

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
المدرسة الوطنية العليا لعلوم البحر وتهيئة الساحل
Ecole Nationale Supérieure des Sciences de la Mer et de l'Aménagement du Littoral



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME
D'INGENIEUR D'ETAT EN SCIENCES DE LA MER

OPTION : AMENAGEMENT DU LITTORAL

Thème :

**Etude de l'intrusion marine de la nappe aquifère de la
Mitidja Est par les techniques hydrochimiques et
isotopiques**

Présenté par:

BOUZENACHA Lamia

CHELOUCHE Moussa

Soutenu le 27/10 /2014, devant le jury suivant :

Mr	BELKESSA. R	Professeur à l'ENSSMAL	Président
M ^{me}	HOCINI. N	Chargée de recherche au CRNA	Promotrice
Mr	MAMI. M	Attaché de recherche au CRNA	Examineur
Mr	BOULAHDID. M	Professeur à l'ENSSMAL	Examineur

Promotion : 2013 - 2014

Remerciements

Le mémoire, c'est fait...

Nous tenons à remercier Allah, Dieu le Tout-Puissant pour nous avoir donné la santé, le courage et la volonté pour réaliser ce modeste travail. Ainsi que tous les gens qui ont, de près ou de loin, accompagné ce travail et l'ont rendu possible.

Nous tenons à témoigner notre respectueuse reconnaissance à tous les membres du jury.

Nous adressons nos sincères remerciements au professeur, **Mr BELKESSA. R**, Professeur a l'ENSSMAL, pour l'honneur qu'il nous a fait de présider le jury de ce mémoire et de nous accompagner tout le long de notre parcours par les remarques pertinentes, suggestions congruentes et grande aide.

Nous tenons en premier lieu à remercier très sincèrement et très chaleureusement notre chère promotrice, **Mme HOCINI. N**, chargée de recherche au CRNA pour nous avoir fait confiance. **Mme HOCINI** nous a très bien accueillis dans son laboratoire, elle nous a fait partager son large savoir et sa passion pour la science, son enthousiasme et nous avons énormément appris au cours de notre séjour au laboratoire. Notre reconnaissance et notre profonde gratitude sont à vous Madame.

Nous exprimons notre profonde gratitude et nos sincères remerciements pour **Mr BOULAHID. M**, Professeur a l'ENSSMAL, d'avoir accepté d'examiner de prendre part à l'appréciation de ce travail.

Nous aurons beaucoup de mal à remercier comme il se doit **Mr MAMI. M Mr TAIEB ERRAHMANI. D**, et **Mme MAMI. S** attachés de recherche au CRNA, qui nous ont accordé leurs confiances. Leurs sens d'appréciation scientifique, leurs rigueurs pour le travail bien fait, leurs suggestions pertinentes dans la recherche et surtout leurs disponibilités. Ils nous ont permis à maintes reprises de clarifier nos pensées leurs contributions hautement distinguées dans la réalisation de ce travail resteront dans notre esprit. Nous ne pouvons pas les remercier jamais assez pour leurs différentes orientations.

Nous tenons à remercier également Monsieur **NOUREDDINE. A** maître de recherche et directeur de la division de DESDR au CRNA pour nous avoir accordé l'accès à la division et donner une chance à ce travail pour qu'il soit réalisé.

Dédicaces

On dédit ce modeste travail

*A nos chers parents pour qui aucune dédicace ne saurait témoigner de
notre profond amour, notre immense gratitude et le plus profond
respect.*

*A ceux qui nous 'ont offert la plus noble des éducations et les plus
riches principes.*

*A ceux qui ont été pour nous à chaque instant, avec tous les sacrifices
qu'ils ont fait pour nous.*

*A ceux qui nous 'ont donné un magnifique modèle de labeur et de
persévérance.*

*on les remercie pour toute l'aide, la patience, la compréhension, la
tendresse, l'amour et le dévouement dont ils font preuve, et par
lesquels ils nous 'entourent depuis mon enfance,
Merci nos parents.*

*A tous nos amis qui nous sont très chers, tous nos enseignants,
On les remercie pour tout, et puisse Dieu tout
Puissant les protéger.*

Moussa & Lamia.

Sommaire

Liste d'abréviations

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale	11
Chapitre I : Généralités	14
I.1 L'aquifère côtier	15
I.2 Le biseau salé.....	15
I.3 Relation eau douce - eau marine.....	15
I.4 L'intrusion marine	17
I.4.1 Sources de salinisation des systèmes hydrologiques.....	17
1. Sources naturelles.....	17
2. Sources anthropiques.....	18
I.4.2 Facteurs déterminants l'évolution de l'intrusion marine	18
1. Profondeur de la nappe.....	18
2. Débit de la nappe.....	18
3. Perméabilité.....	18
4. Géométrie de l'aquifère et topographie du substratum	19
I.5 Approches utilisées dans l'étude de l'intrusion marine	19
I.5.1 Approche hydrochimique	19
1. Les paramètres physico-chimiques	19
a. Conductivité électrique.....	20
b. pH	20
c. Température.....	20
2. Les ions majeurs.....	20
3. Les faciès chimiques	20
I.5.2 Approche isotopique	21
1. Notions de base	21
2. Isotopes stables de la molécule d'eau (Oxygène-18 et Deutérium).....	22
Chapitre II : Description de la zone d'étude.....	23
II.1 Localisation géographique	24
II.2 Aperçu géologique	25
II.2.1 Formation géologique.....	25
1. Le Primaire	25
2. Le Secondaire.....	25
3. Le Tertiaire.....	25
a. Le Miocène	25
b. Le Pliocène	26
4. Le Quaternaire.....	26
II.2.2 La tectonique	27

II.3	Aperçu hydrogéologique.....	28
II.3.1	Aquifère de l’Astien	28
II.3.2	Aquifère du Quaternaire	28
II.3.3	Alimentation des aquifères	29
II.4	Aperçu géomorphologique.....	29
II.4.1	Le Sahel	29
II.4.2	La plaine de la Mitidja.....	29
II.4.3	L’Atlas Blidéen	29
II.5	Aperçu hydrographique	30
II.5.1	Oued El Harrach	30
II.5.2	Oued El Hamiz	30
II.5.3	Oued Réghaia	30
II.6	Aperçu climatologique.....	31
II.6.1	Type de climat	31
II.6.2	Les précipitations.....	31
II.6.3	La température.....	33
II.7	Aperçu sur l’hydrodynamisme marin	34
II.7.1	La marée	34
II.7.2	Les vents	34
II.7.3	La houle	35
II.7.4	Les courants.....	35
1.	Le courant général.....	35
2.	Les courants liés au vent	35
3.	Les courants liés à la houle	35
II.8	Études antérieures réalisées sur la Mitidja Est.....	36
II.8.1	Évolution de la piézométrie.....	36
II.8.2	Étude hydrochimique.....	38
a.	La conductivité électrique	38
b.	Les faciès chimiques	41
II.8.3	Résultats des analyses isotopiques	43
Chapitre III : Matériel et méthodes.....		44
III.1.	Prélèvement et conservation des échantillons d'eau.....	45
III.2.	Moyens et méthodes d’analyse	45
III.2.1.	Mesure des caractéristiques physico-chimiques in situ.....	45
III.2.2.	Analyses au laboratoire	47
1.	Analyse des ions majeurs	47
2.	Analyse des isotopes stables de l’eau par spectromètre Laser	47
Chapitre IV : Résultats et discussion.....		49
IV.1	La piézométrie actuelle de la nappe aquifère de la Mitidja Est	50
IV.2	La température	50

IV.3	Le pH	50
IV.4	La conductivité électrique.....	51
IV.5	Faciès chimiques de la région d'étude	64
IV.6	Résultats isotopiques.....	68
Conclusion et recommandations		69
Références bibliographiques.....		72

« Quand je suis dans l'eau, j'ai des idées.

Quand j'en suis sorti, je sèche. »

Roger Pierre

Liste d'abréviations

AIEA : Agence Internationale de l'Énergie Atomique.

