83,2	72,2	65,6	52,1	39,7	11,2	3,9	9,1	582,1
Hamiz Barrage	32,9	62,2	94,1	124,4	97,4	81,1	67,2	40,2	50,7	9,3	2,9	4,75	671
Reghaia	26,2	55,8	95,21	102,1	82,25	66,3	53,9	44,8	47,2	8,4	3,1	3,7	585

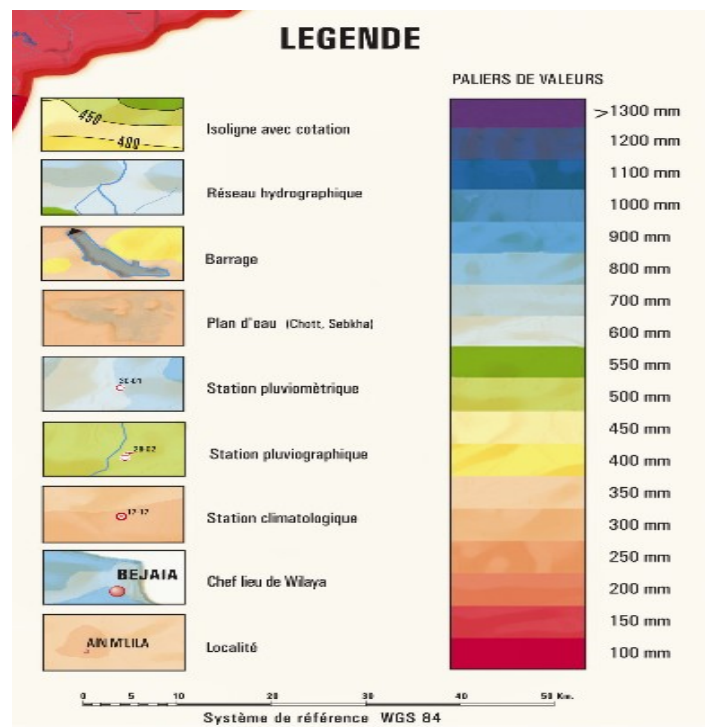
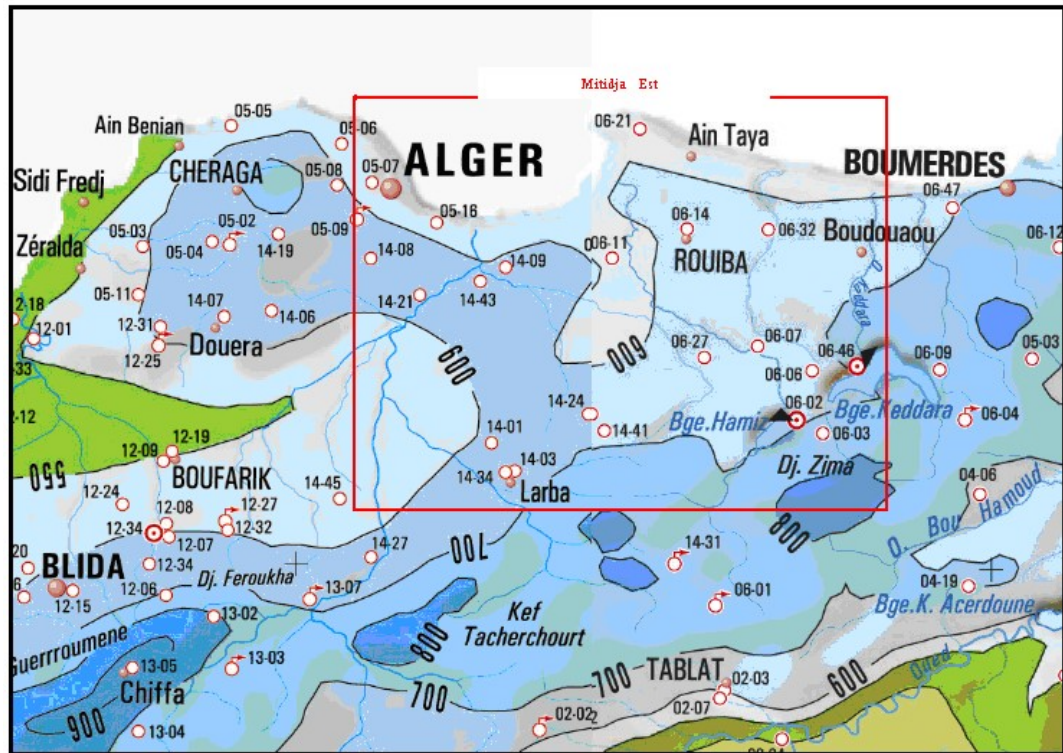


Figure II-5: Carte pluviométrique de la Mitidja (ANRH 2008)

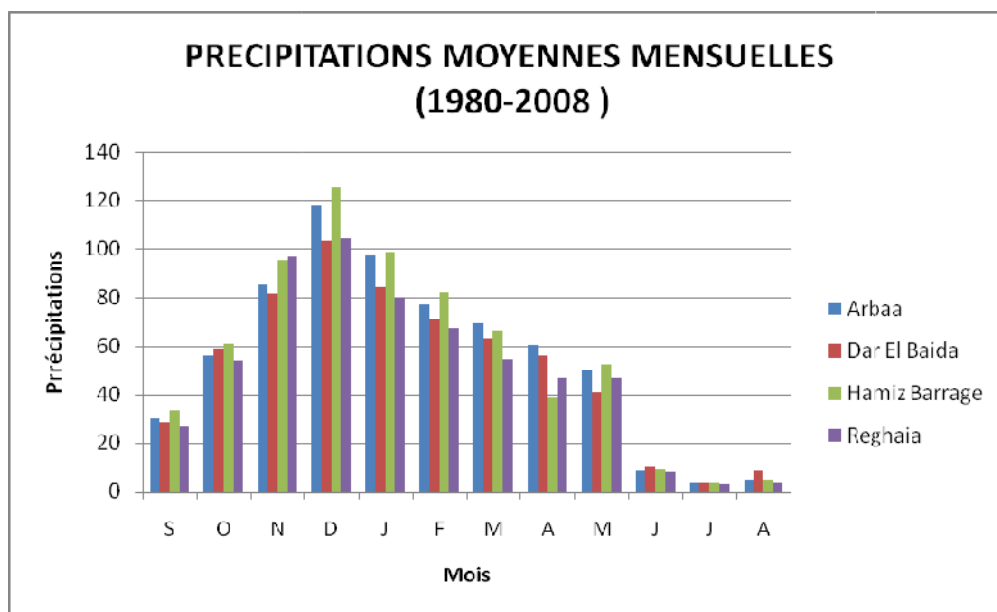


Figure II-6 : Précipitations moyennes mensuelles période (1980 -2008)

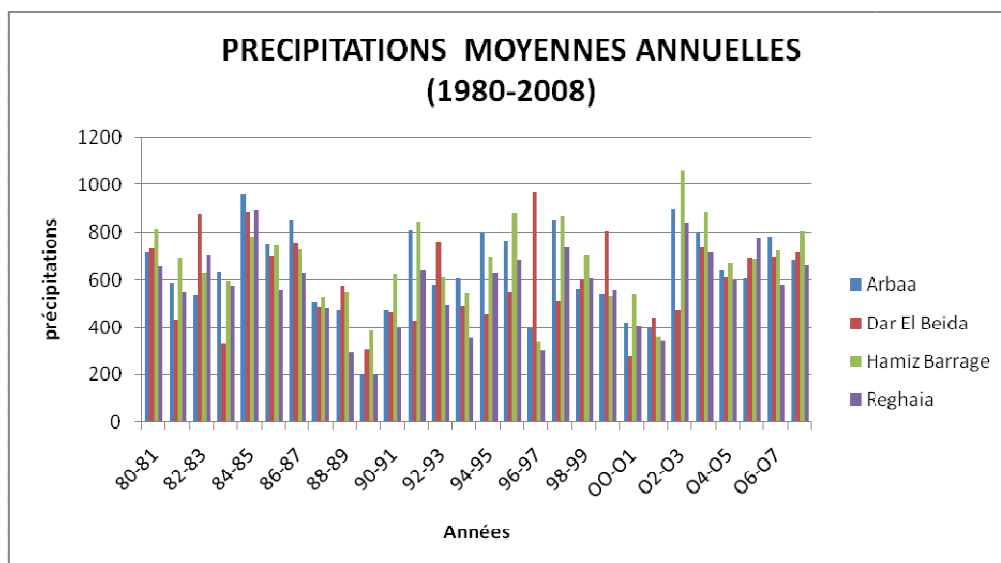


Figure II-7 : Précipitations moyennes annuelles période (1980-2008)

L'analyse des données des précipitations pour chaque station peut se résumer comme suit:

- La station de l'Arbaa

La période (1980-2008) est caractérisée par une moyenne annuelle des précipitations de l'ordre de 659,7 mm/an et d'une moyenne mensuelle des précipitations plus élevée au mois de décembre avec une valeur de 119 mm et plus faible au mois de juillet avec une valeur de 2,9mm.

- Station de Dar El Beida

La moyenne annuelle des précipitations de la période (1980-2008) est de 582,1mm, la moyenne mensuelle des précipitations la plus élevée est celle du mois de décembre avec une valeur de 105 mm et la plus faible est celle du mois de juillet avec 3,5mm.

- La station de Hamiz Barrage

La moyenne annuelle des précipitations de la période (1980-2008) est de 671mm/an, cette période est caractérisée au mois de décembre par une moyenne des précipitations mensuelles la plus élevée de l'ordre de 124,9 mm, et au mois de juillet par une moyenne des précipitations la plus basse de l'ordre de 3,2 mm.

- La station de Reghaia

La période (1980-2008) est d'une moyenne annuelle des précipitations de l'ordre de 585mm/an, la moyenne mensuelle des précipitations la plus élevée est celle du mois de décembre avec 103,9 mm et la plus faibles est celle du mois de juillet avec 2,6mm.

II-2-1-4- Evaluation de la lame d'eau précipité

Pour déterminer la lame d'eau précipitée à l'échelle du bassin, nous avons utilisé trois méthodes :

- a- La méthode Arithmétique
- b- La méthode de Thiessen
- c- La méthode des isohyètes

a-La méthode arithmétique

La méthode la plus simple qui consiste à calculer la moyenne arithmétique des valeurs obtenues aux stations étudiées, s'applique uniquement si les stations sont bien réparties et si le relief du bassin est homogène.[19]

$$P = \sum p_i / n \quad \text{ou} \quad P = (P_{i1} + P_{i2} + P_{i3}) / n$$

Avec :

- P** : précipitations moyennes annuelles (mm)
- P_i** : précipitation moyenne annuelle de la station (mm)
- n** : nombre de stations considérées, dans notre cas n=4

Le calcul de la lame précipitée de la période (1980-2008) par la méthode arithmétique est donné dans le tableau ci après

Tableau II-5 : Calcul de la lame précipitée de la période (1980-2008) par la méthode arithmétique.

station	Précipitations (mm)
L'Arbaa	659,7
Dar El Beida	582,1
Hamiz Barrage	671
Reghaia	585
	P_i=599,45

D'où P_i=599,45 mm

b - La méthode des polygones de Thiessen

La méthode du polygone de Thiessen est la plus couramment utilisée, parce que son application est aisée et qu'elle donne de bons résultats.

$$P = \sum A_i \times P_i / A = (P_{i1} \cdot A_1 + P_{i2} \cdot A_2 + P_{i3} \cdot A_3) / A$$

Avec:

P: précipitations moyennes annuelles (mm)

P_i: précipitations moyennes annuelles de la station située dans le polygone (mm)

A_i: surface du polygone (km²)

A: surface totale de zone d'étude (km²).

Les résultats du calcul apparaissent dans le tableau suivant :

Tableau II-6: calcul de la lame précipitée par méthode Thiessen période (1980-2008)

Station	Surface de polygone (km ²)	Précipitations		Volume d'eau (10. m ³)
		(mm)	(m)	
Arbaa	159	659,7	6,597	10 33,55
Dar El Beida	196	582,1	5,821	1140,91
Hamiz Barrage	32	671	6,71	214,72
Réghaia	88	585	5,85	514,8
	∑St=472			∑PiSi=2903,98

D'ou P=2903,98/ 472 = 615,25mm

c- Méthode des isohyètes

C'est la méthode la plus fiable, Le principe de cette méthode consiste à tracer les courbes d'égales hauteurs de précipitations à l'échelle du bassin étudié par triangulation et à déterminer les surfaces comprises entre deux isohyètes consécutifs.[8]

$$L_p = \sum \frac{P_i S_i}{S_t}$$

Avec :

L_p : Lame moyenne annuelle précipitée en mm.

P_i : Précipitation moyennes annuelles inter-isohyètes en mm.

S_i : Surfaces inter-isohyètes considérés en km^2

S_t : Surfaces totale du bassin versant en km^2 .

Cette méthode a donné les résultats indiqués dans le tableau ci après :

Tableau II-7: résultats obtenus par la méthode des Isohyètes .[17]

Classes inter-isohyètes (mm)	Précipitation P_i		Surface inter-isohyètes S_i (Km^2)	Volume d'eau $P_i * S_i$ ($10^6 m^3$)
	(mm)	(m)		
588	588	5.8	60.5	350.9
588 - 608	590	5.9	30.4	179.36
608 - 628	610	6.1	65.2	397.72
628 - 648	630	6.3	35.5	223.65
648 - 668	650	6.5	42.3	274.95
668	660	6.6	61	407.48
			$S_i=295$	$P_i S_i=1834.$

$$\text{Soit } L_p = \sum \frac{P_i S_i}{S_t} = \frac{1834}{295} = 622 \text{ mm}$$

Le tableau II-8 , nous donne les résultats des trois méthodes, nous retiendrons la moyenne égale à **615 mm**.

Tableau II-8: résultats obtenus par les 3 méthodes :

Méthode	Arithmétique	Thiessen	Isohyètes	Moyenne
Moyenne (mm)	600	615	622	615

II-2-2- Les températures

Le climat de la région est méditerranéen caractérisé par un été chaud et sec et un hiver doux et pluvieux. La température moyenne annuelle est d'environ 17°C (données de Dar el Beida) avec des températures moyennes autour de 11°C en hiver (décembre- février) et d'environ 24°C en été (juillet-août). La moyenne des maxima varie entre 17°C environ en hiver et 31°C en été, alors que la moyenne des minima varie entre 6°C environ en hiver et 18°C en été.

Les calculs des températures sont indiqués dans le tableau ci après :

Tableau II-09: Mensuelles des températures moyennes, maximales et minimales
Période (sept 1980-août 2008) Dar El Beida.

	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou
Max	26.8	22.7	17.9	16.2	14.3	13.9	16.6	17.4	21.1	25.4	27.8	29.1
Min	21.6	17.1	12.8	10.1	8.2	8.8	11.2	13.2	15.2	20.4	22.8	23.5
Moy	23.7	20.2	15.6	12.4	11.0	11.5	13.7	15.2	17.8	21.5	25.3	25.9

Moyenne Annuelle : 17.8°C.

L'analyse de ces valeurs montrent que les températures maximales sont observées au mois d'août (25.9°C) et la valeur minimale au mois de janvier (11.0°C) ce qui correspond parfaitement au climat du nord de l'Algérie, essentiellement méditerranéen.

Les valeurs des températures moyennes mensuelles de Dar El Beida pour la période (1980-2008) indiquées dans le graphe ci après :

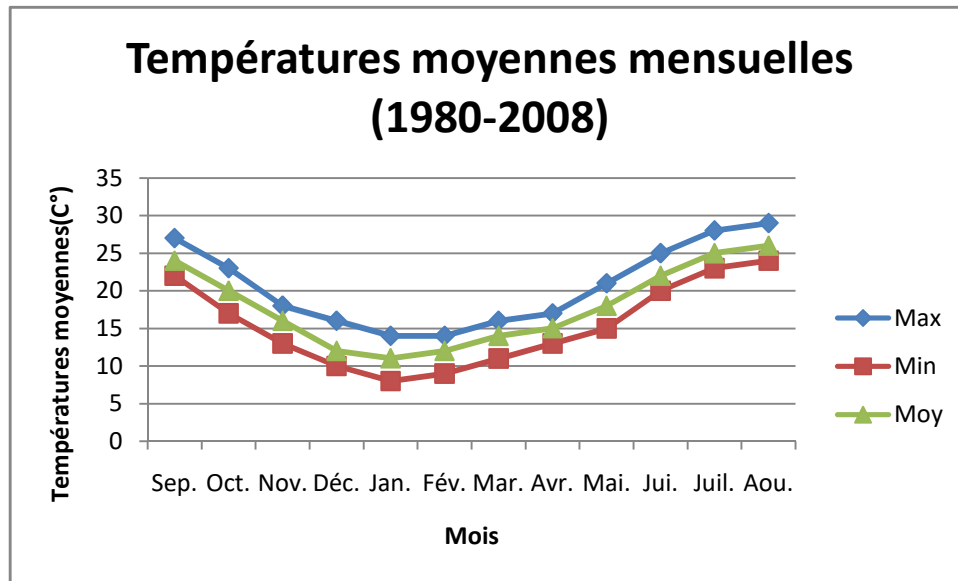


Figure II-8: graphe des Températures moyennes mensuelles de Dar El Beida pour la période (1980-2008)

Ce graphe permet de distinguer dans cette série hydrologique deux périodes :

1. **Une période froide** : depuis Novembre jusqu'à Avril avec une température moyenne inférieure à la température moyenne annuelle.
2. **Une période chaude** : de Mai jusqu'à Octobre dont la température moyenne est supérieure à la température moyenne annuelle.

II-2-3- Evapotranspiration ou déficit d'écoulement

Il existe deux types d'évapotranspiration :

1. l'évapotranspiration potentielle.
2. l'évapotranspiration réelle.

II-2-3-1- Calcul de l'ETP

L'évapotranspiration potentielle est la quantité d'eau maximale susceptible de s'évaporer au niveau d'un sol.

1. Application de la méthode de Thornthwaite

L'ETP est calculée par la formule :

$$ETP = 16(10 t / I)^a$$

Avec :

$$a = 1.6 I / 100 + 0.5$$

I = Somme des indices mensuelles de l'année $I = \sum^{12} i$ avec $i = (T/5)^{1.514}$

i = Indice thermique mensuelle

T = Température moyenne mensuelle en °C

**Tableau II-10: Détermination de l'ETP par la méthode de Thornthwaite
Période (1980-2008)**

	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
T°moy Mensuelle	24.9	21.4	16.2	13.0	11.7	12.1	13.6	16.0	19.7	23.7	25.4	27.8
i	10.54	8.28	5.59	3.95	3.29	3.52	4.59	5.38	6.83	9.1	11.64	12.06
I						84.8						
a						1.85						
ETP (mm)	107.4	79.9	49.5	32.4	25.9	28.2	38.9	47.2	63.2	89.64	121.1	126.5
K	1.03	0.97	0.86	0.84	0.87	0.85	1.03	1.10	1.21	1.22	1.24	1.16
ETPc	110.6	77.5	42.6	27.2	22.6	23.9	40.1	51.9	76.5	109.4	150.2	146.8

La réserve utile RFU donnée pour les sols de la plaine de la Mitidja varie de 50 à 150mm ; la valeur prise en compte pour le calcul du bilan hydrique est **100mm**.

II-2-3-2-Evapotranspiration réelle (ETR)

L'évaluation de la lame d'eau évaporée se fera à partir de formules empiriques usuelles, il s'agit de celles de **Turc**, **Coutagne** et **Thornthwaite**.

1. Formule de Turc

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0,9 + \frac{P^2}{L^2}}}$$

$$L = 300 + 25 T + 0,05 T^3$$

Avec :

ETR : Evapotranspiration réelle moyenne annuelle en (mm)

P : précipitation moyenne annuelle en (mm)

T : température moyenne annuelle en (°C) ;

P : Pouvoir évaporant.

Nous avons obtenu une ETR égale à **500 mm**.

2. Formule de Coutagne

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

Dans laquelle:

$$\lambda = \frac{1}{0,8 + 0,14T}; \quad \text{Avec limite d'application } \frac{1}{8\lambda} < P < \frac{1}{2\lambda},$$

ETR : évapotranspiration réelle en mm.

P : précipitation moyenne annuelle en mm.

T : température moyenne annuelle en °C.

Tableau II-11: résultats de l'ETR par la formule de Coutagne

paramètres	λ	$1/8 \lambda$	P (m)	$1/2 \lambda$	ETR (mm)
Résultats	0,3	0,42	0,623	1,67	541

3. Méthode de bilan hydrique de C.W Thornthwaite

Tableau II-12: bilan hydrique de C.W Thornthwaite à la station de Dar El Beida (1980-2008)

	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jui	Aou	Total
P	28.3	59.3	81.4	103.3	84.4	71.1	63.4	56.2	40.7	10.4	3.9	8.9	583.4
ETPc	110.57	77.47	42.58	27.19	22.56	23.94	40.1	51.92	76.47	109.36	150.21	146.74	879.1
ETR	28.3	59.3	42.58	27.19	22.56	23.94	40.1	51.92	76.47	86.88	3.9	8.9	472.04
Ru	0	0	38.82	100	100	100	100	100	61.18	0	0	0	-
Déficit	82.27	18.17	0	0	0	0	0	0	0	37.78	146.31	137.84	422.37
Excédent	0	0	0	9.02	61.84	47.16	23.3	4.28	0	0	0	0	145.6

Tableau II-13 : Récapitulatif des résultats d'ETR par les différentes méthodes Pour la période (1980-2008).

