

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE
LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

**Université Saad Dahleb - Blida
Faculté de Technologie**

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

Mémoire de fin d'études Master

Spécialité : Hydraulique

Option : Sciences de l'eau

Titre :

**L'apport des méthodes hydrochimiques et
hydrodynamiques à l'étude de l'intrusion
marine (cas de la baie d'Alger)**

Présenté par : MORCELI Mohamed

Devant le jury :

Président :

Promoteur : Pr. Gendouz Abdelhamid

Examineur :

Examinatrice :

Année universitaire : 2012-2013

Introduction Générale

En Algérie la principale ressource hydrique est le réservoir souterrain. Même la région du littoral est tributaire des nappes phréatiques. L'exploitation des ressources en eau souterraines dans le bassin hydrographique côtier de la baie d'Alger, a connu une intense activité liée au développement démographique et économique ces dernières décennies.

L'augmentation significative des prélèvements destinés à l'irrigation et à l'alimentation en eaux potables semble avoir favorisé la propagation du phénomène de l'intrusion marine dans les eaux souterraines de la baie d'Alger.

Le phénomène de l'intrusion marine se concrétise en un biseau salé qui est le contact entre la mer et une nappe d'eau dans un aquifère poreux. Il est connu par l'interface eau douce/eau salée.

Généralement cette interface est en bordure de la mer, mais elle peut se déplacer à l'intérieur des terres en cas d'exploitation intense de la nappe comme c'est le cas dans notre zone d'étude.

Ce mémoire de fin d'étude, est porté d'une part sur l'étude des récentes analyses (2005, 2007, 2010) obtenues au niveau de l'agence nationale des ressources hydrique (ANRH) et le centre de recherche nucléaire Algérien (CRNA). Ces analyses nous ont permis d'établir les cartes isoteurs, les couples et les faciès chimiques afin de déterminer l'origine de la salinité dans les eaux des zones sensibles.

D'autre part, les données piézométriques ont servi à dresser des cartes nécessaires pour la localisation du biseau salé. Les apports chimique et piézométrique ont montré qu'il y a une sérieuse prolifération de la salinité dans la nappe de la Mitidja et dans la baie d'Alger.

Le phénomène de l'intrusion marine semble en théorie irréversible mais cependant on peut le stopper en mettant en place des plans d'action proposés dans ce mémoire autant que recommandations.

Le schéma général du présent mémoire comprend quatre parties. La première étant consacrée à la présentation du phénomène de l'intrusion marine. La deuxième comprend l'étude de la région et la troisième explique la méthodologie suivie pour réaliser ce travail. La quatrième est consacrée à la discussion et l'interprétation des résultats obtenus

Résumé

Le phénomène d'intrusion marine est considéré comme l'un des grands problèmes qui menacent les cotes algériennes.

Notre étude a pour but la détermination de l'état d'avancement de ce phénomène au niveau de la baie d'Alger. En se basant sur les informations et les résultats d'analyses obtenus de l'ANRH et la CRNA, on a étudié l'origine de la salinisation et le niveau piézométrique de la nappe par rapport à la surface de la mer et ceux en utilisant la méthode hydrochimique et la méthode hydrodynamique.

Au final on a pu déduire que le biseau salé a considérablement avancé au niveau de la zone d'étude

Mots clés : intrusion marine - biseau salé - baie d'Alger - piézométrie - hydrochimie

Abstract:

The seawater intrusion is one of the biggest problems threatening the Algerian coasts.

Our study aims to determine the situation of this problem in the Algerian coast, using the information brought from the ANRH and the CRNA we have studied the source of the salinization and the piezometric level of the underground water compared with the surface of the seawater using the hydrochemical and hydrodynamic methods.

In the final, we have deduced that the seawater intrusion has infected a part of the Algerian coast.

Keys words: sea water intrusion - salt water - Algiers coast – piezometric – hydrochemical

ملخص

تعتبر ظاهرة تقدم المياه المالحة على حساب المياه الجوفية مشكلة في تزايد مستمر تهدد المناطق الساحلية الجزائرية.

نهدف في دراستنا هذه الى تحديد تقدم المياه المالحة نحو المياه الجوفية في منطقة خليج الجزائر. بدئنا بتعريف الظاهرة بعد ذلك قمنا بالتطرق الى المفاهيم الجيومورفولوجية والهيدروكليماطولوجية والجيولوجية للمنطقة. استنادا للمعطيات المتحصل عليها من الوكالة الوطنية للموارد المائية و مركز البحث النووي الجزائري قمنا بدراسة مصدر الملوحة و مستوى المياه الجوفية بالنسبة الى سطح البحر. وذلك باستعمال الطريقة الهيدروكيميائية و الطريقة الهيدروديناميكية.

كلمات المفتاح: تقدم مياه البحر، مصدر الملوحة، خليج الجزائر، مستوى المياه، هيدروكيميائية.

Introduction

Les eaux souterraines entretiennent de nombreuses relations entre les eaux de mer et les aquifères côtiers qui peuvent varier dans le temps et dans l'espace. Cette relation se traduit par un problème qui est l'avancement des eaux salées dans les régions côtières. Dans ce chapitre nous tenterons de présenter une vue générale sur le phénomène de l'intrusion marine.

1.1 Les eaux souterraines dans les zones côtières

1.1.1 Description d'un aquifère côtier

Les aquifères côtiers sont en général, en communication avec la mer. Ce sont des systèmes globaux aquifères. 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 un équilibre hydrostatique s'établit 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). (Toubal, 1997)

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 1.1)

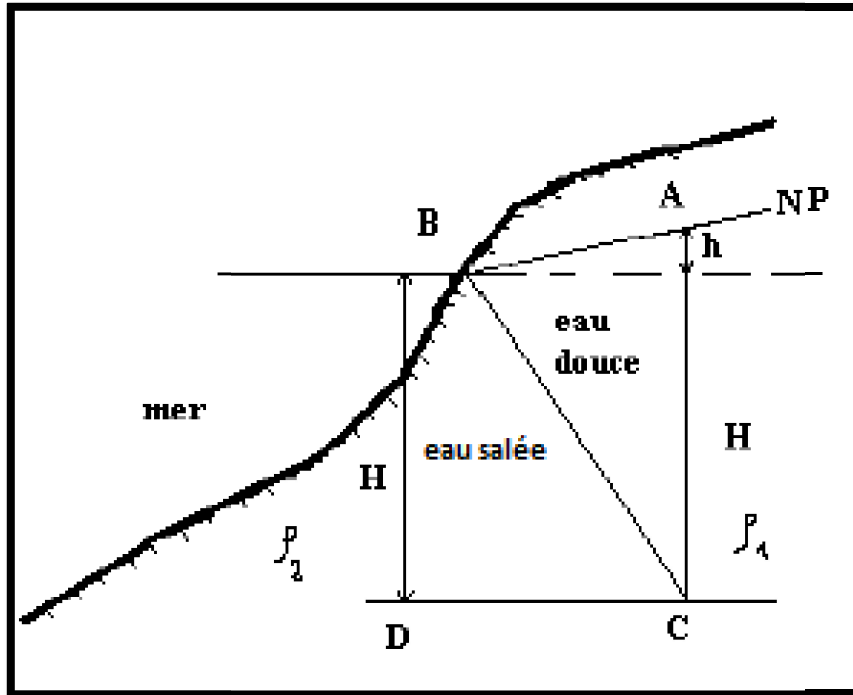


Fig1.1 Schéma théorique de l'invasion marine le long du littoral pour une nappe libre. (D'après Ghyben-Herzberg)

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 1-2) à chercher une solution mathématique plus appropriée, il a étudié dans une coupe transversale, deux lignes équipotentielles séparées d'une distance ds .

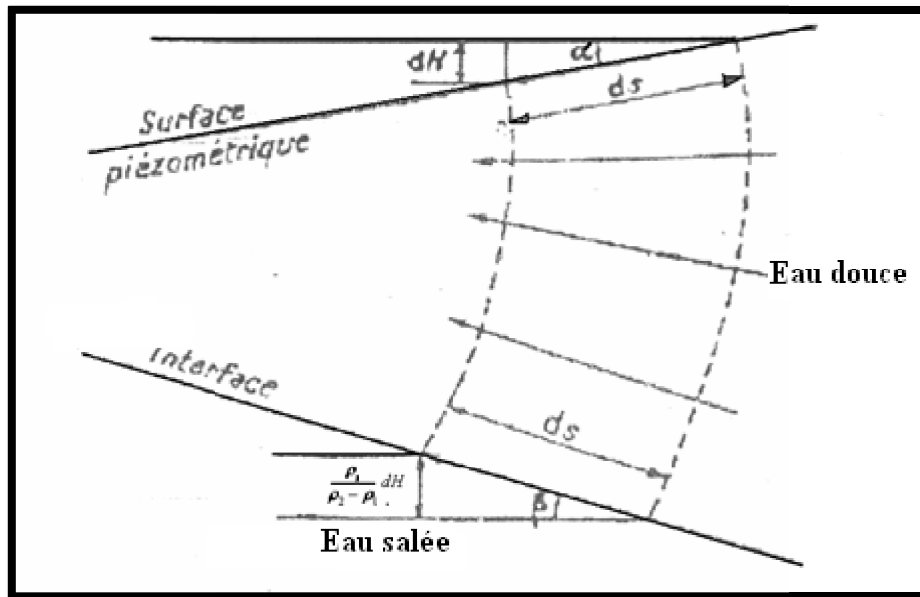


Fig 1.2 Etude mathématique de l'interface. (D'après M.K.Hubbert)

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

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

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 convergentes vers la mer, la vitesse v décroît dans cette direction, donc l'interface est une courbe concave.

1.1.2 Relation eau souterraine-eau marine

Les aquifères côtiers (eau douce souterraine) fonctionnent en interaction avec les eaux marines. L'eau douce peut se déverser dans la mer directement ou par l'intermédiaire d'une zone humide. De même l'eau marine peut influencer les aquifères côtiers par le phénomène de l'intrusion marine. Ce dernier, qui peut s'étendre sur plusieurs kilomètres à l'intérieur des terres est d'un grand risque pour les régions côtières tributaires des eaux souterraines pour

leur approvisionnement en eau. Sous certaines conditions, l'eau salée se propage à l'intérieur des terres et contamine les eaux de la nappe. Par ailleurs, l'intrusion des eaux douces par les eaux salées aura pour effet une dégradation des sols et une salinisation par suite des irrigations avec ces eaux.

1.1.3 Risques de surexploitation et de pollution

Les zones côtières sont généralement un lieu de concentration de différentes activités anthropiques : la forte urbanisation, l'industrialisation, l'agriculture maraîchère et l'activité touristique. Les aquifères côtiers se trouvent par conséquent souvent confrontés à des exploitations abusives pour répondre à des besoins en eau très élevés et se trouvent exposés à des problèmes de pollution. Il s'agit du phénomène d'avancée du biseau salé dans les terres en cas de mauvaise gestion quantitative des nappes en plus d'autres pollutions diffuses.

Partout dans le monde, de nombreux aquifères côtiers sont actuellement largement exploités et exposés à des pollutions diverses susceptibles d'altérer, parfois irrémédiablement, la qualité des eaux prélevées (Custodio 2002), notamment au Mexique, en Chine, et en Algérie.

1.1.4 Le 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 importante 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).

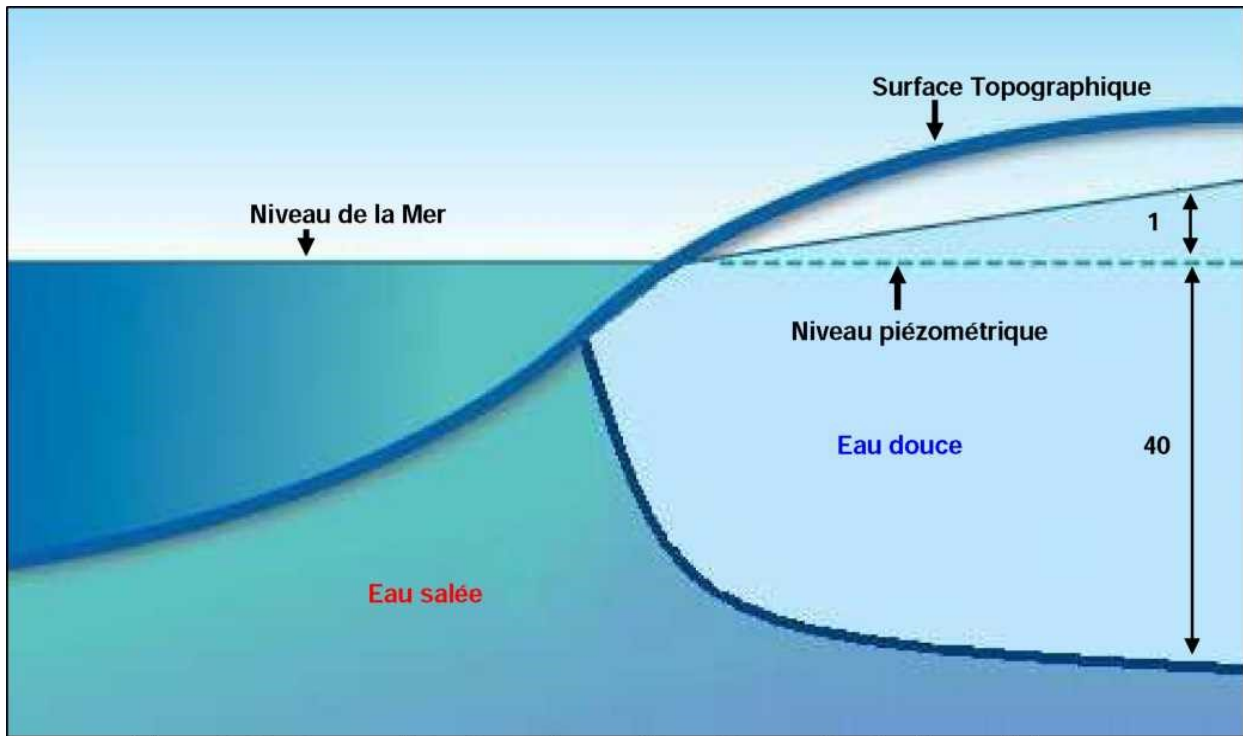


Fig 1.3: coupe schématique d'un aquifère côtier en situation normale (CASTANY, G, 1982)

1.2 Interface eau douce/ eau salée

1.2.1 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 et 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.

1.2.2 Origines de la salinité des eaux souterraines en zones côtières

Dans la région étudiée et de manière générale dans les zones côtières irriguées et à climat aride et semi-aride où l'on observe une intensification des activités socio-économiques et essor démographique important, les sources potentielles des fortes salinités des eaux souterraines (figure 1.4) peuvent être soit naturelles (intrusion marine, embruns marins, lixiviation des roches réservoirs, évaporation), soit anthropiques (sur fertilisation, pesticides, eaux usées, lixiviats des déchets solides, salage des routes, émissions gazeuses), soit encore une combinaison des sources naturelles et anthropiques (Younsi, 2001).

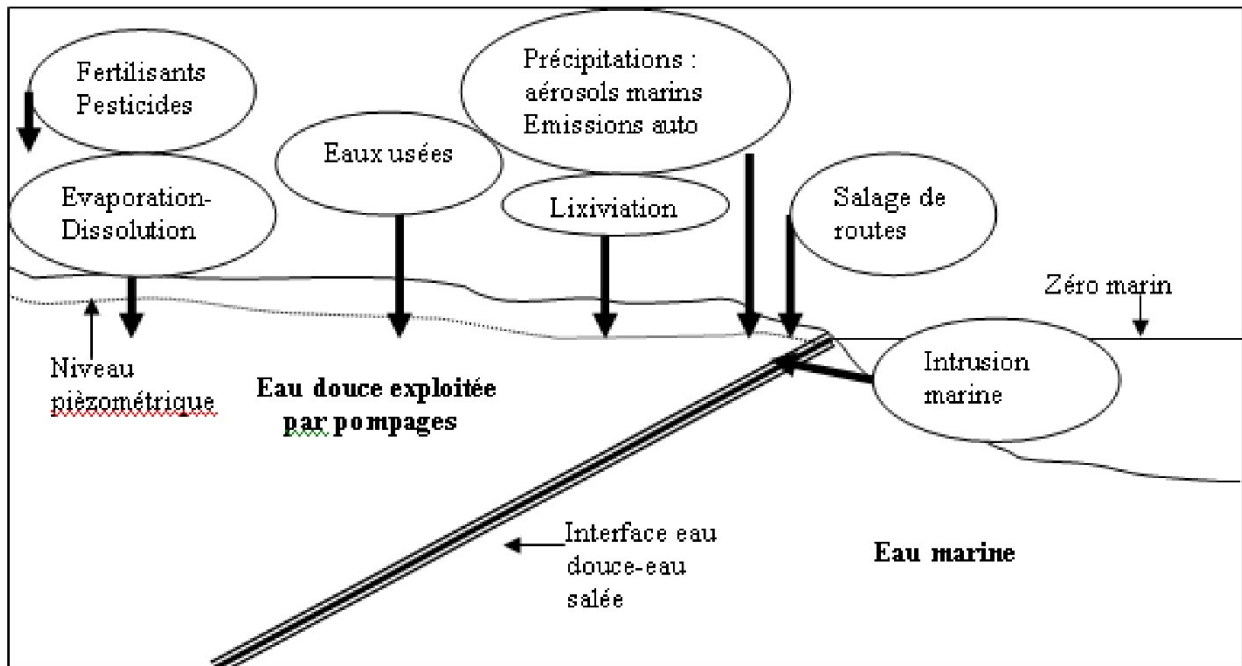


Figure 1.4: Sources potentielles des salinités des eaux souterraines côtières (Younsi, 2001).

1.2.3 Mécanismes réglant les rapports entre l'eau douce et l'eau salée

Il est reconnu que dans un aquifère côtier non perturbé par l'activité humaine, l'eau douce en provenance de l'infiltration des précipitations constitue une nappe s'écoulant vers la mer qui surmonte une masse d'eau salée affectant la forme d'un biseau pénétrant à l'intérieur des terres.

La transition entre eau douce et eau salée s'effectue relativement brusquement sur une épaisseur ne dépassant pas quelques mètres. A l'échelle de l'aquifère, cette zone de transition est souvent assimilée à une interface abrupte séparant l'eau douce de l'eau salée.

L'existence de la zone de transition est due à la coexistence de plusieurs phénomènes :

- les fluctuations naturelles de la nappe d'eau douce ou encore l'effet de la marée provoquent un mélange des eaux par déplacement de l'interface ;
- la diffusion moléculaire du sel dans l'eau tend à diminuer les contrastes de concentration ;

Enfin, la dispersion en milieu poreux due à l'écoulement le long de l'interface contribue également au mélange.

- L'ensemble de ces causes tendrait à un envahissement progressif de l'aquifère par la saumure, si l'écoulement de la nappe d'eau douce vers la mer n'entraînait un nettoyage permanent et si l'effet de densité ne tendait à maintenir le sel en profondeur.

1.2.4 Mécanismes de pollution des aquifères côtiers

Sous l'effet d'un pompage, la zone de transition eau douce/eau salée subit un déplacement d'ensemble vers l'intérieur des terres. Si cette zone de transition atteint les crépines des forages (phénomène connu sous le nom "d'upconing"), il se produit une pollution intense de l'eau pompée. Cet événement peut apparaître même si la nappe d'eau douce n'est pas surexploitée, il s'agit seulement d'une remontée locale de l'eau de mer dans la zone des captages.

Le phénomène est d'autant plus grave que consécutivement au déplacement de l'interface en cours d'exploitation, l'écoulement s'effectue avec un coefficient d'emmagasinement apparent très élevé par rapport à celui de la nappe libre d'eau douce. Il en résulte une évolution lente de la piézométrie de l'aquifère qui masque le caractère inacceptable de la situation à long terme.

1.3 Critères de reconnaissance de l'intrusion marine

Il existe différents critères permettant d'identifier le cas d'une intrusion marine :

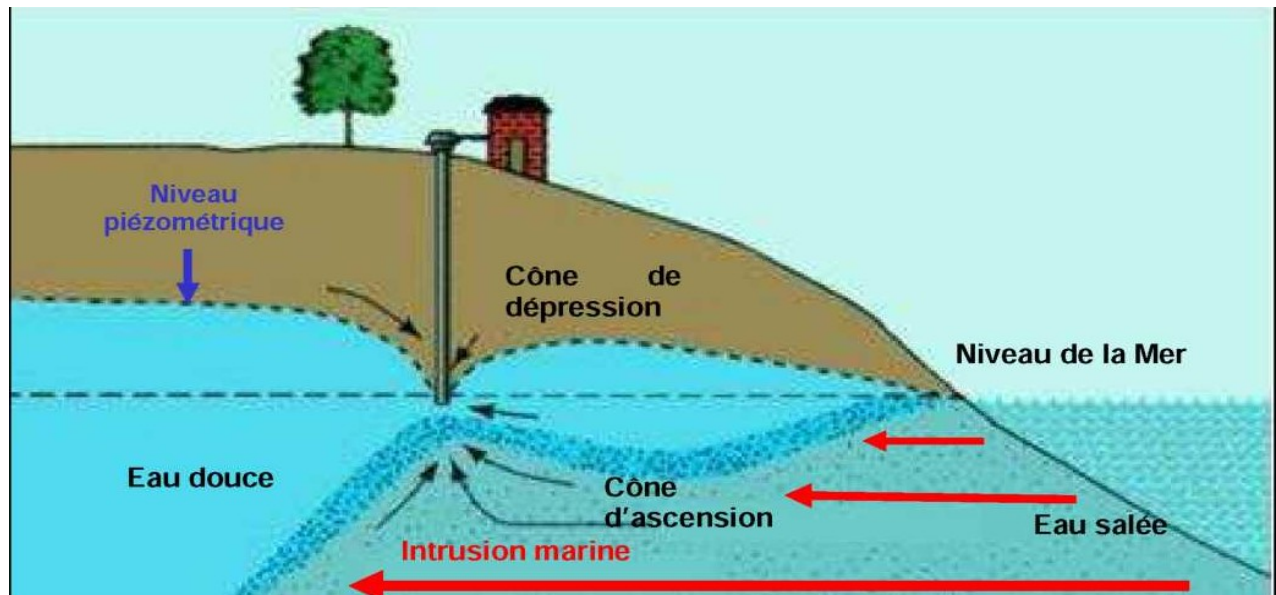
1.3.1 Critères géologiques

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.

1.3.2 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)



1.3.3 Critères géophysiques

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 ses 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 des différentes profondeurs.

1.3.4 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.

1.4 Impact de L'intrusion marine

Du fait de l'utilisation des eaux souterraines contaminées par les eaux salées, il en résulte un double impact sur la santé humaine et sur les plantes et cultures irriguées.