ANRH : Agence Nationale des Ressources Hydrauliques.

CRNA : Centre de Recherche Nucléaire d'Alger.

DMMO : Droite Météorique de la Méditerranée Orientale.

DMM : Droite Météorique Mondiale.

NGA : Nivellement Général Algérien.

ONM : Office National de Météorologie.

SEAAL : Société de l'Eau et d'Assainissement d'Alger

SMOW: Standard Mean Ocean Water.

SOGREAH : Société Grenobloise d'Etudes et d'Application Hydrauliques.

JICA: Japan International Cooperation Agency.

Liste des figures

Figure 1: Coupe schématique perpendiculaire au littoral montrant le biseau salé.	15
Figure 2: Coupe schématique perpendiculaire au littoral montrant l'intrusion saline selon Ghyben-Herzberg.	16
Figure 3: Coupe schématique perpendiculaire au littoral montrant l'influence d'un pompage sur l'intrusion saline selon Ghyben Herzberg.	16
Figure 4: Coupe schématique perpendiculaire au littoral montrant le phénomène de l'intrusion marine.	17
Figure 5: Coupe schématique perpendiculaire d'un aquifère côtier.	19
Figure 6: Exemple du diagramme de Piper.	21
Figure 7: Situation géographique de la Mitidja (Google Earth 2013).	24
Figure 8: Situation géographique de la zone d'étude.	25
Figure 9: Carte géologique de la Mitidja orientale (Bennie, et al., 1983).	26
Figure 10: Cadre sismo-tectonique de la région d'Alger (Meghraoui, 1988).	27
Figure 11: Coupe géologique longitudinale de la Mitidja Est (Bennie, et al., 1983).	28
Figure 12: Formes géomorphologiques de la région de la Mitidja.	29
Figure 13: Réseau hydrographique de la Mitidja Est (Ait-Oauli, 2007).	30
Figure 14: Histogramme des précipitations moyennes annuelles (1980-2010).	32
Figure 15: Variation de la température moyenne, maximale et minimale à la station de Dar El-Beida (1980-2010).	33
Figure 16: Carte des points d'accès à la nappe de la Mitidja Est.	36
Figure 17: Esquisse piézométrique de la Mitidja Est (1981).	37
Figure 18: Carte piézométrique de 1992 (Benziada, 1994).	37
Figure 19: Esquisse piézométrique de la Baie d'Alger 2010.	38
Figure 20: Carte d'isovaleurs des conductivités des eaux souterraines (Mania, et al., 1985).	39
Figure 21: Carte d'isovaleurs des conductivités des eaux souterraines en octobre 2005. ...	39
Figure 22: Carte d'isovaleurs des conductivités des eaux souterraines en septembre 2007.	40
Figure 23: Carte d'isovaleurs des conductivités des eaux souterraines en décembre 2009.	41
Figure 24: Diagramme de Piper de la partie supérieure de l'aquifère (mai 2005).	41
Figure 25: Diagramme de Piper des analyses d'eau à la surface des ouvrages (2006).	42
Figure 26: Diagramme de Piper des analyses d'eau à différentes profondeurs (septembre 2007).	42
Figure 27: Diagramme 18O/2H sur les eaux souterraines de la Mitidja Est.	43
Figure 28: Préleveur de type Bailer.	46
Figure 29: Préleveur d'eau de type NISKIN.	46
Figure 30: Conductivimètre avec sonde.	46
Figure 31: pH-mètre.	46
Figure 32: Flacons en polyéthylène.	46
Figure 33: GPS.	46
Figure 34: Chaîne automatique d'analyse par colorimétrie.	47
Figure 35: Spectrophotomètre d'émission de flamme modèle 410.	48
Figure 36: Spectromètre laser de type Picarro L 2110 i.	48
Figure 37: Esquisse piézométrique de la nappe aquifère de Mitidja Est en juin 2013.	50

Figure 38: Carte de conductivité des eaux souterraines en juin 2013 dans le secteur d'étude	51
Figure 39: Répartition des points de mesure de conductivité selon les transects.....	52
Figure 40: Profil de conductivité et température sur le piézomètre Pz 58.	53
Figure 41: Profil de conductivité et température sur le forage F4 Deroux.....	53
Figure 42: Profil de conductivité et température sur le piézomètre Pz F.	55
Figure 43: Profil de conductivité et température sur le piézomètre Pz B.....	55
Figure 44: Profil de conductivité et température sur le piézomètre Pz 51.	56
Figure 45: Profil de conductivité et température sur le piézomètre Pz 61.	57
Figure 46: Profil de conductivité et température sur le forage F8 bis.	58
Figure 47: Profil de conductivité et température sur le forage F17.....	58
Figure 48: Profil de conductivité et température sur le forage F7.....	59
Figure 49: Profil de conductivité et température sur le piézomètre Pz 1.	59
Figure 50: Profil de conductivité et température sur le piézomètre Pz 45.	61
Figure 51: Profil de conductivité et température sur le piézomètre Pz D.....	61
Figure 52: Profil de conductivité et température sur le forage F20.....	62
Figure 53: Profil de conductivité et température sur le piézomètre Pz 2.	62
Figure 54: Profil de conductivité et température sur le forage F2 Salah Dib.....	63
Figure 55: Faciès chimique globale selon Piper de la zone d'étude.	64
Figure 56: Diagramme de Piper du champ captant de Hamiz.....	65
Figure 57: Diagramme de Piper du champ captant de Bouréah.....	65
Figure 58: Diagramme de Piper du champ captant de Rouiba.....	66
Figure 59: Diagramme de Piper du champ captant de Réghaia.	66
Figure 60: Diagramme de Piper du champ captant de Dar El-Beida.	67
Figure 61: Diagramme de Piper du champ captant de Bordj El-Bahri.....	67
Figure 62: Composition isotopique de l'eau. Les points ont une couleur différente en fonction du champ captant.	68

Liste des tableaux

Tableau 1: Stations pluviométriques de Dar El Beida et Réghaia.....	31
Tableau 2: Précipitations moyennes annuelles (mm) des deux stations.....	32
Tableau 3: Variation de la température moyenne enregistrée au niveau de la station de Dar El- Beida (1980-2010).	33
Tableau 4: Vitesse moyenne mensuelle du vent dans la station de Dar El Beida (1980-2010).	34

Introduction générale

Introduction générale

Il est communément admis que les pays méditerranéens, et notamment ceux qui bordent le rivage Sud de cette mer semi-fermée, connaissent aujourd'hui des problèmes d'eau inquiétants.

La rareté des ressources en eau autour de la Méditerranée, leur fragilité et leur inégale répartition font paraître un risque majeur de pénurie qui s'accroît continuellement face aux pressions démographiques et aux besoins croissants de l'essor socio-économique. Ce constat général prend toute son importance dans les pays arides et semi-arides où les ressources en eau sont souvent exploitées à la limite de leur disponibilité. Elles enregistrent des baisses piézométriques considérables et une dégradation de leur qualité par salinisation ou par contamination. Dans le cas des aquifères côtiers, la vulnérabilité qui en découle est accentuée par le risque de l'intrusion marine.

En Algérie, ce problème s'est peu posé dans le passé, mais durant les dernières années, on a décelé des intrusions des eaux marines dans les nappes aquifères côtières d'Annaba, d'Oran et d'Alger (*Sekkal, 1986*).

La nappe aquifère de la Mitidja Est qui constitue le principal réservoir d'eau de la région d'Alger contribue aux besoins en eau potable de la population et à l'irrigation des terres agricoles. Cette ressource en eau a connue une augmentation liée notamment au développement démographique et économique des dernières décennies.

Du fait de la sécheresse persistante, l'exploitation intensive s'est accompagnée de rabattements considérables de la nappe superficielle dans certains secteurs et d'une augmentation de la minéralisation des eaux, essentiellement dans la zone côtière. Cette situation risque de mener à une dégradation importante de la qualité des eaux.