Paramètres	Méthodes	Résultats (mm)	(ETR/P) (%)
ETR	Turc	500	80
	Coutagne	541	87
	c.w Thronthwaite	472.04	76

Nous retiendrons la moyenne arithmétique de ces trois méthodes, qui est de **504 mm**

II-3- Bilan hydrologique

La formule classique du bilan est la suivante :

$$P = E + R + I + \Delta s$$

Avec :

P : précipitation moyenne annuelle (mm) ;

E : évapotranspiration réelle moyenne annuelle (mm) ;

R : ruissellement moyen annuel (mm) ;

I : Infiltration moyenne annuelle (mm).

Δs : Variation des réserves qui tend vers zéro pour une période s'étalant sur plusieurs années.

II-3-1- Estimation de la lame ruisselée

La lame ruisselée est estimée à partir de la formule d'approximation de Tixeront-Berkaloff elle est donnée par l'expression suivante :

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

Avec :

R : ruissellement superficiel moyen annuel (mm) ;

P : précipitation moyenne annuelle (mm) ;

ETP : évapotranspiration potentielle moyenne annuelle

L'application de cette formule nous donne les résultats suivants :

Tableau II-14: valeurs de la lame d'eau ruisselée (1980-2008)

P (mm)	ETP (mm)	R (mm)
623	879.11	104

Nous obtiendrons R = **104mm**.

II-3-2- Estimation de l'infiltration :

L'infiltration est évaluée à partir de l'équation du bilan ci-dessous :

$$I = P - (ETR + R) - \Delta S$$

Avec :

I: lame infiltrée en mm

P : lame précipitée en mm.

ETR : Evapotranspiration réelle en mm.

R : lame ruisselée en mm.

ΔS : Variation de la réserve en mm. Cette dernière (Δs) devient négligeable devant une période d'observation de longue durée (28 ans)

Nous obtenons **I = 15 mm**.

Tableau II-15: récapitulations des différentes composantes du bilan hydrologique dans la station de Dar El Beida (1980-2008).

Paramètres	Méthodes utilisées	Valeurs (mm)	Proportion (%) des différents paramètres par rapport à la lame précipitée
ETP	Thronwaite	879.11	-
E (ETR)	Moyenne	504	81
R	Tixeron-Berkaloff	104	17
I	Bilan hydrique	15	2.4

CONCLUSION

Géomorphologie

Cet aperçu nous a permis, en nous appuyant sur les différents paramètres géomorphologique, de dégager un certain nombre de caractéristiques du bassin versant considéré :

- A partir de l'indice de compacité de Gravelius, on a pu démontrer la forme allongée de ce bassin versant.
- L'indice de pente global a fait ressortir un temps de concentration des eaux de ruissellement relativement étalé.
- Les valeurs faibles de la densité de drainage témoignent d'un réseau hydrographique peu dense.

Hydroclimatologie

Du fait de sa proximité de la mer, la zone d'étude jouit d'un climat méditerranéen, caractérisé par un été sec et chaud et un hiver doux et humide La température moyenne annuelle durant la période (1980-2008) a été estimée à 17,8°C.

La précipitation moyenne annuelle est de l'ordre de 599,45 mm.

- Les mois les plus secs sont : Juin, Juillet, Aout.
- Les mois les plus pluvieux sont : Novembre, Décembre, Janvier.
- Les précipitations moyennes annuelles calculées par la moyenne des trois (3) méthodes (Arithmétique, Thiessen, Isohyètes) sont de 615mm

Pour le calcul des paramètres hydroclimatiques nous avons choisi la station de Dar El Beida (ONM) comme station de référence pour son fonctionnement régulier, les résultats obtenus sont :

- L'évapotranspiration potentielle (ETP) est de 879.11mm, obtenue par la formule de C.W Thornthwaite

Introduction :

Dans ce chapitre, nous allons donner un aperçu géologique sur la région de la Mitidja, en se basant sur la description lithostratigraphique et l'évolution paléogéographique et tectonique.

III -1- Cadre général :

La plaine de la Mitidja est une plaine côtière d'orientation OSO - ENE. Elle présente une structure synclinale, siège d'une sédimentation provenant de la transgression des mers et de l'érosion.

Elle est comprise entre deux blocs :

- Au Nord l'anticlinal du Sahel d'altitude moyenne de 270 m qui isole la plaine de la Mitidja de la mer, interrompue par la cluse de Mazafran. Le Sahel se raccorde à l'Ouest de l'oued Nador au massif de Chenoua, et à l'Est au massif de Bouzaréah.
- Au sud l'Atlas Blidien qui est un vaste massif montagneux, caractérisé par des séries épaisses de Crétacé

III-2- Stratigraphie et lithostratigraphie :

La configuration et la structure des réservoirs sont imposées par les formations limostratigraphiques, lesquelles déterminent les formations et les structures hydrogéologiques. Celles-ci sont la base de l'identification géologique des aquifères.

Une formation lithostratigraphique est constituée par un corps de terrain de nature pétrographique homogène : sable, calcaire, grès, gravier, argile, gypse, etc. Elle est désignée par le nom de la région (ou de la localité) où elle a été observée et décrite ou par un terme d'étage.

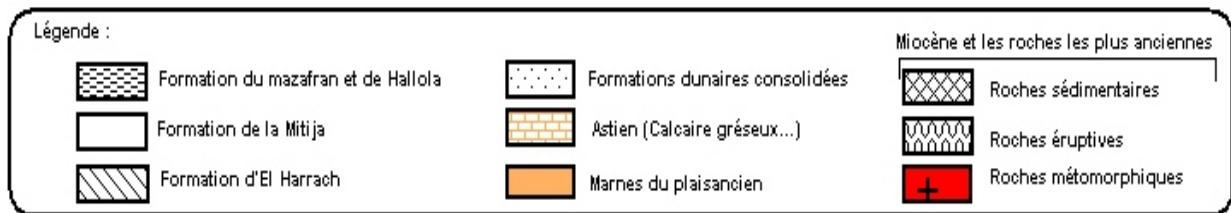
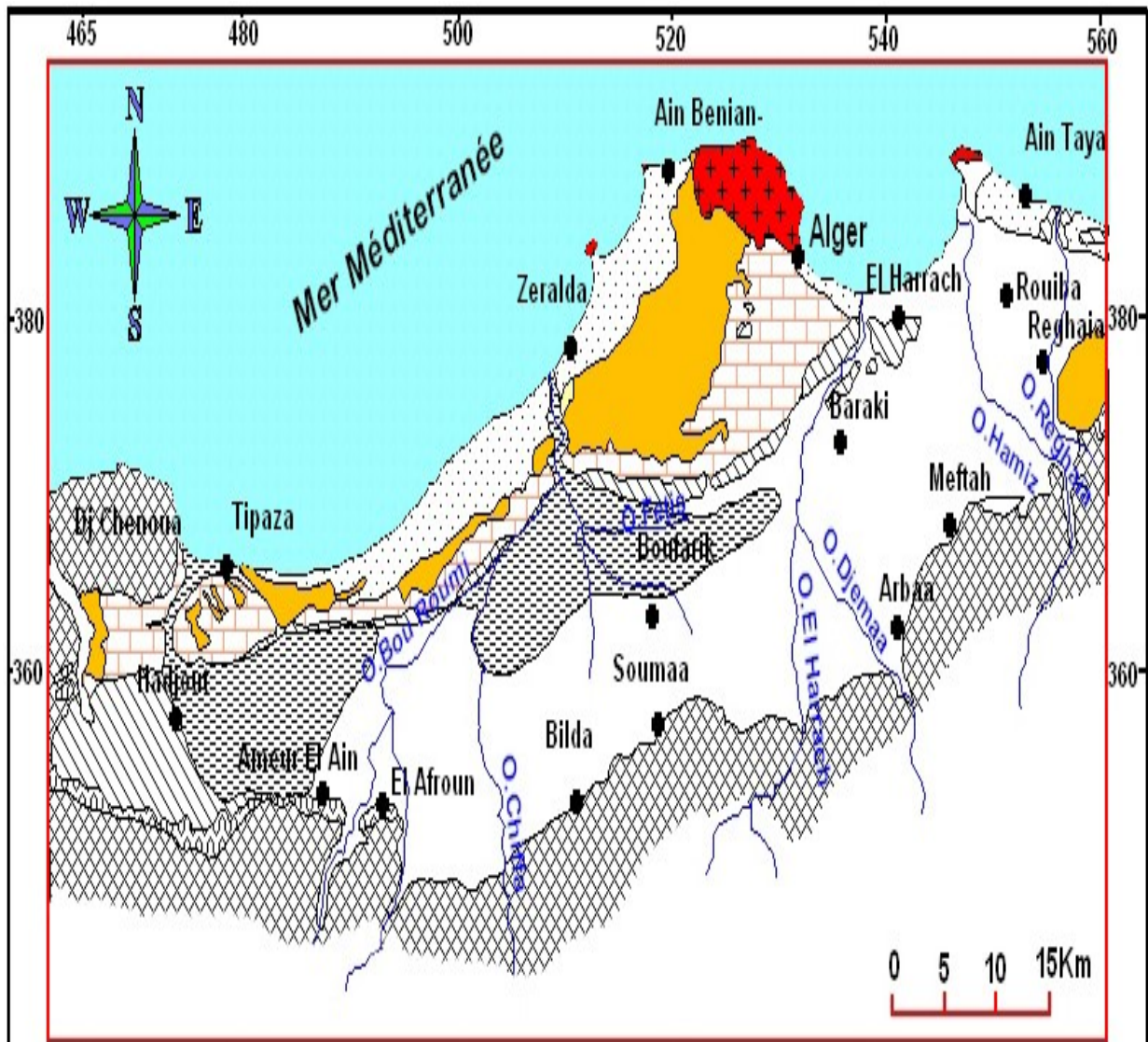


Figure III-1 : Carte géologique de la Mitidja (ANRH Alger)

Les différents stades de l'évolution de la Mitidja sont aujourd'hui bien connus depuis les travaux de (L.Glangenau et A. Aymé.1932). Ils sont résumés ci après ;

Elle est identifiée par trois ensembles de données fixes : surfaces limites, localisation dans le sous-sol et structure.

III-2-1- Miocène et formations plus anciennes :

Ces formations sont présentes sous le bassin de la Mitidja dans le cœur de l'anticlinal du Sahel et affleurent par endroits dans l'Atlas, sur la bordure Sud du bassin.[9]

III-2-1-1- Le Miocène :

Le miocène affleure localement dans l'Atlas, plus particulièrement au Sud de Khemis EL Khechna et à l'Est de oued Réghaïa. Il est représenté par des marnes de 50 m d'épaisseur du Vindobonien contenant des lentilles de calcaires, et aussi des lentilles de grès d'épaisseur variable du Burdigalien. (figure III-2)

III-2-1-2- Les formations plus anciennes :

Elles sont constituées par :

a- Roches éruptives du tertiaire :

Ces roches éruptives sont associées aux roches volcaniques, calcaire, conglomérat. Elles affleurent sur le pourtour Sud-Ouest de la plaine de la Mitidja.[9]

b- Roches métamorphiques :

Elles sont constituées de gneiss de schistes et micas schistes. Elles apparaissent sous forme de petits affleurements isolés au Nord (massif d'Alger, cap Matifou).[9]

III-2-2- Le pliocène :

Le pliocène est représenté par des dépôts du Plaisancien et l'Astien qui sont les plus développés dans la plaine.

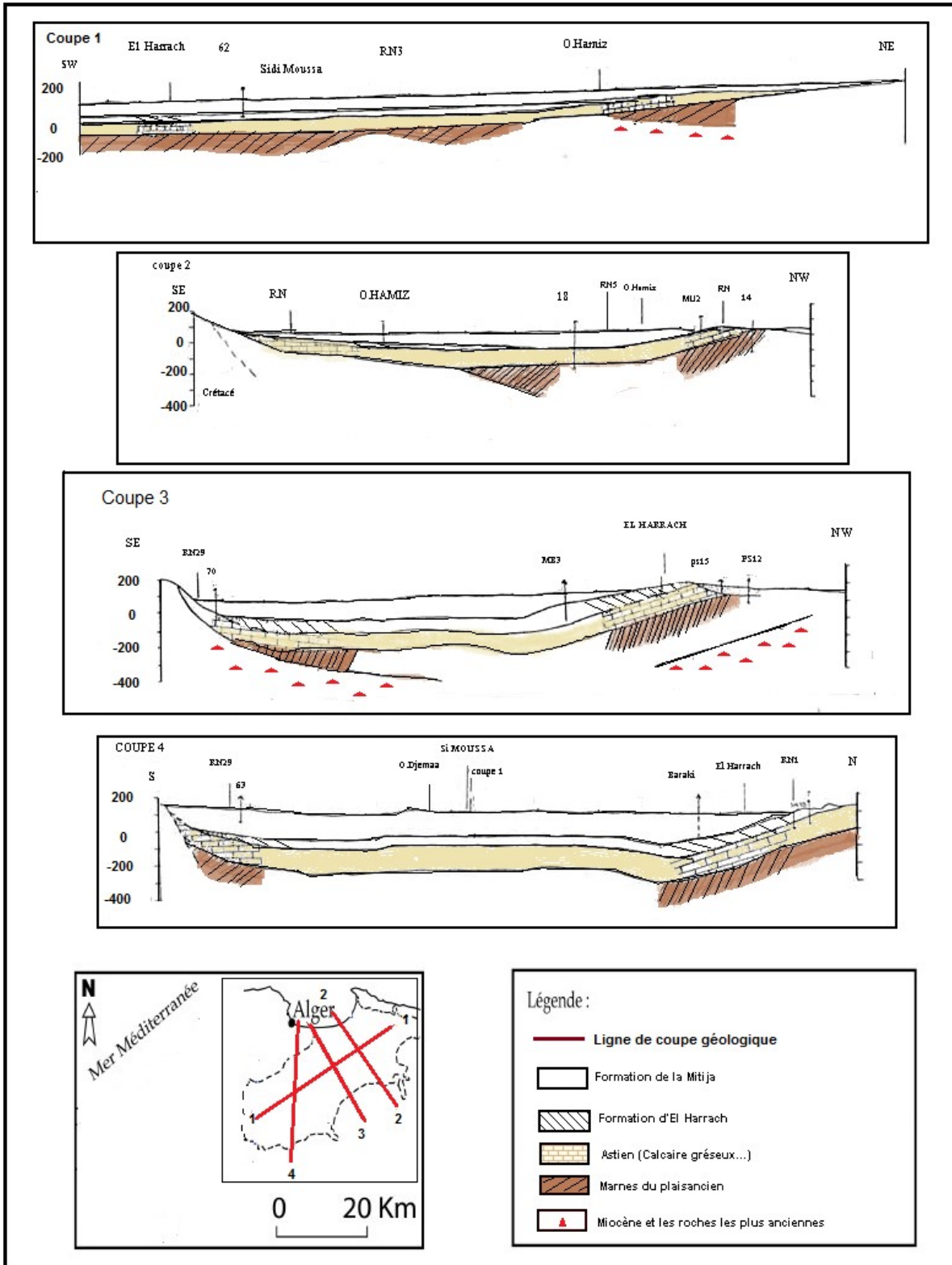


Figure III-2 : Coupes géologiques au niveau de la Mitidja Est (Bennie and partners, 1983)

III-2-2-1- Plaisancien :

Le Plaisancien affleure uniquement dans les collines du Sahel au cœur d'un plissement anticlinal, dans la zone de Khemis EL Khechna et Réghaia où il constitue la formation Est du bassin.

Il est représenté par une série épaisse uniforme de marnes grises ou bleues parfois sableuse.

III -2-2-2- L'Astien :

Il est bien développé sur la cote Sud du Sahel, contrairement à la bordure Sud de la Mitidja où il n'apparaît que très peu.

La formation de l'Astien est caractérisée par un faciès varié associé à une sédimentation marine de haut fond. Cette série, d'une épaisseur de 100 à 130 m, débute par une couche glauconienne et se poursuit par de la molasse récifale ou sub-récifale, par des marnes jaunes ainsi que par un faciès calcaire ou calcaro-gréseux.

À l'est de Rouïba, l'Astien se rencontre à de faibles profondeurs et son épaisseur a été réduite par l'érosion.

III -2-3- Le villafranchien :

Le villafranchien connu aussi sous le nom de « formation d'El Harrach » est marqué par des dépôts alluviaux plus récents. Il apparaît néanmoins le long du versant Sud du Sahel et à l'extrémité Ouest du bassin.

Cette formation constitue une séquence relativement uniforme d'argile plastique jaune ou grise localement, légèrement caillouteuse, contenant un petit nombre de lentilles de graviers de 2 à 6 m d'épaisseur.[9]

Son épaisseur moyenne au centre du bassin est estimée à 100 m. elle diminue progressivement en allant vers l'Atlas.

À noter que ces argiles sont totalement absentes autour de Rouïba.

III-2-4- Le Soltano-Tensifien :

Cette formation recouvre la totalité de la plaine sur une épaisseur de 100 à 200 m, et diminue vers les bordures de l'Atlas et de la baie d'Alger.

L'ensemble présente des variations de granulométrie considérables aussi bien dans le sens horizontal que dans le sens vertical.

Elle se compose principalement de matériaux alluviaux grossiers : graviers, limons, argiles et galets.

III-2-5- Le Rharbien -Actuel :

Ces dépôts intéressent une fraction peu importante du remplissage du bassin oriental de la Mitidja. Ils englobent les dépôts suivants :

- **Dépôts de sables dunaires :** se localisent essentiellement dans la région de Réghaia sur 20 à 40 m d'épaisseur.[9]
- **Dépôts des lits des oueds actuels :** ils sont constitués de sables et de graviers, et présentent une épaisseur de quelques mètres.
- **Dépôts de piémont de l'Atlas :** ce sont des dépôts divers d'éléments anguleux et de couches de graviers.

III-3- Evolution paléogéographique et tectonique :

L'histoire géologique du bassin de la Mitidja remonte à l'Éocène, tandis que son individualisation en unité structurale s'esquisse dès la fin de l'Astien.

À partir de l'Astien, les phénomènes de remblaiement, d'érosion et de plissement commencent à s'accroître. Ils se poursuivent jusqu'à la fin du Pléistocène en modifiant la distribution spatio-temporelle des sédiments précédemment déposés.

Plusieurs phénomènes géologiques ont contribué à l'évolution paléogéographique et structurale de la Mitidja.

III-3-1- A l'Éocène :

Jusqu'à la fin de l'Oligocène, les formations anciennes ont été structurées avec formation d'écaillés et de plis complexes.

Vers la fin du Lutécien (phase Priabonienne), *il y a* soulèvement de l'Atlas qui connaît dès lors une évolution continentale.

III-3-2- Au Miocène :

Au Burdigalien, la mer occupe toute la Mitidja, le processus de sédimentation et de plissement s'accroît et le bassin commence à s'effondrer. Cette phase de plissement se poursuit au Cartenien par des déformations cassantes. À la fin du Miocène (Vindobien), la mer se retire de la totalité de la Mitidja. Cette régression généralisée est accompagnée par une phase tectonique en distension favorisant l'émission des roches éruptives.

III -3-3- Au Pliocène :

Le cycle débute par une transgression marine traduisant une cimentation marneuse et se termine par une régression avec émergence.

III-3-4- Au Plaisancien :

Il correspond à une période de calme orogénique avec sédimentation en mer profonde, à cette époque la mer avance vers le Sud sans atteindre le pied de l'Atlas qui est en surrection continue.

Cette transgression traduit une sédimentation marneuse discordante sur la formation du Miocène. Cet épisode se termine par une sédimentation détritique : grès, calcaire, sable glauconique de faible profondeur qui marque le début de l'Astien.

III-3-5- À la fin de l'astien :

Un plissement surélève l'Atlas Blidien, le synclinal s'enfonce tout en provoquant l'apparition du bombement anticlinal du Sahel.

L'Atlas est soumis à une érosion dont les produits viennent se déposer dans le bassin subsident.

C'est le début du remblaiement Villafranchien.

III-3-6- Au quaternaire :

Pendant le villafranchien, le bassin subsident se remplit de marnes et de cailloutis et s'approfondit. À ce mouvement d'enfoncement s'ajoutent des compressions latérales de relief et subsidence.