1.4.1 Impact sur la santé humaine

Diverses maladies sont issues de la consommation des eaux salées :

a) L'hypertension

L'hypertension artérielle se caractérise par une trop forte pression du sang sur les parois artérielles. Même si le rôle du sel dans l'hypertension artérielle reste controversé, il n'empêche que l'hypertension touche des millions de personnes dans le monde, et que celle-ci favorise les maladies cardiovasculaires.

b) Les maladies cardiovasculaires

Hormis l'hypertension artérielle qui est directement liée aux risques de maladies" cardiovasculaires, l'excès de sel aurait tendance à engendrer une hypertrophie du ventricule gauche. Or cette hypertrophie d'une partie du cœur a un rôle important dans le déclenchement de maladies cardiovasculaires.

c) L'ostéoporose

L'ostéoporose, qui se traduit par une fragilité des os accrue, touche 1/4 des personnes âgées. En fait l'os se solidifie grâce à la présence de calcium, mais une partie de celui-ci part dans les urines. Le sel favorise cette fuite de calcium par les urines.

1.4.2 Impact sur les plantes

La qualité des eaux d'irrigation doit être bonne parce qu'une eau de mauvaise qualité peut avoir des incidences graves sur le développement des plantes.

La plante peut absorber l'eau de deux façons soit par les organes aériens (cas de l'irrigation par aspersion) soit par les racines, mais la quantité d'eau absorbée par les feuilles est toujours faible, ce sont les racines qui assurent la quantité d'eau nécessaire à la plante.

La présence de sels dans le sol et l'eau d'irrigation pose trois groupes principaux de problèmes

a- Un problème d'alimentation en eau des plantes :

-le passage de l'eau du sol à la plante est dû en partie à la pression osmotique développée par les cellules racinaires.

-la présence ou l'accumulation des sels dans la zone racinaire diminue le potentiel osmotique des plantes.

-l'augmentation de la concentration saline dans la solution du sol peut arriver à annuler la pression osmotique et entraîner pour la plante un phénomène de sécheresse physiologique fatale.

b- Un problème lié à la dispersion des argiles et à l'imperméabilisation du sol :

L'imperméabilité peut être engendrée par l'arrosage avec des eaux salées de sol bien structurés, et à teneur en sodium en regard de la teneur en ion flocculant (et notamment l'ion calcium) renseignera sur les risques de défloculation entraînée par une eau salée.

c- Un problème de rendement et de toxicité :

Les éléments chimiques qui sont importants à considérer dans l'étude de la salinité

Sont :

- Les cations : Na^+ , Ca^{++} , Mg^{++} , k^+ , Li^+
- Les anions : Cl^- , SO_4^- , $\text{HCO}_3^- / \text{CO}_3^-$, NO_3^-
- Autres éléments chimiques : Si, B, Se.

Le tableau ci-dessous nous donne quelques seuils de tolérance de certaines cultures.

Tableau : 1-1 : Seuil de tolérance à la salinité des cultures arbustives (Région méditerranéenne).

cultures	Limite de salinité (mmhos/cm)	cultures	Limite de salinité (mmhos/cm)
Avocatier	6	Vigne	12
Amandier	7	Figuier	14
Agrumes	8	Grenadier	14
Pommier	8	Olivier	14
Poirier	8	Palmier Dattier	32

Conclusion

L'intrusion marine est un phénomène qui se produit au niveau des aquifères côtiers. Sa principale cause est l'exploitation irrationnelle et excessive de la nappe d'eau douce pour l'alimentation en eau potable, l'irrigation ainsi que pour l'industrie. Ce phénomène est accentué par les changements climatiques, notamment le manque de précipitations et les températures élevées.

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

Une étude approfondie de ce phénomène s'avère donc plus que nécessaire puisque la salinité de l'eau a de nombreuses conséquences. Elle affecte la santé de l'être humain, les plantes et les cultures irriguées.

Introduction

La baie d'Alger et l'une des zones plus menacée par le phénomène de l'intrusion marine. Afin de mieux connaître l'état de l'avancement du biseau salé ainsi que la variation de la qualité de l'eau souterraine dans la région ; il est nécessaire de procéder à une étude du contexte géographique, géomorphologique, hydroclimatologique et géologique, ce dont fait l'objet ce chapitre.

2.1 Etude géomorphologique

2.1.1 Situation géographique

➤ 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.



Fig 2.1 : situation géographique de la zone d'étude (Google Earth)

2.1.2 Aspect hydrographique

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

- **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.

- **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 dans le 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. (Fig 2.2)

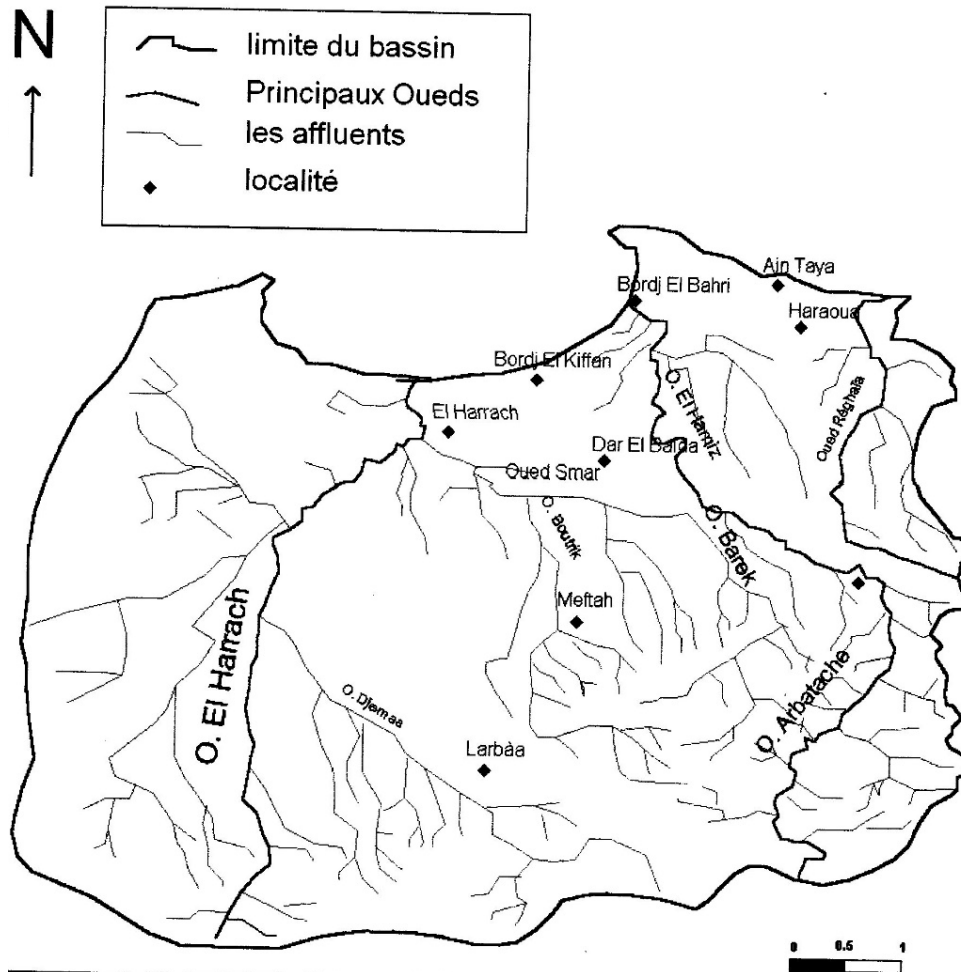


Fig 2.2 carte de réseaux hydrographique (ANRH.Alger)

2.1.3 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

2.1.4 Les paramètres géomorphologiques

2.1.4.1 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 les 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 2.1 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

c) 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. (LABORDE.2000)

d) 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 2.2 Paramètres de forme et de relief des deux sous bassins versants (Oued El Hamiz et Oued El Harrach). [ANRH]

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
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. (Tableau 2.2)

2.2 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.

2.2.1 Paramètre climatologique

2.2.1. a) Réseau pluviométrique

Trois stations sont prises en compte car bien réparties du sud vers le Nord, ceux sont:

- > La station du Barrage Hamiz
- > La station de Dar El Beida (D.E.B)
- > La station de Réghaïa

Tableau 2.3 Caractéristiques des stations pluviométriques

stations pluviométriques	Coordonnées			Paramètres climatologiques
	Code ANRH	Longitude	Latitude	
Dar El Beida	02-06-2011	3°13' E	36°41' N	P, T°
Hamiz Barrage	02-06-2002	3°21' E	36°36' N	P
Réghaïa	02-06-1932	3°20' E	36° 44' N	P

Source : ANRH

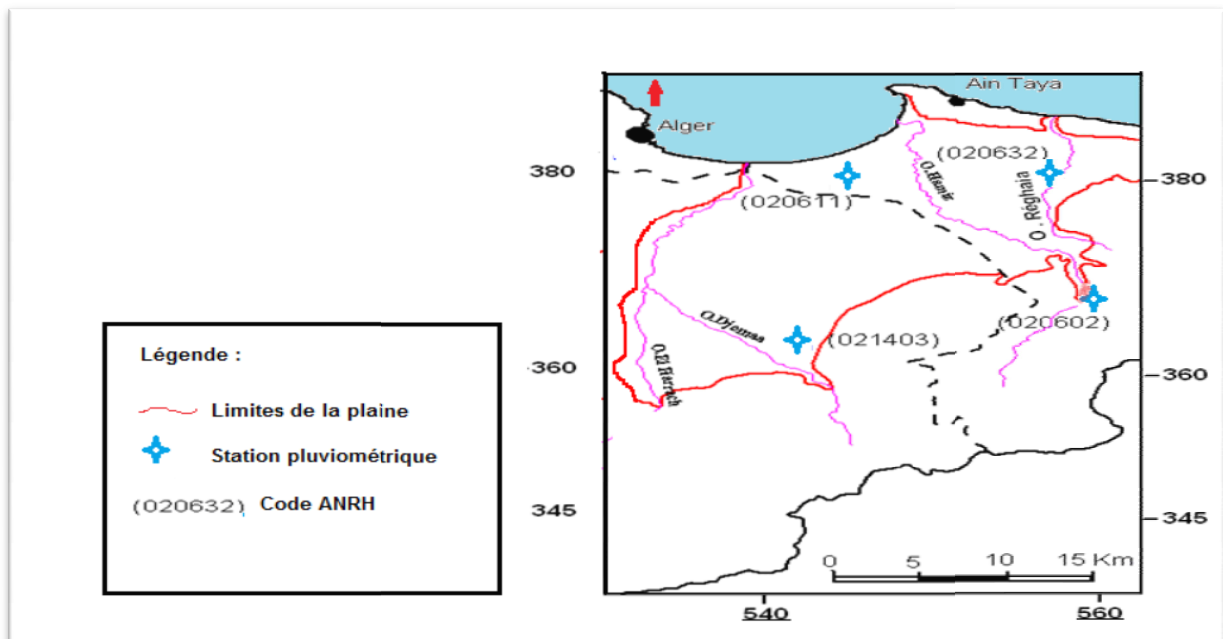


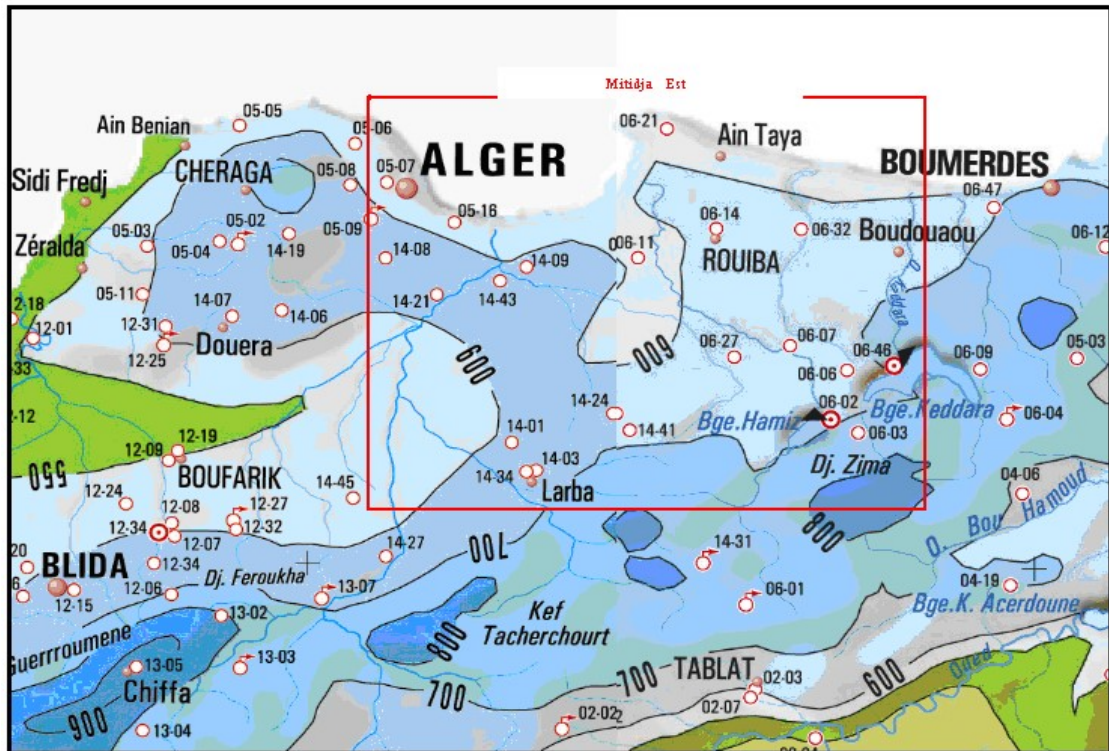
Fig.2.3 carte de la répartition des stations pluviométriques (ANRH)

2.2.1. b) Les précipitations

Les précipitations moyennes annuelles sur une période d'observation de 28ans (1978 à 2011) pour les trois stations sont représentées dans le tableau 2.4

- **Précipitations annuelles**

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



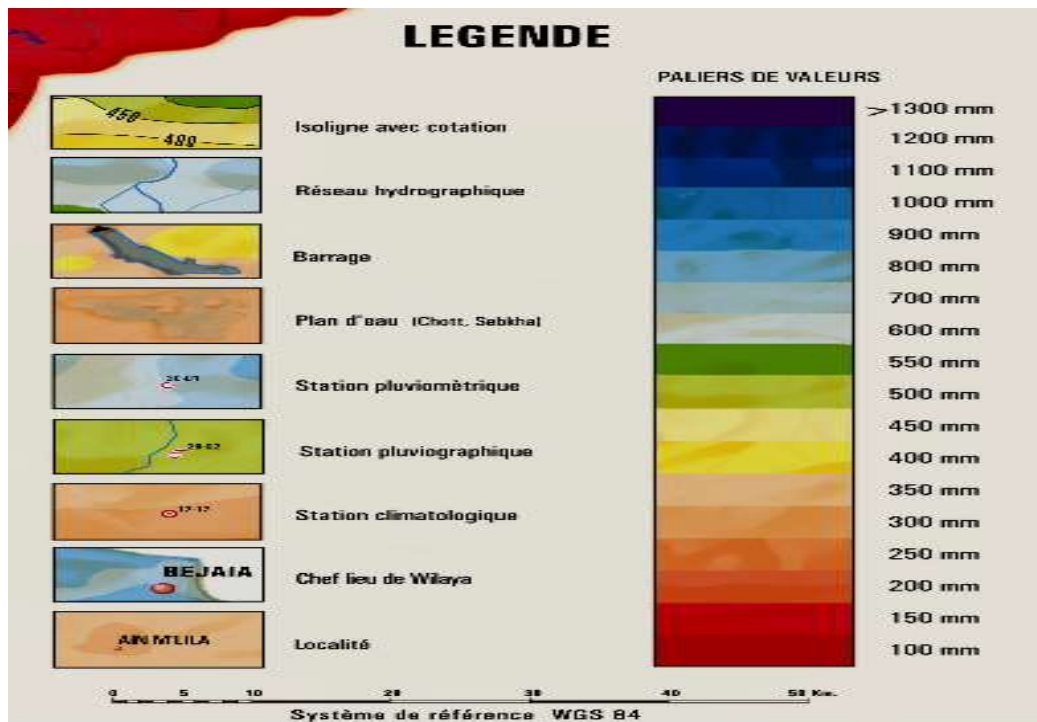


Fig.2.4 Carte pluviométrique de la Mitidja (ANRH)

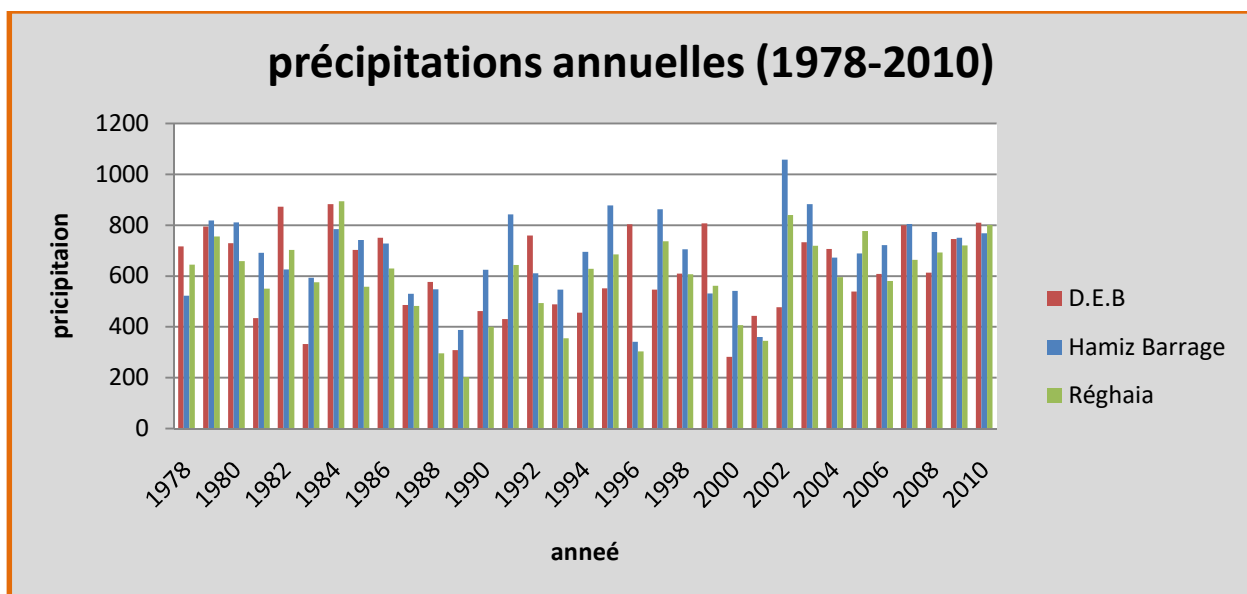


Fig 2.5: Précipitations moyennes annuelles période (1978-2010)

Les trois stations qui apparaissent dans le tableau 2.4 on peut déduire que :

- i. La Station de Dar el Beida : D'après l'historique des précipitations :
 - la précipitation moyenne annuelle (1978-2011) est de 613.96 mm/an.
 - une année sèche est enregistré en 2000 avec une lame d'eau de 282 mm.
 - une année pluvieuse est enregistré en 2010 avec une lame d'eau de 810 mm.

la Station de Hamiz barrage :

- la précipitation moyenne annuelle (1978-2011) est 680 mm/an.
- une année sèche est enregistré en 1996 avec une lame d'eau 341.4mm.
- une année pluvieuse est enregistré en 2002 avec une lame d'eau de 1058.6 mm.

ii. La station de Réghaia :

- la précipitation moyenne annuelle (1978-2011) est 591.6 mm/an.
- une année sèche est enregistré en 1989 avec une lame d'eau 203 mm.
- une année pluvieuse est enregistré en 1984 avec une lame d'eau de 894 mm.

L'évolution des précipitations dans le temps est caractéristique du climat méditerranéen. Le changement du taux des précipitations dans les différentes stations est dû aux paramètres altitude et distance à la mer (CASTANY. G, 1982).

- **Evaluation de la lame d'eau précipitée**

Pour déterminer la lame d'eau précipitée à l'échelle du bassin, Nous nous sommes basés sur les 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. (CASTANY. G, 1982)

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

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 (1978-2010) par la méthode arithmétique est donné dans le tableau ci-après

Tableau 2.5 : Calcul de la lame précipitée de la période (1980-2010) par la méthode arithmétique.

Stations	Précipitations (mm)	n	Lame précipitée (mm)
D.E.B	613.96	3	628.34

Hamiz Barrage	680		
Réghaia	591.06		
	IPi	1885.02	

D'où $P_i = 1885.02 \text{ mm}$

b - La méthode des polygones de Thiessen

Elle est la plus utilisée car son application est simple et donne généralement de bons résultats, même quand le réseau pluviométrique n'est pas homogène spatialement. Après découpage géométrique du bassin, sur une carte topographique, la précipitation pondérée se calcule par l'expression :

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

Avec :

P : précipitations moyennes annuelles (mm)

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

A_i : surface du polygone (km^2)

A : surface totale de zone d'étude (km^2).

Les résultats du calcul apparaissent dans le tableau suivant :

Tableau 2.6 : calcul de la lame précipitée par méthode Thiessen période (1980-2010)

Station	Surface du Polygone (Km^2)	P (mm)	Pi X Si	Pmm
Dar El Beida	145.5	613.96	89331.18	619.43
Hamiz Barrage	192.3	680	130764	
Réghaia	58.25	591.06	34429.245	
		$\sum P_i \cdot S_i =$	254524.425	

D'où $P = 619.43 \text{ mm}$

c- Méthode des isohyètes

Dans cette méthode le but est de tracer des courbes d'égales précipitations appelées isohyètes et à calculer la surface comprise entre deux isohyètes consécutifs.[8]

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

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 km²

S_t : Surfaces totale du bassin versant en km².