La surexploitation de la nappe aquifère de la Mitidja Est se traduit par des modifications de l'environnement comme la progression continue du biseau salé et une baisse plus importante des niveaux piézométriques dont l'impact financier se fait déjà sentir (nécessité d'approfondissement des forages, abandon des forages en zone côtière, abandon des surfaces cultivées...).

L'objectif de cette étude est de démontrer la présence du biseau salé et d'identifier les secteurs vulnérables à l'intrusion marine au niveau de la plaine aquifère de Mitidja Est. L'approche proposée est de combiner l'analyse chimique des eaux avec des outils isotopiques (isotopes stables de l'eau) susceptibles de fournir des informations sur les différents aspects du problème (origine de la salinité des eaux).

Cette étude rentre dans le cadre du projet de coopération technique avec l'Agence Internationale de l'Énergie Atomique (AIEA) dont l'intitulé est la préservation et protection des zones vulnérables ou à risques contre toute forme de contamination et cartographie de la vulnérabilité et des risques de pollution des eaux souterraines en utilisant les techniques isotopiques. Ce projet rentre dans le cadre de la politique nationale de l'eau (PNE) pour la valorisation des ressources en eau.

Ce mémoire est divisé en quatre chapitres :

- Le premier chapitre décrit la définition de l'aquifère côtier avec les interactions entre eau de mer – eau douce. Une description succincte des connaissances concerne la minéralisation des eaux des aquifères côtiers et les facteurs déterminants l'évolution de l'intrusion marine. Les différentes sources de salinisation ont été mentionnées à savoir les sources de salinisation d'origine naturelles et anthropiques. Les techniques et méthodes d'investigation pour étudier l'intrusion marine ont été présentées succinctement dans ce chapitre.

- Concernant le deuxième chapitre, on a présenté les caractéristiques générales du milieu récepteur en relation avec la problématique. On a traité en premier lieu les contextes géographique, géologique et tectonique de la région et plus précisément de la zone d'étude. Par la suite, un aperçu hydrogéologique concernant les deux aquifères l'Astien et le Quaternaire ont été présentés dans ce chapitre avec les caractéristiques hydrodynamiques de la région d'étude. Description de l'aperçu géomorphologique, climatologique, et morphologique a été donnée afin d'identifier les bassins versants et les principaux oueds existants dans la région. Enfin, on a traité les données existantes sur la région d'étude à savoir les aspects hydrodynamiques et hydrochimiques qui peuvent donner une idée sur l'évolution de la piézométrie et les faciès chimiques qui caractérisent la zone d'étude.

- Dans le troisième chapitre, une synthèse des méthodes et techniques utilisées dans le cadre de cette étude a été décrite dans ce chapitre avec une description brève des procédures, des équipements et matériels utilisés pour les mesures in situ et au laboratoire.

- Le quatrième chapitre est consacré à l'interprétation des résultats sur la présence et l'évolution spatio-temporelle du biseau salé au niveau de la Mitidja Est. Pour caractériser le biseau salé, une approche méthodologique structurée en trois parties a été adoptée :

- ✓ La piézométrie actuelle de la nappe alluviale de la Mitidja orientale a été discutée pour montrer le changement du sens d'écoulement.
- ✓ L'interprétation de la conductivité électrique qui permet de tracer la zone de transition eau douce-eau salée.
- ✓ Les faciès chimiques et la signature isotopique des eaux de la nappe à travers des résultats de mesures et d'analyses pour montrer l'origine des eaux et leur contamination par l'eau de mer.

Chapitre I : Généralités

Les eaux souterraines des aquifères côtiers entretiennent de nombreuses relations avec l'eau de mer qui peuvent varier dans l'espace et dans le temps. Dans ce chapitre, nous tenterons d'expliquer le phénomène de l'intrusion des eaux salées dans les eaux de l'aquifère côtier.

I.1 L'aquifère côtier

C'est une structure géologique perméable contenant de l'eau issue de l'infiltration, comme des alluvions des oueds, un plateau calcaire... etc (Gilli, *et al.*, 2008). Un aquifère côtier doit son nom à sa localisation en zone côtière et de ce fait est en communication avec la mer ou l'océan.

Un aquifère est caractérisé par sa géométrie, sa superficie et sa profondeur, et par les caractéristiques intrinsèques de la roche dont il est formé : lithologie, porosité, perméabilité, fracturation, homogénéité.

I.2 Le biseau salé

Le biseau salé est défini comme la partie d'un aquifère côtier envahi par l'eau salée (généralement marine), comprise entre la base de l'aquifère et une interface de séparation eau douce/eau salée : le coin d'eau salée est sous l'eau douce (figure 1) (Kloppmann, *et al.*, 2011).

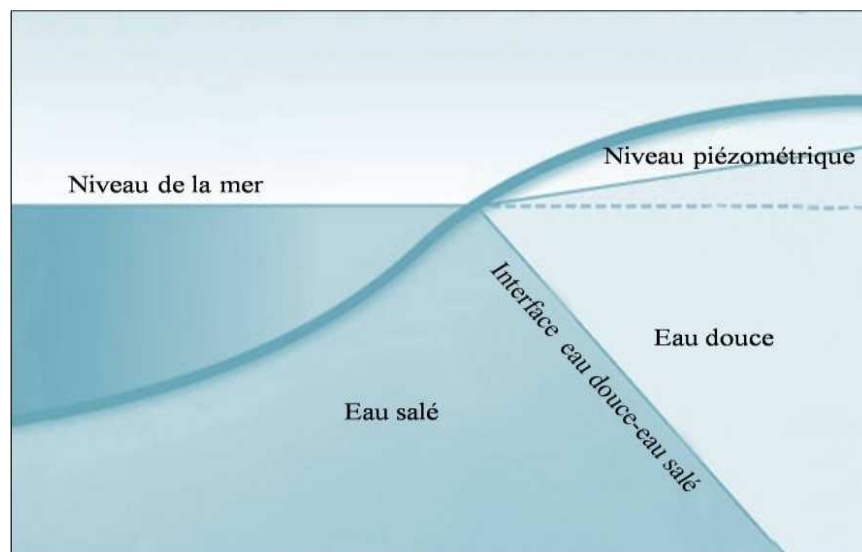


Figure 1: Coupe schématique perpendiculaire au littoral montrant le biseau salé.

I.3 Relation eau douce - eau marine

Les aquifères littoraux prennent place au sein de formations géologiques variées, ils sont le lieu de rencontre de deux types d'eaux souterraines :

- Des eaux douces provenant de l'infiltration des précipitations et des eaux de ruissellement au niveau de la surface continentale.
- Des eaux salées qui imprègnent les terrains au voisinage des côtes pouvant ainsi donner lieu à la salinisation des eaux souterraines en relation hydraulique avec les eaux de surface.

En-cas normal, les aquifères littoraux sont donc en contact avec l'eau salée d'origine marine, qui envahit plus ou moins les formations géologiques côtières, l'eau douce d'une densité moindre que l'eau salée flotte sur cette dernière.

Le biseau d'eau salée rentre à l'intérieur des terres et atteint une profondeur H sous le niveau de la mer au point a où la côte piézométrique h est telle que $H = 40h$ (figure 2) (Pool, et al., 2011).

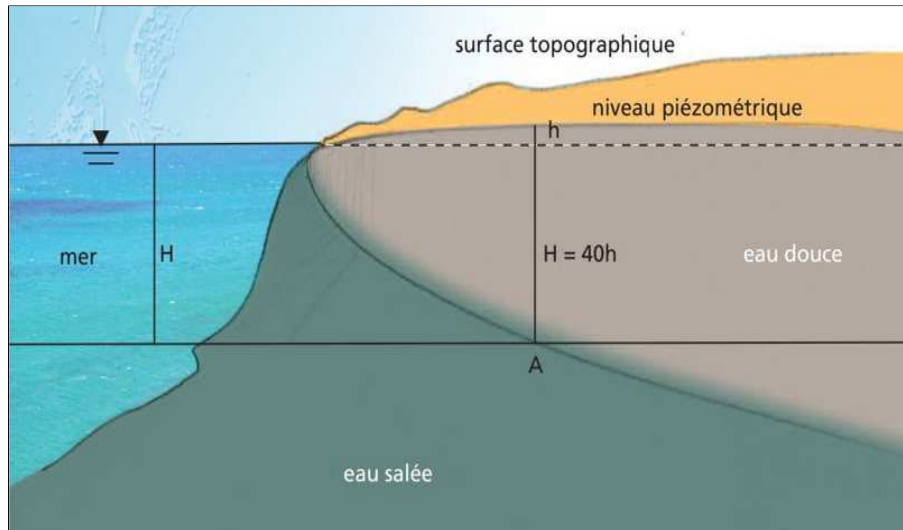


Figure 2: Coupe schématique perpendiculaire au littoral montrant l'intrusion saline selon Ghyben-Herzberg.