Tableau III-2: Log Lithostratigraphique Synthétique de la Mitidja Est.[16]



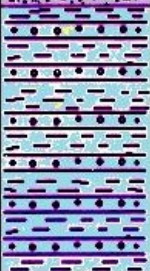


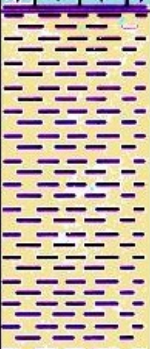


Systemes	Etages	Lithologie	Figures	Epaisseur	
QUATERNAIRE	Halocène	Actuel/récent		20 m	
	PLEISTOCENE	Flandrien	Limons , argiles		30 m
		Rharbien	Sables consolidés à lumachelles		30 m
		Soltanien / Tensiftien	Alternances d'argiles et de graviers (Formation de la Mitidja)		150 m
		Calabrien / Villafranchien	Argiles et Cailloutis (Fprmaton d'El Harrach) 2éme substratum		100 m
TERTIARE	QUATERNAIRE	Astien	Calcaires gréseux, marnes jaunes,sables		100 m
		Plaisancien	marnes à argiles ierr substratum		200 m
	Miocène	Vindobonien	marnes à lentilles de calcaires		50 m
		Burdigalien	marnes à lentilles de grés		

Tableau III-2 : récapitulation des différents stades d'évolution de la Mitidja

Système géologique, série, âge	Niveaux de la mer	Evénements géologiques
Tertiaire : miocène et Miocène supérieur	Baisse importante du niveau marin	Isolement de la Mitidja en tant qu'une unité structurale à la fin de la phase principale de l'orogénèse alpine qui a amorcé un affaissement; apparition de roches volcaniques en bordure du bassin.
Pliocène Plaisancien	élévation du niveau marin	<ul style="list-style-type: none"> • Dépôts de couches épaisses de marnes en mer profonde sur la surface d'érosion antérieure au miocène.
Astien	Baisse du niveau marin	<ul style="list-style-type: none"> • Dépôts de grès et de calcaires en mer peu profonde. • Léger plissement continu des sédiments.
Quaternaire : Pléistocène-Villafranchien	- 200 m	<ul style="list-style-type: none"> - Développement du bassin isolé de la mer par l'anticlinal du Sahel. - Dépôts d'épaisses couches d'argiles et de limons avec des couches minces de graviers en milieu fluvio-lacustre.
Arminien et Sallinien	- 50 m Fluctuations du niveau marin mais baisse progressive jusqu'à - 50 m A la fin de cette période.	<ul style="list-style-type: none"> - Période d'érosion intense et continue avec enlèvement jusqu'à 300 m de sédiment du Villafranchien. - Mise à nu de l'anticlinal du Sahel et creusement de cluses dans celui-ci, l'oued El Harrach devient un affluent de l'oued Mazafran. - Exposition et érosion des matériaux de l'Astien à l'Est.
Tensifien	-90 m à -95 m	Rajeunissement de l'Atlas entraînant Une sédimentation rapide et le remblaiement du bassin par colluvions et des alluvions caillouteuses d'origine continentale. Erosion des graviers et affouillement de la cluse de Mazafran.
Soltanien	-10 à -15m	Drainage médiocre, remblaiement des cluses par des fins sédiments, formation de marécages et dépôts de limons et d'argiles dans les lacs peu profonds
Rharbien	- 5 m	Drainage médiocre, remblaiement des cluses par de fins sédiments ; formation de marécages et dépôts de limons et d'argiles dans les lacs peu profonds
Récent/Actuel	0 m	Dépôts de dunes sableuses et de sédiments marins autour de la baie d'Alger. Creusement des oueds et des lits actuels.

Conclusion :

Le secteur d'étude constitue l'extrémité orientale de la plaine de la Mitidja qui est une zone de subsidence continue.

Cette dernière a donné naissance à une sédimentation active dont les éléments proviennent des reliefs de l'Atlas blidéen.

À la fin du Pliocène et au quaternaire, deux réservoirs aquifères se sont formés. Il s'agit de l'Astien formé par des calcaires et des grès d'origine marine et le réservoir quaternaire ou de la Mitidja (nappe alluviale) formé par un matériel d'origine continentale constitué essentiellement de galets et de graviers. (Tableau III-1)

Ces deux réservoirs sont séparés sur presque toute la surface de la plaine par des marnes jaunes semi-perméables de la formation d'El Harrach (le Villafranchien) sauf à l'Est de l'oued El Hamiz où ils ne constituent qu'un seul aquifère. (Tableau III-2)

Introduction :

L'objectif principal de notre étude hydrogéologique, est d'identifier et de décrire les unités géologiques ayant une importance du point de vue ressources en eau de la plaine de la Mitidja.

IV-1- Présentation des aquifères de la Mitidja :

De nombreuses études géophysiques et hydrogéologiques ont été réalisées qui ont fourni des précisions sur la géologie de la région et sur les relations qui existent entre les différentes unités hydrogéologiques.

L'analyse du remplissage du bassin de la Mitidja permet de distinguer de bas en haut quatre ensembles lithologiques :

- Un substratum imperméable formé par une série marneuse.
- L'Astien formé par un ensemble calcaire-sableux et gréseux.
- Une « Formation d'El Harrach », constituée par un ensemble argileux contenant par endroit du sable et du gravier.
- Les « Alluvions de la Mitidja », formées par un ensemble gravelo-sableux.

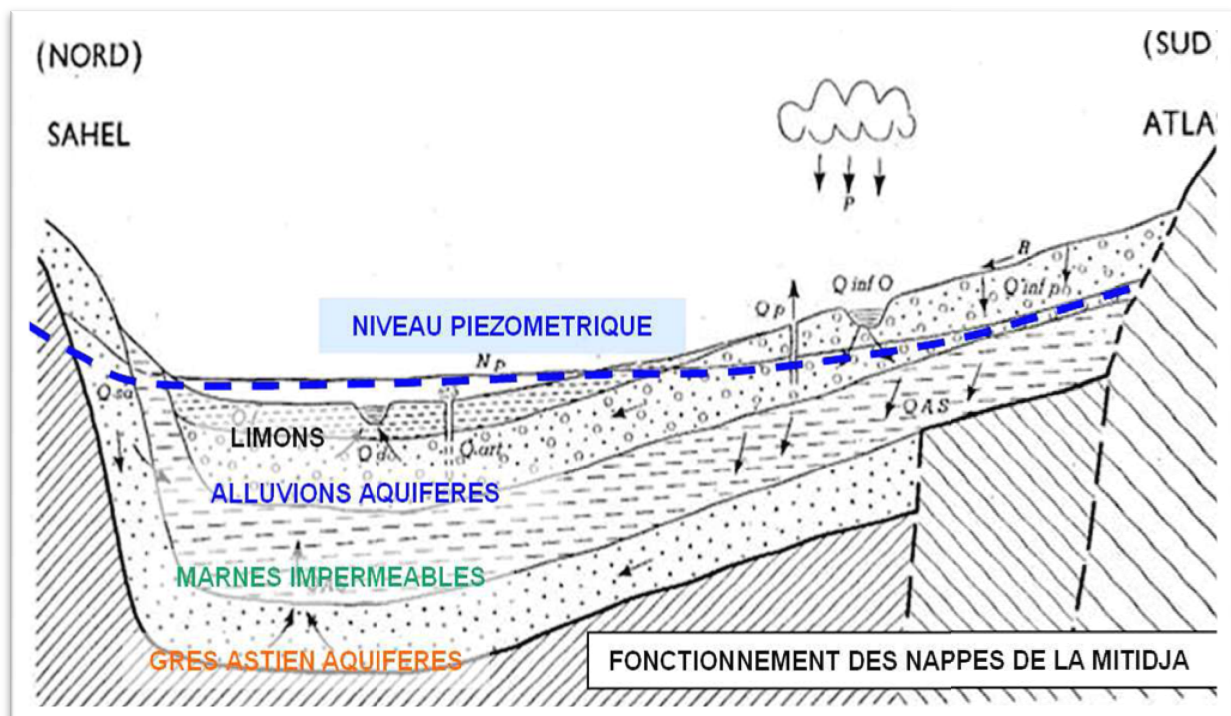


Figure IV-1 : fonctionnement des nappes de la Mitidja (M. Engalenc Géohydraulique 1971)

On distingue dans la Mitidja deux réservoirs aquifères :

IV-1-1 Aquifère de l'Astien :

L'aquifère Astien s'étend sous la majeure partie du bassin alluvial et affleure principalement dans le Sahel et au niveau des piments de l'atlas blideen. Il est composé de calcaire et de grés comportant occasionnellement des unités argileuses, son épaisseur moyenne varie de 100 à 180m et son toit se trouve généralement entre 250m et 300m au-dessous de la surface de la majeure partie de la plaine, La direction générale des écoulements est orientée vers la mer qui est le seul exutoire naturel en Mitidja Est.

Le réservoir Astien est délimité entre un substratum imperméable (Plaisancien) et la couverture des marnes de Maison Carrée ou marnes d'El Harrach.

L'alimentation de cet aquifère est assurée par l'infiltration efficace des pluies dans les zones où la nappe est libre, mais aussi par la nappe alluviale sus-jacente, par drainance à travers la formation d'El Harrach (présence de passées de sables et graviers).

Le flux de drainance ascendant vers la nappe alluviale à travers les passées caillouteuses de la formation d'El Harrach, constitue le seul exutoire de la nappe.

Du point de vue hydrodynamique l'Astien constitue une nappe captive sauf dans les zones d'affleurement et les zones de contact avec l'alluviale quaternaire dans la majeure partie orientale de la Mitidja à l'Est du Hamiz.

IV-1-2 Aquifère quaternaire :

L'aquifère alluvial se compose principalement de graviers et de galets alternant avec des limons et des argiles en quantité variable et comportant parfois des masses lenticulaires argileuses. Les alluvions sont d'âge Soltano-Tensiftien inférieur et reposent sur les marnes d'El Harrach. L'épaisseur moyenne de l'aquifère de la Mitidja est d'environ 100 à 150m, elle diminue au Sud en direction de l'Atlas Blidéen et atteint 40m au Nord au niveau de la Baie d'Alger. La limite inférieure de l'aquifère se situe au contact avec la formation d'El Harrach, à l'exception de la région Hamiz et Rouiba où l'aquifère se trouve en contact direct avec l'Astien et forme un aquifère unique, l'absence du substratum dans cette zone est due à l'activité érosive qui a lieu au cours du Pléistocène.

L'aquifère est libre sauf au niveau de l'oued Mazafran où il est mis en charge par une formation argileuse.

Du point de vue hydraulique, la nappe des alluvions peut être divisée en deux parties :

- Le bassin du Mazafran où la nappe est captive sur une grande étendue.
- Le bassin Harrach-Hamiz où la nappe est entièrement libre.

✓ **Le bassin Harrach-Hamiz**

Dans ce bassin, la nappe est libre, la zone de Rouiba forme une poche alluviale très transmissive qui atteint 4.10^{-2} m/s avec un coefficient d'emménagement (porosité efficace) qui varie de 3 à 10%.

La nappe alluviale est en continuité hydraulique avec la plus part des grands oueds qui la traverse. L'aquifère alluvial est limité à l'Ouest par les formations limoneuses de Halloula. Le long du Sahel, il est bordé par les marnes d'El Harrach sauf en quelques points où il est en contact avec l'Astien et où il se prolonge à travers la cluse de Mazafran. Le long de la Baie d'Alger la base de l'aquifère est perchée et le contact avec la mer n'est pas étendu.

A l'Est de la Baie, l'aquifère est isolé de la mer par les strates du petit Sahel, la limite est en partie constituée de marne du Plaisancien mais l'aquifère est en partie en continuité avec l'alluvion de la basse vallée de l'oued Boudouaou.

Le Tableau suivant montre le potentiel aquifère des formations les plus importantes.

**Tableau IV-1 : Classification du potentiel aquifère des grandes formations
Mac Donald (1992)**

Formation	Lithologie	Epaisseur (m)	Potentiel aquifère
Mazafran	Limons et argiles limoneuses	10 à 60	Potentiel limité car relativement imperméable. De grands diamètres fournissent de l'eau en faible quantité dans certaines aires. Ne couvre qu'une surface limitée .
Mitidja y compris les dunes et les alluvions récentes des oueds	Sables et graviers contenant plus ou moins de limons et d'argiles. Quelques strates d'argiles.	100 à 200	Aquifère principal du bassin. Absent dans les aires Ouest et quelques aires localisées près des bords du bassin. Presque toute l'eau de cette formation est souterraine.
El Harrach	Argiles avec quelques lentilles et couches de graviers	0 à 200 moyenne 100	Potentiel très limité en tant qu'aquifère sauf dans des aires localisées d'où l'on peut soutirer de l'eau depuis les lentilles de graviers présentes dans les argiles.
Astien	Grès, sables et caldaires	100 à 130	Materiaux aquifères; potentiel important près de la surface ou aux endroits où la formation de la Mitidja est absente.
Plaisancien	Marnes	200	Pas de potentiel aquifère.

IV-2- Etude des caractéristiques hydrodynamiques

Elles concernent la transmissivité T, le coefficient d'emménagement S et la perméabilité verticale K.

IV-2-1- Transmissivité

La transmissivité représente le produit de la perméabilité par l'épaisseur productive de l'aquifère, elle caractérise la facilité avec laquelle l'eau souterraine peut se déplacer. Pour la Mitidja une série d'études a été réalisée, la synthèse apparaît dans le tableau suivant :

Tableau IV-2: Transmissivité dans la Mitidja

Aquifère	Transmissivité (m ² /s)	Auteur
Astien	$10^{-2} - 2,3 \cdot 10^{-2}$	Bennie et Partners (1971)
	$1,1 \cdot 10^{-3}$ à $2,2 \cdot 10^{-3}$	Sir MacDonald and Partners 1992
	$1,7 \cdot 10^{-2}$ à $3 \cdot 10^{-2}$	Toubal, 1998

IV-2-2-Le coefficient d'emmagasinement :

Ce paramètre permet de distinguer les zones à nappe libre et les zones à nappe captive. Il caractérise la capacité de l'aquifère à libérer une certaine quantité d'eau sous l'action d'une certaine variation de charge hydraulique.

Les études qui ont été faites pour définir ce paramètre, sont représentées dans le tableau suivant :

Tableau IV-3: coefficient d'emmagasinement dans la Mitidja

Aquifère	Coefficient d'emmagasinement	Auteur
Astien	$5 \cdot 10^{-6}$ à $5 \cdot 10^{-3}$	Bennie et Partners (1980-1981)
Quaternaire	$7 \cdot 10^{-3}$	Bennie et Partners (1971)

Mac Donald (1992) donne une fourchette de valeurs citée dans le Tableau suivant:

Tableau IV-4: Coefficient d'emmagasinement.[5]

Formation	Condition	Fourchette de valeurs
Astient	libre	0.03-0.05
	captive	$5 \cdot 10^{-3}$ - $5 \cdot 10^{-6}$
Mitidja	libre	0.02-0.07
	captive	$3 \cdot 10^{-3}$ - $1.6 \cdot 10^{-4}$

IV-2-3- Perméabilité Verticale

Ce paramètre caractérise l'écoulement vertical entre les deux nappes.

Pour le système aquifère de la Mitidja, aucune mesure de la perméabilité verticale n'a été faite sur le terrain, toutes les estimations proposées ne sont que des hypothèses. Parmi elles, la perméabilité verticale des marnes jaunes de la formation d'El Harrach estimée par Mac Donald (1992) a une valeur comprise entre 10^{-7} et 10^{-8} m/s.

La perméabilité verticale de la Mitidja est d'environ 6.10^{-6} m/s et celle de l'Astien 10^{-5} m/s.

Tableau IV-5 : Perméabilité verticale

Aquifère	Mitidja	Astien	Marnes d'E Harrach Limos du Mazafran	Auteur
kv (m/j)	0.5	1	8.10^{-4} - 8.10^{-3}	Mac Donald (1992)

IV-3- Les mécanismes d'alimentation et d'écoulement des nappes :

IV-3-1- L'aquifère Astien :

Il est limité à la base et sur les bords par les formations peu perméables (marnes et argiles bleues du plaisancien), par conséquent les eaux qu'il reçoit sont celles arrivant par le dessus

Il est principalement alimenté par :

- L'infiltration des précipitations sur le Sahel où il est affleurant.
- Réalimentation due à la nappe de la Mitidja sus-jacente.

Dans les piémonts de l'Atlas, l'Astien est alimenté par la nappe de la Mitidja par drainante à travers les marnes jaunes de la formation d'El Harrach peu épaisse (aux endroits où il y a des passées caillouteuses et absence de marnes).

IV-3-1-1 Ecoulement de la nappe de l'Astien :

Les exutoires de cette nappe sont constitués par :

- les fuites latérales de l'Astien le long de la limite Sud du Sahel, bien qu'il soit limité sur les cotés par des formations peu perméables ; un débit important sort à travers ces limites.

- La réalimentation par les écoulements verticaux de l'Astien vers la nappe de la Mitidja.
- La réalimentation par les écoulements des eaux souterraines de l'Atlas : ces écoulements d'eau souterraines ont été mis en évidence par des analyses chimiques des eaux. [3]
- La réalimentation par distribution en eau potable et par les eaux usées.
- La réalimentation par les petits flux à travers les limites de l'aquifère : elle comprend les flux provenant du bassin versant du cours d'eau supérieur de l'oued Réghaia et les petits flux arrivant des formations de Halloula et d'ElHarrach.

IV-3-1-2 Les exhaures et les pertes de l'aquifère de la Mitidja :

Elles sont assurées par :

- la fuite souterraine, surtout vers l'Astien : Dans les piémonts de l'Atlas, l'aquifère de la Mitidja alimente l'Astien sous-jacent et cela par drainance à travers les marnes jaunes d'El Harrach.
- Fuite vers la baie d'Alger,
- Écoulement dirigé de la nappe de la Mitidja vers les limons de la formation de Mazafran par drainance à travers la couverture semi-perméable,
- Les prélèvements dans les puits et forages de la plaine : la presque totalité des prélèvements en eau souterraine provient de l'aquifère de la Mitidja, où plus de 4000 puits et forages assurent l'alimentation en eau potable, industrielle et d'irrigation de toute la région.

IV-3-2- Bilan entrant et sortant des aquifères :

IV-3-2-1- Bilan d'eau de la nappe de l'Astien :

Le bilan de la nappe de l'Astien n'est pas parfaitement connu, vu que les prélèvements et la réalimentation ne sont pas bien estimés. Les éléments connus du bilan d'eau sont données dans le tableau suivant : [14]

Tableau IV-6: Bilan d'eau de la nappe de l'Astien.[14]

DESIGNATION	DEBITS ENTRANTS		DEBITS SORTANTS	
	m ³ /jour	hm ³ /an	m ³ /jour	hm ³ /an
-Échange avec l'aquifère de la Mitidja.	35000	12,8	57000	20,8
- Débits sortants le long de la limite Sud du Sahel.	-	-	41000	15,0
-Réalimentation directe par les eaux de pluie	25000	9,1	-	-
-Fuite des réseaux de distribution en eau potable d'Alger.	37000	13,5	-	-
Total	97000	35,4	98000	35,8

La concentration nette de l'aquifère aux ressources de la plaine est approximativement de 62000 m³/jour soit 23 hm³/an.

IV-3-2-2- Bilan d'eau de la nappe de la Mitidja :

Dans les conditions climatiques moyennes, la réalimentation de la nappe est inférieure aux débits sortant de la nappe. Cette situation existe depuis la concentration des prélèvements par le champ captant de Mazafran I réalisé à la fin de 1970. par conséquent, la nappe n'est pas en équilibre hydraulique et entre 1970 et 1981, les niveaux piézométriques ont baissé de 10 m et plus en certains secteurs.

La réalimentation totale pour l'année hydrologique 1979/1980 dans les conditions climatiques moyennes étant de 900000 m³/jour, soit 328,5 hm³/an ; ce chiffre se décompose de la manière suivante [14].

Tableau IV-7: Débits entrants de la nappe de la Mitidja

DESIGNATION	DEBITS ENTRANTS		
	m ³ /jour	h m ³ /an	% du total
-Apports souterrains d'autres formations surtout l'Astien et les formations de l'Atlas.	172000	63	19,1
-Réalimentation directe par les précipitations	211000	77	23,4
-Réalimentation par les oueds et bassins versants périphériques	374000	136	41,5
-Infiltration des eaux d'irrigation excédentaires	69000	25	7,7
-Fuite des réseaux de distribution en eau potable et des eaux usées.	59000	22	6,6
-Réalimentation depuis les limons de Mazafran	15000	5	1,7
-Total	900000	328	100

Le total des débits sortants de la nappe de 1979/1980 était de 916000 m³/jour soit 335 hm³/an. Ce chiffre se décompose de la manière suivante [14] :

Tableau IV-8 : Débits sortants de la nappe de la Mitidja

DESIGNATION	DEBITS SORTANTS		
	m ³ /jour	h m ³ /an	% du total
Débits souterrains sortant vers l'Astien et vers la mer	46000	17	5,0 7,1
Drainage vers les oueds et vers la nappe des limons de la formation de Mazafran	65000	24	
Prélèvements :			
-eau potable	388000	142	42,4
-eau agricole	345000	126	37,7
-eau industrielle	57000	21	6,2
-autres	15000	5	1,6
Total	916000	335	100

Conclusion :

La plaine de la Mitidja comporte deux aquifères principaux : celui de l'Astien et celui de la Mitidja, séparés par la formation d'El Harrach, sauf dans la partie Est où il sont en contact direct.

L'Aquifère de l'Astien (gréseux) se trouve en charge sous la formation d'El Harrach.

L'aquifère de la Mitidja contient une nappe d'eau libre, sauf dans le bas Mazafran où elle est captive. Les transmissivités sont importantes, surtout dans la partie où il est en contact avec l'aquifère de l'Astien.

La nappe de la Mitidja est plus importante que celle de l'Astien de part l'épaisseur de son réservoir, les caractéristiques hydrodynamiques des formations le constituant et les apports qu'elle reçoit.

Presque la totalité des puits et des forages captent la nappe de la Mitidja et de ce fait depuis la fin de l'année 1970, la nappe a perdu son équilibre hydraulique, les débits sortants sont supérieurs aux débits entrants et les niveaux piézométriques baissent constamment.

Introduction :

Dans ce chapitre, on va tenter de donner un aperçu sur l'état de l'invasion marine dans cette région, en se basant sur trois principaux critères : hydrodynamique, hydrochimique et géophysique.

V-1- Exploitation de la nappe :

D'après l'inventaire effectuée par l'ANRH (direction régionale centre) en 1997 puis complétée en 2001/2002, le nombre de forages inventoriés a pratiquement triplé, puisqu'il a atteint 4193 ouvrages par rapport à l'inventaire de 1970 où le nombre des ouvrages hydrauliques était seulement de 1462.