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

Tableau2.7 : résultats obtenus par la méthode des Isohyètes. [ANRH]

Classes intra-isohyètes (mm)	Surfaces intra-isohyètes (Km ²)	Précipitations (mm)	Pi x Si	P (mm)
<580	173.84	530	92135.2	619.09
580-680	186	630	117180	
>680	61.74	730	45070.2	
			I Pi x Si=254385.4	

$$\text{Soit } L_p = \sum \frac{P_i S_i}{S_t} = 619.09 \text{ mm}$$

Tableau2.8 : résultats obtenus par les 3 méthodes :

Méthode	Arithmétique	Thiessen	Isohyètes	Moyenne (mm)
Précipitation Moyennes (mm)	628.34	619.43	619.09	622

Le tableau2.8 , nous donne les résultats des trois méthodes, nous retiendrons la moyenne égale à **622mm**

2.2.1. c) Les températures

Les calculs des températures sont indiqués dans le tableau ci-dessous :

Tableau2.9 Variation de la température moyenne, maximale et minimale

	SEP	OCT	NOV	DEC	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUIN	JUIL	AOUT	ANNEE
Moy	23.57	20.12	15.44	12.5	11.13	11.65	13.25	15.05	18.33	22.25	25.2	26.11	17.88
Min	17.6	14.2	10	6.9	5.6	5.1	7.1	9.4	13	16.5	19	20.1	12.04
Max	29.54	26.04	20.88	18.1	16.66	18.2	19.4	20.7	23.66	28	31.4	32.12	23.72

Dar El Beida (1978-2010). [ANRH]

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

Les valeurs des températures moyennes mensuelles de Dar El Beida pour la période (1980-2011) indiquées dans le graphe ci-après

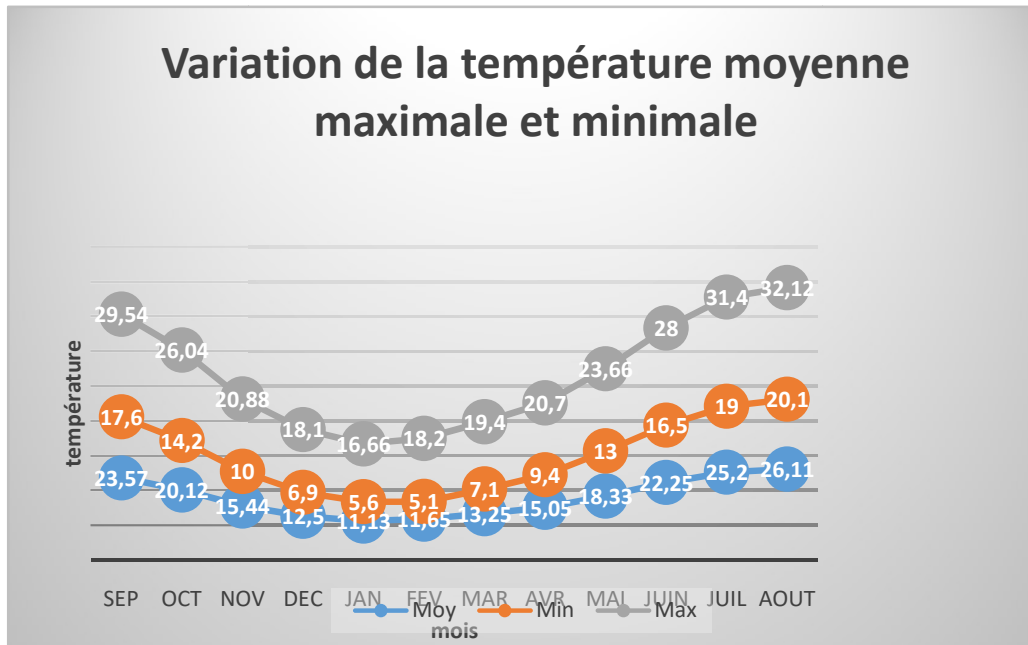


Fig 2.5 graphe des Températures moyennes mensuelles de Dar El Beida pour la période (1978-2010)

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

- **Une période froide** qui débute au mois de Novembre jusqu'au mois Mai avec une température moyenne la plus basse enregistrée au mois janvier à 11.13°C.
- **Une période chaude** débute au mois Juin jusqu'au mois d'Octobre, la température moyenne la plus élevée (26.11 °C) est observée au mois d'Août. L'amplitude thermique varie avec les mois et les saisons, mais cet écart reste toujours peu important, il en est de même pour l'amplitude thermique annuelle car la différence entre le mois le plus froid et le mois le plus chaud ne dépasse pas les 15°C.

2.2.1. d) Evapotranspiration ou déficit d'écoulement

Il existe deux types d'évapotranspiration :

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

1. Calcul de l'ETP

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

a) Application de la méthode de Thornthwaite

L'ETP est calculée par la formule :

$$\mathbf{ETP = 16(10 t / I)^a}$$

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 2.10 Détermination de l'ETP par la méthode de Thornthwaite

Mois	T	i	I	a	ETP (mm)	K	ETP _c (mm)
Septembre	23.58	10.46	85.35	1.87	106.44	1.03	109.6332
Octobre	20.12	8.23			79.22	0.97	76.8434
Novembre	15.44	5.51			48.34	0.86	41.5724
Décembre	12.5	4			33	0.84	27.72
Janvier	11.13	3.35			26.24	0.87	22.8288
Février	11.65	3.6			28.58	0.85	24.293
Mars	13.25	4.37			36.34	1.03	37.4302
Avril	15.05	5.3			46.09	1.1	50.699
Mai	18.33	7.15			66.58	1.21	80.5618
Juin	22.25	9.58			96	1.22	117.12
Juillet	25.22	11.59			120.58	1.24	149.5192
Août	26.11	12.21			128.83	1.16	149.4428
Annuel	17.88	85.35					887.6638

-Station de Dar El Beida

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**.

a- 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)

T : température moyenne annuelle en (°c) ;

P : Pouvoir évaporant.

Nous avons obtenu une ETR égale à **500** mm.**b- 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 2.11 : résultats de l'ETR par la formule de Coutagne

Variabes	<i>A</i>	<i>1/8 A</i>	P	<i>1/2 A</i>	ETR mm
Résultats	0.3	0.41	0.622m	1.65	505.93

2.3 Etude géologique

2.3.1 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. (GLANGEAUD.L. 1952)
- Au sud l'Atlas Blidéen qui est un vaste massif montagneux, caractérisé par des séries épaisses de Crétacé

2.3.2 Stratigraphie et lithostratigraphie

La configuration et la structure des réservoirs sont imposées par les formations lithostratigraphiques, 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.

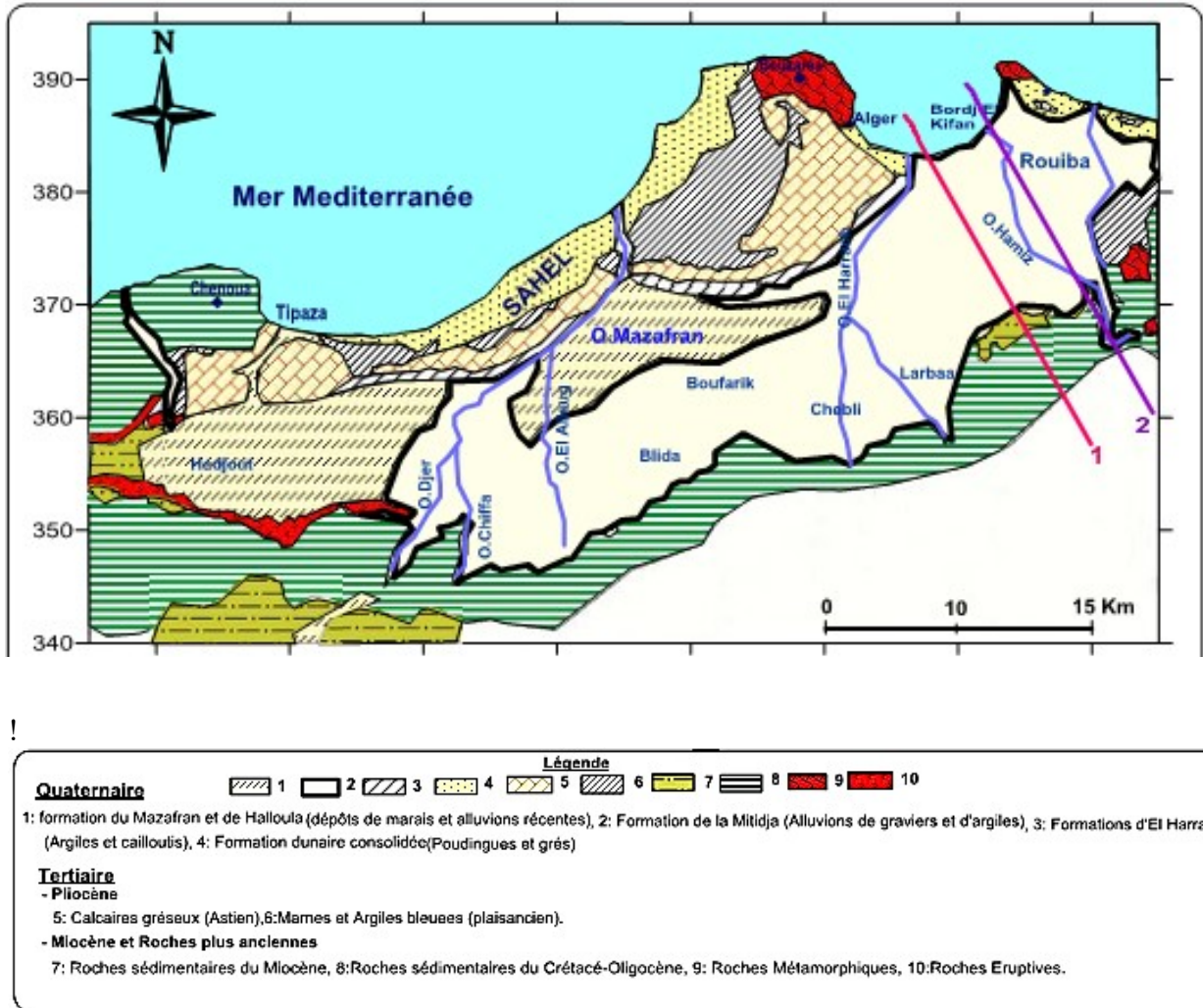


Fig 2.6 Carte géologique de la Mitidja (ANRH 1986)

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.

2.3.3 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.(Rivoirard, 1952)

2.3.3.a) 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 2.6)

2.3.3.b) Les formations plus anciennes

Elles sont constituées par :

1- 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. (Binnie & Partners, 1981)

2- 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). (Binnie & Partners, 1981)

2.3.4 Le pliocène

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

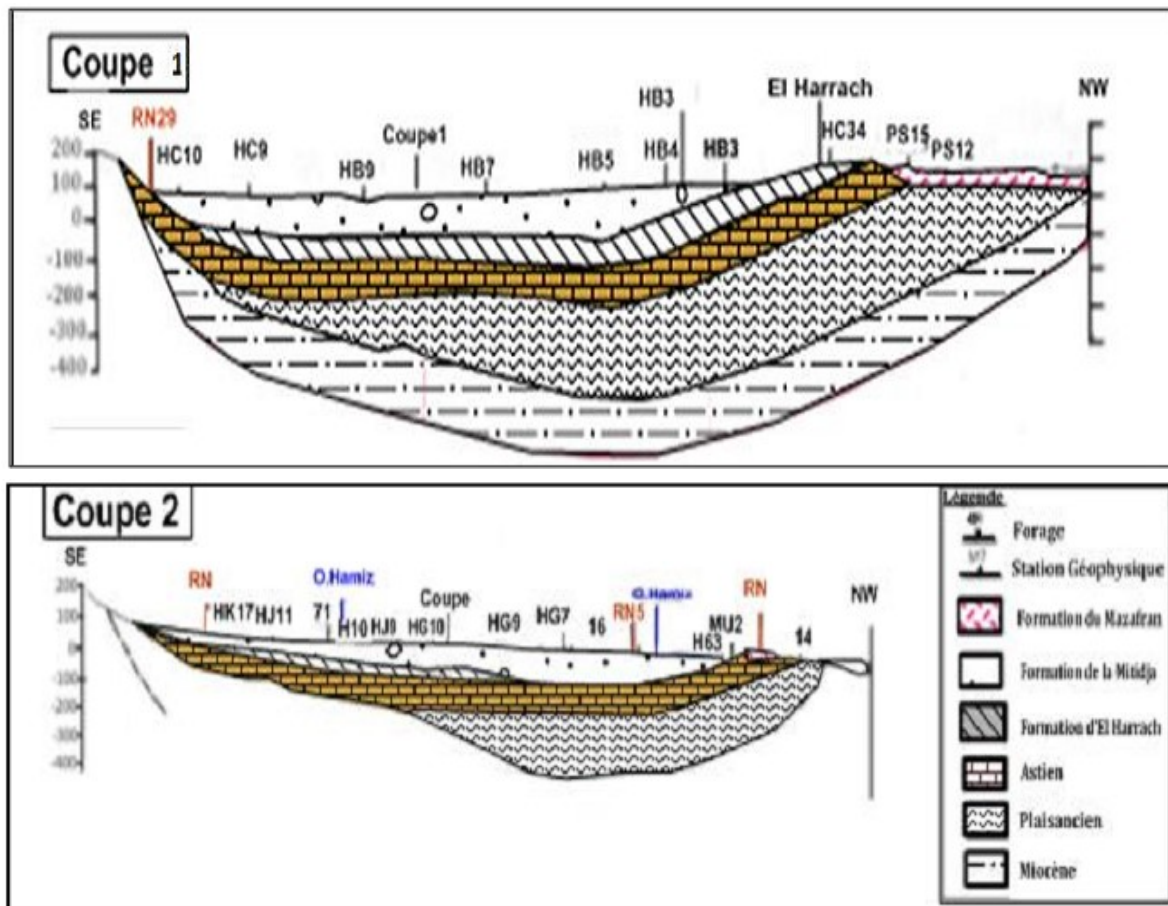


Fig 2.7 Coupes géologiques 1 et 2- SE/NW (Bennie et Atkins, 1983)

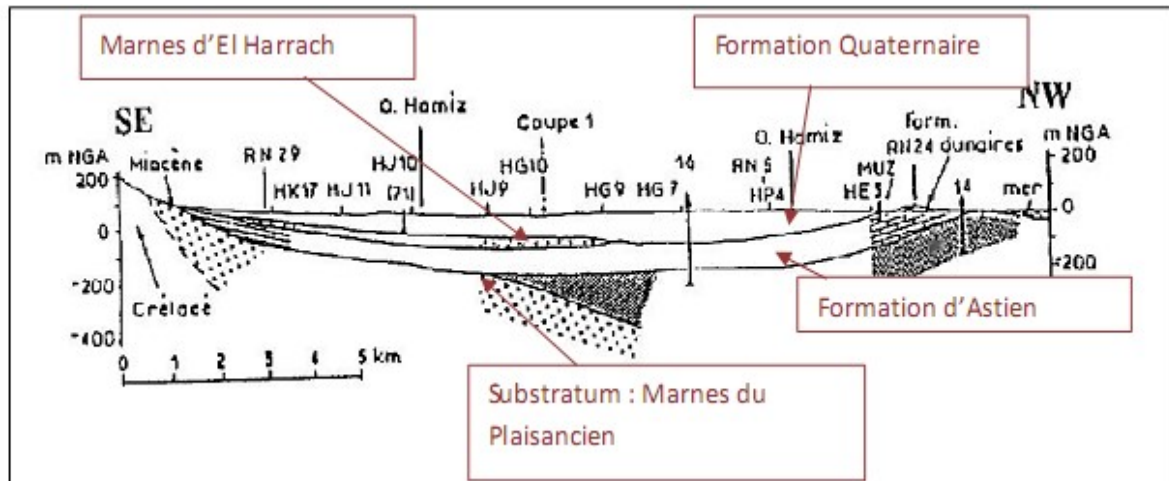


Fig 2.8 Coupes géologiques au niveau de la Mitidja Est (Bennie and partners, 1983)

2.3.4.a) 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. (Rivoirard, 1952)

2.3.4.b) L'Astien

Il est bien développé sur la côte 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.

2.3.5. 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. (Mektaa Kheira ; Aymé 1954).

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.

2.3.6 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.

2.3.7 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. (GLANGEAUD.L. 1952)
- **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.

2.3.8 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.

2.3.8.a) 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.

2.3.8.b) 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.

2.3.8.c) Au Pliocène

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

2.3.8.d) 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.

2.3.8.e) À la fin de l'astien

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

L'Atlas est soumis à une érosion dont les produits viennent de déposer dans le bassin subsident. C'est le début du remblaiement Villafranchien.

2.3.8.f) 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.


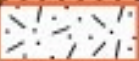






SYSTEME		ETAGE	LITOLOGIE		Epaisseur (m)
QUATERNAIRE	Holocène	Actuel récent			20
	PLEISTOCENE	Flandrien/ Rharibien	Limons, Argiles limoneuses		30
			Sables consolidés à lumachelles		30
		Soltanien/ Tensiftien	Alternance de graviers et d'argiles		150
		Calabrien/ Villafranchien	Argiles et cailloutis		100
TERTIAIRE	PLIOCENE	Astien	Grès, Sables et calcaires		120
		Plaisancien	Marnes et Argiles bleues		200
	MIOCENE	Vindobonien	Marnes à lentilles de calcaire		50
		Burdigalien	Marnes à lentilles de grès		?

Fig 2.9 Loglitho stratigraphique de la plaine de la Mitidja. (M. Mac Donald & Partners, Février 1992)

2.4 Étude hydrogéologique

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

Dans la plaine de la Mitidja Est on distingue deux réservoirs aquifères :

- Les alluvions du quaternaire (formation de la Mitidja).
- Les formations gréseuses ou grésocalcaires de l'Astien.

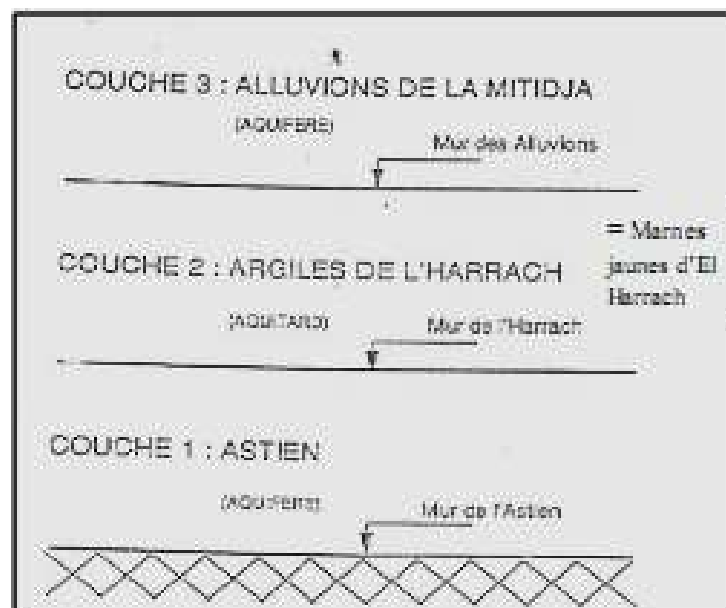


Fig.2.10. Schéma du système aquifère de la Mitidja Est (M. Mac Donald et Partners, Février 1992)

- L'aquifère Astien s'étend sous la majeure partie du bassin alluvial et affleure principalement dans le Sahel. Il est situé entre un substratum marneux Plaisancien et la couverture épaisse de marnes jaunes d'El Harrach, à l'exception de la partie orientale de la plaine où il est en contact direct avec l'aquifère alluvial.
- L'aquifère alluvial qui nous intéresse ici s'étend sur toute la superficie du bassin, sauf dans les secteurs occidentaux au-delà de Ameer El Aïn. Dans certaines zones localisées en bordure du bassin, il est essentiellement constitué par la superposition des alluvions du Quaternaire moyen et les alluvions récents parfois très argileux. Son substratum est constitué par les formations marneuses d'El Harrach, à l'exception de la partie orientale où c'est l'Astien qui forme cette limite inférieure.

2.4.1 Contexte hydrogéologique local de la baie d'Alger

Localement, au niveau de la baie d'Alger, la formation des marnes d'El Harrach a été érodée. Les deux aquifères composent ainsi une seule nappe "Quaternaire-Astien".

Sur de la baie d'Alger, cet aquifère unique formé par les grès de l'Astien et les alluvions de la Mitidja atteint une grande épaisseur ; dans cette zone, le mur de l'aquifère correspond au toit du substratum marneux du Plaisancien, situé à environ 180 mètres de profondeur.

Globalement l'aquifère est en équilibre de pression hydrostatique avec la mer. Les directions naturelles d'écoulement des eaux souterraines vont globalement du sud vers le nord, du continent vers la mer. Cependant, l'exploitation intensive de la ressource au nord de la baie d'Alger là où se retrouve des champs captant, des forages d'irrigation et des forages d'industrie qui ont pour conséquence le rabattement de la nappe, la modification des directions d'écoulement des eaux souterraines et l'appel inévitable de l'intrusion marine.

Dans les années 1980 (Mania, 1985), on note la présence de dômes piézométriques au droit des dunes côtières, semblent indiquer une zone préférentielle d'alimentation au niveau de ce secteur. Ces « dômes piézométriques » pouvaient alors, à l'époque, jouer le rôle de « barrière hydraulique » définie comme une zone d'apport hydraulique.

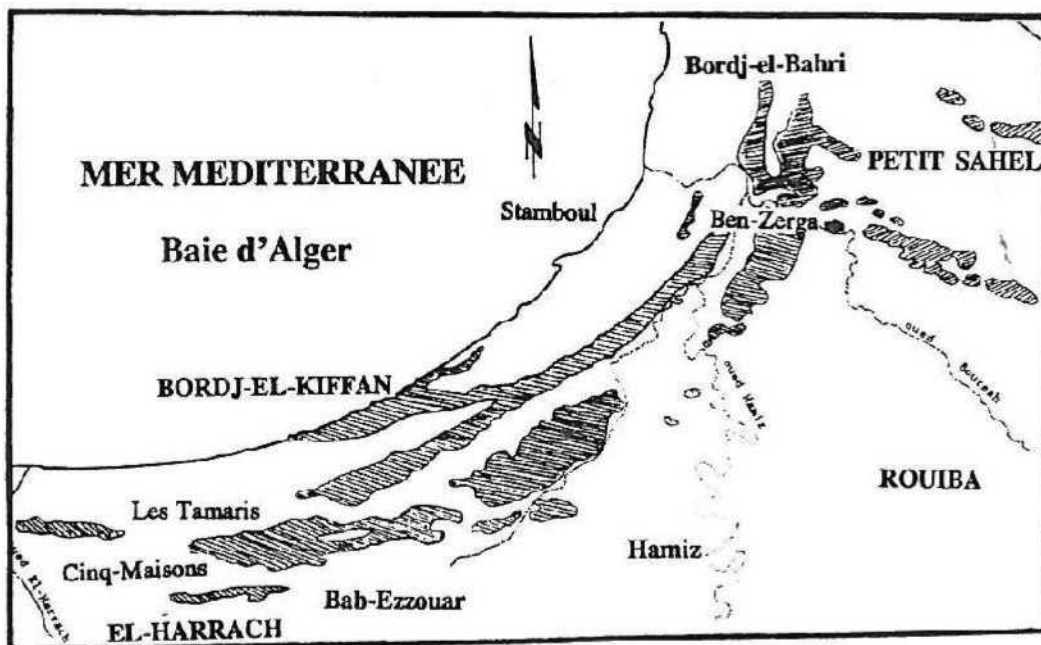


Fig.2.11. localisation des dunes côtières (Ayme, 1962)

2.4.2 Etude des caractéristiques hydrodynamiques

Elles concernent la transmissivité T , le coefficient d'emmagasinement S et la perméabilité verticale K_v .

2.4.2.a) 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 2.12. Transmissivité dans la Mitidja (ANRH)*

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

2.4.2.b) 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 2.13. 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 2.14. Coefficient d'emmagasinemen. Mac Donald (1992)

Formation	Condition	valeurs
Astient	libre	0.03-0.05
	captive	5.10^{-3} - 5.10^{-6}
Mitidja	libre	0.02-0.07
	captive	3.10^{-3} - $1.6.10^{-4}$

2.4.2.c) 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 2.15. Perméabilité verticale

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

2.4.3 Les mécanismes d'alimentation et d'écoulement des nappes

2.4.3.a) 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).

2.4.3.b) Écoulement 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 souterraine ont été mis en évidence par des analyses chimiques des eaux.
- 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'El Harrach.