En cas de déséquilibre, les eaux salées prennent la forme d'un biseau plongeant vers l'intérieur des terres, et constituent une interface entre l'eau salée et l'eau douce. Cette interface évolue au cours du temps en fonction de la recharge par les précipitations qui provoquent une baisse de niveau piézométrique, et de l'exploitation de l'aquifère par des forages qui créent des cônes de dépression autour de ces derniers et fait remonter le biseau salé (figure 3).

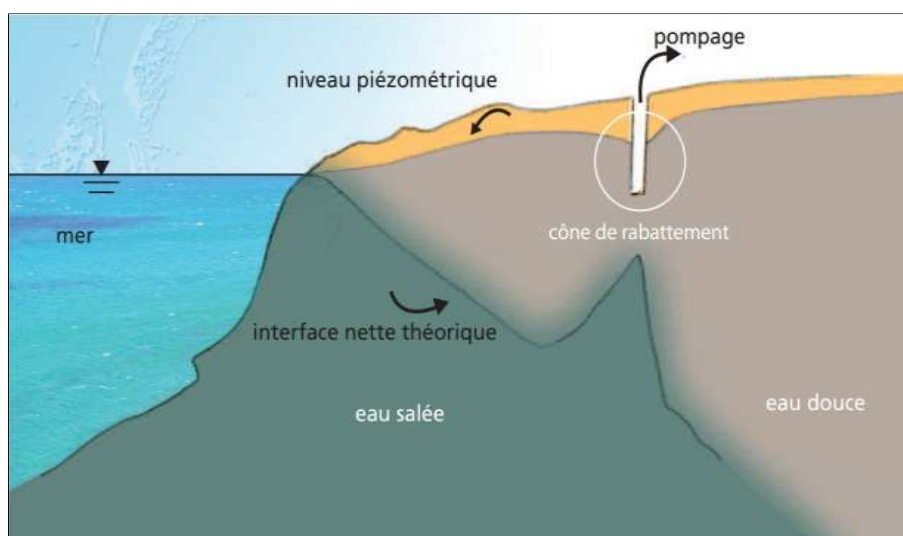


Figure 3: Coupe schématique perpendiculaire au littoral montrant l'influence d'un pompage sur l'intrusion saline selon Ghyben Herzberg.

I.4 L'intrusion marine

L'utilisation des ressources en eau souterraine prend une dimension considérable de nos jours; on assiste alors à une surexploitation des réserves disponibles, ce qui a pour conséquences leur fragilisation et leur vulnérabilité croissante à la pollution et en particulier à la contamination marine dans les aquifères côtiers.

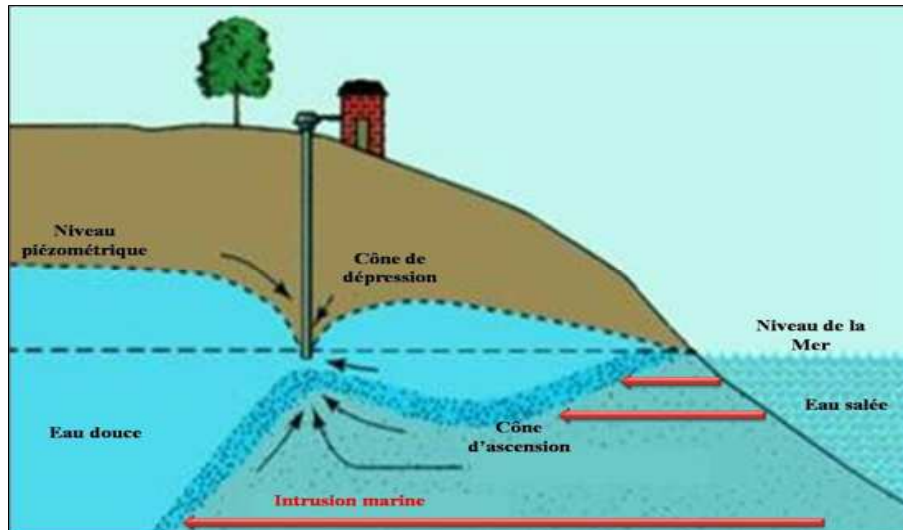


Figure 4: Coupe schématique perpendiculaire au littoral montrant le phénomène de l'intrusion marine.

L'intrusion marine représente l'un des mécanismes de salinisation les plus répandus impactant la qualité de l'eau des aquifères côtiers. Ce phénomène entraîne des niveaux de salinité qui peuvent dépasser les normes de potabilité de l'eau, mais également compromettre son aptitude à l'irrigation. Cette problématique se trouve aggravée par une concentration de la population sur les côtes (environ 70 % de la population mondiale vit en zone de plaine littorale), et par une forte croissance démographique. Les activités humaines concentrées sur ces zones (industries, agriculture et tourisme, etc...) provoquent une augmentation de l'exploitation de la ressource et favorisent une hausse du taux de salinisation (figure 4).

I.4.1 Sources de salinisation des systèmes hydrologiques

1. Sources naturelles

Le cycle de la salinité dans les eaux continentales peut être subdivisé en deux grands domaines :

- **Le domaine marin :** lié directement ou indirectement à l'eau de mer, la salinité peut être associée à une intrusion directe de l'eau de mer dans les aquifères côtiers comme elle peut résulter de la présence d'aérosols marins dans les précipitations qui après évaporation partielle, vont s'infiltrer dans les aquifères.
- **Le domaine continental (interactions eaux-roches) :** dans lequel les sels dissous sont issus essentiellement de l'interaction avec des roches sédimentaires.

2. Sources anthropiques

Un certain nombre d'actions humaines se superpose à ce cycle naturel des sels et de l'eau. Ces actions ont tendance à renforcer certains mécanismes et donc à contribuer à la salinisation des nappes. L'irrigation est un facteur majeur de la salinisation des sols et, en conséquence, des nappes dans les climats arides et semi-arides. Certaines activités produisent des flux riches en chlorures, des déchets solides qui peuvent se dissoudre et contribuer à la salinisation des nappes.

I.4.2 Facteurs déterminants l'évolution de l'intrusion marine

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

1. Profondeur de la nappe

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

2. Débit de la nappe

Les nappes d'eau souterraine côtières sont alimentées principalement par l'infiltration et la percolation des eaux de pluie efficaces. Le taux d'infiltration efficace conditionne l'évolution piézométrique et par conséquent l'évolution de la qualité des eaux souterraines.

En effet, une importante infiltration efficace va favoriser une surélévation du niveau de la nappe et une augmentation de son débit, ce qui va permettre de chasser le biseau salé et empêcher son avancée vers le continent.

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

3. Perméabilité

La perméabilité est une grandeur qui caractérise la facilité avec laquelle l'eau circule dans un réservoir. Elle est exprimée par le coefficient de perméabilité K défini par la loi de Darcy, comme le volume d'eau gravitaire traversant une unité de section perpendiculaire à l'écoulement sous l'effet d'une unité de gradient hydraulique.

4. Géométrie de l'aquifère et topographie du substratum

L'étalement du biseau salé à l'intérieur de la plaine côtière est régi par la topographie du substratum. En règle générale, Plus ce dernier est incliné vers la mer, plus il y aurait une avancée rapide des eaux de mer vers l'aquifère côtier (figure 5).