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

Il faut signaler que le rabattement de la surface piézométrique n'est pas le seul responsable de la diminution des débits, le colmatage des crépines et le vieillissement des forages, sans réhabilitation depuis plus de 15 ans joue également un rôle important et parfois prépondérant dans cette diminution des débits (Tableau V-1).

Tableau V-1 : Tableau récapitulatif des points d'eau et des débits extraits réalisés en 1997 complétés en 2001/2002 dans la plaine de la Mitidja.

Usages	Nombre d'ouvrages inventoriés		Débits (m3/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	

Source : (ANRH,2002)

V-2- Historique de l'intrusion marine dans la baie d'Alger :

Le phénomène de l'intrusion marine dans la baie d'Alger remonte à la fin des années soixante dix (1978) où des études géophysiques ont montrées l'avancée du front salé de quelque mètre de la côte.

La nappe côtière de la baie d'Alger s'est révélée très vulnérable aux phénomènes d'invasion marine, la contamination de la nappe se produit d'avantage plus facilement le long des chenaux (embouchure de oued El Harrach et Hamiz, le Lido, Stamboul et le secteur de la verte rive) et des enclaves plus ou moins salées existant même loin à l'intérieur de la plaine.

De point de vue pratique, la réalité est amère et les constats sont édifiants : en 1992 l'intrusion marine s'est étalée jusqu'à plus de 1,5 km du littoral, progressant à l'intérieur des terres à une vitesse moyenne de 10 mètres par mois, causant ainsi d'irrémediables dommages à l'économie régionale.

La carte piézométrique du complexe alluvial établie en juillet 1992 par A.C.TOUBAL a montré que le biseau salé se localise surtout dans la région comprise entre Bordj-El-Kiffan et Stamboul où un abaissement important de la surface piézométrique, accompagné d'un changement du sens de l'écoulement souterrain. La longueur d'eau salée pourrait atteindre à la longue les champs de captages implantés à quelques kilomètres du littoral.

La carte au point de résidu sec établie à partir des données des analyses chimiques de l'inventaire octobre-novembre-décembre 1997 a montré que les concentrations les plus élevées correspondent aux points les plus proches du littoral, elles se localisent entre les régions comprises entre Stamboul-Bordj El Kiffan et Ain Taya-Surcouf-Dergana. Ces points présentent un faciès chimique surtout chloruré sodique confirmant ainsi l'invasion marine.

En janvier 2001, l'invasion marine a atteint les forages gérés par l'EPEAL sur une distance de plus de 2,5 km tout près de Lalla Dergana à Ouled Maàmar et à 2 km à partir de la côte à l'Est de Oued Réghaia. [13]

V-2- 1- Approche directe de l'invasion saline par la géophysique

V-2- 1- 1- La résistance transversale (Rt)

L'évolution du front salé peut être aisément suivie dans le temps, en établissant des cartes de Rt correspondant à des périodes différentes.

Toute modification de la position de la courbe limite de Rt (résistance transversale) enregistrée entre deux campagnes successives ne peut être imputée qu'à la seule variation de la conductivité électrique de l'aquifère et donc à un changement appréciable de la minéralisation des eaux, la résistance transversale correspondant à la limite d'exploitabilité de la nappe est dans ce cas particulier égale à $Rt_{min} = F \times S_w \times E$

F : facteur de formation

S_w : résistivité de l'eau

E : l'épaisseur de l'aquifère.

La carte de résistance transversale Rt établie en 1978 (Figure V-1), n'indique encore aucune restriction majeure quant aux modalités d'exploitation de la nappe, si ce n'est au niveau d'Alger-plage ou une courbe à 1000 $\Omega.m^2$ entoure un secteur particulièrement vulnérable.

La carte de Rt relative à l'année 1992 (Figure V-2) semble par contre plaider pour une nette progression du front salé vers l'intérieur de la plaine. On remarquera, en effet, l'apparition des courbes à 500 et 1000 $\Omega.m^2$ dans le secteur de Stamboul - verte rive - bateau cassé et l'existence probable de nombreuses poches salines isolées.

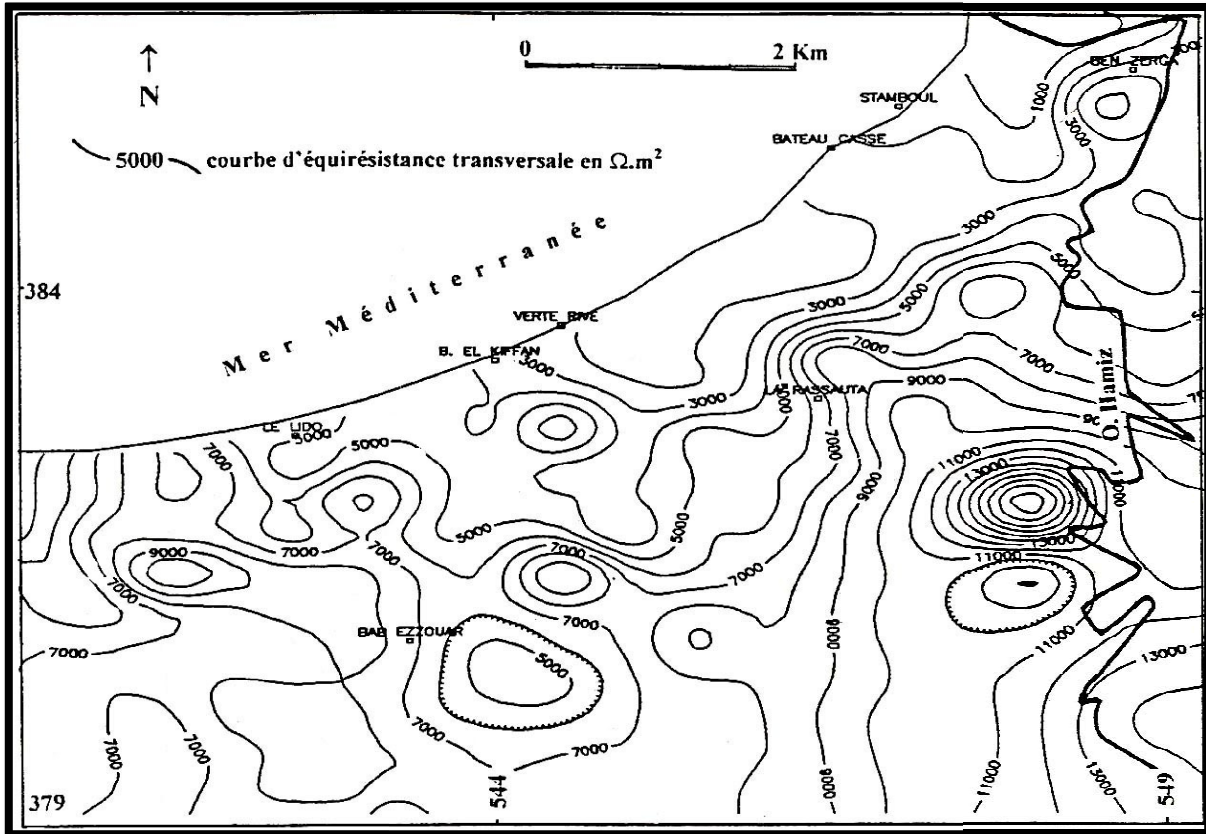


Figure V-1 : Carte des résistances transversales (Toubal, 1978)
($e=1/50.000$)

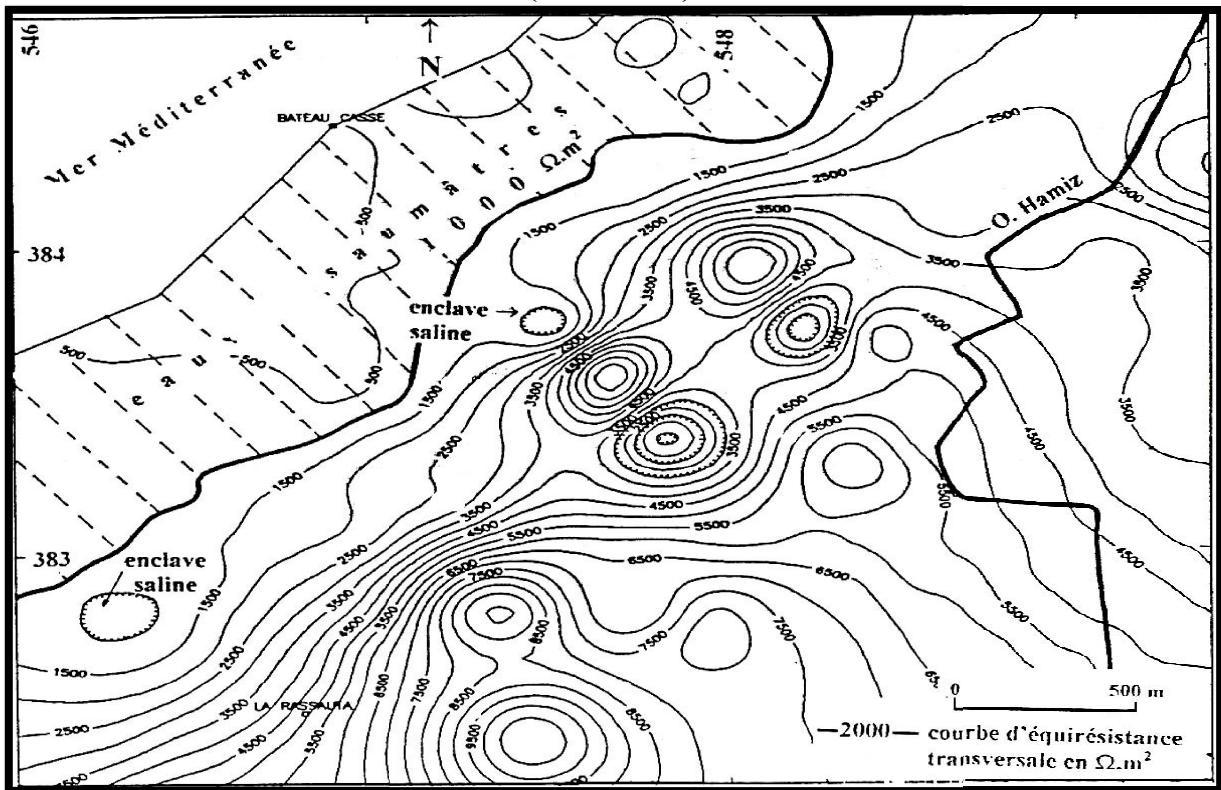


Figure V-2 : Carte des résistances transversales (Toubal, 1992)
($e=1/50.000$)

V-2- 1- 2- Les coupes géoélectriques interprétatives

Les coupes géologiques, exécutés en 1978 puis en 1992 (Figure V-3), ont permis de représenter sur les mêmes coupes, l'évolution dans le temps de l'invasion saline. Les différences relevées entre les deux campagnes sont manifestement dues à une augmentation de la minéralisation des eaux souterraines suite à une intrusion marine. La comparaison des courbes exécutées au même endroit mais à des périodes différentes, atteste dans ce sens de modifications significatives.[17]

- En résumé (entre 1978 et 1992)

- Au niveau de la zone de Stamboul, l'intrusion marine est passée de 600 m à environ 1000 m de la côte.
- A bateau cassé, l'interface eau douce/ eau salée est passée de 400 m à 900 de la mer.
- A verte rive, de 800 à 900 m.

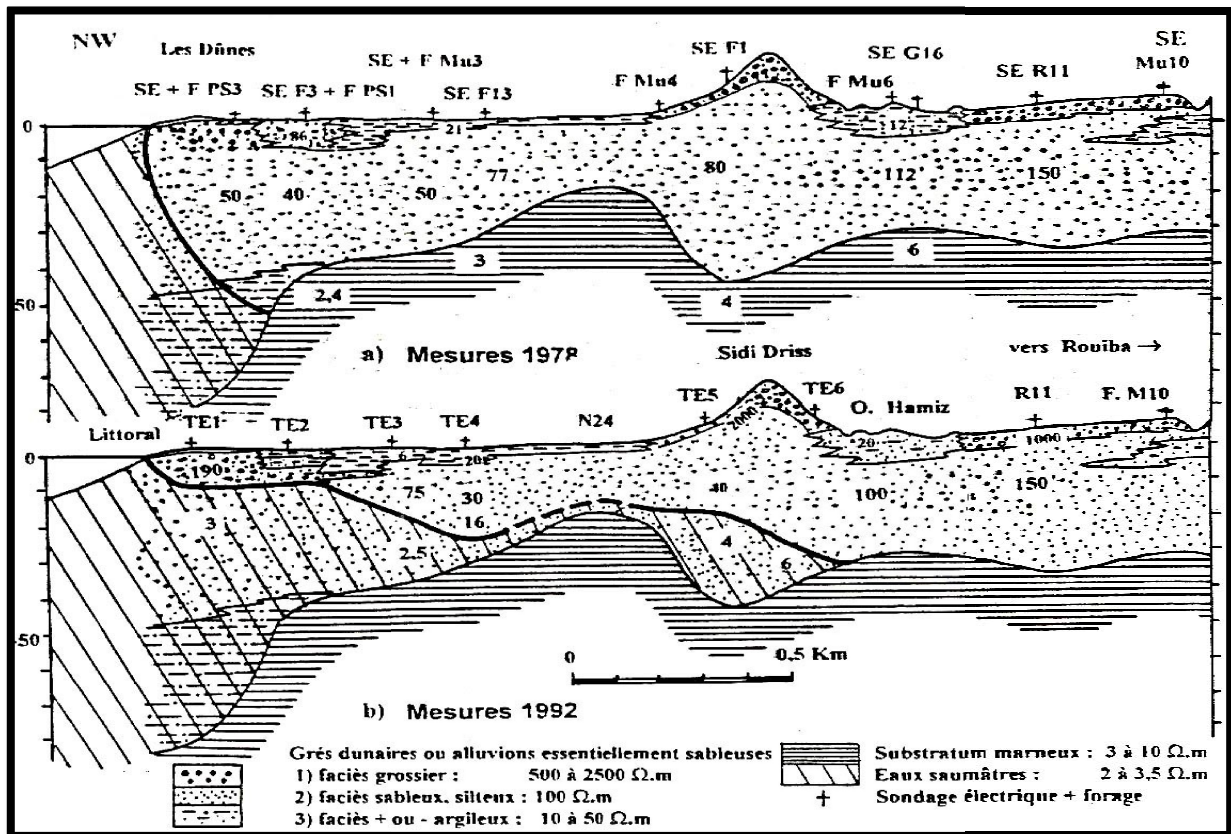


Figure V-3 : Coupe géoélectrique interprétatives avec comparaison entre les année 1978 et 1992.[17]

V-2-2- Approche directe par la piézométrie

La piézométrie est un élément fondamental dans l'analyse de la vulnérabilité d'une nappe et son suivi dans le temps peut nous donner une preuve visible de l'évolution de l'interface eau douce/eau salée dans le continent.

Il est élémentaire pour un hydrogéologue que dans les conditions naturelles l'écoulement des eaux souterraines se fait du continent vers la mer.

A cet effet, la carte piézométrique du complexe alluvial de la Mitidja orientale de la campagne de novembre 1983, nous montrons un écoulement naturel, qui se fait du continent vers la mer, et ce au niveau de toute la baie d'Alger. Au niveau de Benzerga, nous notons un cône de dépression, qui est du à un pompage intensif au niveau des forages du champ de captage de cette zone (figure V-4), sans pour autant inverser le sens d'écoulement connu.

Cette carte nous montre des niveaux piézométriques au-dessous du niveau de la mer (- 2 m et - 1 m) dans la région sud de Stamboul et jusqu'à - 7 m à l'Est du Lido. Cette baisse est due au pompage intensif au niveau des champs de captage d'AEP et autres forages (agricultures, industries).

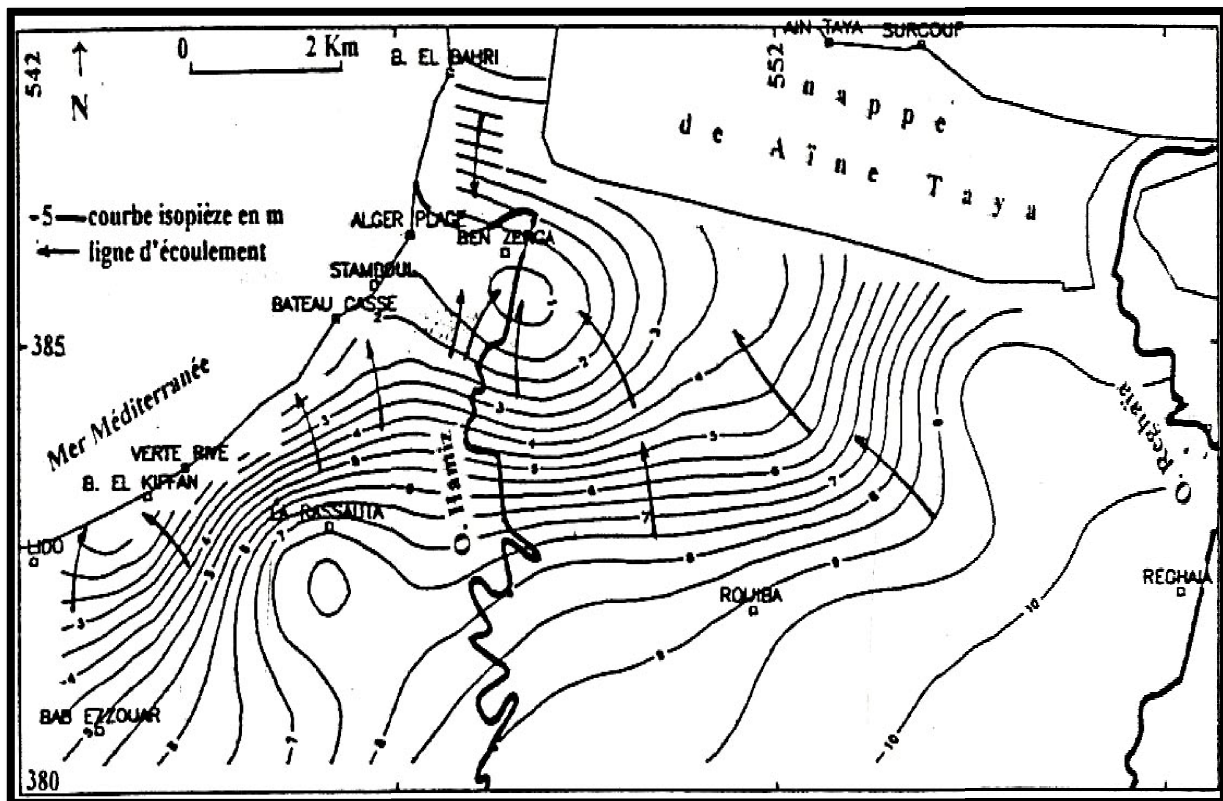


Figure V-4 : Carte piézométrique de la baie d'Alger (Toubal, 1983)

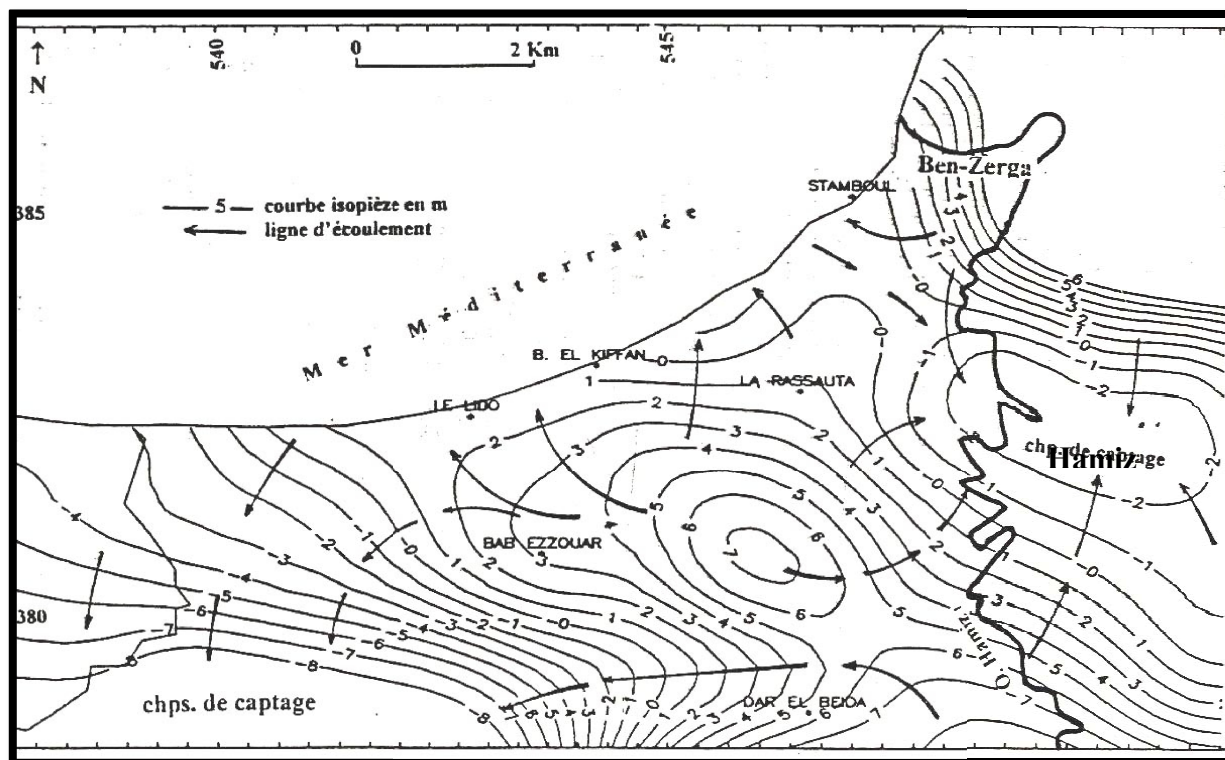


Figure V-5 : Carte piézométrique de la baie d'Alger (Toubal,1992)

La carte piézométrique de 1992, montre un changement de la configuration piézométrique (figure V-5). En certains endroits, comme l'Est du Lido ou près de Stamboul, l'écoulement se fait de la mer vers le continent, ce qui est une preuve irréfutable d'une invasion saline. Nous notons dans le champ de captage du Hamiz un grand cône de dépression qui attire les eaux de mer. Ce qui est alarmant c'est que ce champ est situé à environ 3000 m de la cote.