2.4.4. Bilan entrant et sortant des aquifères

2.4.4.a) 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 : (BENNIE & PARTNERS. 1983)

Tableau 2.16 Bilan d'eau de la nappe de l'Astien (BENNIE & PARTNERS. 1983)

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 des ressources de la plaine est approximativement de 62000 m³/jour soit 23 hm³/an.

2.4.4.b) 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 dans 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 (BENNIE & PARTNERS. 1983)

2.4.4.c) Débits entrants de la nappe de la Mitidja

Tableau 2.17. Bilan d'eau de la nappe de la Mitidja .Mac Donald (1992)

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 (BENNIE & PARTNERS. 1983)

Tableau 2.18. 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 :

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 à 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

On constate que la région de la baie d'Alger se caractérise par un été chaud et un hiver doux et humide qui se classe dans la zone de drainage océanique avec des ;

Dans notre étude nous avons opté pour la station de Dar El Beida pour le calcul des paramètres hydroclimatiques car elle ne présente pas d'interruptions durant toute la période 1978-2010.

La Baie d'Alger est assez homogène du point de vu climatique : la température moyenne est pratiquement constante environ 18°C par contre la pluviométrie présente une hétérogénéité dans sa répartition spatiale et même temporelle. Elle marque un premier pic pluvial en Décembre-Janvier et un second pic en Février- Mars. Les précipitations moyennes annuelles estimés par les trois méthodes (arithmétique, Thiessen et Isohyètes) sont de même ordre de grandeur, soit 622.28 mm/an.

L'évapotranspiration potentielle estimée par la méthode de C.W Thornthwaite, est de l'ordre de 887.66mm/an.

Quant à l'évapotranspiration réelle, estimée par la formule empirique de Coutagne est de 505.93mm/an, soit 81.38 % des précipitations moyennes annuelles ;

'estimation de la lame d'eau infiltrée a été déduite à partir de la formule du bilan hydrologique. Elle est égale à 14.41mm, soit 2.31 % des précipitations moyennes annuelles.

Hydrogéologie :

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 ils 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 par 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 il sera question d'une part d'border et de déterminer la méthodologie adoptée pour l'aboutissement aux résultats et d'autre part d'expliquer les deux approches utilisées afin de déterminer l'état d'avancement le biseau salé au niveau de la baie d'Alger

L'intrusion marine est abordée dans ce travail par l'étude de la conductivité électrique sur le plan spatiale, aussi que les éléments majeurs et quelques traces, pour identifier les processus et les réactions chimiques qui gouvernent la salinisation et détermination la limite et l'extension du biseau salé et donc l'intrusion marine.

Nous avons en recours à l'interprétation des résultats en utilisant la corrélation des éléments majeurs avec les chlorures, la variation des apports $\text{SO}_4^-/\text{Cl}^-$, $\text{Mg}^{++}/\text{Ca}^{++}$ de calcul dans écarts ionique et des indices de saturation.

3.1 Historique de l'intrusion marine dans 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.(TOUBAL.Dj 2007)

Du 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 chimique 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. (TOUBAL.Dj 2007)

3.2. Approche hydrodynamique

3.2.1 Réseau piézométrique de la baie d'Alger

Le premier inventaire partiel des points d'eau a été réalisé en 1974 par l'agence nationale des ressources hydraulique (ANRH). Cet inventaire a été complété en 1991.

Depuis juin 1993, un réseau piézométrique a été sélectionné pour le suivi de la nappe. Ce réseau fait l'objet de deux campagnes de mesure du niveau statique durant la période 1993-1994.

Depuis, le suivi de cette nappe a été interrompu pour des raisons sécuritaires pour être repris en 2003.

Dans le cadre de la surveillance de la fluctuation des eaux souterraines, l'ANRH a retenu des points de mesures constitués de puits, de piézomètres et de forages non exploités. Ces points d'observation forment le réseau piézométrique de la nappe alluviale de la Mitidja.

Sachant que la piézométrie est un élément fondamental dans l'étude de l'évolution du comportement hydrodynamique et hydro chimique de la nappe, nous avons choisi de faire l'historique piézométrique de la nappe étudiée sur la période 1968-2011.

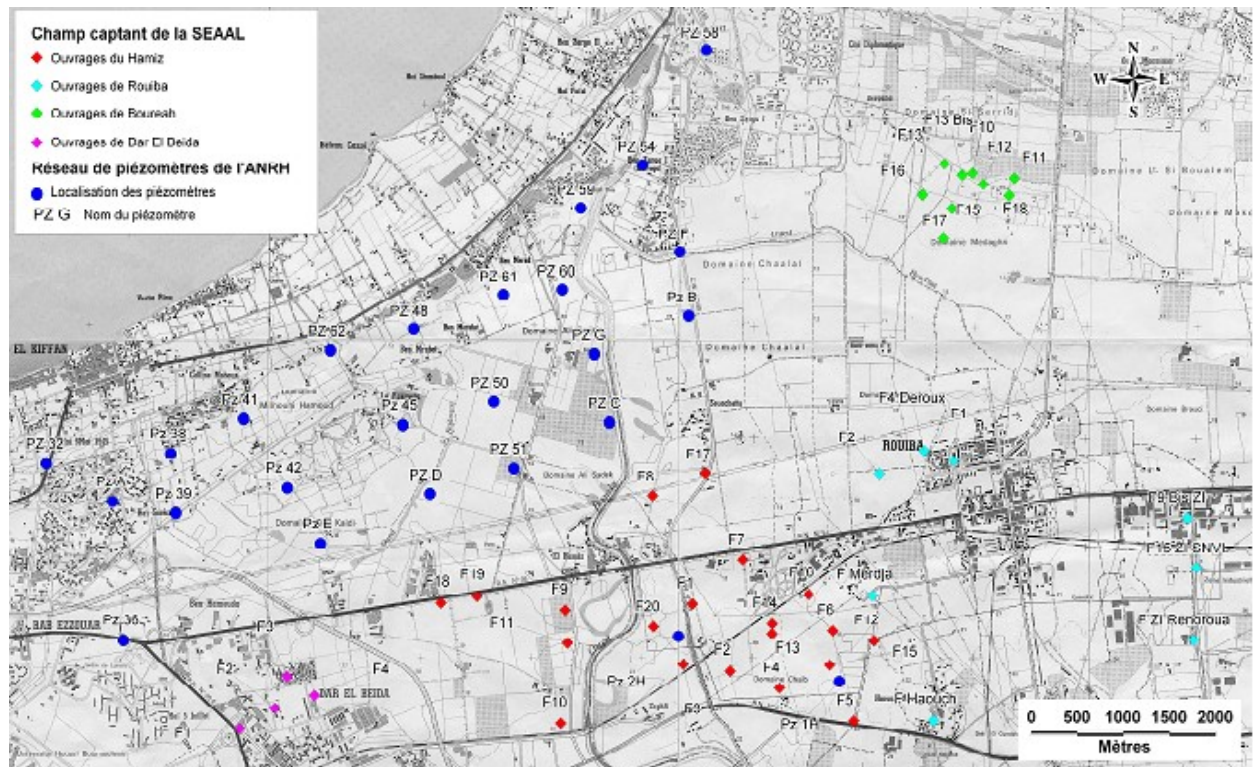
3.2.2 Présentation du réseau piézométrique de la baie d'Alger

Une campagne de mesures des coordonnées GPS de l'ensemble des piézomètres du réseau de l'ANRH et des forages des champs captant de la SEAAL (Hamiz, Boueah, Rouïba et Dar El Beida) a été réalisée de Novembre 2009 à Janvier 2010.

La carte des points d'accès à la nappe résulte de cette campagne :

Le réseau de piézomètres (25 piézomètres) de l'ANRH s'étend del'Oued El Harrach à l'Ouest à Bordj El Bahri à l'Est. Deux piézomètres (PZ 1 H et PZ 2 H) se trouvent au sein du champ captant du Hamiz.

Ce réseau est bien adapté à l'étude de la lutte contre l'intrusion marine dans la baie d'Alger. Il est équipé d'enregistreurs automatiques de type Schlumberger et OTT. Ces capteurs enregistrent le niveau d'eau, la température et, pour certains la conductivité électrique de l'eau dans les



ouvrages.

Fig. 3.1 Carte de situation du réseau de surveillance de la nappe [ANRH]

3.2.3 élaborations des cartes piézométriques

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

Les cartes piézométriques sont élaborées en utilisant le logiciel **Surfer** qui est un logiciel de cartographie. Il est utilisé dans notre cas pour tracer les courbes isopièses (ou les courbes piézométriques), et cela en lui injectant les coordonnées de chaque piézomètre et les niveaux piézométriques.

3.3 Approche hydrochimique

3.3.1 Analyse des paramètres chimiques en laboratoire

L'approche hydrochimique est basée sur la récolte, et l'analyse des résultats obtenus à partir des campagnes d'échantillonnage effectives par l'agence nationale de ressources hydriques (2007-2010) et par le centre de recherche nucléaire d'Alger (2005). Tableaux 2.1, 2 et 3.

- durant les campagnes des paramètres physico-chimique ont été mesure in situ : T^0 , PH, σ , TDS et le TAC

-sur le plan analytique, les échantillons d'eau ont été analysés aux laboratoires respectifs de l'ANRH et le CRNA, des ions majeurs et quelques éléments en traces [Sr, Br, Li]ont été déterminé aussi.

PZ	x	y	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO4	HCO3	NO3
pzB/50m	549350	383600	164,1	62,8	132,9	2,5	513,6	184,8	61,6	75,1
pzB/28,5m	549350	383600	87,5	55,8	124,3	2	222,6	250	87,8	72,2
pzC	548500	382550	70,9	42	63,1	2,6	144,4	147,8	134	45,9
pzE	546125	381450	69,3	34,4	89,3	7,6	127,4	140,8	154	53,6
pzF/32m	549200	384250	152	69,5	181,3	3,6	485,5	190,4	84,7	161,2
pzD/48m	547000	382000	64,9	29,9	60,4	2,1	113,4	115,9	144,8	39,6
pz39	544900	381850	81,5	47,5	89,8	3	128,4	190,4	69,3	158,6
pz51/29m	547800	382250	103,5	74,4	240,3	3,6	323	396,9	177,1	67,6
pz54/15,8m	548850	385050	15,4	21,2	126,7	8,2	177,6	14,6	150,9	21,9
pz54/22,46m	548850	385050	20,2	31,1	136,8	9,4	200,6	24,6	192,5	33,1
pz58/14m	549450	386050	20	27,3	676,5	23,2	1029,3	4,2	95,5	9,5
pz59/33m	548300	384650	450,7	226,6	3632,6	155,5	6945	999,5	147,9	59,8
pz59/19,5m	548300	384650	29,6	57,5	514,4	15,9	935,5	18,9	101,7	25,7
pz59/25,52m	548300	384650	163,6	101	1080,3	9,8	1969,3	446	67,8	36,6
pzF/26,8m	549200	384250	123,3	56,6	143,1	2,6	288	180	100,1	121,9
pz61/19,5m	547650	383750	141,3	63,3	235,5	3,7	474,8	147	110,9	167,3
pz60/23m	548150	383900	52,7	44,8	146,6	3,3	204,2	163,7	123,3	20,4
pz58/25,44m	549450	386050	29,9	35,4	847,3	26,1	1363,2	2,9	94	9,8
pz61/26m	547650	383750	845,4	191,5	1290	5,5	3657,6	758,3	63,2	113,7
pz60/26,83m	548150	383900	55,7	44,9	148,5	2,2	209,3	167,4	126,3	20,6
pzG/28m	548450	383300	71,9	54,5	128,3	8,1	207,2	172,4	107,8	75,2
pzG/36m	548450	383300	107,7	61,5	126,2	7,3	317,6	161,8	86,3	71,5
pz61/40m	547650	383750	796,1	183,3	1554,6	5,8	4015,4	691,5	95,5	113,5
pz58/43m	549450	386050	54,5	67,1	1800,9	41,4	2824,2	3	53,9	20,9
pz60/46m	548150	383900	253,1	87,9	555	4,1	1317,2	298,8	72,4	70
pz48/21,5m	546900	383850	53,5	25,6	155	64,9	313,2	15,8	163,3	13,4
pz48/25,92m	546900	383850	359,5	83,1	318,4	24,7	951,3	313,8	97	121,5
pzD/27,5m	547000	382000	48,8	29,4	63,3	1,6	99,2	117,7	97	14,9
pz50/27,73m	547400	382800	158,8	83	156,9	5,1	408,5	259,5	73,9	75
pz45/29,54m	546850	382600	34,9	47,2	76,6	10,1	83,9	101,1	160,2	79,3
pz45/36m	546850	382600	161,3	66,5	106,1	4,9	442,2	194,8	67,8	120,2
pz48/46m	546900	383850	407,2	152,4	1384	9,5	2964,9	640,6	69,3	101
pz62/26,82m	546150	383250	180,7	61,6	330,3	8,3	545,1	336,4	137,1	100,6

Référence	Cl ⁻	Na ⁺	Mg ⁺⁺	Ca ⁺⁺	SO4 ⁻	NO3 ⁻	K ⁺	HCO3 ⁻	Mg ⁺⁺	Li ⁺	Sr ⁺⁺	F ⁻	Br ⁻	Δ%	TDS(mg/l)
PZ 45	63,7	58,6	46,3	105,7	82,1	57,3	11,4	458,0	46,3	0,02		0,3	1,0	0,1	653
PZ 39	89,2	72,3	24,1	60,9	46,2	3,2	1,8	250,0	24,1	0,03		0,4	0,9	3,7	428
F PZ 38	99,1	81,9	33,0	104,8	167,9	58,5	3,4	221,0	33,0	0,04	0,9	0,4	1,0	3,4	611
PZ A	123,9	93,4	22,5	80,4	59,0	3,6	2,5	256,0	22,5	0,04	0,6	0,4	1,0	5,4	506
PZ 41	139,0	110,9	49,2	126,8	309,3		4,2	315,0	49,2	0,05	2,1	0,4	1,0	0,6	1110
F-PZ A	142,1	108,5	32,1	105,8	159,5	4,1	2,9	299,0	32,1	0,04	0,9	0,4	1,0	1,8	677
PZ 38	146,8	105,7	65,1	144,4	232,8	3,1	3,9	500,0	65,1	0,05	2,0	0,3	1,1	0,2	921
PZ F	156,0	100,4	43,4	121,3	180,4	69,0	2,3	305,0	43,4	0,03	0,9	0,4	1,4	0,7	
PZ G	182,14	114,52	58,39	142,4	172,1	95,27	6,43	399	58,39	0,03	1,3	0,4	1,1	0,8	1907
PZ32	182,9	117,8	33,4	147,9	190,6	197,4	3,0	272,0	33,4	0,02	1,3	0,3	1,1	4,5	
PZ 50	184,9	138,8	36,6	113,8	100,4	30,4	8,0	403,0	36,6	0,03	1,3	0,4	1,1	1,8	
PZ 58	221,2	122,1	28,6	200,3	220,2	160,2	7,4	268,0	28,6	0,02		0,3	1,3	0,1	973
F-PZ 45	221,9	81,3	43,9	136,2	153,1	84,6	1,6	207,0	43,9	0,02	1,1	0,4	1,2	0,7	761
F PZ 58	240,9	155,4	44,3	157,1	169,7	152,7	9,7	315,0	44,3	0,03	1,4	0,3	1,3	1,5	990
PZ-54	256,9	148,7	67,4	156,2	281,3	93,4	2,2	355,0	67,4	0,03	1,7	0,5	1,5	1,4	
PZ E	268,68	183,53	54,07	157,7	254,63	131,2	9	303	54,07	0,03	1,2	0,4	1,4	1,4	1090
PZ 48-1	301,0	120,6	43,7	76,8	70,6	12,1	9,5	140,0	43,7	0,02	2,2	0,5	1,5	1,9	696
PZ 51	302,3	189,0	79,9	174,5	348,0	86,7	1,7	355,0	79,9	0,03	1,6	0,4	1,5	1,2	
PZ B	332,1	103,9	53,3	166,2	193,1	78,1	1,7	234,0	53,3	0,03	1,3	0,4	1,7	3,4	
PZ 62-1	345,6	164,2	43,8	164,5	239,6	96,5	7,8	241,0	43,8	0,03		0,4	1,6	2,8	1080
PZ 53-1	526,5	308,7	44,3	17,7	12,7	10,5	8,9	128,0	44,3	0,03		0,4	2,0	2,2	
PZ 61-1	676,4	239,6	79,6	216,7	228,0	120,9	2,5	267,0	79,6	0,03	1,8	0,4	2,5	3,9	
F-MC	685,8	228,3	80,5	331,9	412,1	109,9	3,6	215,0	80,5	0,03	2,4	0,3	2,6	0,0	1730
PZ 58-1	704,0	457,4	14,5	9,8	3,5	3,0	18,9	75,0	14,5	0,04		0,7	3,5	1,4	1230
PZ 62-2	1868,4	1075,2	114,4	329,7	574,6	112,9	6,7	297,0	114,4	0,05	2,1		5,5	1,0	3490
PZ 58-2	2470,1	1434,0	57,0	53,9	3,1	3,1	37,1	35,0	57,0		1,2	0,4	11,6	0,1	4000
PZ 61-2	2700,9	688,6	217,1	751,7	470,6	139,1	4,8	165,0	217,1		5,0		7,5	3,1	
PZ 48-2	3334,0	1371,8	172,1	569,1	561,8	97,2	7,4	218,0	172,1		3,4		8,5	4,0	5000

PZ 53-2	8318,6	3648,8	426,6	917,0	1121,1	50,9	25,1	260,0	426,6	0,03	0,6		20,9	4,6	
----------------	--------	--------	-------	-------	--------	------	------	-------	-------	------	-----	--	------	-----	--

Nom des échantillons	pH	CE 25°C	Ca	Mg	Na	K	HCO3-	CO3	Cl	SO4	NO2	NO3	TAC
Eau de mer	7.65	44.20	446.80	1615.30	11580.00	400.00	317.2		19887.00	6244.00	0.06	2.60	13.00
PZ 1 à 60m	7.18	1.16	142.77	36.88	56.00	3.00	610		104.00	164.00	0.03	78.05	25.00
PZ 2 à 65m	7.11	1.16	115.08	43.48	69.00	3.00	579.5		133.00	172.00	0.03	48.28	23.75
PZ 36 à 60m	7.79	0.23	13.17	6.50	57.00	3.00	91.5		102.00	13.00	0.02	0.15	3.75
PZ 39(BA) à 50m	6.96	0.95	93.75	21.90	95.00	2.00	671		97.00	86.00	0.03	32.92	27.50
PZ 42 à 60m	6.93	2.03	227.63	41.80	135.00	16.00	732		180.00	436.00		90.60	30.00
PZ 45 à 45m	6.94	2.49	330.00	70.00	177.00	2.00	549		626.00	234.00	0.04	116.61	22.50
PZ 48(BA) à 50m	7.17	6.95	429.45	148.63	1115.00	8.00	768.6		2198.00	649.00	0.02	58.21	31.50
PZ 50(BA) à 32m	6.88	2.35	260.00	80.00	214.00	8.00	854		450.00	338.00	0.04	80.85	35.00
PZ 51(BA) à 40m	7.14	1.89	199.50	63.23	215.00	1.00	1037		247.00	355.00	0.04	79.43	42.50
PZ 54(BA) à 50m	7.10	3.42	285.00	80.00	400.00	9.00	1037		722.00	325.00	0.12	86.45	42.50
PZ 58(BA) à 40m	8.72	7.02	11.36	22.11	1570.00	40.00	183	0.02	2331.00	280.00	0.03	0.00	7.43
PZ 60 à 45m	6.94	6.82	521.48	147.05	862.00	7.00	634.4		2085.00	599.00	0.03	75.78	26.00
PZ 61 (BA) à 50m	6.90	7.58	425.00	104.00	1400.00	4.00	957.7		2240.00	696.00	0.02	111.28	39.25
PZ 62(BA) à 40m	6.96	3.61	261.00	71.00	560.00	5.00	799.1		839.00	499.00	0.04	70.19	32.75
PZ A(BA) à 45m	7.27	0.98	86.47	19.82	122.00	2.00	695.4		128.00	79.00	0.04	0.12	28.50
PZ B(BA) à 55m	7.16	3.26	390.00	84.25	335.00	2.00	610		923.00	232.00	0.05	99.78	25.00
PZ C à 50m	6.92	4.22	403.76	100.50	283.00	5.00	757.62		1005.00	268.00	0.79	39.79	31.05
PZ D(BA) à 55m	6.93	2.18	293.00	65.00	115.00	2.00	488		575.00	138.00	0.04	64.09	20.00
PZ E à 50m	7.13	1.92	206.51	44.15	145.00	30.00	706.99		240.00	248.00	0.04	156.85	28.98
PZ F(BA) à 50m	6.91	3.96	406.00	79.00	380.00	2.00	701.5		1025.00	223.00	0.04	151.49	28.75
PZ G à 50m	7.03	1.30	208.48	66.53	136.00	16.00	884.5		242.00	314.00	0.03	131.39	36.25

Conclusion

L'intrusion marine est un phénomène qu'on peut étudier par plusieurs approches, les plus intéressantes sont l'approche hydrodynamique et l'approche hydrochimique de ce fait le choix de la méthodologie de ce travail c'est porté sur ces deux méthodes et cela a fin de déterminer l'état d'avancement du biseau salé. On se basant sur l'hydrodynamique de la nappe de la Mitidja est on a déterminé des cartes piézométriques a fin de déterminer les fluctuations de la nappe pour une période donnée.

Et pour la détermination de l'origine de salinité des eaux de la nappe quaternaire et de réalisé des carte d'isoteneur na cl et le résidu sec, on a utilisé l'approche chimique.

Introduction

Ce chapitre est consacré à l'interprétation des cartes piézométriques de la baie d'Alger d'une part, et aux analyses physico-chimiques qui comprennent les couples et les faciès chimiques d'autre part. Cette démarche nous permet de déterminer l'origine de la salinité des eaux de la nappe phréatique et de localiser les zones menacées par l'avancement du biseau salé.

4.1. Résultats des analyses chimiques pour toutes les campagnes (2005 - 2007-2010) :

◆ PH :

Le pH des eaux souterraines de la région étudiée pour l'ensemble de la campagne 2010 (**tableaux 3.3**) varient de 6.88 à 8.72. Traduisant ainsi une eau de caractère légèrement basique. Ces valeurs de pH répondent aux normes établies par l'O.M.S. qui exigent un pH compris entre 6.5 à 9.5. (**Tableaux 3.3 campagne 2010**).

◆ Dureté :

Le titre hydrotimétrique des eaux souterraines de la zone étudiée varie de 8 F° à 404 F°. **Compagne 2005**. Et varient de 13 F° à 290 F°, et pour la **compagne 2010** les valeurs sont de 6 F° et 191 F°. Ces valeurs dépassent la norme recommandée par l'O.M.S. Et qui est de 50 F° ; ce qui traduit des eaux dures à très dures de caractères incrustant à cause de la substitution des ions Na^+ par Ca^{++} et Mg^{++} .

◆ Ca^{++} :

Les valeurs des teneurs en Ca^{2+} de notre secteur d'étude varient de 15.4 mg/l à 450.7 mg/l, qui se situent donc dans la fourchette de la norme de l'O.M.S. qui est de 200 mg/l pour une eau potable ; à l'exception de Pz 61/40 m, pz 61/26 m (**tableaux 3.3 campagne 2007**).