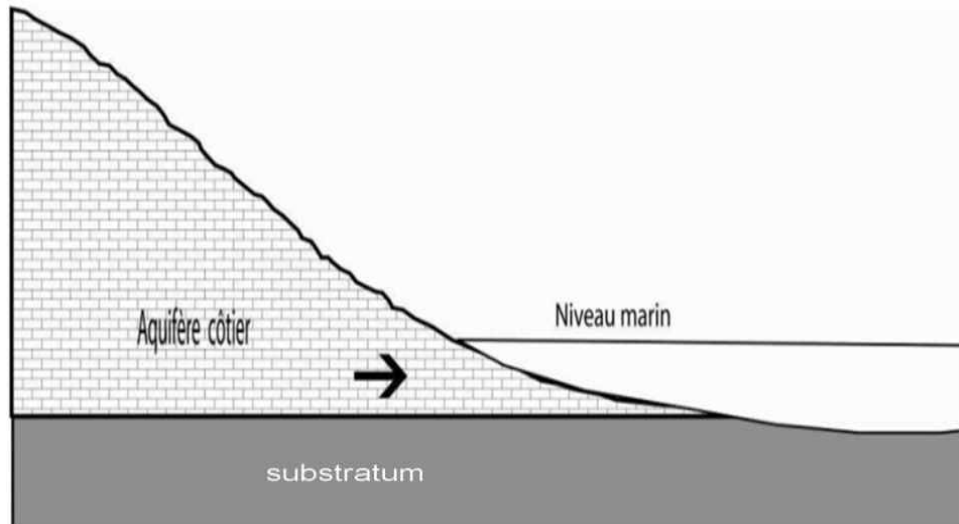


Figure 5: Coupe schématique perpendiculaire d'un aquifère côtier.

I.5 Approches utilisées dans l'étude de l'intrusion marine

La caractérisation du phénomène d'intrusion marine nécessite une approche multidisciplinaire. La démarche consiste à établir la structure géologique, à déterminer les propriétés hydrologiques, géochimiques et isotopiques, à travers un nombre suffisant de mesures et d'analyses pour caractériser la salinisation des aquifères, ainsi que la localisation de l'interface et les fonctions qui engendrent son évolution spatio-temporelle. Les techniques d'analyse utilisées dans l'étude de l'intrusion marine consistent à déterminer les paramètres physico-chimiques et la composition isotopique.

I.5.1 Approche hydrochimique

Du fait de la spécificité des caractéristiques physico-chimiques des eaux, leurs analyses s'avèrent nécessaires à l'hydrogéologie. En effet, ce sont la température, le potentiel d'hydrogène (pH), la conductivité électrique et les teneurs en éléments chimiques dissous qui vont donner aux eaux leurs caractères spécifiques.

Les caractères physico-chimiques des eaux, ayant été acquis au cours de leur transfert dans l'aquifère jusqu'à son exutoire, seront donc influencés aussi bien, par la nature lithologique des formations traversées, que par le temps de transit et de la profondeur de la nappe.

1. Les paramètres physico-chimiques

Les paramètres physico-chimiques, mesurés au cours des études hydrogéochimiques, permettent d'apprécier les principales caractéristiques des eaux souterraines. En fait, ils

favorisent la détermination de zones préférentielles d'alimentation, de contamination ou de nature géologique différente.

a. Conductivité électrique

La conductivité est la propriété que possède une eau à favoriser le passage d'un courant électrique. Elle fournit une indication précise sur la teneur en sels dissous. La conductivité s'exprime en micro Siemens par Centimètre ($\mu\text{S/cm}$), elle est fonction de la concentration totale des ions dans l'eau, de leur mobilité, de leur valence et de la température. C'est un paramètre très important qui permet d'avoir rapidement une idée précise sur la minéralisation globale de l'eau.

b. pH

C'est un paramètre qui détermine l'acidité ou l'alcalinité d'une eau ainsi que l'état d'équilibre des éléments chimiques.

Le pH joue un rôle primordial, dans les propriétés physico-chimiques. Il doit être mesuré le plus souvent et de préférence in situ.

c. Température

La température est un paramètre essentiel dans le fonctionnement des systèmes aquifères. Elle varie en fonction de la température extérieure (l'air), des saisons, de la profondeur du niveau d'eau par rapport à la surface du sol.

La température joue un rôle important dans la solubilité des sels et surtout des gaz. Elle agit sur la conductivité électrique et le pH et permet la connaissance de l'origine des eaux souterraines et des éventuels mélanges.

2. Les ions majeurs

La minéralisation de la plupart des eaux est dominée par huit (8) ions, appelés couramment les majeurs.

Les cations :

- Calcium (Ca^{+2})
- Magnésium (Mg^{+2})
- Sodium (Na^{+})
- Potassium (K^{+})

Les anions :

- Chlorure (Cl^{-})
- Sulfate (SO_4^{-2})
- Nitrate (NO_3^{-})
- Bicarbonate (HCO_3^{-})

3. Les faciès chimiques

L'utilisation des données en hydrochimie repose parfois sur des outils assez compliqués et lourds d'emploi, mais dans de nombreux cas il est heureusement possible de visualiser simplement des caractéristiques importantes d'un échantillon d'eau ou même d'un groupe de solutions.

Le diagramme de Piper est une composante graphique qui permet de visualiser, quantitativement et qualitativement, la composition chimique des eaux. Le procédé consiste à porter les concentrations sur deux triangles équilatéraux (triangle des anions et triangle des cations) puis à projeter les points représentatifs des échantillons dans un diagramme sous forme de losange qui donne les compositions totales en éléments majeurs et les faciès chimiques des eaux (figure 6).

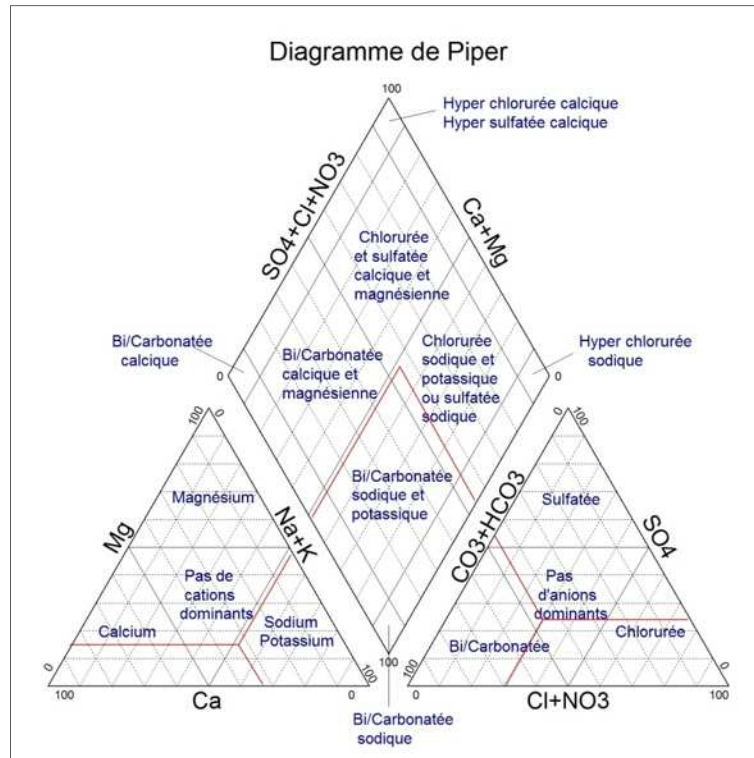


Figure 6: Exemple du diagramme de Piper.

I.5.2 Approche isotopique

Les isotopes du milieu sont utilisés comme un outil complémentaire aux moyens d'investigation classiques qui sont l'hydrogéologie physique et la géochimie. L'hydrologie isotopique constitue un outil indispensable dans les études modernes du cycle de l'eau et le but de l'utilisation de ces techniques isotopiques peut être résumé comme suit :

- L'identification des différents types d'eau et des conditions d'infiltration.
- Le mélange entre les masses d'eau.
- La localisation des zones de recharge et des exutoires.
- La détermination du temps de transit des eaux et leur vitesse d'écoulement.