V-2- 3- Approche indirecte par la Chimie:

V-2- 3-1- Faciès chimique

Les eaux salées de la mer ont un faciès chloruré sodique, alors que les eaux de la Mitidja sont reconnues pour être bicarbonatées calciques.

Déjà en 1983, l'eau de la nappe côtière à l'Est d'Alger, étaient chlorurées calciques et parfois chlorurées sodiques (65 % des puits étaient à faciès chloruré calcique et 35 % à faciès chloruré sodique). Il a été constaté même, un déplacement des eaux chlorurées calcique vers le pôle sodique, ce qui marque le phénomène de l'invasion des eaux de la mer vers l'intérieur de la plaine de la Mitidja.[17]

V-2-3-2- Résidu-Sec

En 1983, le résidu-sec variait entre 800 et 6800 mg/l (Figure V-6).

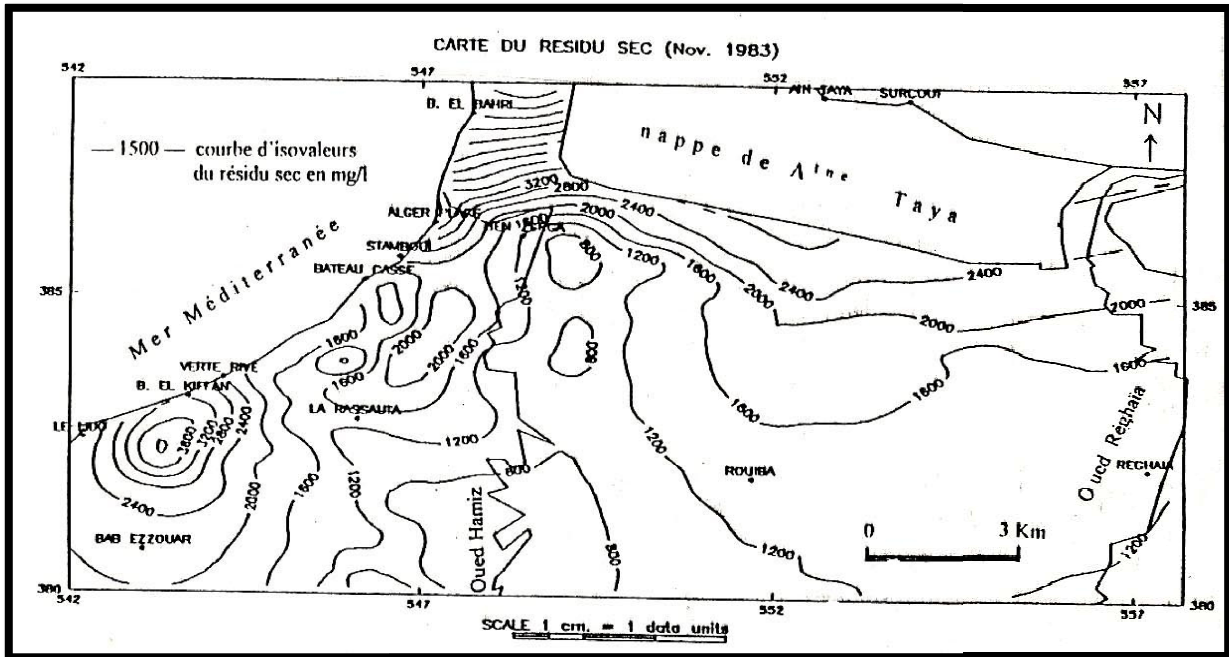


Figure V-6 : Carte des résidus secs (Toubal, novembre 1983)

En 1992, les cartes indiquent une nette augmentation de la salinité des eaux à l'ouest de l'embouchure de l'oued Hamiz, plus précisément dans le secteur compris entre Bordj El Bahri, Benzerga et Bateau cassé ou le résidu-sec atteint le chiffre record de 1500 mg/l (Figure V-7).

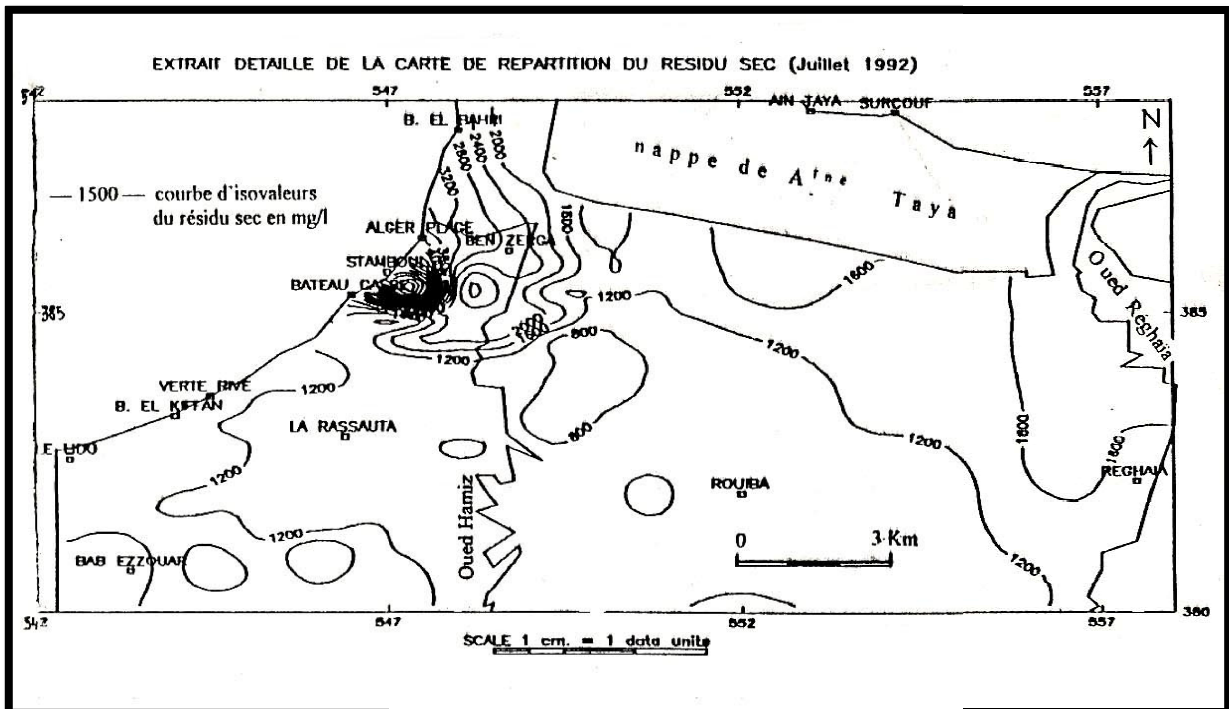


Figure V-7 : Carte de répartition du résidu sec (Toubal, Juillet 1992)

V-3- Inventaire des points d'eau dans la baie d'Alger :

Pour suivre l'évolution du niveau piézométrique dans la baie d'Alger, l'Agence Nationale des Ressources Hydriques (ANRH) et dans le cadre de son plan d'action a établi un réseau de surveillance où pas moins de 23 piézomètres ont été installés dans le but de :

- Mesurer le niveau piézométrique pour établir des cartes piézométriques ;
- Echantillonnage d'eau au niveau de chaque point.

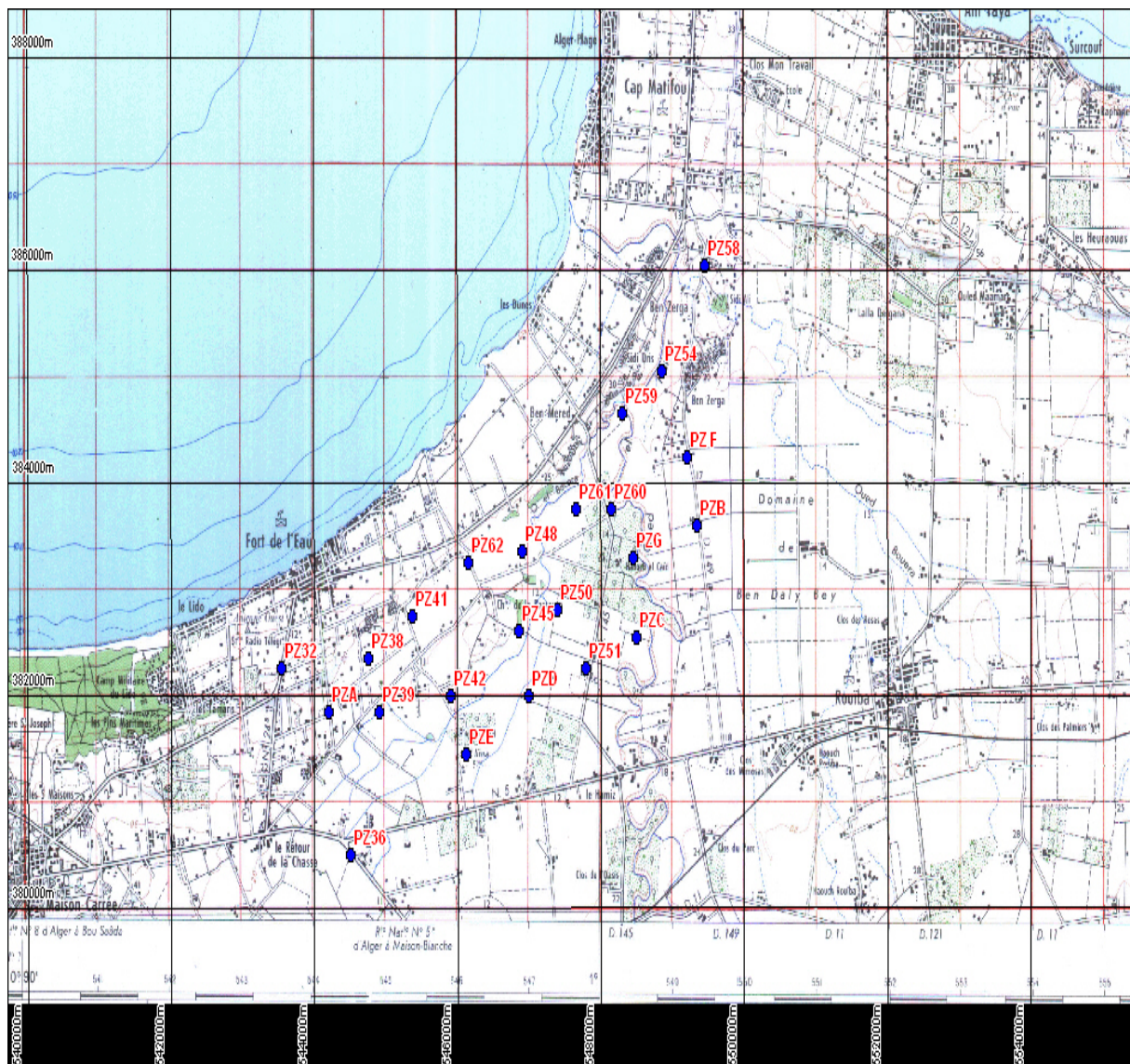


Figure V-8 : Carte de situation des piézomètres de contrôle dans la baie d'Alger

V-4- Approche de l'intrusion marine :

Trois approches sont utilisées pour estimer la localisation de l'interface eau douce/eau salée (ou le biseau salé) au niveau de la nappe côtière de la baie d'Alger :

- approche géophysique
- approche hydrodynamique
- approche hydrochimique.

V-4-1- Approche géophysique :

V-4-1-1- Interprétation de la carte des résistances transversales :

La résistance transversale (RT) est le produit de l'épaisseur par la résistivité d'une formation.

L'examen de la carte des résistances transversales (Figure V-9) permet de mettre en évidence deux zones bien distinctes :

- Une plage forte, située à un kilomètre du littoral, de $RT = 8000 / 2 \text{ m}^2$ due à une augmentation de l'épaisseur de l'aquifère.
- Une zone faible, de $RT = 400/3 \text{ m}^2$, le long du littoral, traduisant ainsi une diminution de l'épaisseur de l'aquifère (remontée du substratum) et une intrusion marine.

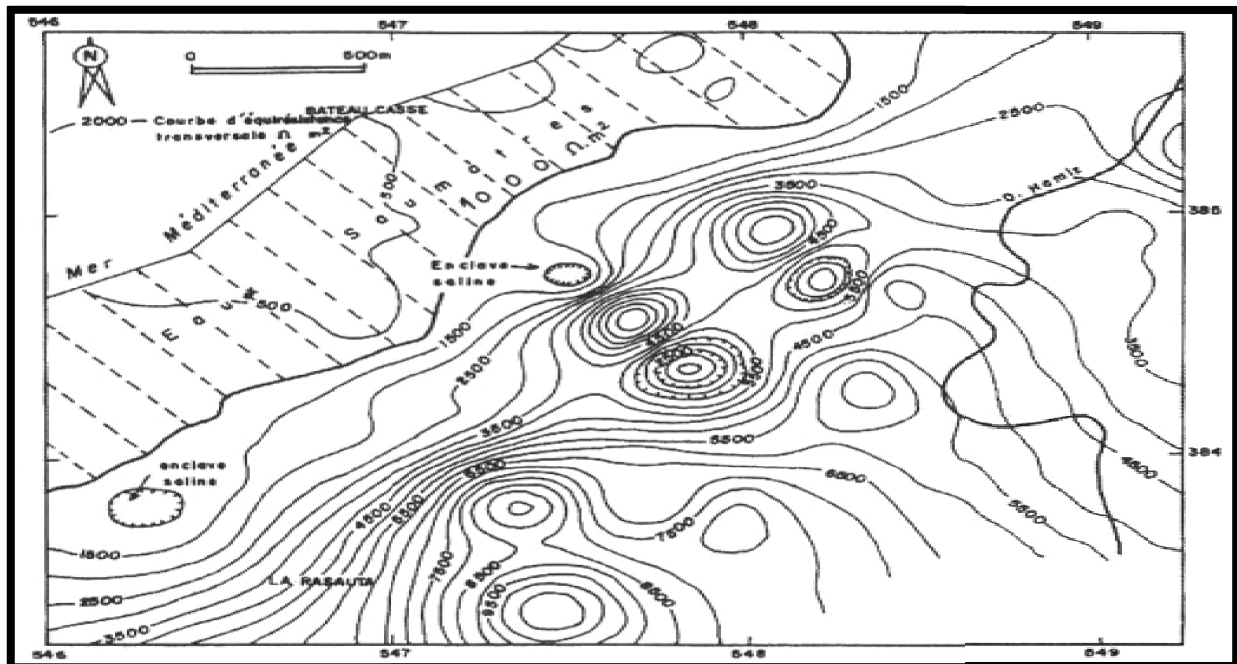


Figure V-9 Carte de résistivité transversale de la baie d'Alger (Toubal,1998)

V-4-1-2- interprétation de la carte d'interface eau douce/eau salée d'après la campagne géophysique réalisée en 2002 :

L'ANRH a dressé en 2002 une carte d'interface eau douce/eau salée à partir de la prospection géophysique réalisée dans la même année (Figure V-10).

À partir de cette carte, on a déduit que l'interface / eau douce eau salée se situe à une distance de la côte qui varie entre 1 km au niveau de la localité de « Stamboul », 1,5 km au niveau du « Bateau Cassé » et 850 m du coté de «la Verte Rive ».

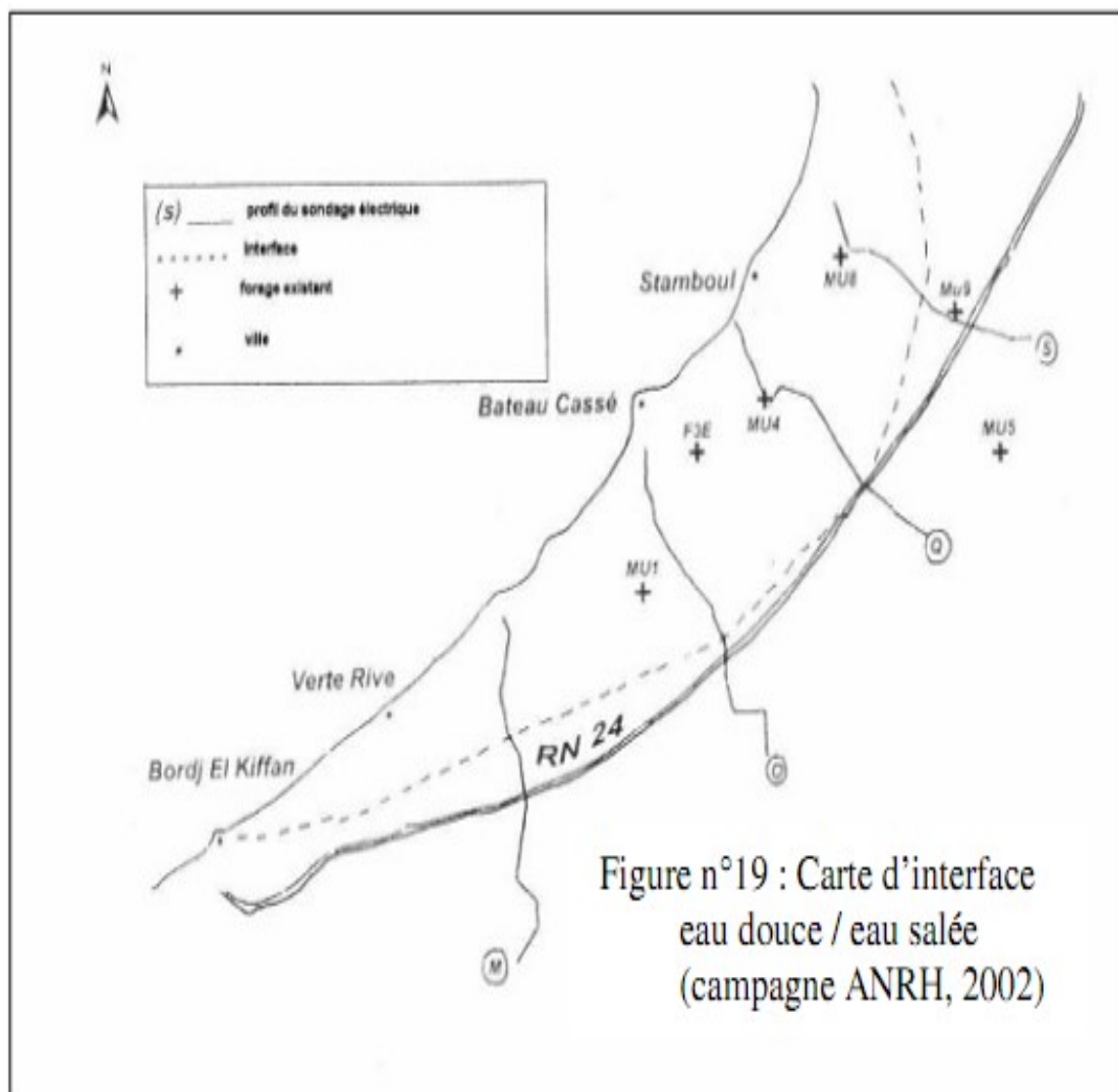


Figure V-10 : Carte d'interface eau douce\eau salée campagne ANRH,2002

V-4-2- Approche hydrodynamique :

L'intrusion marine peut être aussi reconnue hydrodynamiquement, en élaborant et interprétant des cartes piézométriques.

V-4-2-1- Élaborations des cartes piézométriques :

À partir des données des campagnes piézométriques récentes au niveau de la baie d'Alger, fournies par l'ANRH (annexe), on a pu calculé les niveaux piézométriques par rapport au niveau de la mer (les côtes absolues) pour les 23 piézomètres existant dans la région (Tableau V-1).

Les figures (V-11, V-12, V-13 , V-14, V-15, V-16) représentent les cartes piézométriques des dix dernières années.