Pour la campagne (**Tableau 3.4 Compagne 2005**). Les valeurs de Ca^{2+} varient de 9.8 mg/l à 329 mg/l ; à l'exception de Pz 61-2, pz 48-2, pz 53-2.

Les valeurs de Ca^{2+} (**Tableau 3.3 Compagne 2010**) comprise entre 11.36 mg/l et 429.45 mg/l. à l'exception de pz 60 à 45 m.

Ces concentrations sont probablement dues au lessivage des alluvions et des formations calcaires.

Mg⁺⁺ :

Les concentrations en ion magnésien sont comprises entre 25,6 mg/l et 226 mg/l. (**tableaux 3.3 campagne 2007**).

Pour la campagne **2005**, **tableau 3.4** les valeurs varient entre 14.5 mg/l et 426.6 mg/l.

Les concentrations en ion magnésien sont comprises entre 6.5 mg/l et 148.63 mg/l. **(compagne 2010)**

◆ **Na⁺** :

Les teneurs en sodium sont comprises entre 60.4 mg/l et 3632.6 mg/l.. **(tableaux 3.3 compagne 2007).**

Pour la campagne 2005 **(tableau 3.4)**, les valeurs sont comprises entre 58.6 mg/l et 1434 mg/l.

Pour la campagne 2010, la concentration de Na⁺ varient entre 56 mg/l et 1570 mg/l.

Ces teneurs sont supérieures à celles retenues par l'O.M.S, correspondant à 100 mg/l.

Les valeurs les plus élevées sont concentrées à l'aval de la nappe où elle est en contact avec l'eau de mer. Par conséquent, l'intrusion marine qui a été noté par plusieurs ingénieurs est toujours en cours.

◆ **NO₃⁻** :

Dans le secteur étudié, les teneurs en nitrates varient entre 9.5 mg/l et 167.3 mg/l;(compagne 2007).

Pour la campagne 2005, les teneurs sont comprises 3.1 mg/l et 160.2 mg/l.

Pour la campagne 2010, les teneurs varient entre 2.60 mg/l et 156.85 mg/l.

Ce qui est excessif pour la plupart des points d'eau.

Les teneurs élevées en nitrates proviennent probablement des épandages d'engrais chimiques et organiques, et aussi les effluents industriels du fait que la région est à vocation agricole.

◆ **HCO₃⁻** :

Les teneurs en bicarbonates varient entre 61.6 mg/l et 163.3 mg/l. (compagne 2007). Et varient de 35mg/l à 458.0 mg/l (compagne 2005) et pour la campagne 2010, les tenures sont comprise entre 91.5 mg/l et 884.5 mg/l.

Les teneurs élevées sont observées aussi bien en aval qu'en amont de la plaine. Ces concentrations sont probablement dues au lessivage des terrains marno-calcaire par les eaux d'infiltration.

◆ **SO₄²⁻** :

Les sulfates proviennent généralement de la dissolution du gypse contenu dans les formations argileuses et du lessivage des engrais chimiques à base azotée dans les terrains agricoles.

Les teneurs en sulfates du secteur étudié sont inférieurs à celles retenues par l'O.M.S qui correspondent à 400 mg/l. La forte concentration s'observe et de valeur égale à 999.5

mg/l. (Tableaux 3.3 campagne 2007).

$3 \text{ mg/l} < \text{SO}_4^{2-} < 999.5 \text{ mg/l}$

Pour la **campagne 2005** les valeurs sont comprises entre 3.5mg/l et 1121.1mg/l .la forte valeurs s'observe dans le pz 53-2, et les teneurs varient de 13 mg/l - 696 mg/l dans la campagne 2010, et la forte valeur s'observe dans le pz61 (BA) à 50 m.

◆ **Cl⁻ :**

Les teneurs en chlore des eaux des points échantillonnés sont comprises entre 83.9 mg/l et 3657 mg/l. (Tableaux 3.3 campagne 2007). Et entre 63.7 mg/l et 8318.6 mg/l pour la campagne 2005 et de 97mg/l à 2085 mg/l pour la campagne 2010.

Cette forte concentration en chlore en aval de la zone étudiée confirme qu'il y a effectivement une contamination par les eaux de mer.

4.2. Faciès chimiques

4.2.1. Faciès chimiques sur la baie d'Alger en mai 2005

D'après les analyses de mai 2005, on remarque que la majorité des points d'eau présentent un faciès Chloruré et sulfaté calcique et magnésienne à l'exception des piézomètres Pz 48-2, Pz 53-2, Pz 62-2, Pz 58-2 et F-Pz 58 qui présentent un faciès de type hyper chloruré sodique et cela indique une contamination par les eaux de mer salées.

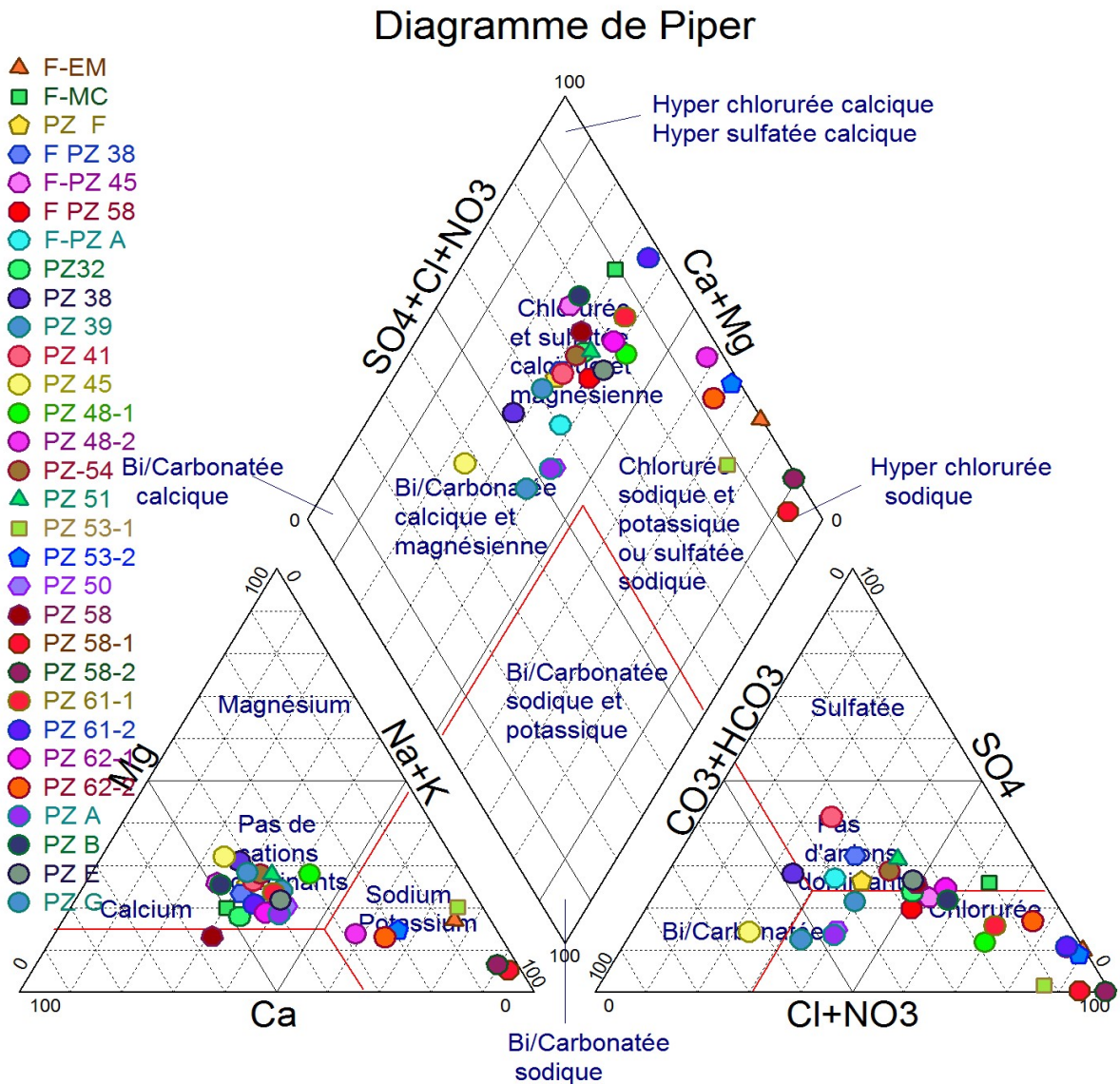


Fig 4.1 Faciès chimiques sur la baie d'Alger en 2005

4.2.2. Faciès chimiques sur la baie d'Alger en 2007

Les analyses effectués en 2007 démontrent que quelques nouveaux ouvrages ont été contaminés par les eaux de mer en l'occurrence Pz B et pz 59.

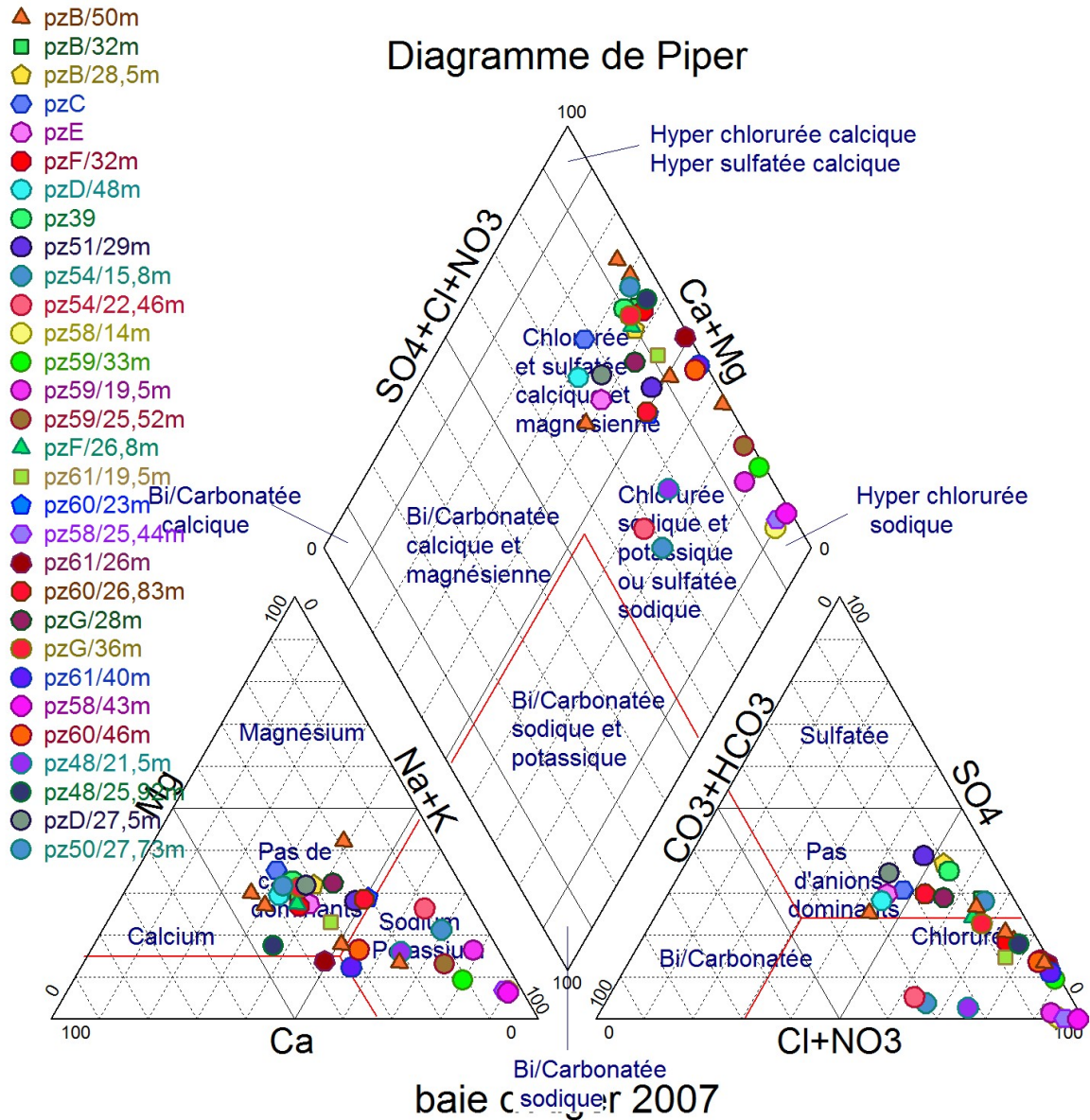


Fig 4.2. Faciès chimiques sur la baie d'Alger en 2007

4.2.3. Faciès chimiques sur la baie d'Alger en 2010

Les analyses effectuées en 2010 indiquent un état très avancé du phénomène d'intrusion marine, vu que toutes les eaux présentent un faciès hyper chloruré sodique à calcique.

Les ouvrages les plus contaminés qui sont : Pz 58, Pz 61 et Pz 62, appartiennent au pôle chloruré sodique, indiquant une origine marine des eaux.

Cependant certains résultats d'analyses ne sont pas crédibles, notamment les teneurs en nitrates de certains ouvrages, anormalement basses (< 10 mg/l) compte tenu de la présence des activités agricoles au niveau de la plaine.

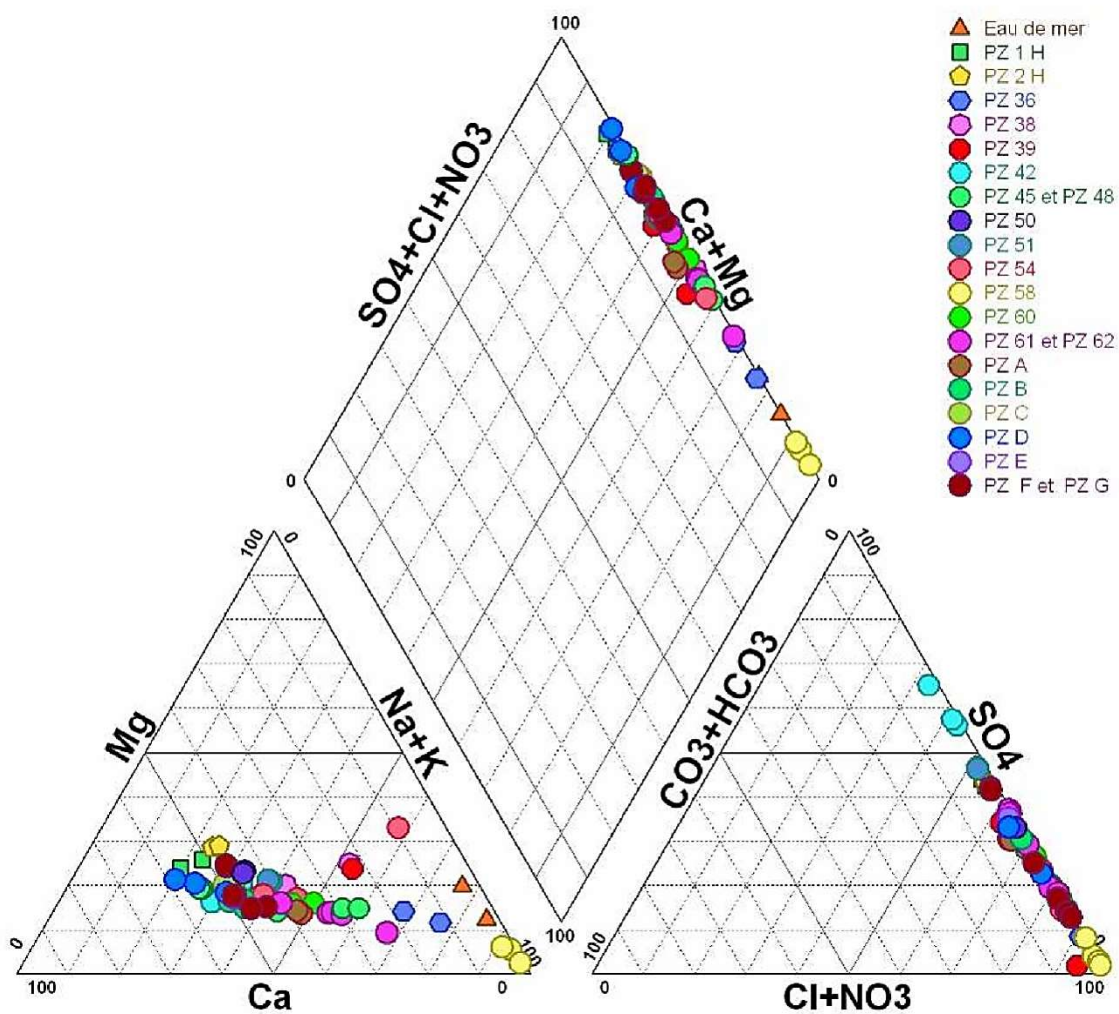


Fig 4.3. Faciès chimiques sur la baie d'Alger en 2010

4.3. Etude de quelques couples chimiques

Un autre moyen d'interprétation utilisé dans cette étude est constituée par les diagrammes ionique dont les concentrations des différents ions analysés en fonction des chlorures sont considérés comme les allogènes par processus redox est des minéraux de faible solubilité.

4.3.1. Diagramme Na-Cl

Ce diagramme (fig.4.4) montre que les points représentatifs se localisent en dessous de la droite de dilution de la halite et se répartissent le long de la droite de mélange « eaux de pluies » ou de l'aquifère quaternaire avec l'eau d' mer (mélange binaire).

4.3.2. Diagramme Br-Cl

Ce diagramme (fig.4.5) montre que les points se répartissent le long de la droite de dilution de l'eau d' mer, et confirment la contamination par l'eau de mer, notamment au niveau des piézomètres Pz 58, 48 et 61.

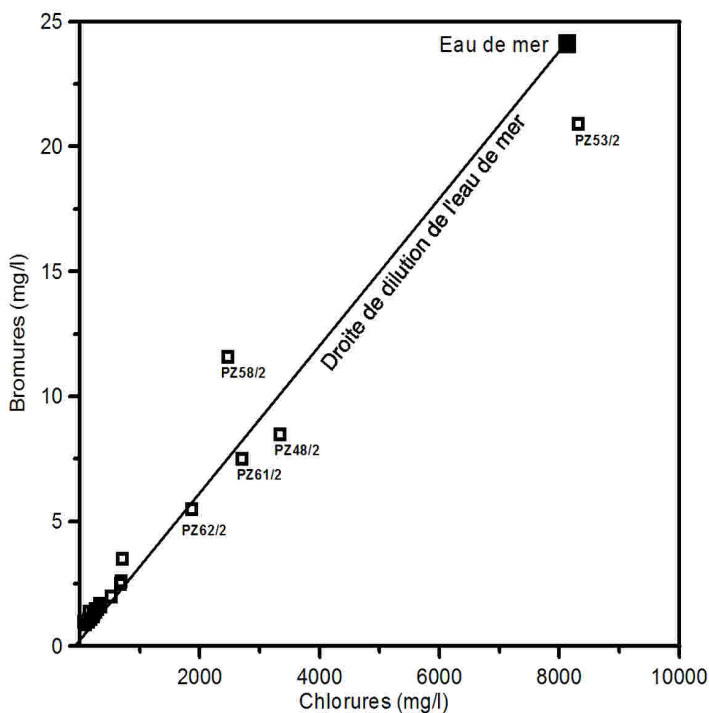


Fig 4.4. Diagramme Na-Br 2005

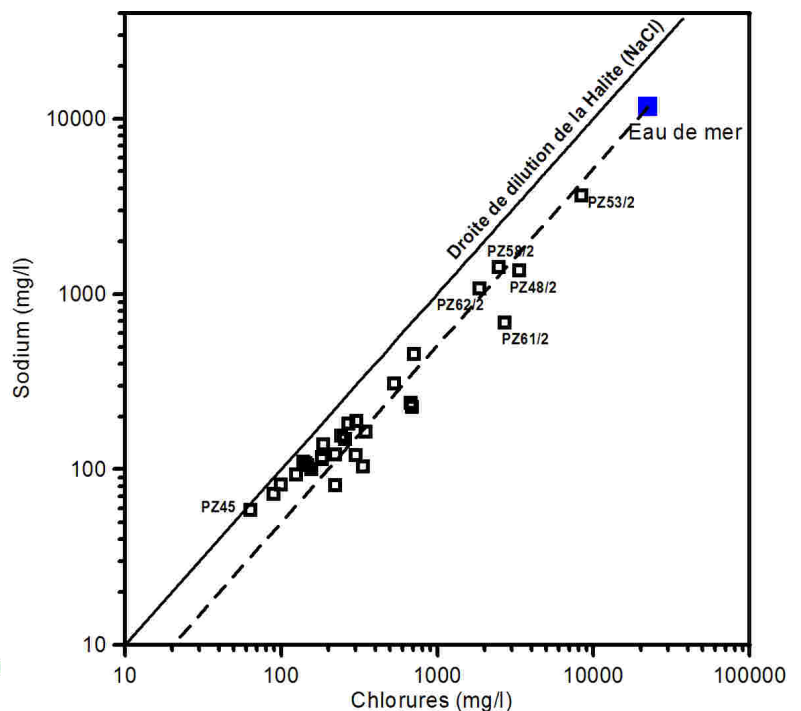


Fig 4.5. Diagramme Na-Cl 2005

4.3.3. Diagramme NO₃-Cl

Le diagramme NO₃-Cl (fig.4.6) montre que pour les campagnes (2007 et 2010), deux évolutions sont visibles :

- Augmentation des nitrates pour des teneurs en chlorures constantes, cela traduit que les points d'eau concerné ne sont pas touchés par l'arrivée de l'eau de mer riche en chlorures.
- Augmentation des tenures en chlorures avec des concentrations en nitrate constantes, cela représente les points les plus touchées par l'intrusion .