1. Notions de base

Chaque élément chimique peut présenter un nombre variable de neutrons. Les atomes d'un même élément sont appelés isotopes de cet élément. Ils se distinguent par une masse différente engendrant des propriétés physiques particulières. Les changements de phase modifient le rapport de la quantité d'isotopes lourds sur la quantité d'isotopes légers d'un même élément.

Les propriétés nucléaires d'un isotope étant liées à la structure du noyau, et notamment au nombre de neutrons, on distingue, pour chaque élément, les isotopes stables dont le noyau ne subit aucune modification au cours de temps, et les isotopes radioactifs, dont le noyau est instable se transforment en un autre noyau.

À titre d'exemple, l'hydrogène possède trois isotopes ^1H , ^2H (deutérium) et ^3H (tritium), les deux premiers étant stables et le troisième étant radioactif. L'oxygène également possède trois isotopes stables sont : ^{16}O , ^{17}O et ^{18}O .

D'autres isotopes sont aussi d'intérêt, comme ceux du carbone (^{12}C , ^{13}C et ^{14}C , ce dernier étant radioactif), ceux du soufre (^{32}S , ^{33}S , ^{34}S , ^{36}S) et finalement ceux de l'azote (^{14}N , ^{15}N).

Les teneurs isotopiques, généralement faibles, sont exprimées en valeur relative et données sous la forme différentielle à l'aide du rapport d'abondance R ($R = \text{nombre d'atomes de l'isotope rare et lourd} / \text{nombre d'atomes de la variété abondante et légère}$).

Exemples : $R = ^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$, $^2\text{H}/^1\text{H}$, $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$, $^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$.

En valeur relative, les concentrations en isotopes stables, mesurées au spectromètre de masse sont exprimées en termes de différence par rapport à un étalon en part pour mille. On utilise la notion (δ) qui s'exprime par :

$$\delta(\text{‰}) = (R_{\text{éch}}/R_{\text{ét}} - 1) \cdot 1000$$

L'abondance relative des isotopes stables de l'eau (^2H et ^{18}O) est exprimée par rapport au standard **SMOW** : Standard Mean Ocean Water, ce standard est représentatif de la composition isotopique moyenne des eaux océaniques (*Craig, 1961*).

2. Isotopes stables de la molécule d'eau (Oxygène-18 et Deutérium)

Les isotopes stables de la molécule d'eau (oxygène-18 et Deutérium) sont les plus utilisés en hydrologie et en hydrogéologie. Ils sont par définition des traceurs intrinsèques de l'écoulement de l'eau souterraine et, contrairement à d'autres isotopes, ils sont peu soumis aux échanges isotopiques avec l'encaissant (*Banton, et al., 1999*).

L'abondance relative d'un isotope dépend de plusieurs facteurs, dont le lieu de précipitation de la pluie (altitude, latitude, distance de l'océan), le cycle d'évaporation-condensation, les échanges avec les minéraux, le mélange avec l'eau magmatique, etc.

Chapitre II : Description de la zone d'étude

II.1 Localisation géographique

La Mitidja est une vaste plaine qui a été comblée par des dépôts d'origine marine ou continentale, au cours de l'ère Tertiaire et de l'ère Quaternaire. C'est une dépression allongée d'Ouest en Est, orientée suivant une direction OSO-ENE, avec une longueur d'environ 80 km et une largeur variant entre 10 et 20 km (figure 7).



Figure 7: Situation géographique de la Mitidja (Google Earth 2013).

La plaine de la Mitidja est répartie entre les wilayas d'Alger, de Blida, de Tipaza et de Boumerdès, sa superficie globale avoisine les 1300 km². Elle est située entre les longitudes 2°32'00 à 3°19'00 E et les latitudes 36°25'17 à 36°47'40 N. Bordée par deux reliefs élevés, au nord par les collines du Sahel Algérois, au sud par l'Atlas Blidéen et elle est directement en contact avec la mer Méditerranée.

La zone d'étude occupe la partie orientale de la plaine de la Mitidja qui s'étend depuis l'oued El Harrach à l'Ouest jusqu'à l'oued Réghaia à l'Est, plus précisément la partie septentrionale de Bordj El-kiffan, qui est en contact direct avec la mer (figure 8).



Figure 8: Situation géographique de la zone d'étude.

II.2 Aperçu géologique

II.2.1 Formation géologique

La Mitidja est un bassin de subsidence présenté comme un dôme métamorphique primaire bordé par des assises sédimentaires d'âge Tertiaire et Quaternaire. On constate toutefois une lacune du secondaire dans toute la zone d'étude de la plaine de la Mitidja orientale (figure 9) (Charakdji, et al., 2006).

1. Le Primaire

Il est représenté par des affleurements réduits isolés dans le massif d'Alger et dans la région de Bordj-El-Bahri. Ces affleurements sont formés par des schistes, des calcaires plus ou moins métamorphisés, des micaschistes et des gneiss.

2. Le Secondaire

Période durant laquelle la sédimentation s'est interrompue. Cela est peut-être dû à une régression marine.

3. Le Tertiaire

Il est marqué par une lacune de l'Éocène et de l'Oligocène et recouvre en discordance le socle métamorphique. Il est représenté par plusieurs formations géologiques d'âge Mio-Pliocène.

a. Le Miocène

Il est matérialisé par des grés et conglomérats très cimentés, il affleure dans le ravin de l'oued Korich et dans la région d'Ain Taya, à la base des falaises littorales (Benallal, et al., 1989).

b. Le Pliocène

Deux étages peuvent être individualisés dans le pliocène, ces formations occupent essentiellement le Sahel :

➤ Le Plaisancien (pliocène inférieur)

Il est formé essentiellement par des marnes bleues argileuses. Le Plaisancien forme le substratum subsident du bassin de la Mitidja (*Glangeaud, et al., 1952*).

➤ Astien (pliocène supérieur)

Il est bien développé dans la partie Sud du Sahel et apparaît très peu sur la bordure Sud de la plaine de la Mitidja. Il se présente sous forme de marnes jaunâtres et de calcaires sableux. (*Glangeaud, et al., 1952*).

4. Le Quaternaire

Les formations du Quaternaire résultent de l'accumulation des produits de l'érosion de l'Atlas Tellien dans la Mitidja et dans le Sahel. Il y a eu d'abord le dépôt de formations continentales détritiques, représentées par des sols rouges gréco-carbonatés et une formation de marne et cailloutis, comblant en partie le synclinorium Mitidjien (*Aymé, 1964*). Puis, des terrasses marines formées par la Consolidation des dunes et des dépôts alluviaux contenant du sable, gravier, argile sableuse, conglomérats et des microconglomérats à ciment calcaire (*Djediat, 1996 in JICA, 2006*).