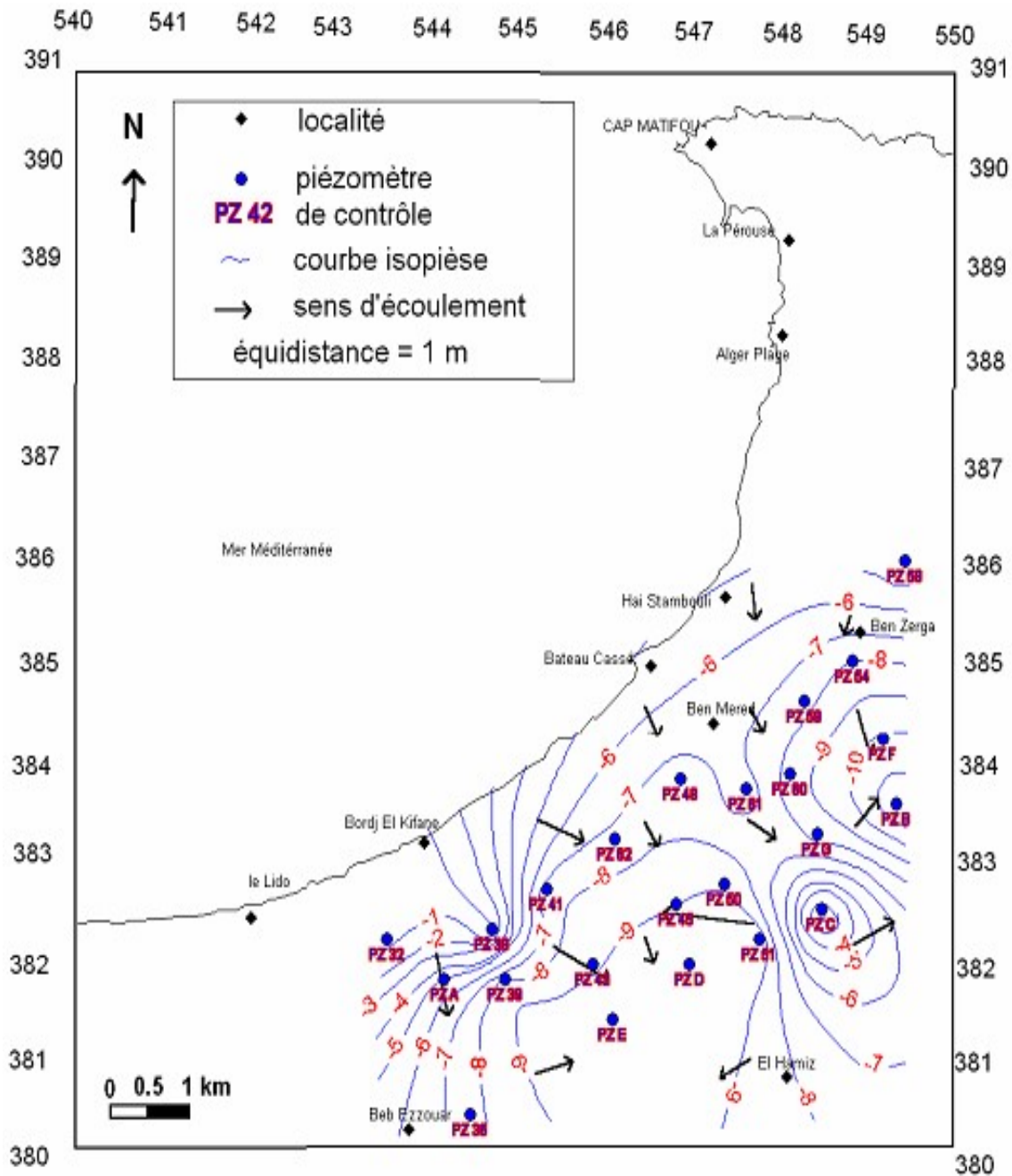


Figure V-11 : Carte piézométrique(Toubal ,Novembre 2002)

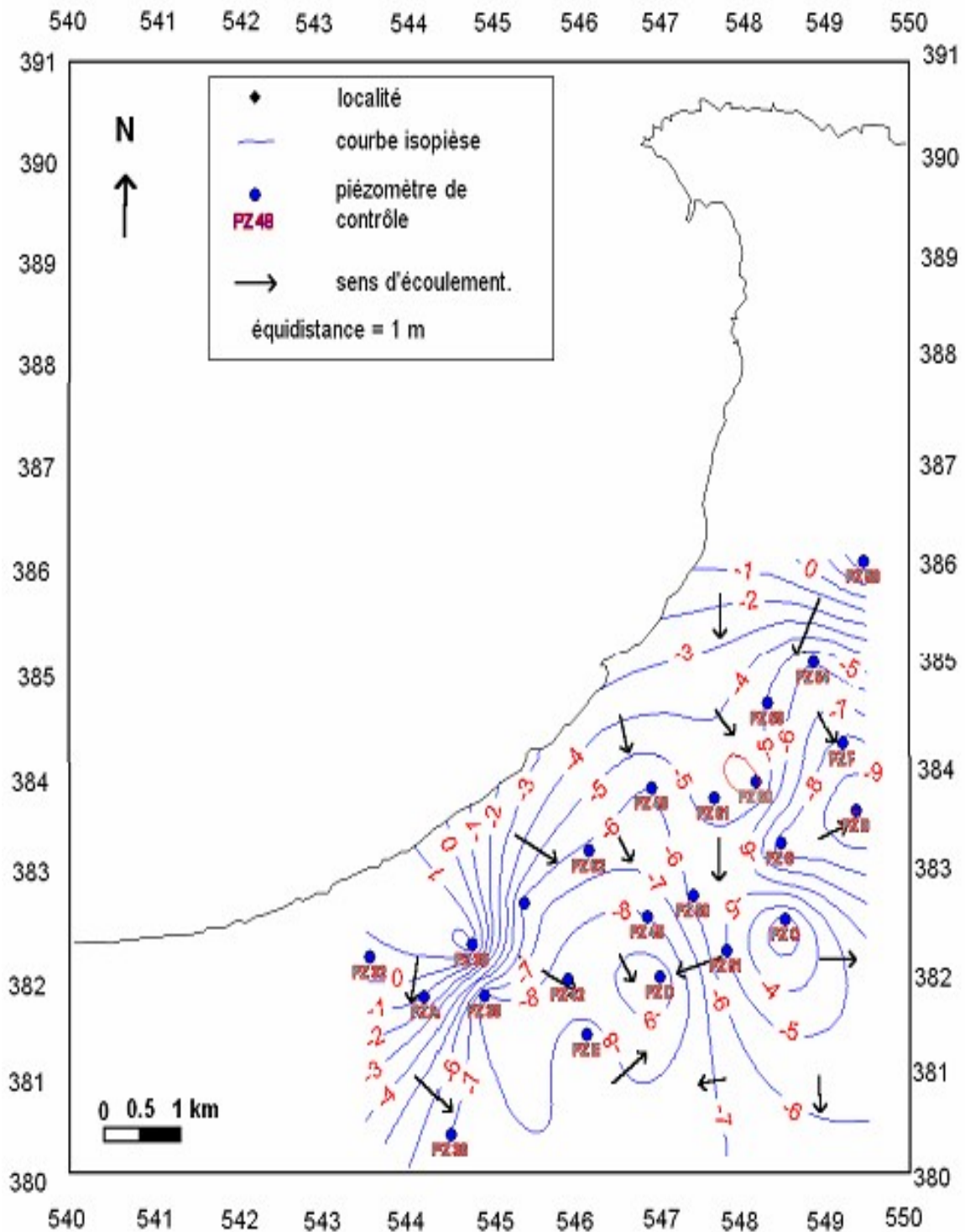


Figure V-12 : Carte piézométrique des hautes eaux (Toubal ,Avril 2005)

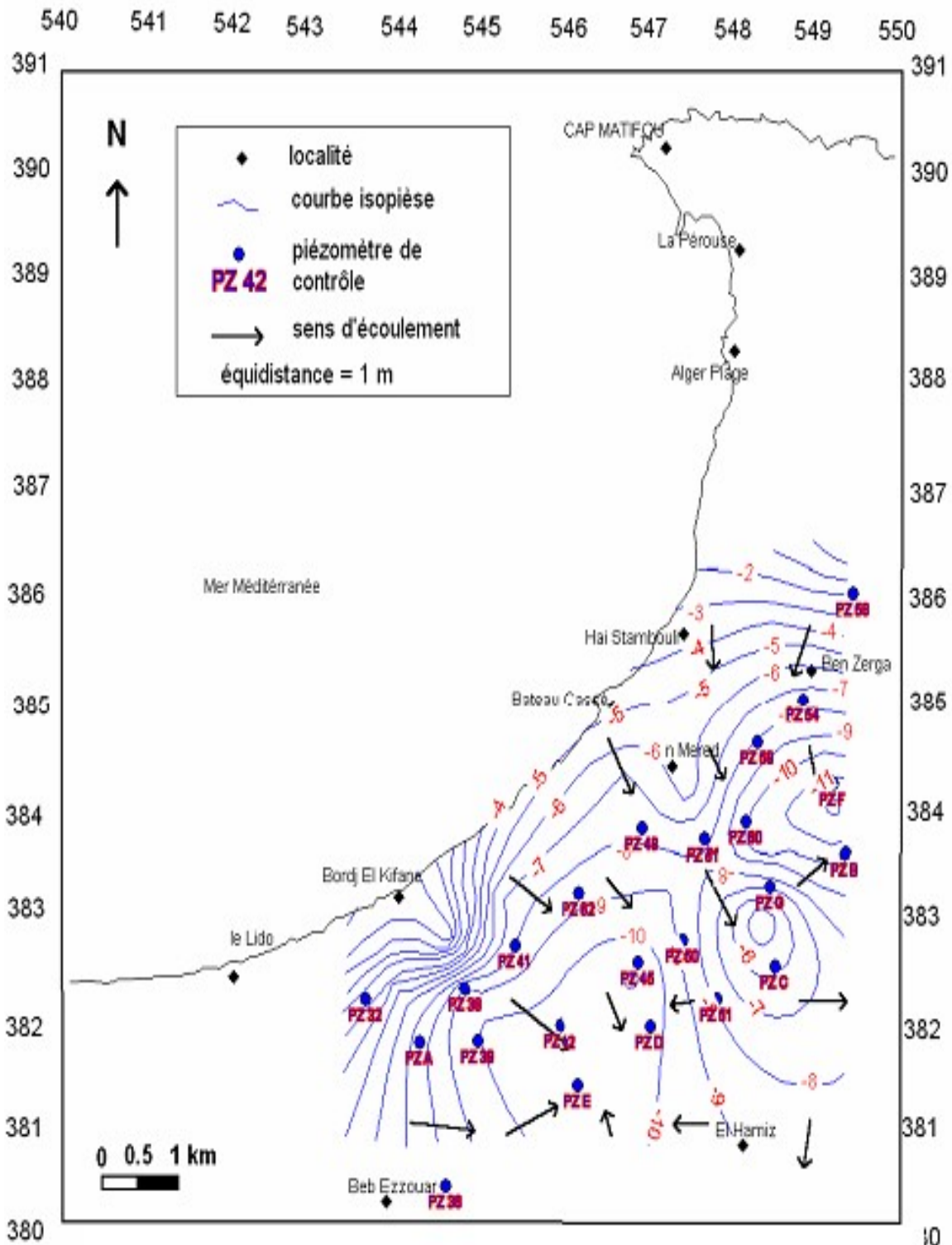


Figure V-13 : Carte piézométrique des basses eaux (Toubal ,Septembre 2005)

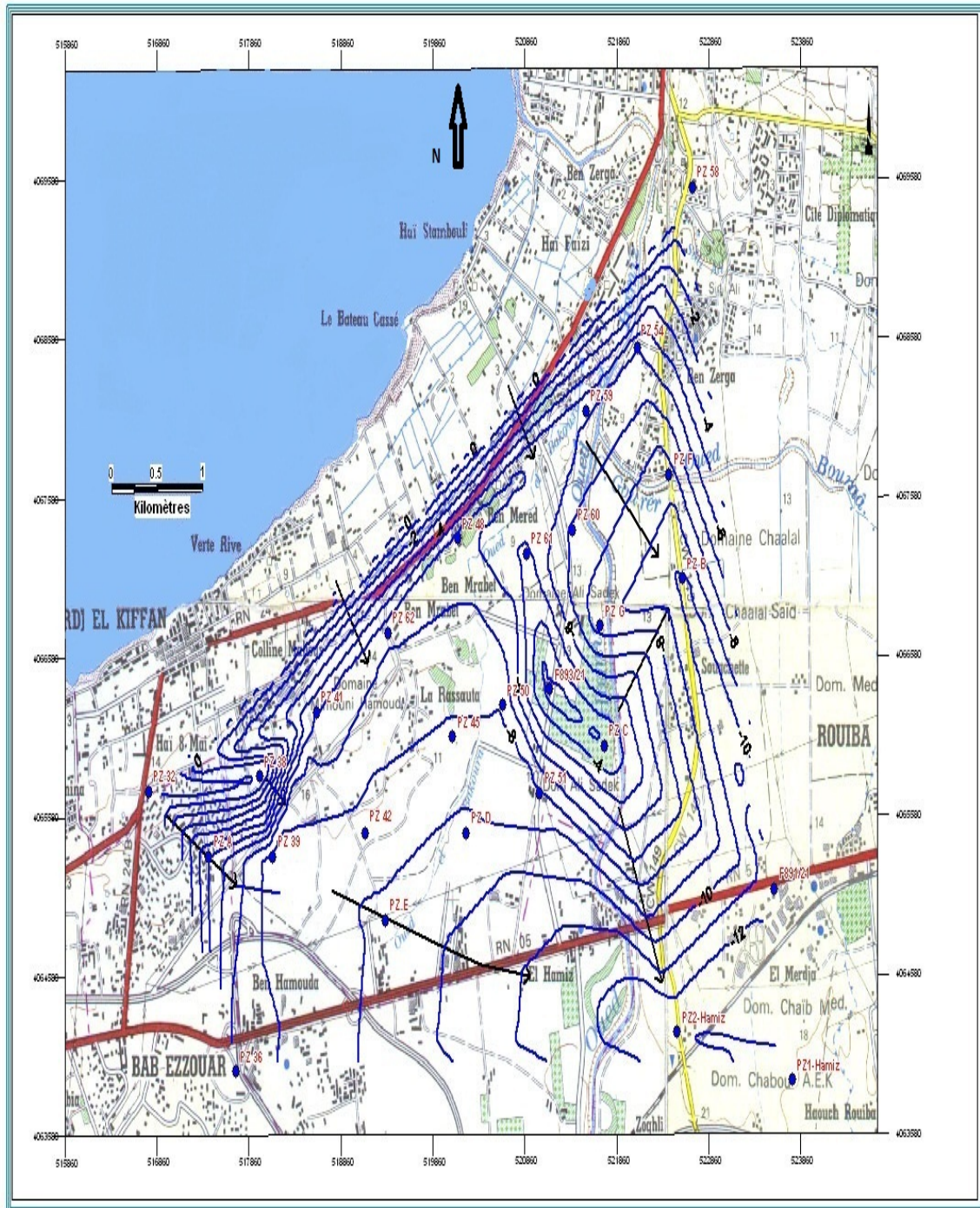


Figure V-14 : Carte piézométrique des hautes eaux (ANRH, avril 2008)

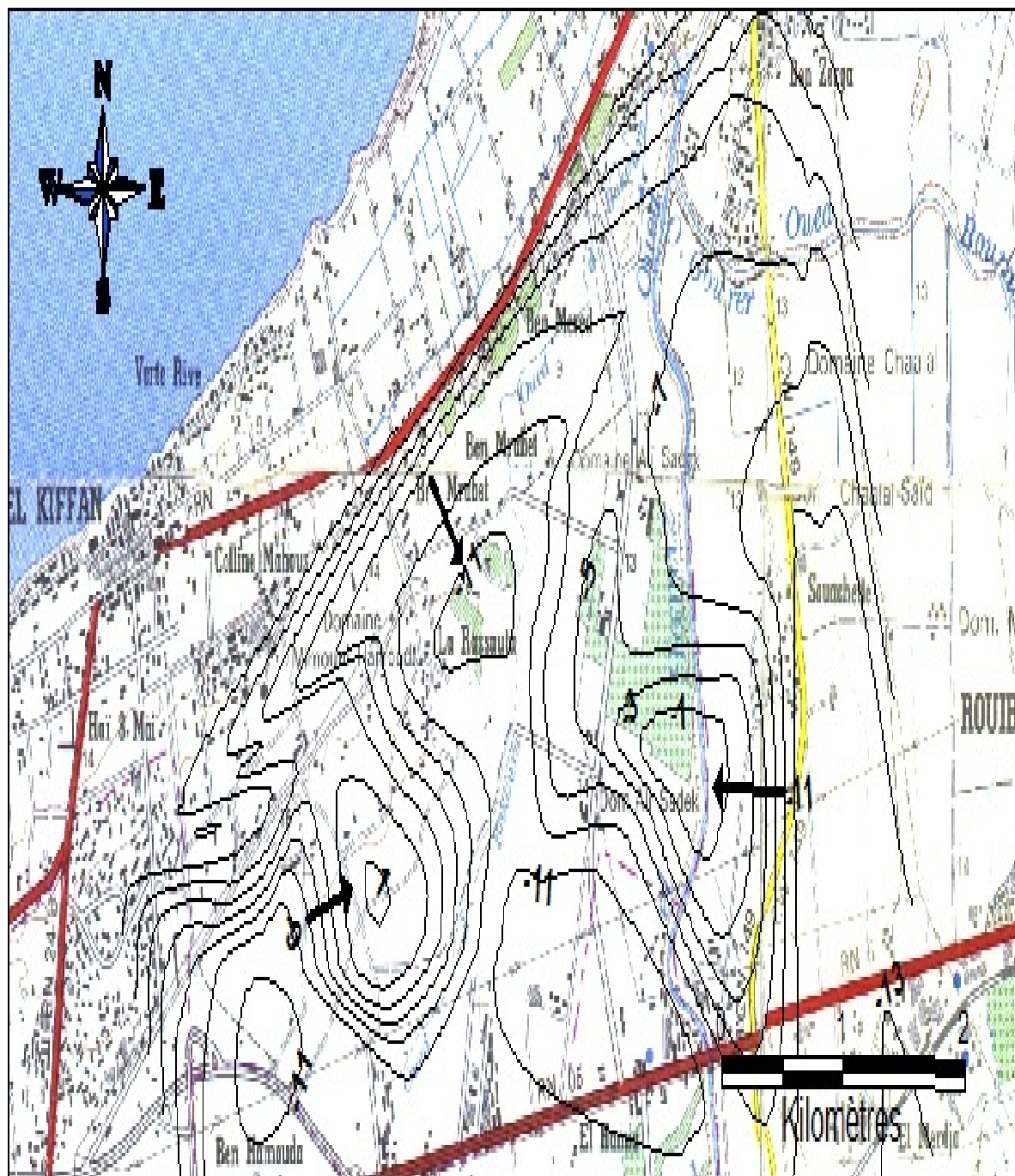


Figure V-16 : carte piézométrique (avril 2010)

V-4-2-2- Interprétation des cartes piézométriques :

- Cartes piézométriques : (novembre 2002, avril 2005, septembre 2005, avril 2008 , septembre 2008 et avril 2010) :

➤ **Les cartes piézométrique (avril 2005 - septembre 2005) (figure V-12 ;V-13):**

Les cartes piézométrique, nous montrons un écoulement qui se fait de la mer vers la plaine, un dôme piézométrique au Sud-est situé entre El Hamiz et Benzerga due au pompage intensif des champs captant (Bouriah et Hamiz).

➤ **La carte piézométrique des hautes eaux (avril 2008) (figure V-14) :**

La carte piézométrique d'avril 2008 montre que la situation s'est empirée puisque au niveau du champ de captage du Hamiz, le niveau piézométrique a atteint une cote de - 12 m au-dessous du niveau de la mer. Et l'écoulement se fait toujours de la mer vers la nappe ce qui fait l'intrusion continue de façon accélérée.

➤ **La carte piézométrique des basses eaux (septembre 2008) (figure V-15) :**

Cette carte indique que la situation s'est encore légèrement empirée puisque les niveaux piézométriques ont atteint - 14 m au-dessous de la mer ce qui est vraiment alarmant et nous impose normalement de ne plus réaliser de forage dans la région même à titre de remplacement. Et qu'il est urgent de commencer la lutte contre cette intrusion par la recharge artificielle.

➤ **La carte piézométrique (avril 2010) (figure V-16) :**

La carte piézométrique de Avril 2010 montre un écoulement qui se fait de la mer vers la plaine, Un dôme piézométrique au Sud-est situé entre El Hamiz et Benzerga due au pompage intensif des champs captant (Bouriah et Hamiz).

Il ressort de l'examen de ces cartes (Figures V-11 ; V-12, V-13, V-14, V-15, V-16) les faits suivants :

- Au Sud-Est, il y a une zone de dépression. Ceci est dû à l'influence du champ de captage de Hamiz et la surexploitation dans cette zone.
- Le cordon dunaire et le léger relèvement du substratum semblent freiner l'extension de l'invasion marine à l'Ouest, jouant ainsi le rôle de barrière hydraulique.