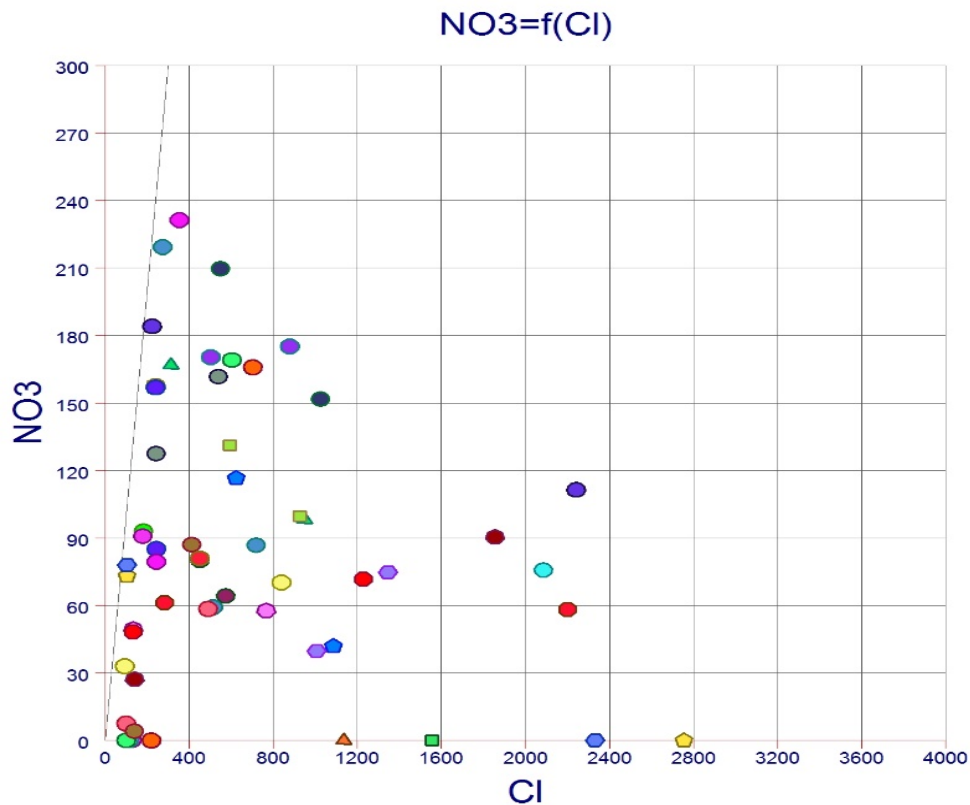


Fig 4.6 Diagramme NO₃-Cl 2010

4.3.4. Diagramme Ca-Cl

Le diagramme Ca-Cl (**fig 4.7**) fait ressortir aussi deux groupes

- Enrichissement en calcium pour les points non touchés par les eaux de mer jusqu'à environ 240 mg/l.
- Enrichissement en Cl pour les points les plus touchées.

4.3.5. Rapport Mg/Ca

Le rapport Mg/Ca (**fig 4.8**) fait ressortir la même évolution observée dans l'étude des couples. Les points non touchés par l'intrusion présentent un rapport inférieur à 1. Ceux caractérisés par un enrichissement en magnésium (rapport supérieur à 1) sont dus essentiellement aux réactions d'échange ionique, caractéristiques des mouvements de mélange eaux douce / eaux de mer.

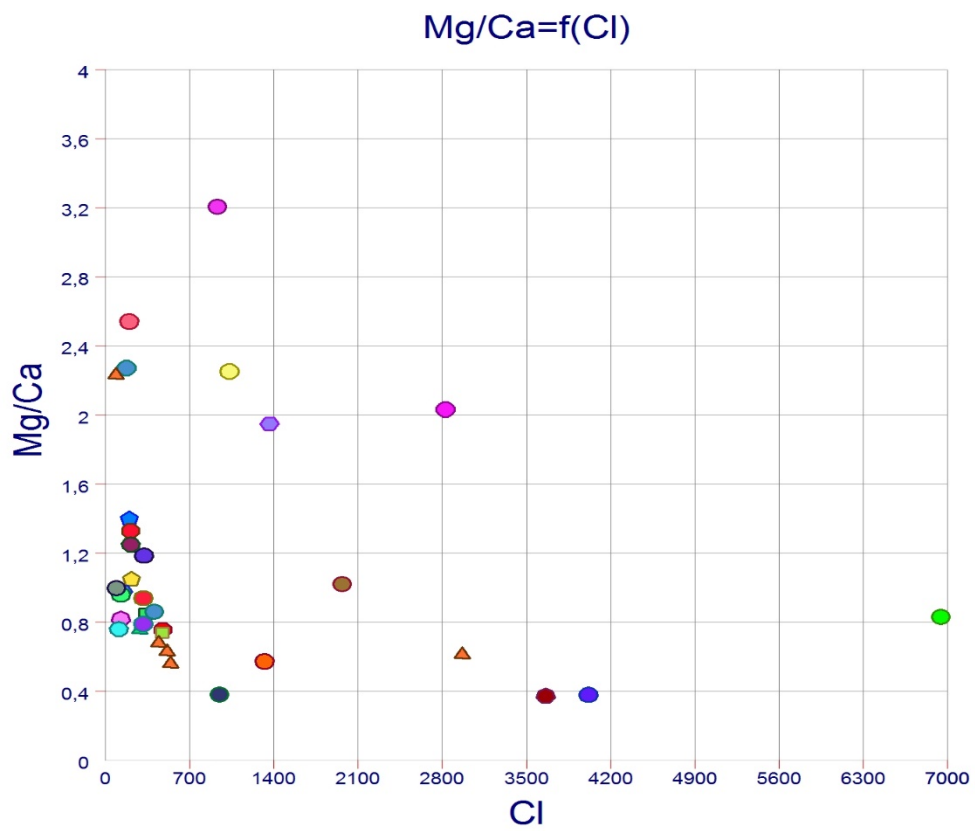
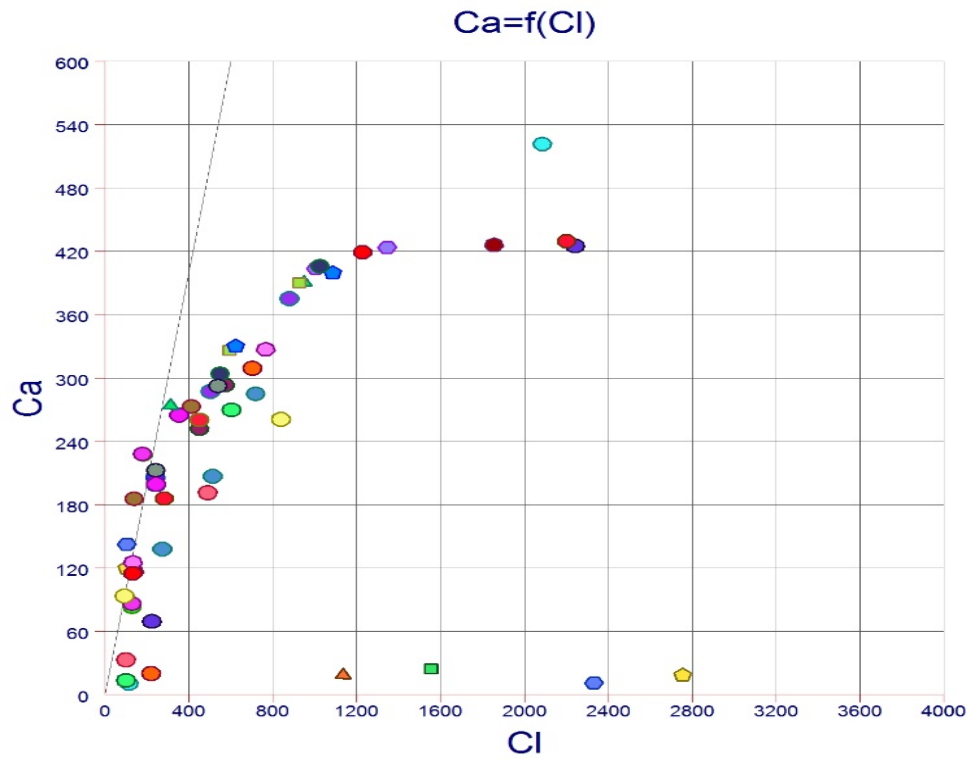


Fig 4.7 Diagramme NO₃-Cl 2010

Fig 4.8 Diagramme NO₃-Cl 2010

4.4. L'indice de saturation

Le calcul des indices de saturation (Is) a été effectué, avec le logiciel DIAGRAMMES de laboratoire d'Avignon, à partir des données de la campagne de 2005, 2007 et 2010. Ces indices de saturation sont indicatifs de l'état d'équilibre ou de déséquilibre existant entre l'eau et les principaux minéraux présents ou potentiellement présents dans l'aquifère.

Le calcul de l'indice de saturation des minéraux dissous dans l'eau a été mené en utilisant la loi de Debye et Hückel (1923).

$$IS = \frac{\log PAI}{\log ks}$$

Avec

- PAI : produit d'activité ionique ;
- Ks : constante d'équilibre.

Lorsque :

- IS > 0 l'échantillon est sursaturé vis-à-vis du minéral (reprécipitation possible du minéral, sous réserve de cinétique) ;
- IS < 0 l'échantillon est sous-saturé (eau agressive si le minéral est présent) ;
- IS = 0 l'échantillon est à saturation (en équilibre). Cette fourchette de saturation tient en compte des éventuelles erreurs sur les mesures du pH qui se percutent que les calculs d'IS.

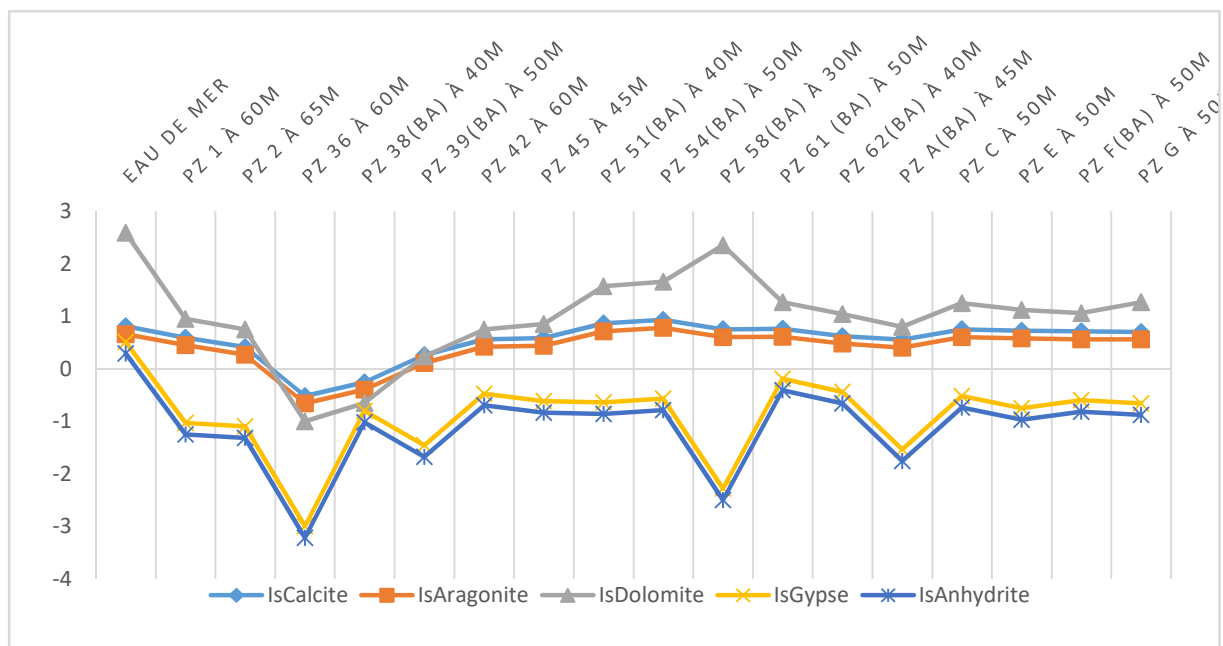


Fig 4.9. Variation de l'indice de saturation des minéraux des eaux de la nappe Mitidja Est 2010

Sur la figure 4.9 sont reportées les variations des indices des saturations par rapport à plusieurs minéraux (compagnes 2010), on constate que les eaux sont en équilibre chimique par rapport à la calcite et l'aragonite et la dolomite et sont sous saturé par rapport à la anhydrite et le gypse.

Ces évolutions s'expliquent par la solubilité de ces minéraux.

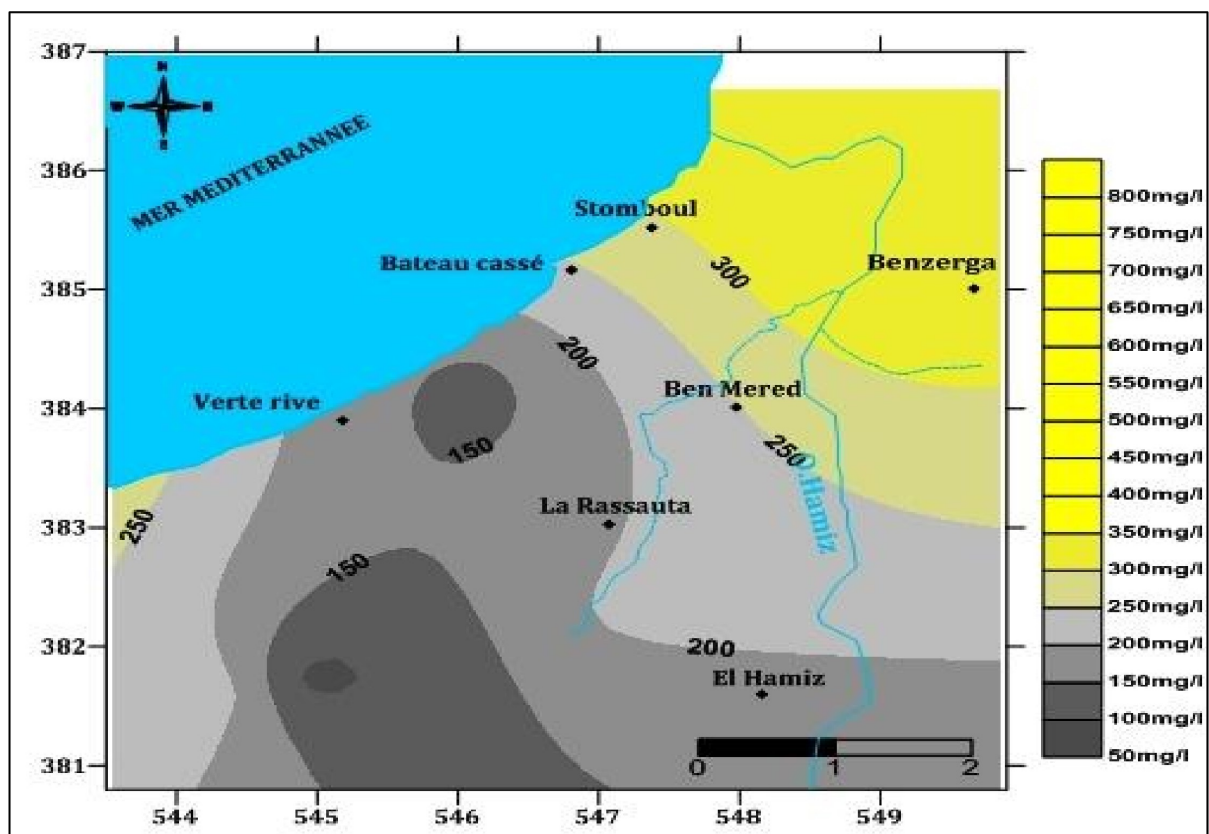
4.5. Lescarte d'iso teneures en éléments chimiques

4.5.1. Cartes d'iso teneures en (Na et Cl, 1985)

Les teneurs en chlorures relativement élevées dans la zone située entre Ben Zerga et le Bateau cassé et aussi au niveau de Bordj –El kiffane .

Dans les zone internes (Bab Ezzouar ,Dar El Beida et l'Hamiz).les teneurs en chlore sont faible (50mg/l-200mg/l).

D'après (Fig.4.10), On observe un resserrement des courbes d'iso concentration en chlorures marquant le passage des faibles ou fortes concentrations. Ces fortes concentrations sont liées spatialement à un appel restreint des eaux de mer. Les teneurs en sodium sont élevées dans la zone située entre Bateau cassé et Ben Zerga et au niveau de Bordj- El-Kiffan, et



ailleurs ces teneurs sont faiblement réparties.(fig 4.11)

Fig.4.10: Cartes d'iso teneures en Cl⁻ (1985)

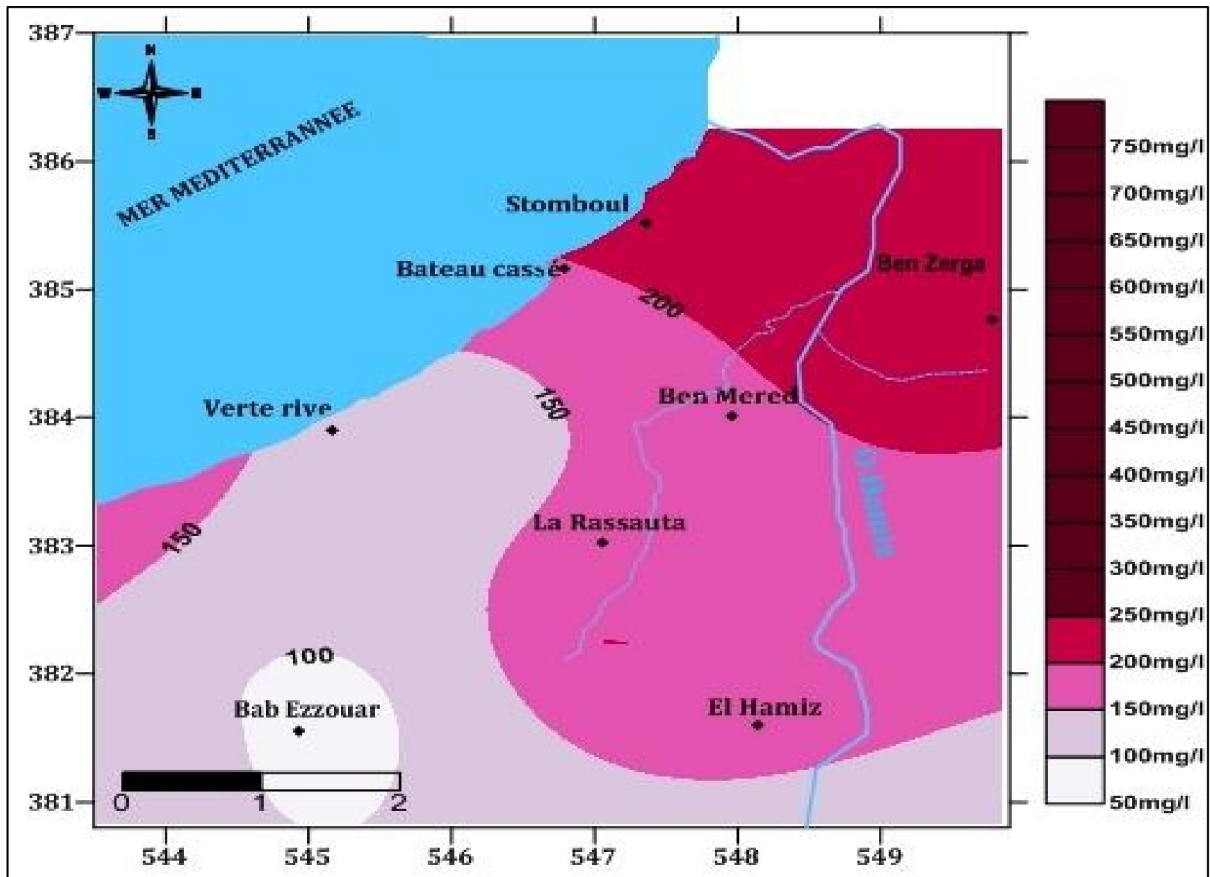


Fig.4.11 : Cartes d'iso teneures en Na⁺ (1985)

4.5.2. Cartes d'iso teneures en Cl (2005)

D'après la fig 4.6 les teneurs en Cl ont doublé en 2005 par rapport à les teneurs enregistrées en 1985.L'avancée du biseau salé au niveau des zones de Ben Zerga et Bateau cassé se fait via les zones préférentielles. Cette avancée est dû essentiellement à l'accroissement des

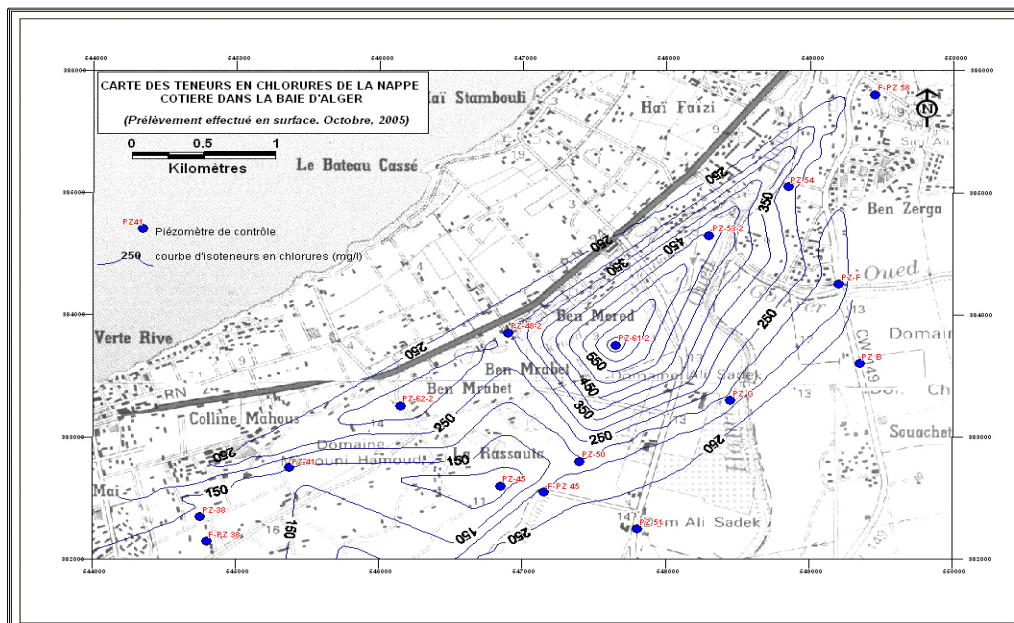


Fig. 4.12 : Cartes d'iso teneures

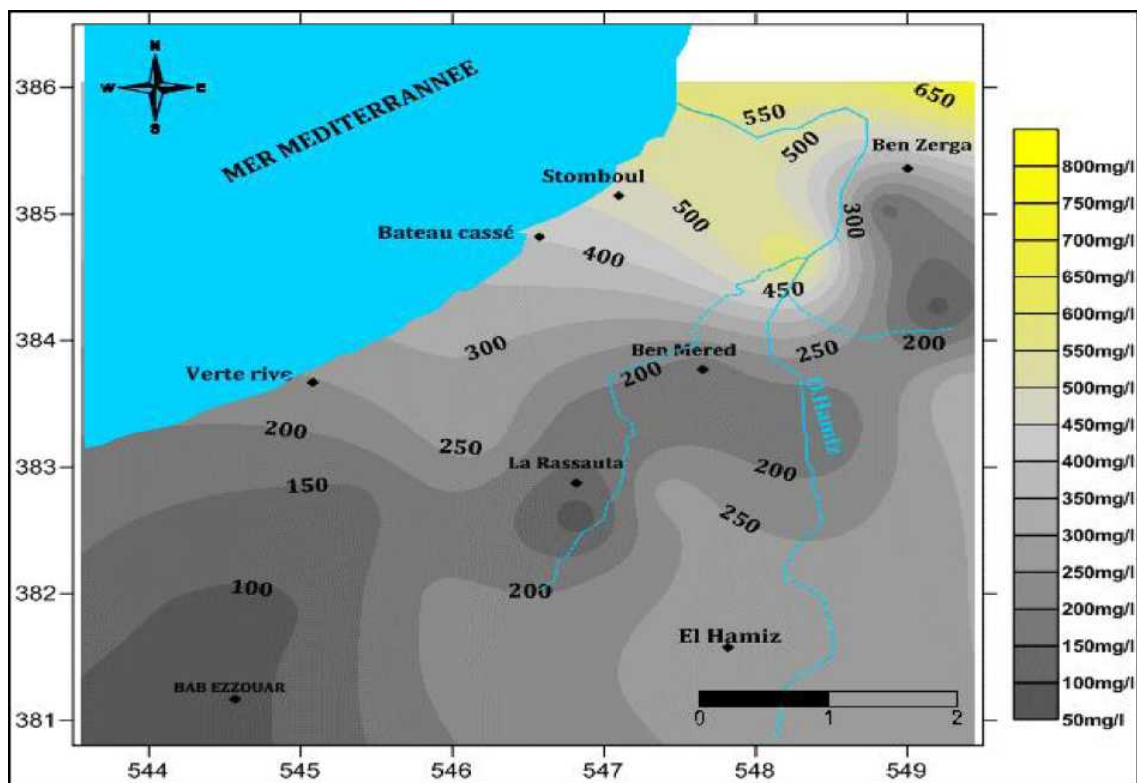
en Cl (2005)

Concentrations du Cl traduit par le resserrement des courbes d'iso teneurs.