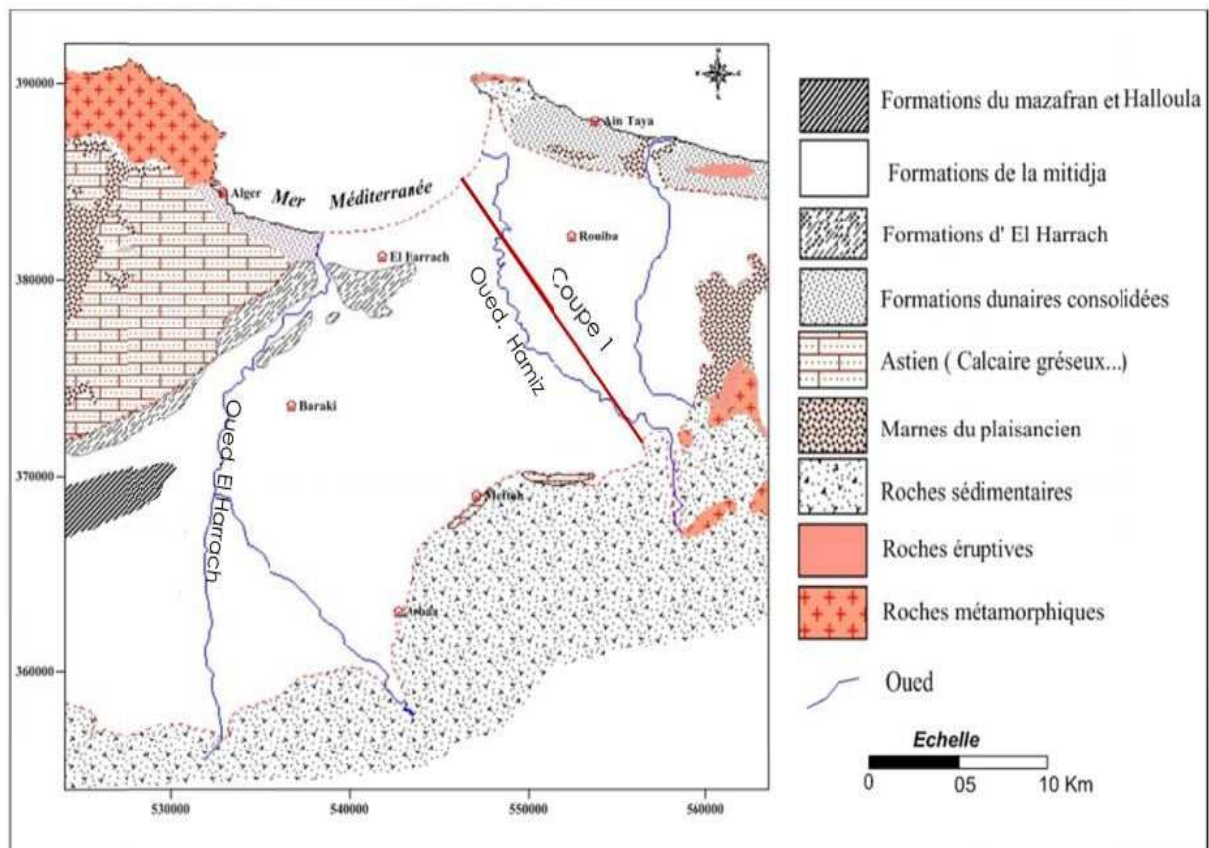


Figure 9: Carte géologique de la Mitidja orientale (Bennie, et al., 1983).

II.2.2 La tectonique

L'activité tectonique de la zone d'étude s'inscrit dans le processus de géodynamique globale de la tectonique des plaques, mouvement de convergence entre les plaques Africaine et Eurasienne. La chaîne alpine Algérienne, qui demeure adossée à la frange nord du bloc méridional, est née de cette collision. Le résultat s'est traduit par des plissements et des failles qui affectent les niveaux du Miocène post-nappes, du Pliocène et du Quaternaire. Ces déformations continuent jusqu'à l'heure actuelle et se traduisent par l'activité sismique de la région.

La plaine de la Mitidja se présente comme un vaste synclinorium limité par deux flexures au Nord et au Sud plus ou moins visibles. La bordure septentrionale essentiellement constituée par l'Astien à pendage faible et localement tectonisé. L'évolution du bassin de la Mitidja a été contrôlée par l'affaissement continu du socle rigide (figure 10).

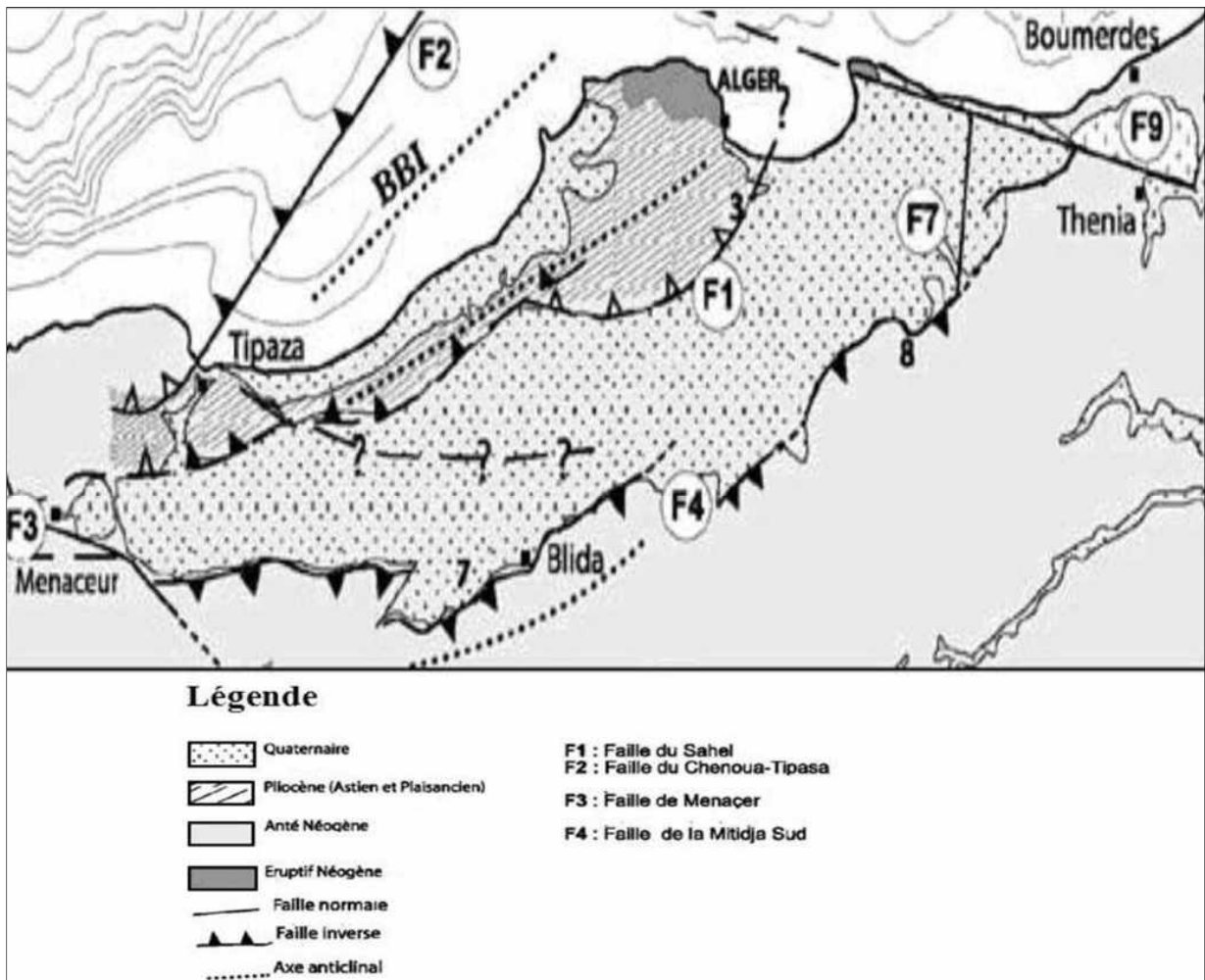


Figure 10: Cadre sismo-tectonique de la région d'Alger (Meghraoui, 1988).

II.3 Aperçu hydrogéologique

Les ressources en eaux souterraines de la plaine de la Mitidja Orientale ont fait l'objet de plusieurs études et campagnes de prospection.

La nappe aquifère de la Mitidja est constituée par deux horizons aquifères (figure 11) :

- Les grès de l'Astien, qui affleurent essentiellement sur les collines du Sahel.
- Les alluvions du Quaternaire, qui affleurent sur la majeure partie de la plaine.

II.3.1 Aquifère de l'Astien

Il s'étend sous la majeure partie du bassin alluvial, il affleure sur les collines du Sahel et sur des endroits peu nombreux le long de la base des monts de l'Atlas à l'Est, son épaisseur moyenne est de 100 à 130 m. Il est limité par deux formations bien distinctes, les marnes bleues du Plaisancien et les argiles jaunes de la formation d'El Harrach, sauf dans la partie Nord-Ouest où il est en contact direct avec l'aquifère du quaternaire.