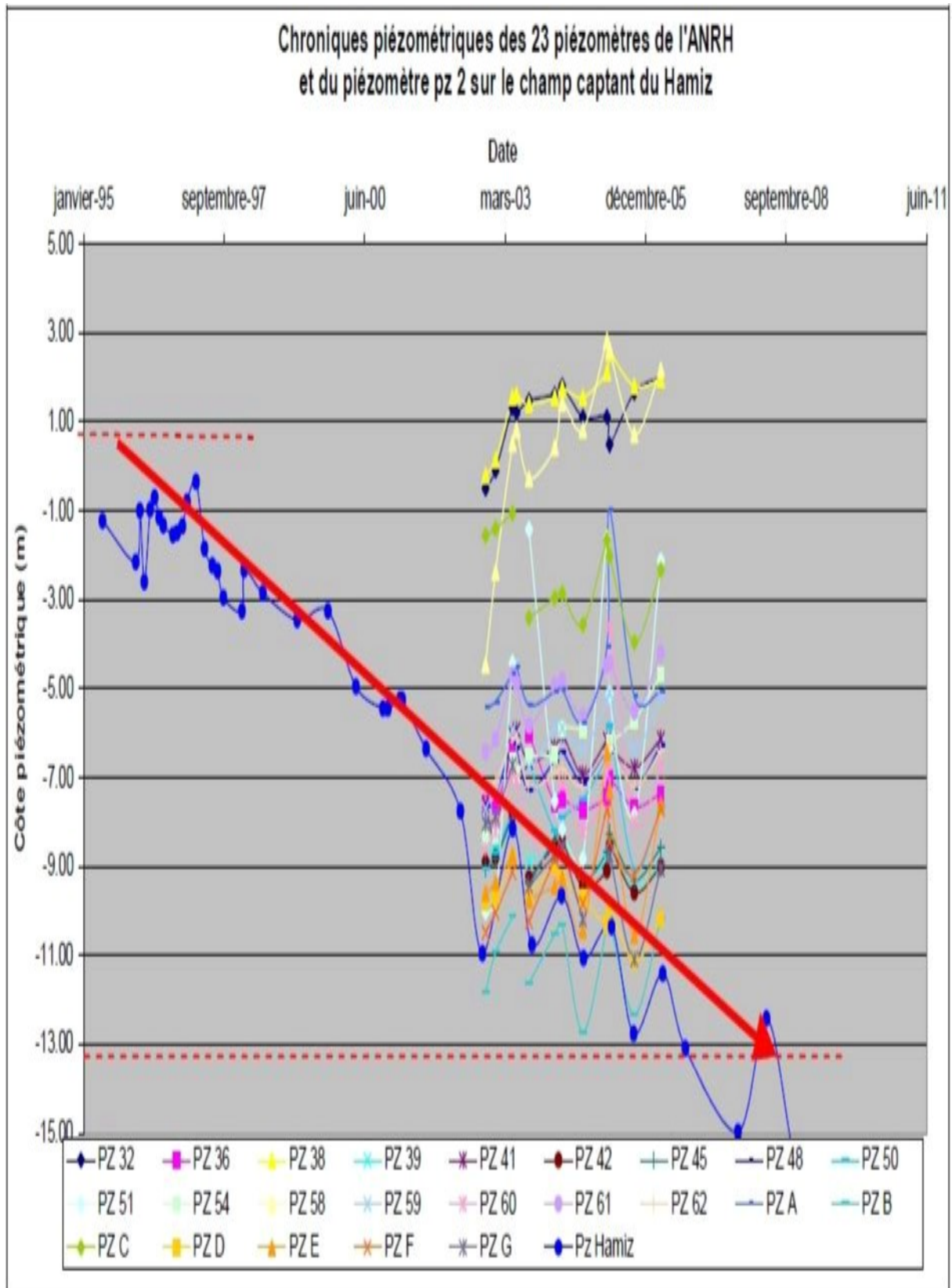
- Un écoulement se faisant de la mer vers la plaine du fait que les côtes piézométriques sont inférieures au niveau de la mer et décroissent en allant de la mer vers l'intérieur de la baie d'Alger. Pratiquement toute la zone étudiée est envahie par les eaux salées.

D'après l'ANRH l'examen des données existantes concernant les niveaux d'eau permet de préciser l'ampleur de la baisse piézométrique de la nappe de la Mitidja. Dans le secteur de la Baie d'Alger, les niveaux d'eau ont baissé d'environ 20m en 30 ans.

Aujourd'hui, une dépression piézométrique semble être centrée sur le secteur du Hamiz, avec un niveau de -15m, là où le niveau piézométrique se situait à 10m au-dessus du niveau de la mer il y a 30 ans.

La figure V-17 montrent que l'intrusion marine continue son avancée de façon inquiétante, la bordure nord occidentale du champ captant du Hamiz serait ainsi très rapidement impacter par l'intrusion marine.

La côte piézométrique, au niveau du champ captant du Hamiz, pourrait atteindre -17m soit 5m sous le niveau piézométrique de janvier 2010.

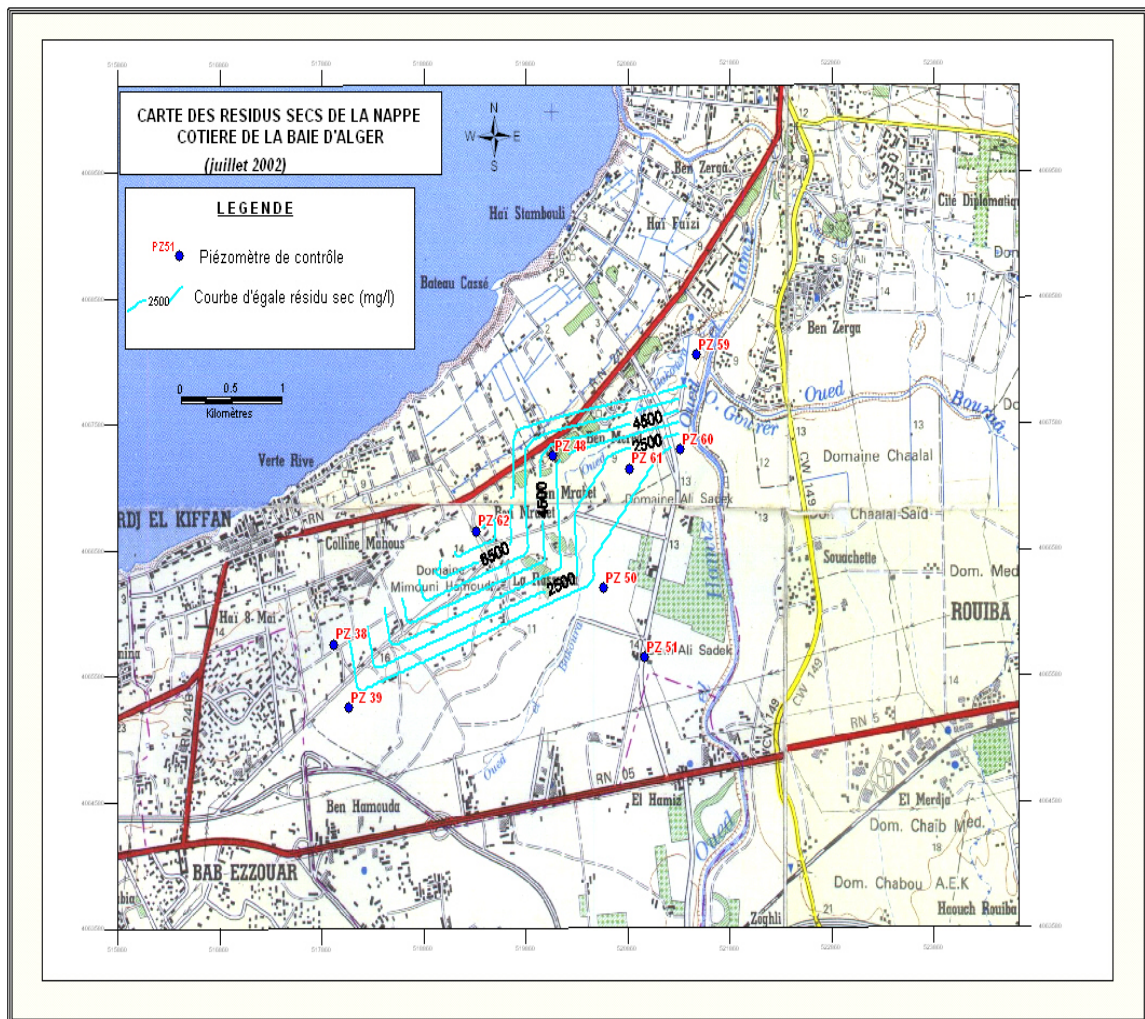


**Figure V-17: Chronique piézométrique des 23 piézomètres de l'ANRH et du pz 2
Sur le champs captant du Hamiz**

V-4-3- Approche hydrochimique :

V-4-3-1-Interprétation des cartes de Résidu sec, conductivité électrique :

En juillet 2002, la salinité a nettement augmenté (Figure V-18) puisque dans la zone de « La Rassauta » elle variait de 2500 à 4500 mg/l alors qu'en 1992(figure V-7) elle était de 1200 mg/l au maximum. Dans la région de Ben Mered la salinité a quadruplé (de 1600 à 6500 mg/l).



Source : ANRH

Figure V-18 : Carte des résidus secs se la nappe côtière de la baie d'Alger (Juillet 2002)

En mai 2006, Du côté des champs de captage de Boureah et du Hamiz les courbes se resserrent et le résidu sec a atteint 2578mg/l ; la langue d'eau salée a progressé à l'intérieur de la terre et menace les deux champs de captage cités précédemment (Figure V-19) en corrélation avec une conductivité électrique élevée (Figure V-20) respectivement au Nord Est du côté de Benzerga, le champ de captage de Boureah et sur toute la zone comprise entre Bordj El Kiffan et Bordj El Bahri.

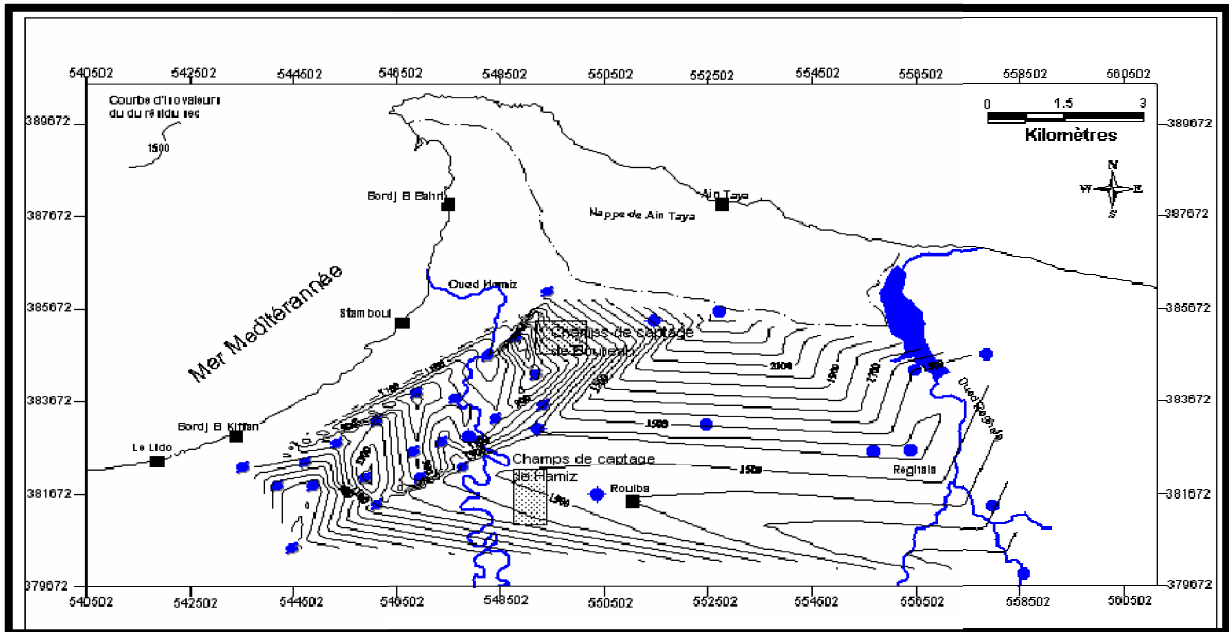


Figure V-19 : Carte de répartition du résidu sec (Touba, mai 2006)

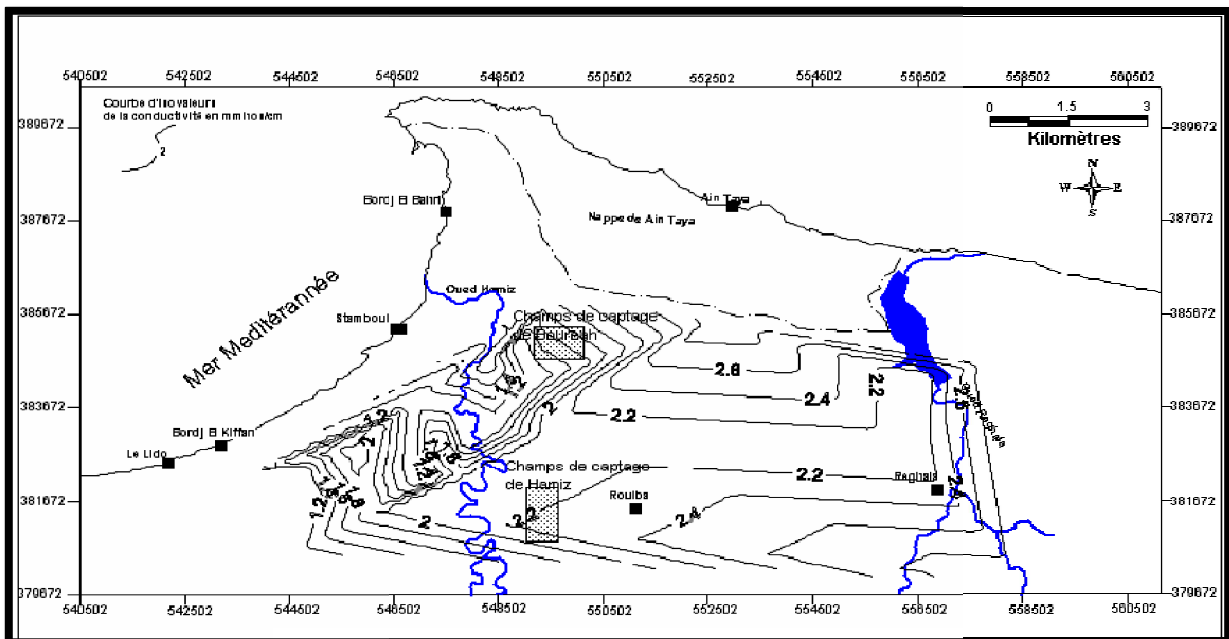
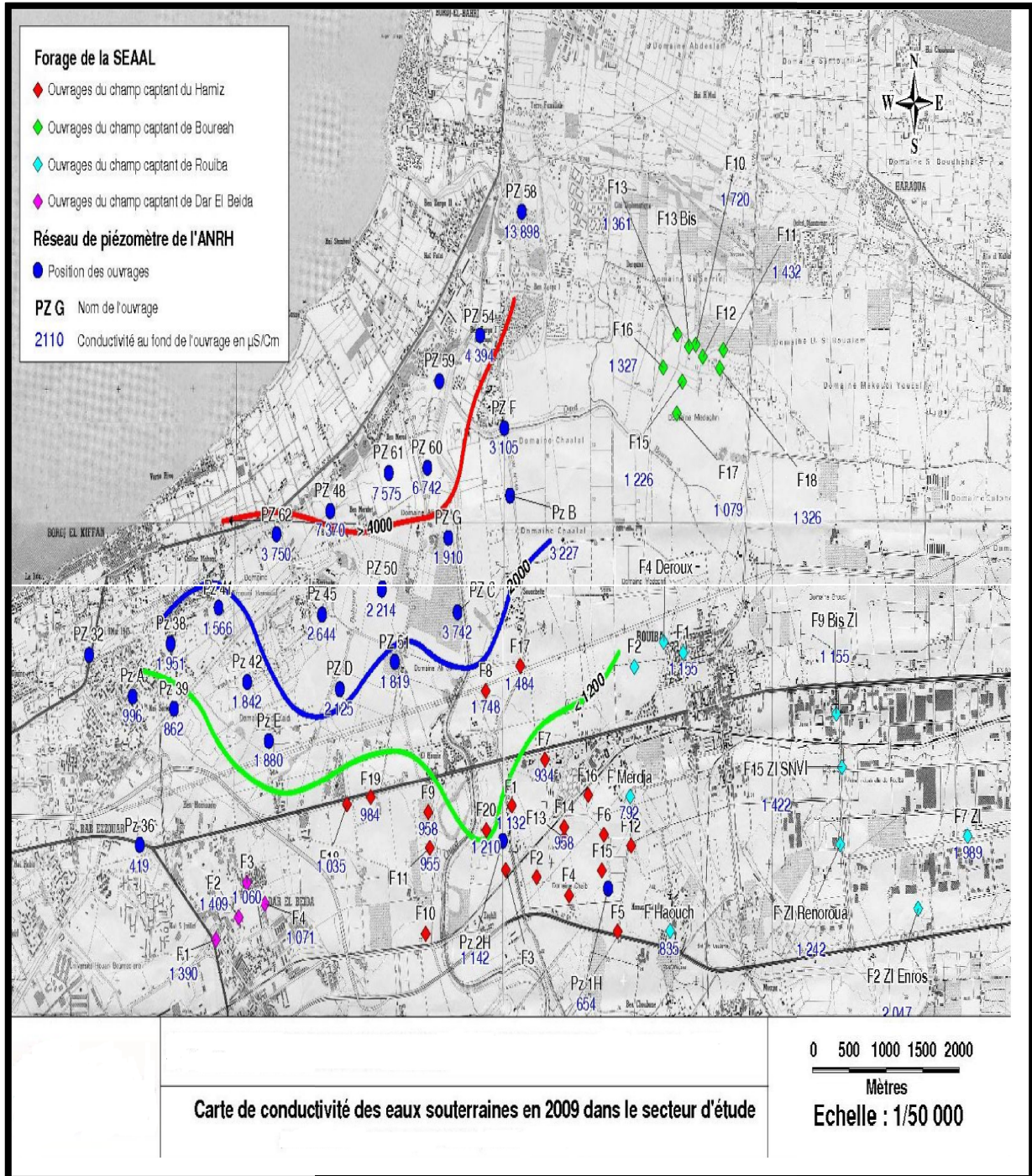


Figure V-20 : Carte de répartition de la conductivité électrolytique (Touba, mai 2006)

Interprétation de La carte de conductivité des eaux souterraines 2009 (ANRH Alger) (figure V-21), la carte montre que les teneurs en sel sont très importantes, notamment dans le nord du champ captant (concentration en sel très supérieure à 10g/L dans certains forages).

L'extension maximale de l'intrusion marine s'étend sur près de 6km vers le champ captant du Hamiz.



Source ANRH Alger

Figure V-21 : Carte de conductivité des eaux souterraines 2009

V-4-3-2- Interprétation des Cartes d'isoteneurs en Chlore et en Sodium :

En inspectant les figures V-22 et V-23, on remarque que :

- 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.
- la variation des teneurs en Cl^- et Na^+ va en s'accroissant du Sud au Nord.
- Ces deux cartes montrent une nette contamination de presque la totalité des piézomètres de surveillances de la nappe alluviale installés par l'ANRH.