En ce qui concerne le champ de captage d'El Hamiz, l'augmentation des teneurs en Cl s'explique par le pompage excessif exercé au niveau de cette région.

4.5.3. Cartes d'iso teneures en Na et Cl (2010)

Dans la zone Ben Zerga, Bateau cassé, les courbes d'iso teneures se resserrent traduisant l'accroissement des concentrations. Cet accroissement n'est qu'une indication de l'avancée des eaux salées vers l'intérieur par le biais des zones préférentielles. Ce qui concerne le champ de captage d'El Hamiz les teneurs ont augmentés à cause du pompage excessifs. Donc on peut dire qu'il existe une équation proportionnelle entre le pompage des eaux souterraines et l'avancée des eaux de mer, dans laquelle le pompage joue le rôle de moteur



favorable à l'intrusion marine. (Fig.4.13 et 4.14)

Fig.4.13 : Carte d'iso teneures en Cl (2010)

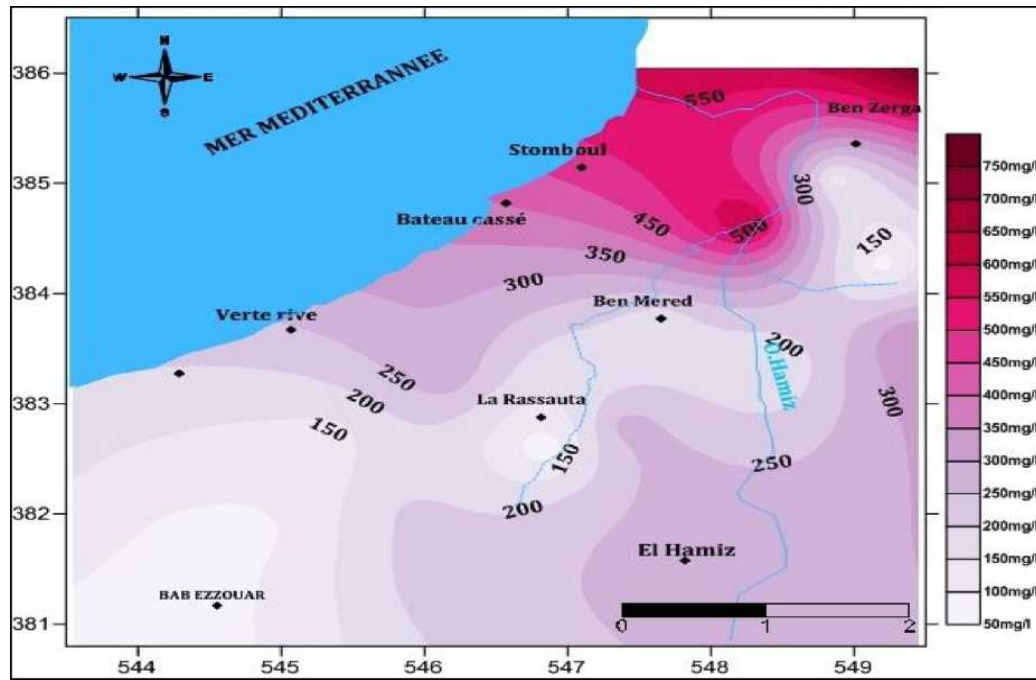


Fig.4.14 : Carte d'iso teneures en Na^+ (2010)

4.5.4. Résidu-Sec :

Le résidu-sec en 1985 fluctue entre 150 et 1350 mg/l. La carte ci-dessous montre bien l'augmentation du résidu sec des eaux à l'ouest dans la zone comprise entre la Rassauta, verte rive jusqu'à Bordj el Kiffan où on remarque que les valeurs dépassent 1000 mg/l. Ces concentrations ont fortement augmenté en 2010 surtout au niveau du champ de captage du Hamiz et dans une direction Est-ouest en allant de la Rive verte vers Bordj El Bahri et Ben

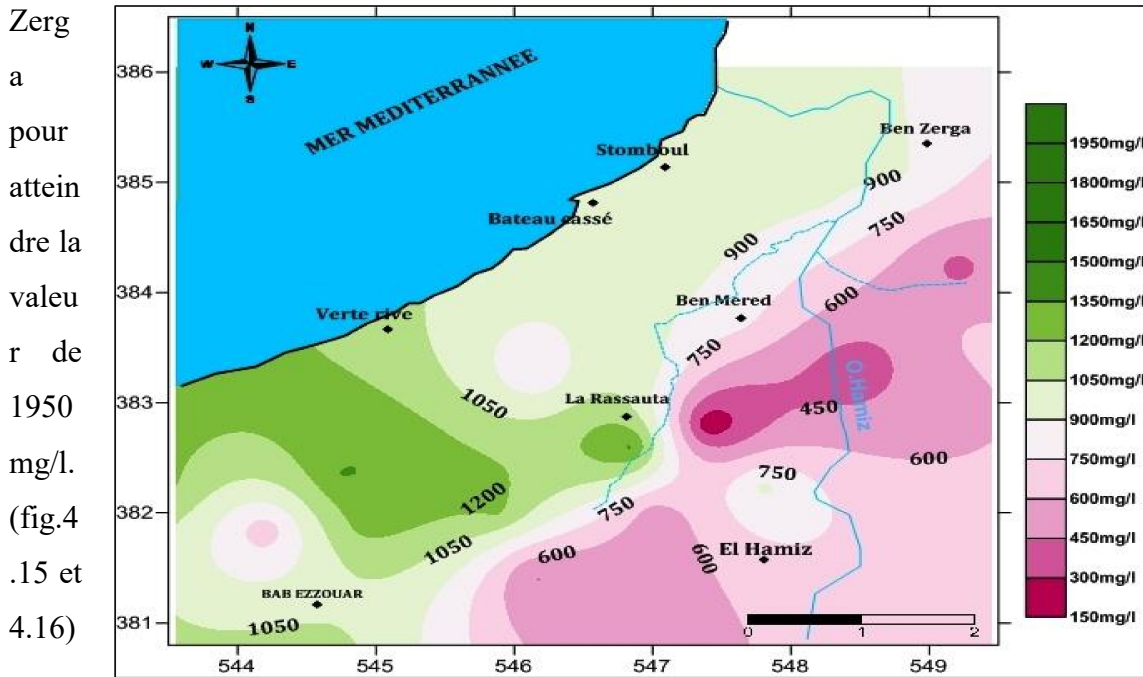
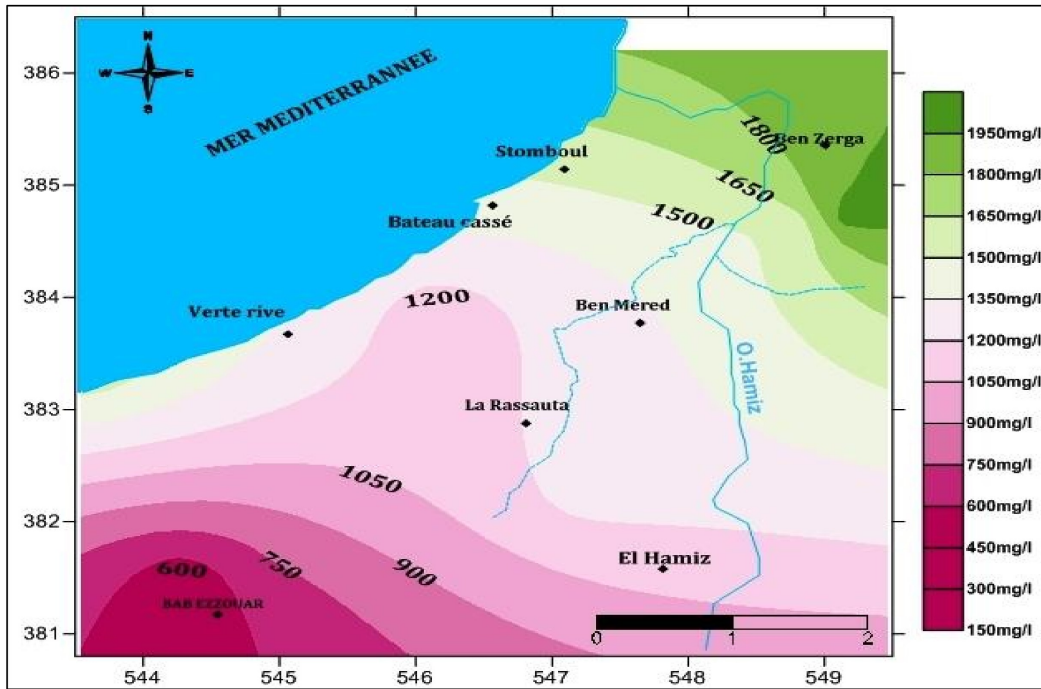


Fig.4.15 carte du résidu sec (Avril, 1985)

Fig.4
.16ca
rté du
résid
u sec
(Avril
,
2010)
4.6
Pré
sent
atio



n des résultats piézométriques

Sachant que la piézométrie est un élément fondamental dans l'étude de l'évolution du comportement Hydrodynamique et hydro chimique de la nappe, nous avons choisi de faire l'historique piézométrique de la nappe étudiée sur la période 1981-2011

4.6.1 Cartepiézométrique de la Mitidja Est (1981)

La carte piézométrique réalisée en Avril 1981 (Fig.4.17), montre que l'écoulement de la nappe se fait de l'Atlas Blidéen vers la mer.

Les fluctuations du niveau piézométrique sont quasiment nulles au bord de la côte atteignant 70 mètres dans les piémonts de l'Atlas Blidéen.

Dans la partie sud on remarque que les courbes hydro isohypses sont parallèles à l'Atlas, indiquant une zone de contact hydraulique (alimentation par les bordures) et traduisant ainsi un écoulement relativement uniforme. On note aussi que la vitesse d'écoulement est élevée due à une pente croissante de la surface piézométrique causée par le resserrement des courbes hydroisohypses,

Le long d'oued el Hamiz les courbes se divergent, ce qui confirme l'alimentation de la nappe par l'oued.

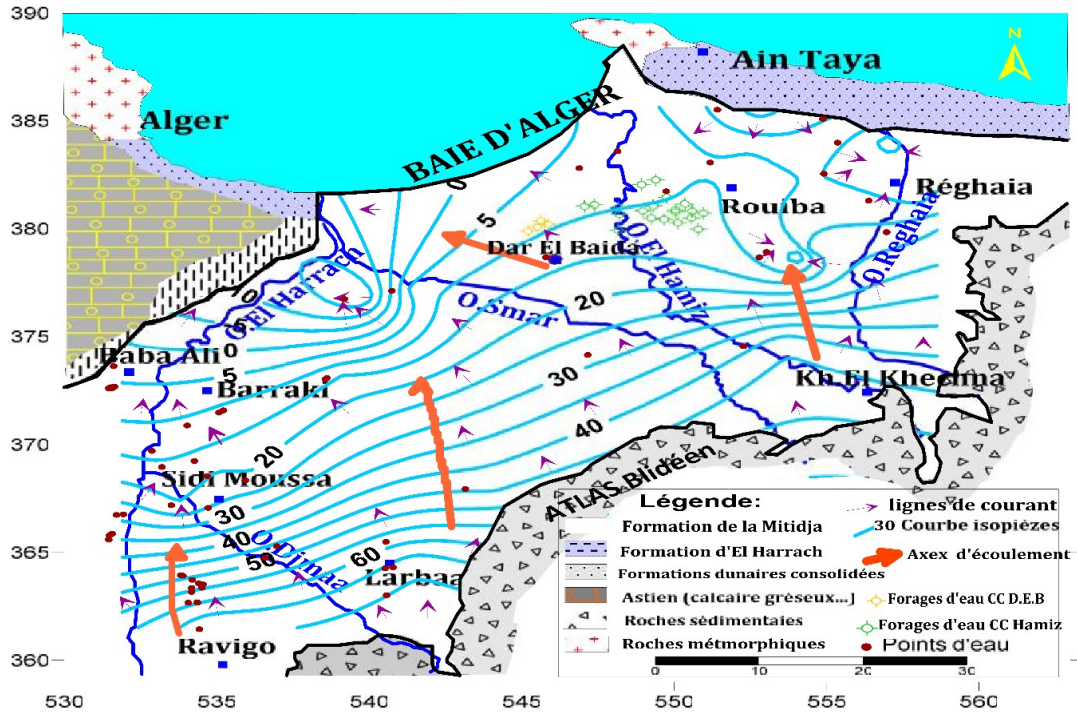
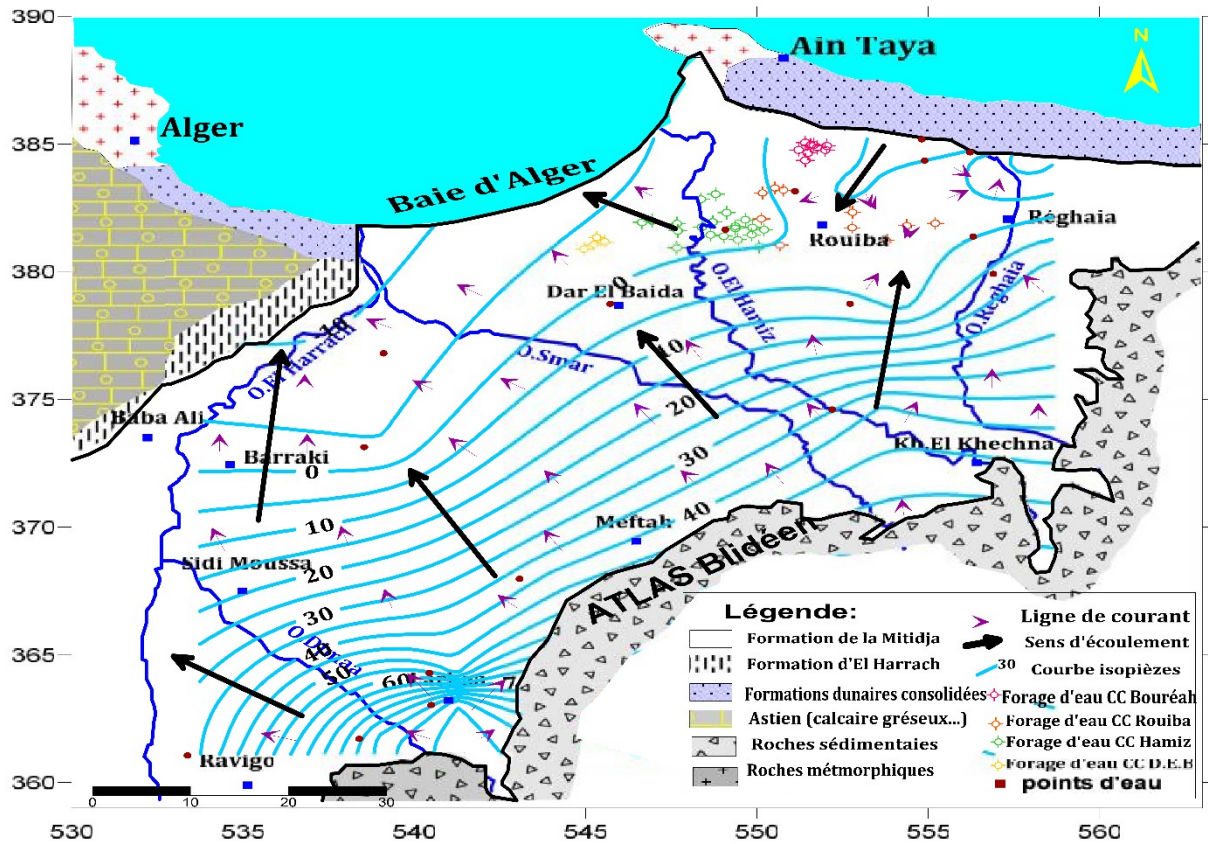


Fig4.17 : Carte piézométrique de la Mitidja orientale (Avril 1981)

4.6.2 Carte piézométrique de la Mitidja Est (Nov. 1991)

- On remarque une baisse du niveau piézométrique (Fig.4.18) par rapport à la situation de 1981.
- Un écoulement des eaux de la nappe du sud vers le nord, se dirige vers le seul exutoire souterrain (la mer) et aussi vers les champs de captage de Baraki et Dar-El-Beida.
- Une crête piézométrique se dessine à l'Est de l'oued Réghaïa, là où le substratum résistant remonte.
- Une baisse du niveau piézométrique due à l'influence des pompages excessifs dont les charges hydrauliques se situent entre - 5m et 0m se remarque au niveau de la zone Est et ouest où la dépression piézométrique témoigne de l'influence du champ de captage de Baraki sur la nappe souterraine. Ceci s'identifie par la convergence des courbes piézométriques vers les grands champs captant de Baraki.
- L'augmentation de la pente de la nappe se définit par le resserrement des courbes isopièzes en allant vers la bordure Sud (piémont de l'Atlas Blidéen) illustrant des vitesses de circulation des eaux souterraines élevées.

➤ On remarque aussi que les courbes isohypses divergent le long des oueds Harrach, et



Réghaïa indiquant l'alimentation de la nappe quaternaire par infiltration par ces oueds.

Fig.4.18 : Carte piézométrique de la Mitidja Est (Nov.1991)

4.6.3 Carte piézométrique de la Mitidja Est (1996)

La carte réalisée en 1996 (Fig.4.19) montre une baisse importante du niveau piézométrique qui varie de -5m (au niveau du lieu actuel du champ de captage du Hamiz) à -11m près du littoral, toujours avec le même sens d'écoulement SW-NE en direction de la mer indiquant ainsi l'avancée continue de l'invasion marine vers les terres internes.

➤ Nous remarquons l'existence d'une importante dépression piézométrique autour du champ de captage de Dar El Beida et Hamiz avec des charges hydrauliques négatives de l'ordre de -5m, témoignant de leur influence sur les eaux souterraines

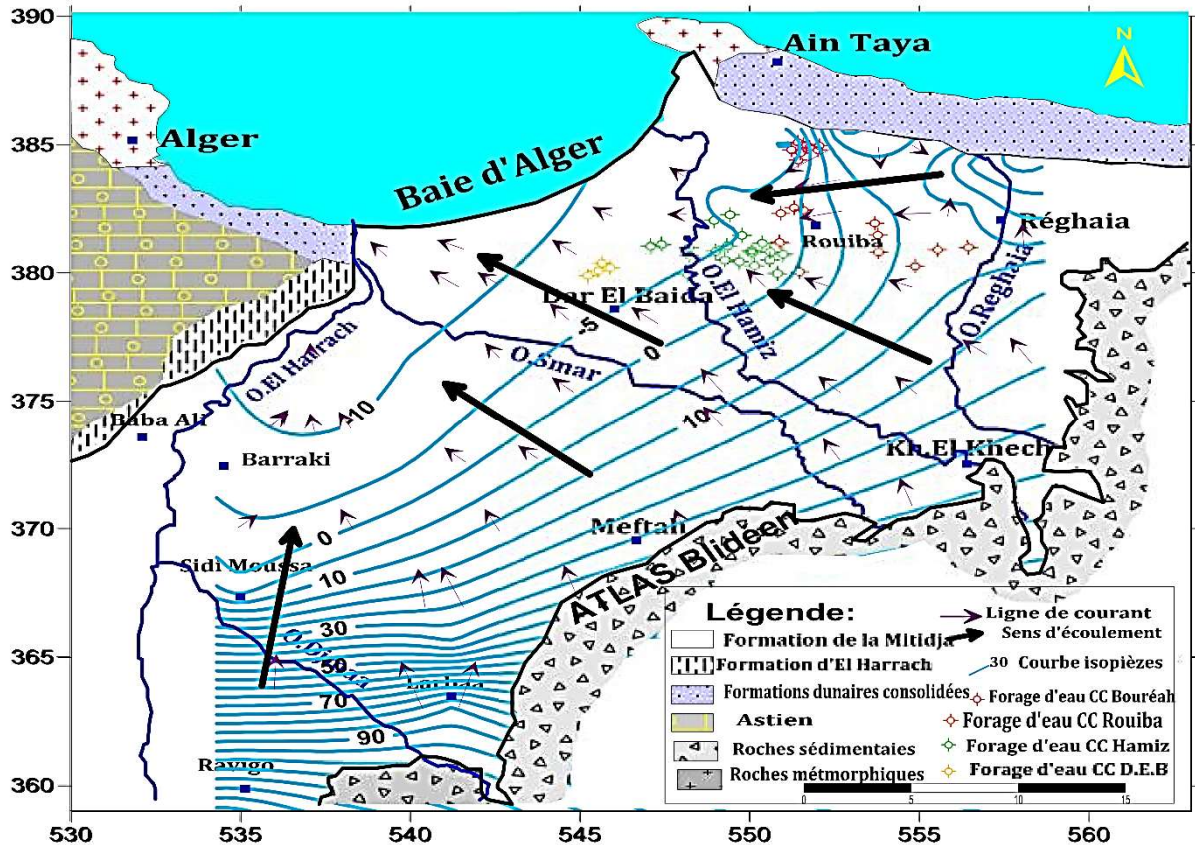


Fig4.19 Carte piézométrique de la Baie d'Alger mai (1996)

4.6.4 Carte piézométrique de la Mitidja Est (Mars 2000)

- les mesures effectuées en 2000 (Fig. 4.20), indique une légère amélioration du niveau piézométrique, plus particulièrement dans les zones non influencées. Cela peut être expliqué par les apports pluviométriques qu'a connus la région durant la période 98-99.
- Le sens d'écoulement se fait toujours du sud vers le nord. Dans la partie sud on note un resserrement
- Des courbes isopièzes traduisant la vitesse de circulation élevée des eaux souterraines, contrairement au nord où les courbes isopièzes sont espacées.
- Au niveau de la baie d'Alger, les courbes isopièzes négatives expliquent le déplacement du front Eau douce / eau salée de la mer vers le continent. A noter, le niveau piézométrique a atteint une cote de - 5 m au-dessous du niveau de la mer au champ de captage du Hamiz,
- Nous remarquons que les valeurs négatives en dessous du niveau de référence 0 de la mer s'étalent jusqu'à plus de 3km à l'intérieur du continent.
- L'écoulement se fait du nord vers le sud, La pente est de l'ordre de 0.01%.