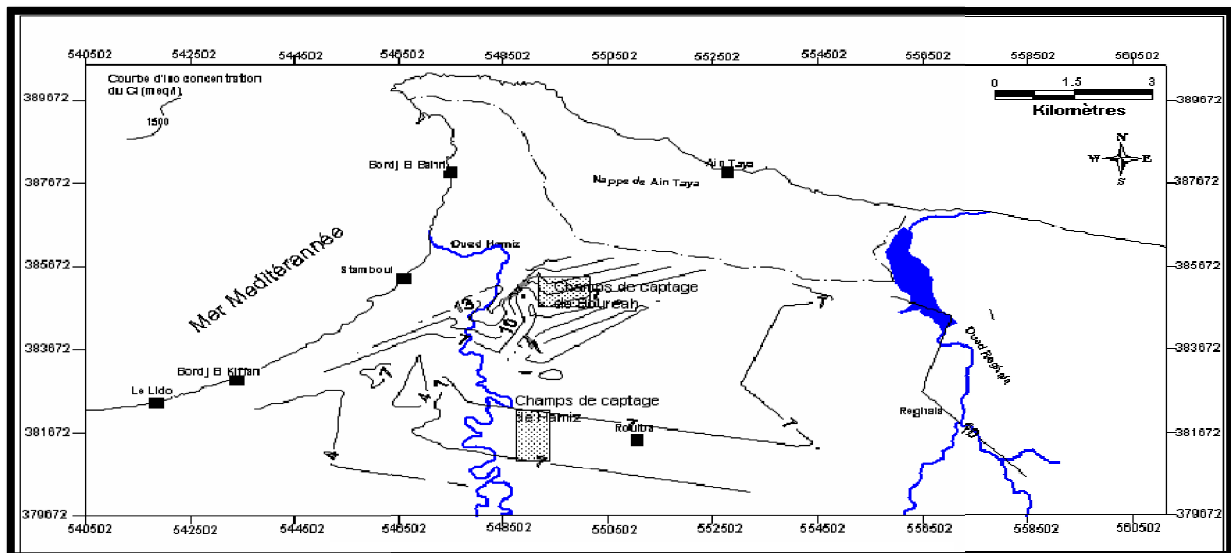


Figure V-22 : Carte d'iso concentration de Cl (Toubal ,mai 2006)

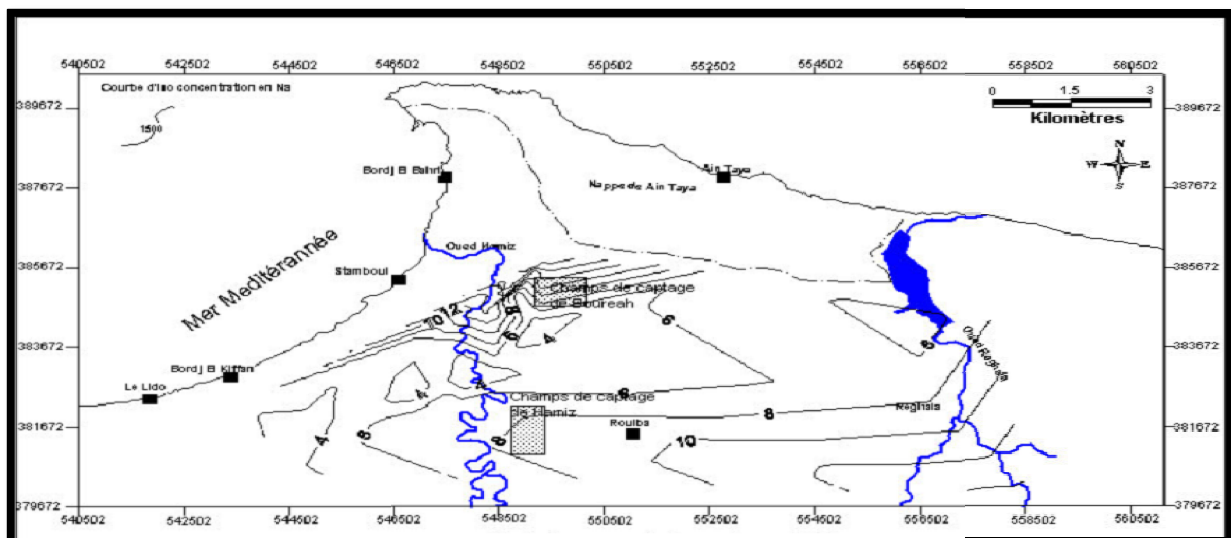


Figure V-23 : Carte d'iso concentration de Na (Toubal ,mai 2006)

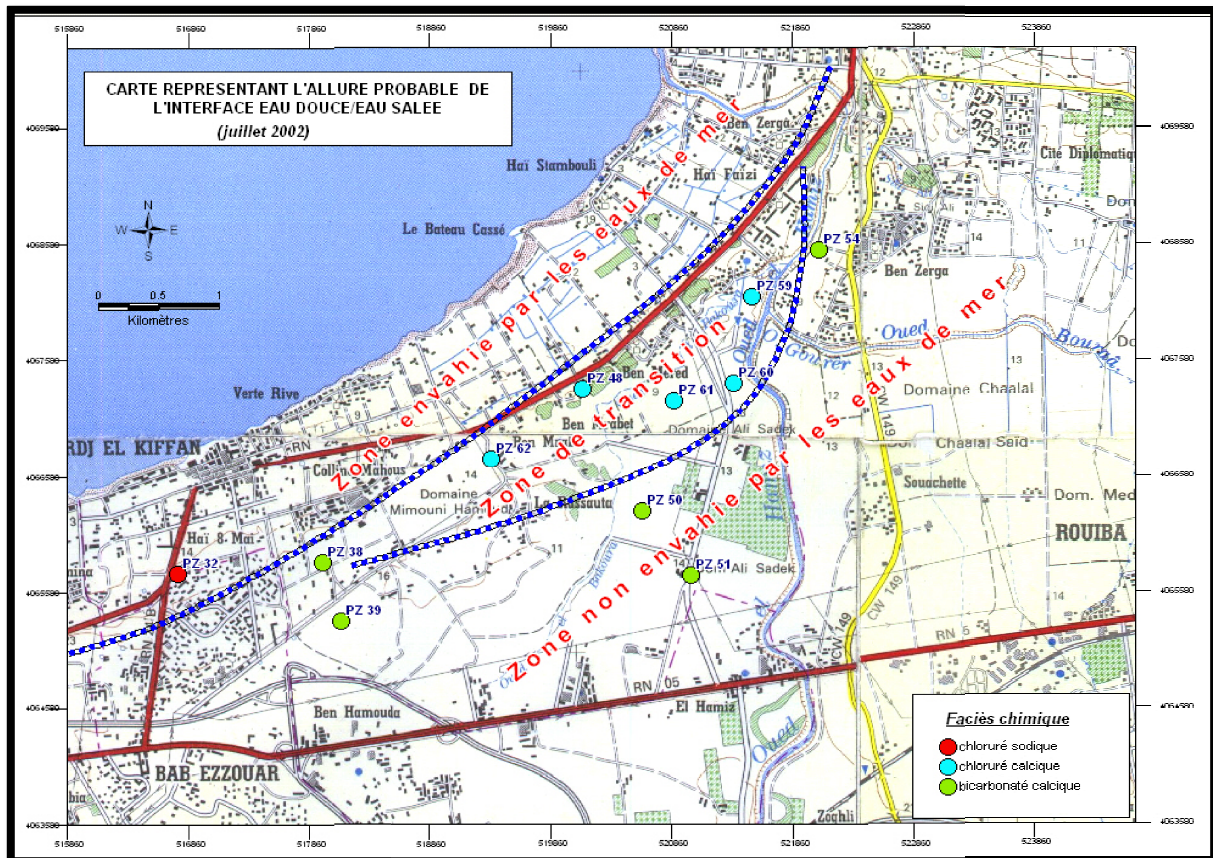


Figure V-24 : Carte de l'interface eau douce eau salée (juillet 2002)
(ANRH,2002)

D'après la carte des faciès de la campagne de prélèvement de juillet 2002 (figure V-24), le faciès chloruré marquant la zone complètement envahie par les eaux de mer est à plus de 1000 m de la cote et le chloruré calcique qui est un faciès de transition des eaux de mer vers les eaux douces s'étend jusqu'à plus de 2500 m ce qui touche la limite nord du champ de captage du Hamiz, par conséquent, la situation est vraiment alarmante.

4-3-3- Rapport de Todd : $rCl-/rHCO3-$:

Selon Todd, ce rapport est spécifique de l'invasion marine . Des valeurs élevées de ce rapport traduisent une contamination par l'eau de mer.

Tableau V-2 : Résultats des analyses hydrochimiques au niveau de la baie d'Alger

(année 2008)

N°	Concentrations (mg/l)					
	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	Cl	HCO ₃	SO ₄ ²⁻
PZ 32	203	59	132	185	500	229
PZ 36	8	22	108	75	330	0
PZ 36	31	11	91	116	149	5
PZ 38	56	76	87	162	186	200
PZ 39	41	19	56	86	242	0
PZ 41	183	69	89	149	425	389
PZ 45	151	52	71	123	464	144
PZ 50	223	87	153	355	393	366
PZ 50	240	101	191	670	305	300
PZ 50	215	69	150	367	305	272
PZ 50	68	75	190	320	250	165
PZ 51	203	88	173	288	470	375
PZ 51	207	66	131	298	290	301
PZ 54	14	30	116	195	166	12
PZ 58	15	32	443	800	151	20
PZ 59	25	58	750	1 250	198	17
PZ 60	211	63	149	375	442	265
PZ 61	199	64	45	272	382	141
PZ 62	206	45	126	258	314	275
PZ A	101	29	81	134	328	44
PZ B	237	71	118	363	380	288
PZ C	239	90	151	580	329	222
PZ D	43	23	177	210	314	67
PZ E	204	61	167	337	394	302
PZ E	192	52	95	203	393	282
PZ F	115	35	81	127	413	140
PZ F	155	69	108	172	353	324
PZ G	143	38	110	136	419	170
PZ42	231	57	105	150	394	445
PZ48	58	30	161	384	156	0

Source : ANRH

Tableau V-3 : Nature de la contamination par l'eau de mer en fonction du Rapport de Todd.

INTERVALLE	NATURE DE LA CONTAMINATION
0-0,5	Eau douce
0,5 - 1,3	Contamination légère par l'eau de mer
1,3-2,8	Contamination modérée
2,8 - 6,6	Contamination forte
6,6-15,5	Contamination très forte
15,5-20	Eau de mer contenant encore un peu d'eau douce

Le tableau V-3 met en évidence la fréquence des échantillons dans chaque intervalle.

Tableau V-5 : Fréquence des échantillons.

Intervalle	Pourcentage d'échantillons
0-0,5	33,33
0,5-1,3	50
1,3-2,8	10
2,8 - 6,6	6,66
6,6-15,5	0
15,5-20	0

33,33 % des échantillons ne présentent aucune contamination par les eaux salées, néanmoins un pourcentage important des échantillons varie entre une eau légèrement contaminée à une eau fortement contaminée.

Interprétation de la carte de rapport de Todd (mai 2006) :

La carte (Figure V-25) montre que :

- La progression des eaux salées sur une large bande en allant d'Est en Ouest, de Bordj El Bahri jusqu'à Bordj El Kiffan, et se prolonge à l'intérieur du continent sur une distance de 5km.
- le rapport de Todd est supérieur à l'unité au niveau de la bande littorale en allant d'Est en Ouest.

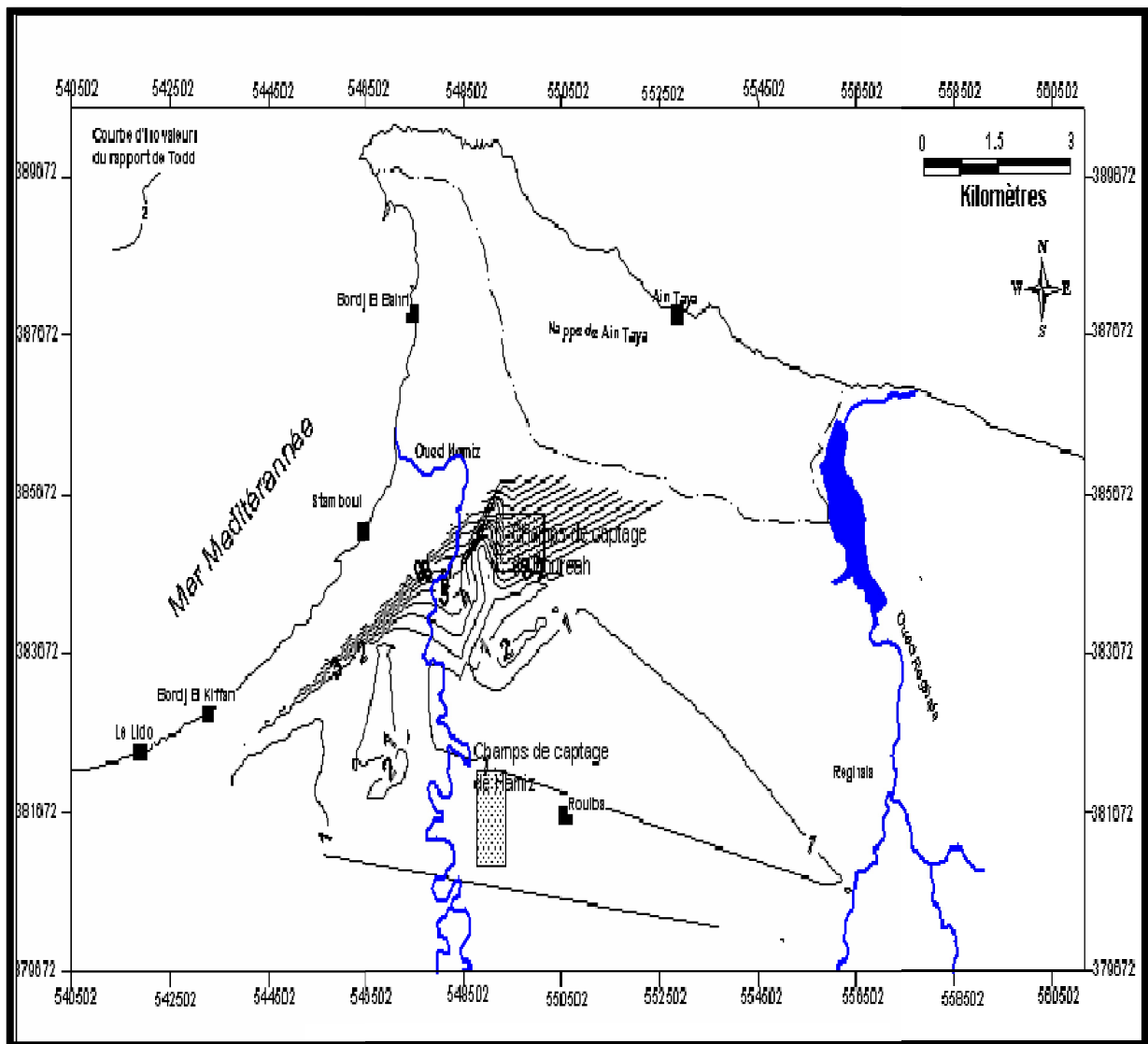


Figure V-25 : Carte de rapport de Todd (Toubal, mai 2006)

V-5- Contrôle et lutte contre l'intrusion des eaux salées :

L'exploitation des couches aquifères sur le littoral nécessite un contrôle permanent et rigoureux afin de limiter l'avancée des eaux salées.

De nombreux travaux ont été consacrés à cet effet dont les plus récents sont ceux de D.K.Todd.

La lutte contre l'intrusion marine peut être conduite par quatre méthodes :

- Modification du pompage ;
- Recharge artificielle ;
- Ligne de rabattement parallèle à la côte ;
- Barrière artificielle du substratum.

V-5-1- Modification du pompage :

La méthode la plus directe pour lutter contre l'intrusion marine est de limiter l'importance du pompage, mais elle est ni la plus efficace ni la plus rationnelle.

Il est plus adroit d'implanter des forages et puits à une certaine distance du littoral en arrière du coin d'intrusion .

V-5-2- Recharge artificielle :

L'emplacement de l'interface eau douce/eau salée étant déterminé par le niveau piézométrique de la nappe, une recharge artificielle, élevant sa surface piézométrique, réduit le coin de l'intrusion.

Cette alimentation artificielle peut être effectuée soit par injection dans des puits ou forages, soit par épandage en surface.

Une méthode efficace consiste à établir une ligne de forages ou de puits d'injection parallèles au littoral .

V-5-3- Ligne de rabattement parallèle à la côte :

Le coin d'intrusion des eaux salées peut être stabilisé par des pompages d'eau salée à une certaine distance du littoral .

Le procédé pratique consiste à implanter une ligne de forages parallèle à la côte. Par pompage simultané, une ligne de rabattement est créée.

Ce procédé a pour inconvénient de réduire le volume d'eau douce utilisable car il développe la longueur du coin d'intrusion. Il est utilisé pour lutter rapidement contre l'intrusion d'eau salée.

V-5-4- Barrière artificielle du substratum :

On peut aussi utiliser un autre moyen pour lutter contre cette avancée, il s'agit de la réduction de la perméabilité des terrains du littoral.

Le principe consiste à reconstruire la couche imperméable en introduisant une couche de terre par compactage, ensuite les couches supérieures par le sable déjà enlevé.

Conclusion :

La nappe côtière de la baie d'Alger constitue un aquifère très vulnérable à l'intrusion marine.

L'approche de ce problème par la géophysique a mis en évidence le tracé du front salé. Néanmoins, les approches hydrodynamique et hydrochimique assistés par un système d'information géographique (SIG) ont révélé que la zone envahie s'étend au-delà de cette limite du fait qu'elle a atteint même 5 Km au niveau de la région comprise entre les régions de Bordj El Bahri et Bordj El Kiffan en 2006 (Toubal ,2006).

L'extension maximale de l'intrusion marine s'étend sur près de 6km vers le champ captant du Hamiz (ANRH Alger ,2009).

Les cartes piézométriques font ressortir nettement l'inversion totale du sens d'écoulement des eaux de la mer vers le continent atteignant les champs de captages de Boueah et menaçant aussi le champ de captage de Hamiz où les niveaux piézométriques sont à -17m en dessous du niveau de la mer.

Pour contrôler et lutter contre l'avancée des eaux salées quatre méthodes sont applicables :

- Modification du pompage ;
- Recharge artificielle ;
- Ligne de rabattement parallèle à la côte ;
- Barrière artificielle du substratum.

Dans ce contexte, un réseau de surveillance comportant 23 piézomètres recouvrant la baie d'Alger est établi par l'ANRH dans le but de mesurer les niveaux piézométriques et prendre des échantillons d'eau pour les analyses hydrochimiques à raison de deux campagnes par année (basses et hautes eaux).

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. **Toubal, A.C., 1997** : La problématique de l'invasion marine dans la baie d'Alger. Etat des connaissances et recommandation, ANRH (Blida).
2. **Toubal, A. C., 1998** : Approche géophysique des problèmes d'hydrodynamique et d'invasion marine en milieu souterraine. Exemple des plaines d'Annaba, de la Mitidja et e la baie d'Alger. Thèse de Doctorat, USTHB /Alger..
3. **Bennie & Partners., 1983** : Schéma d'aménagement des ressources en eau dans la région d'Alger-Sebaou/
4. **Castany , G., 1982** : Hydrogéologie ; Principes et méthodes, Edition Dunod, Paris
5. **MacDonald and Partners 1992** : Classification du potentiel aquifère des grandes formations de Mitidja.
6. **Mania J., Imersoukene S., Braillon JM., 1985.** Pollution saline de la nappe côtière à l'est d'Alger.
7. **Djouidar-Hallal, D., 2003** : Vulnérabilité et protection des régions côtières. Application aux alluvions de la Mitidja Orientale. Thèse de magistère, IST/USTHB/Alger.
8. **Touaibia, B., Mars 2004** : Manuel pratique d'hydrologie
9. **Glangeaud, I., 1952** : Etude géologique de la région littorale de la province d'Alger.
10. **Hubert, M.K., 1940:** the theory of groundwater motion, J. Geol.
11. **Muting, G., 1977** : La Mitidja : décolonisation et espace géographique, Edition O.P.U, Alger.
12. **Rodier, J., 2005** : L'analyse de l'eau. Eaux naturelles. Eaux résiduaires. Eaux de mer.

- 13. Berdja, F .,2001** : Note préliminaire sur l'invasion marine au niveau de la baie d'Alger, ANRH (Alger).
- 14. Yahiaoui A, 2006** : Etude de l'impact de l'intrusion marine par cartographie assistée par le SIG, de la baie d'Alger. Mémoire d'ingénieur, ENSH
- 15. ANRH , 2010** : Lutte contre l'intrusion saline par recharge de la nappe à partir des eaux épurées.
- 16. Benziada Mebrouk,1994** : Hydrogéologie de la plaine de la Mitidja Orientale
- 17. Sidi Moussa Mohamed Fouzi, Avril2006** : Le phénomène d'intrusion marine de la nappe de la Mitidja dans la baie d'Alger (ANRH)
- 18. <http://www.pffice-eau974.fr/html/sommaire/cycle/Cycle/logsalim.htm>**
- 19. <http://www.solinst.com/Res/papers.101C4Salt.html>**

CONCLUSION GÉNÉRALE ET RECOMMANDATIONS

L'exploitation anarchique des nappes côtières provoque une baisse importante du niveau de la nappe, engendrant ainsi le phénomène de l'intrusion marine. Ce phénomène est à prendre au sérieux puisqu'il affecte la santé humaine, les plantes et le sol.

La baie d'Alger est une des régions d'Algérie les plus touchées par ce phénomène.

La région d'étude est soumise à un climat méditerranéen, caractérisé par une température moyenne de 17,8°, une précipitation moyenne annuelle de l'ordre de 596.5 mm.

L'étude géologique nous a permis de définir deux types de nappes :

- la nappe de l'Astien, qui se trouve entre le Plaisancien (le substratum) et les marnes jaunes semi-perméables de la formation d'El Harrach.
- La nappe du Quaternaire, constituée d'alluvions composés essentiellement de graviers et de galets.

En utilisant trois critères (hydrodynamique, hydrochimique et géophysique) on a pu mettre en évidence l'ampleur de l'invasion saline.

L'étude piézométrique a montré une inversion du sens d'écoulement de la mer vers la nappe, due essentiellement à la surexploitation de la ressource souterraine.

L'interprétation des cartes hydrochimiques a révélé que les concentrations les plus élevées correspondent aux points les plus proches de la côte.

La géophysique a permis de connaître la nature et la structure de l'aquifère ainsi que la localisation de l'interface eau douce/eau salée.

L'interprétation de la carte du rapport de Todd révèle que la zone envahie par les eaux salées s'étend au-delà de la limite estimée auparavant puisqu'elle a atteint même 5 Km au niveau de la région comprise entre les régions de Bordj El Bahri et Bordj El Kiffan en 2006.

L'extension maximale de l'intrusion marine s'étend sur près de 6 km vers le champ captant du Hamiz en 2009.

Pour contrôler et lutter contre l'avancée des eaux salées quatre méthodes sont applicables :

- Modification du pompage ;
- Recharge artificielle ;
- Ligne de rabattement parallèle à la côte ;
- Barrière artificielle du substratum.

CONCLUSION GENERALE ET RECOMMANDATIONS

Les observations et les résultats obtenus à travers l'étude effectuée sur la baie d'Alger permettent de suggérer les recommandations suivantes :

- Compléter l'inventaire des points d'eau ;
- Installer de nouveaux piézomètres pour la surveillance permanente de la nappe ;
- Faire des études géophysiques en réalisant plusieurs coupes géoélectriques le long de la zone littorale pour déterminer de manière précise la limite actuelle de l'interface eau douce / eau salée;
- Contrôler l'exploitation anarchique des forages ;
- Arrêter toute exploitation des forages à proximité de la zone littorale, pour freiner la vitesse d'avancée du biseau salé ;
- L'élaboration de procédures de recharge artificielle de la nappe ;
- Faire des campagnes de sensibilisation auprès des consommateurs et des agriculteurs sur les conséquences de l'intrusion marine pour la santé humaine, pour les ouvrages hydrauliques et les terres agricoles.