- Il faut dire que la surexploitation de la nappe par les forages des champs de captage de la SEAAL et ceux destinés à l'industrie et à l'agriculture (forages licites et illicites) ont fait que Les côtes absolues de l'eau soient négatives.

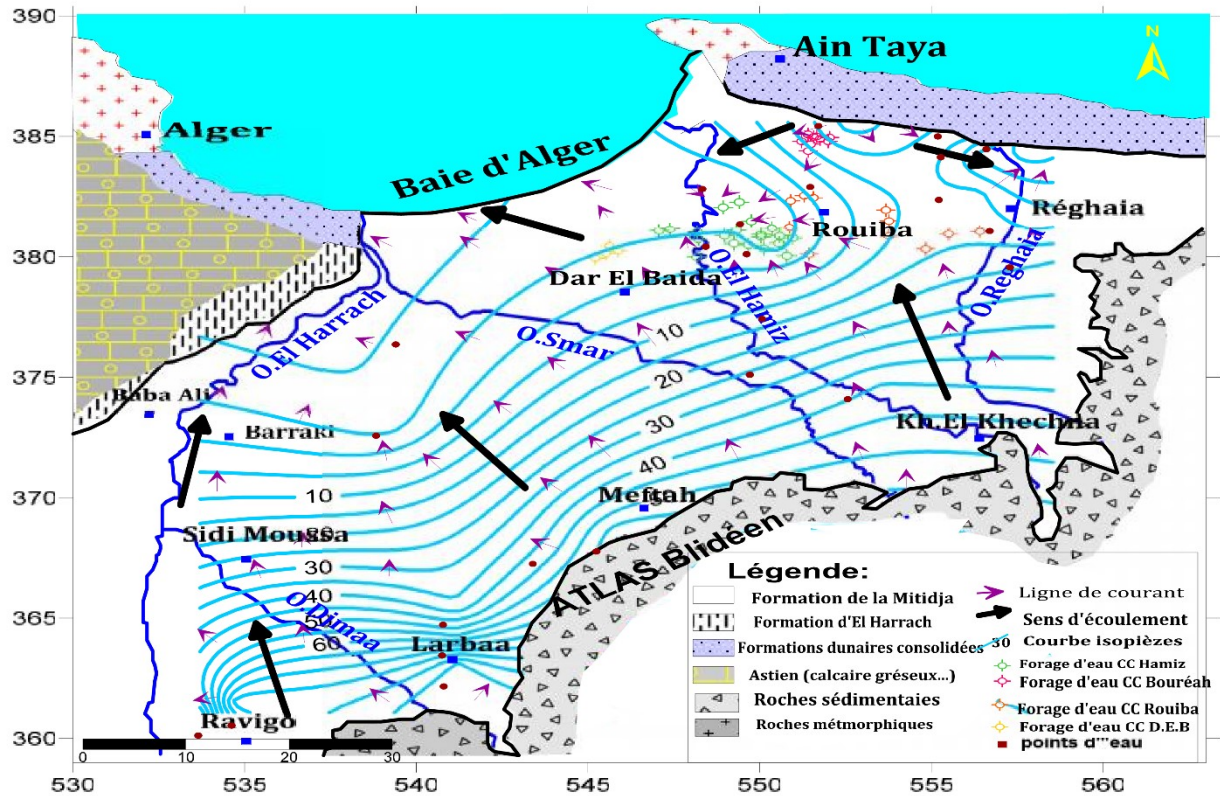


Fig. 4.20. Carte piézométrique de la Mitidja orientale (2000)

4.6.5 Carte piézométrique de la Baie d'Alger (Mars 2005)

- la carte piézométrique de la baie d'Alger réalisée en 2005, indique que le sens d'écoulement global se dirige du nord vers le sud, ce qui veut dire que les eaux douces sont contaminées par les eaux salées.
- le pompage important exercé au niveau du champ de captage du Hamiz a fait qu'une zone d'appelle se dessine au nord et trace une courbe en isovaleur de -8m.
- le grand espace existant entre les courbes piézométriques implique que la pression hydraulique et la vitesse d'écoulement soient faibles, par contre les valeurs de perméabilité sont élevées. (Fig 4.21)

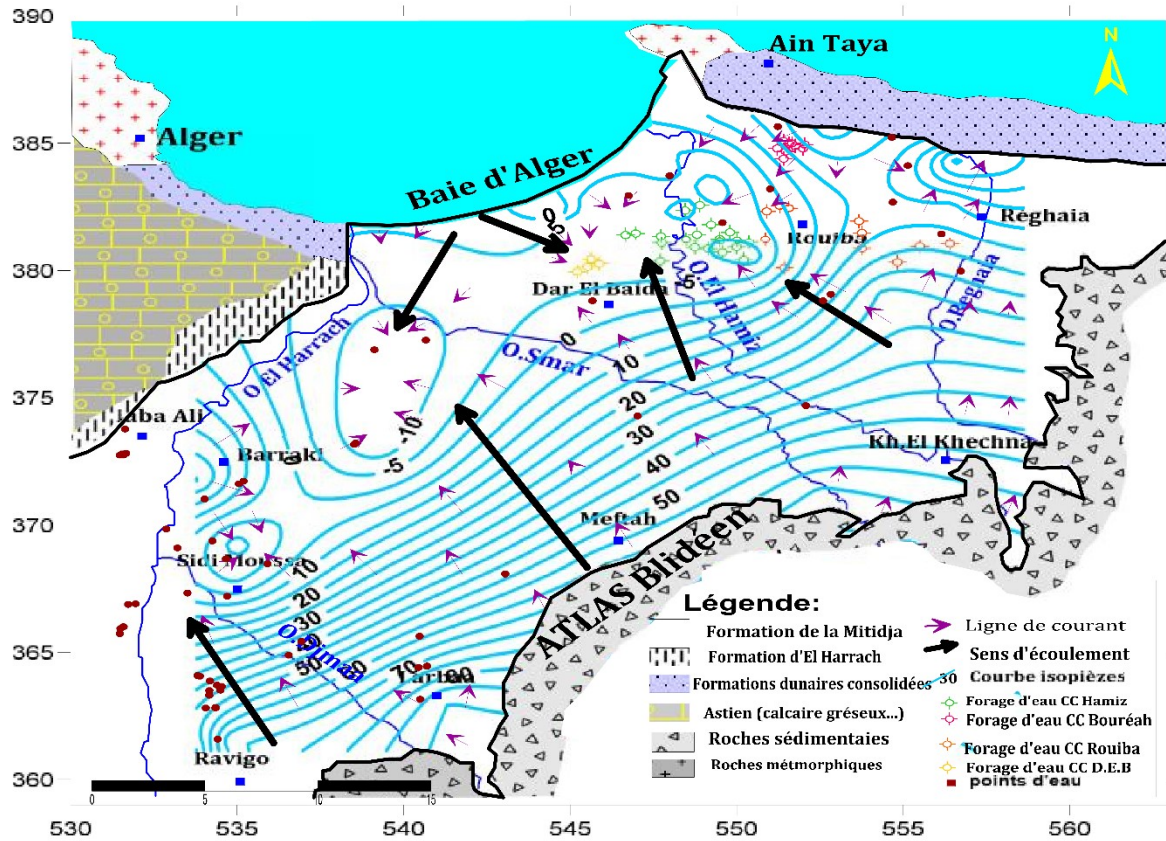


Fig4. 21. Carte piézométrique de la Mitidja orientale (Mars 2005)

4.6.6 Carte piézométrique de la Mitidja (Avril 2010)

Nous voyons à partir de la carte piézométrique de l'année 2010 (Fig.4.22), que le niveau piézométrique varie de :

- 95m au pied de l'Atlas Blidéen
- 0m au niveau de Baraki,
- 10m au niveau du Hamiz, Dar el Beida .
- -5m au niveau de Rouiba et Bouréah.

Le niveau piézométrique continue à diminuer au niveau des champs de captage de Baraki et Haouch Félit à l'ouest et du Hamiz, Dar el Beida, Bouréah et Rouiba à l'Est favorisant ainsi la propagation du phénomène d'intrusion marine.

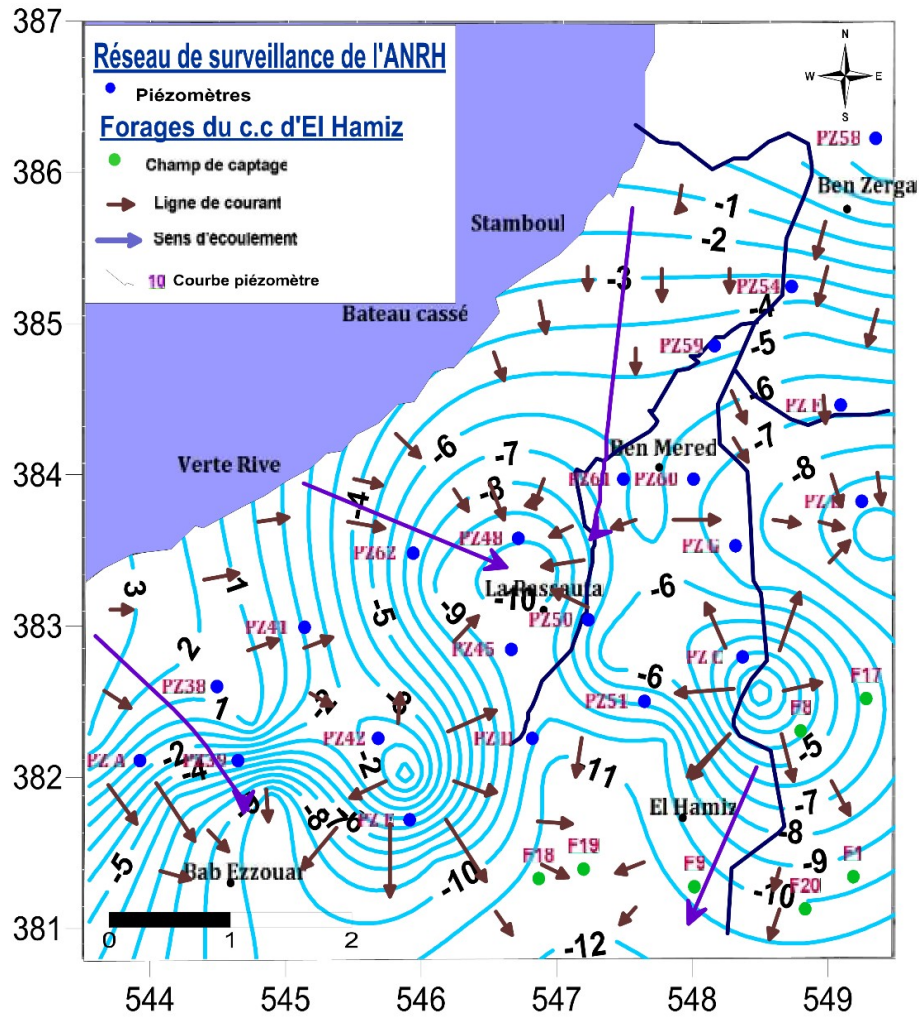


Fig.4.22 : Carte piézométrique de la de la Baie d'Alger (Avril 2010)

4.6.7 Carte piézométrique de la Mitidja Est 2011

Malgré la pluviométrie importante qu'a connue la région d'étude en 2011 (Fig.4.23), le niveau piézométrique reste toujours inférieur à celui de la mer impliquant la persistance du phénomène d'intrusion marine.

- On remarque toujours l'existence d'un dôme piézométrique au niveau de la Rassauta lié à la présence de cordons dunaires.
- La dépression du champ de captage du Hamiz est bien tracée par la courbe en isovaleur -11 m faisant un appel inévitable à l'intrusion marine.

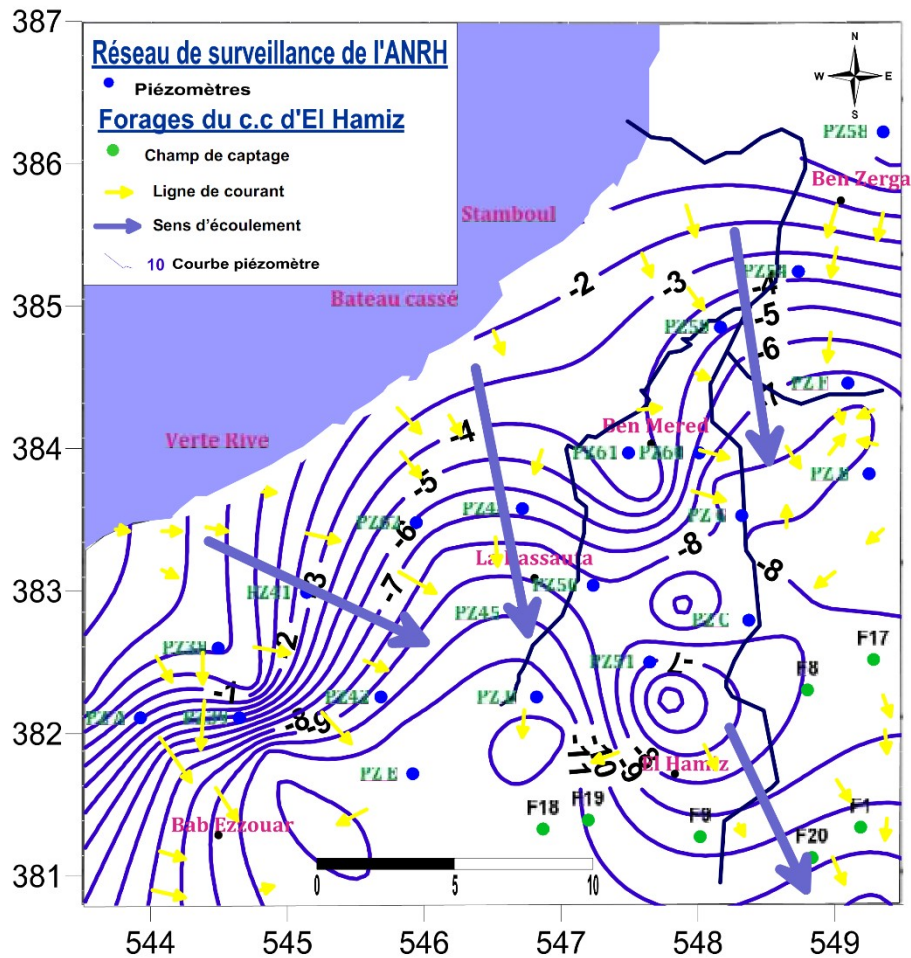


Fig.4.23. Carte piézométrique de la Baie d'Alger mai(2011)

En 2011, un déséquilibre hydrodynamique a engendré un avancement du biseau salé qui a impliqué le phénomène d'intrusion marine, causé par une baisse considérable du niveau piézométrique.

On remarque l'existence d'un dôme piézométrique au niveau de la Rassauta, lié à la présence de cordons dunaires.

- La dépression du champ de captage du Hamiz, est bien tracée par la courbe en iso valeur -11 m faisant un appel non évitable à l'intrusion saline.

4.7 Localisation du biseau salé

D'après les résultats obtenus de la méthode hydrochimique et la méthode hydrodynamique nous avons pu localiser la zone atteinte par le phénomène d'intrusion marine (Figure 4.24).

- La zone contaminée est à 1.2 à 1.3 km de la cote.
- Au niveau de la zone de transition, certains endroits sont envahis par les eaux salées.
- Zone caractérisée par un pizométré négatif.

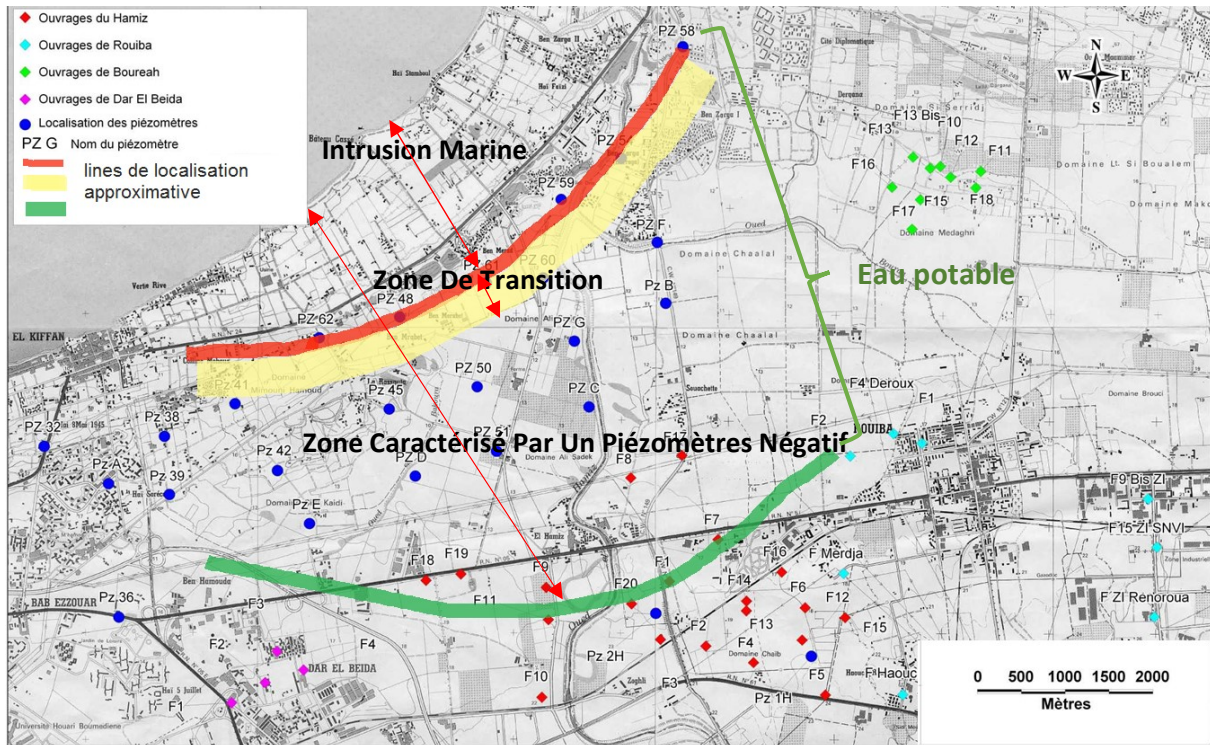


Fig 4.23. Localisation du biseau salé

Conclusion générale

L'objectif de la présente étude était d'aborder le phénomène d'intrusion marine par l'analyse des éléments majeurs et quelques traces, pour identifier les processus et les réactions chimiques qui gouvernent la salinisation et déterminent la limite et l'extension du biseau salé et donc l'intrusion marine.

Pour se faire nous avons récupéré les données des campagnes d'échantillonnages des années 2005, 2007 et 2010 au niveau de l'ANRH et la CRNA. Et en utilisant la méthode hydrochimique qui comprend les faciès chimiques, l'indice de saturation, l'étude des couples et les cartes isotoneurs (Na, Cl, résidu sec et des rapports Na/Cl, Mg/Ca et SO_4/Cl) ainsi que la méthode hydrodynamique qui se base sur l'analyse des cartes piézométriques réalisée à l'aide du logiciel **surfer**, nous avons déterminé l'état d'avancement du phénomène d'intrusion marine au niveau de la baie d'Alger.

Les résultats obtenus à partir de la méthode hydrochimique montrent que le faciès hyper chloruré sodique caractérise les points les plus proches de la côte, il faut dire aussi que les valeurs du Sodium et du chlore sont plus concentrées au nord et au Nord-Ouest de la baie d'Alger, elles atteignent respectivement 450 et 750 mg/l. L'étude des couples de Na-Cl et Br-Cl confirme la contamination de la nappe quaternaire par l'eau de mer.

Concernant la méthode hydrodynamique les résultats montrent le changement du sens d'écoulement en direction de la mer depuis le champ captant du Hamiz, dont le niveau piézométrique atteint 15M au dessous du niveau de la mer, signifiant l'avancée du biseau salé vers les zones internes, ceci étant causé par l'influence des pompes sur les forages.

Malheureusement l'intrusion marine est un phénomène irréversible qui touche les zones côtières par la salinisation des eaux de la nappe par l'eau de mer, néanmoins des mesures préventives peuvent être appliquées dans le but de stopper l'avancement du biseau salé vers les zones internes en l'occurrence la diminution du pompage dans les zones sensibles, la recharge artificielle de la nappe par injection directe, utilisation des eaux non conventionnelles et l'utilisation des eaux usées épurées pour l'irrigation et l'industrie.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Agence Nationale Des Ressources Hydrauliques (ANRH). Carte hydrogéologique de la région d'Alger 1/200000 et sa notice explicative.

Annuaire piézométrique de la plaine de la Mitidja (Année 1996 – 1997), 1998.

BEHIRI Nouara (2011). Cartographie et évolution de l'état actuel du biseau salé de la baie d'Alger et son impact sur l'AEP (champ de captage du Hamiz) et l'industrie (champ de captage de Rouiba)

BENNIE & PARTNERS. 1983 : Évaluation du système d'eau potable existant dans le grand Alger. ANRH d'Alger.

CASTANY. G, 1982 : Hydrogéologie : Principes et méthodes, Edition Dunod, Paris.

Custodio, E. (2002): Aquifer over-exploitation; what does it mean? Hydrogeology Journal, 10, 254-277

GLANGEAUD, L., 1952. Histoire géologique de la province d'Alger. IV congrès géologique international. Monographie région d'Alger. ANRH d'Alger.

LABORDE. J.P, 2000. Élément d'hydrogéologie de surface. Centre National de la recherche Scientifique, Université de Nice - Sophia Antipolis.

Journal officiel., Avril 2011. Norme Algérienne de l'eau.

MORSLI Boutkhal, 2007. Étude de l'intrusion marine et de ses répercussions sur la dégradation des sols : cas des zones côtières d'Alger Est. BP. 88 Mansourah Tlemcen Algérie.

MOHAMED A.S. (2012). Approches hydrodynamique et géochimique de la recharge de la nappe du Trarza, sud-ouest de la Mauritanie.

MacDonald M. et Partners, 1992, Etude de l'aménagement hydro-agricole de la Plaine de la Mitidja.

RODIER J. (1984). L'analyse de l'eau ; Eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer, 7ème Edition, Ed. Dunod, Paris.

SIR M Macdonald & Partners Limited, 1993. Étude de l'aménagement hydro-agricole de la plaine de la Mitidja. Ministère de l'agriculture. ANRH d'Alger.

TOUBAL A. C. DJOUDAR /HALLAL Dahbia, 2007 État actuel de l'invasion marine dans la baie d'Alger. École Nationale Supérieure de l'Hydraulique,

Toubal A. C., D. Djoudar, 2008, Etat actuel de l'invasion marine dans la Baie d'Alger. Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene. Poster présenté au World Water Congress 2008.

YOUNSI A. (2001). Méthodologie de mise en évidence des mécanismes de salures des eaux souterraines côtières en zone semi-aride irriguée. Chaouia côtière, Maroc. Thèse de doctorat d'état, Université Chouaib Doukkali, El Jadida, Maroc.

BEHIRI N. (2011). Cartographie et évolution de l'état actuel du biseau salé de la baie d'Alger et son impact sur l'AEP (champ de captage du Hamiz) et l'industrie (champ de captage de Rouiba)