II.3.2 Aquifère du Quaternaire

Il constitue la principale nappe aquifère de la Mitidja, il est constitué par des alluvions anciennes et récentes qui ont comblé le bassin subsident de la Mitidja. Son épaisseur varie entre 100 et 200 m et s'amincit vers les bordures de la plaine. Cette nappe aquifère joue un rôle capital dans le développement socio-économique de la région d'Alger et ses environs pour l'alimentation en eau potable, l'irrigation et l'industrie. Elle est exploitée par plusieurs centaines d'ouvrages.

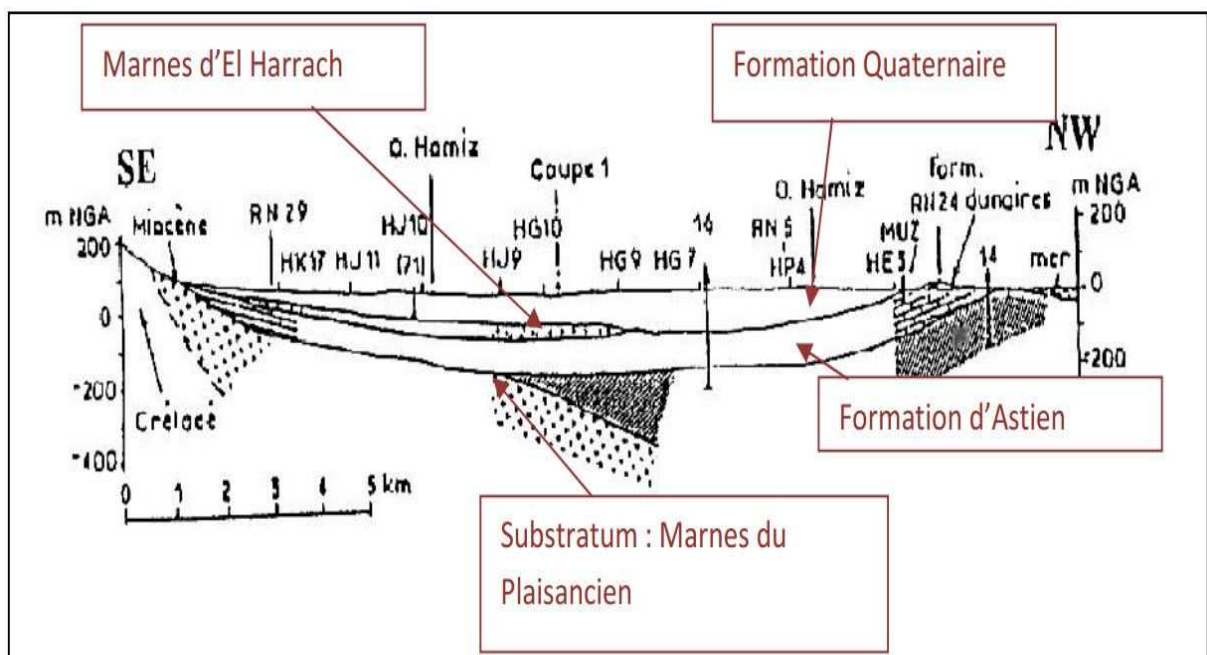


Figure 11: Coupe géologique longitudinale de la Mitidja Est (Bennie, et al., 1983).

II.3.3 Alimentation des aquifères

Les aquifères de la Mitidja sont alimentés par :

- Les précipitations
- L'infiltration à partir des oueds (El-Harrach et Hamiz)
- Le réservoir Astien par drainance

D'une manière générale, la profondeur des forages varie entre 200 et 300 m, selon l'endroit et l'horizon capté. Le bilan de la nappe de la Mitidja, établi par le modèle mathématique réalisé en 2009 par SOGREAH et l'ANRH, évalue la recharge de la nappe à 307.2 millions m³/an (SOGREAH, 2010).

II.4 Aperçu géomorphologique

L'étude morphologique de cette région permet de distinguer trois unités géomorphologiques du Nord vers le Sud (figure 12) :

II.4.1 Le Sahel

Il correspond à un bombement anticlinal à faible pente avec une altitude de 200 à 250 m et qui sépare la plaine de la mer.

II.4.2 La plaine de la Mitidja

La plaine de la Mitidja est une zone d'affaissement général à remplissage plio-quadernaire d'orientation ENE-WSW. Elle a une altitude moyenne de 40 à 50 m.

II.4.3 L'Atlas Blidéen

Il correspond à un massif montagneux d'orientation NE-SW, limitant au Sud la plaine et atteignant une altitude d'environ 1600 m. Cette chaîne montagneuse présente un relief très accidenté, découpé par les gorges profondes des oueds principaux.

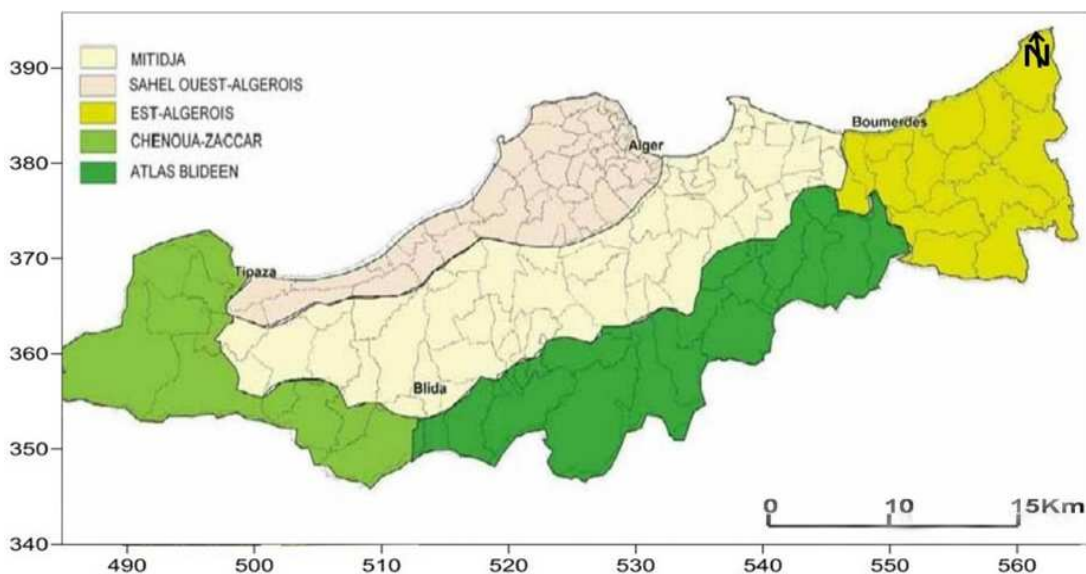


Figure 12: Formes géomorphologiques de la région de la Mitidja.

II.5 Aperçu hydrographique

Le réseau hydrographique de la plaine de la Mitidja orientale est représenté par trois principaux oueds : oued El Harrach, oued Hamiz et oued Réghaia (figure 13).

II.5.1 Oued El Harrach

Il constitue l'un des principaux cours d'eau en raison de la superficie de son bassin versant qui est de l'ordre de 1200 Km². Cet oued est dévié de son lit plusieurs fois. Actuellement, il traverse la plaine du Sud au Nord pour s'infléchir vers le NE au pied du Sahel jusqu'à la cluse d'El-Harrach.

II.5.2 Oued El Hamiz

Il prend source dans l'Atlas blidéen avant de traverser la plaine de la Mitidja, c'est un cours d'eau de moindre importance que l'oued El Harrach du fait de la superficie de son bassin versant qui est environ 270 Km².

II.5.3 Oued Réghaia

L'oued Réghaia fait transiter tous les effluents provenant des zones industrielles de Rouiba et de Réghaia, cet oued est considéré comme un oued secondaire.

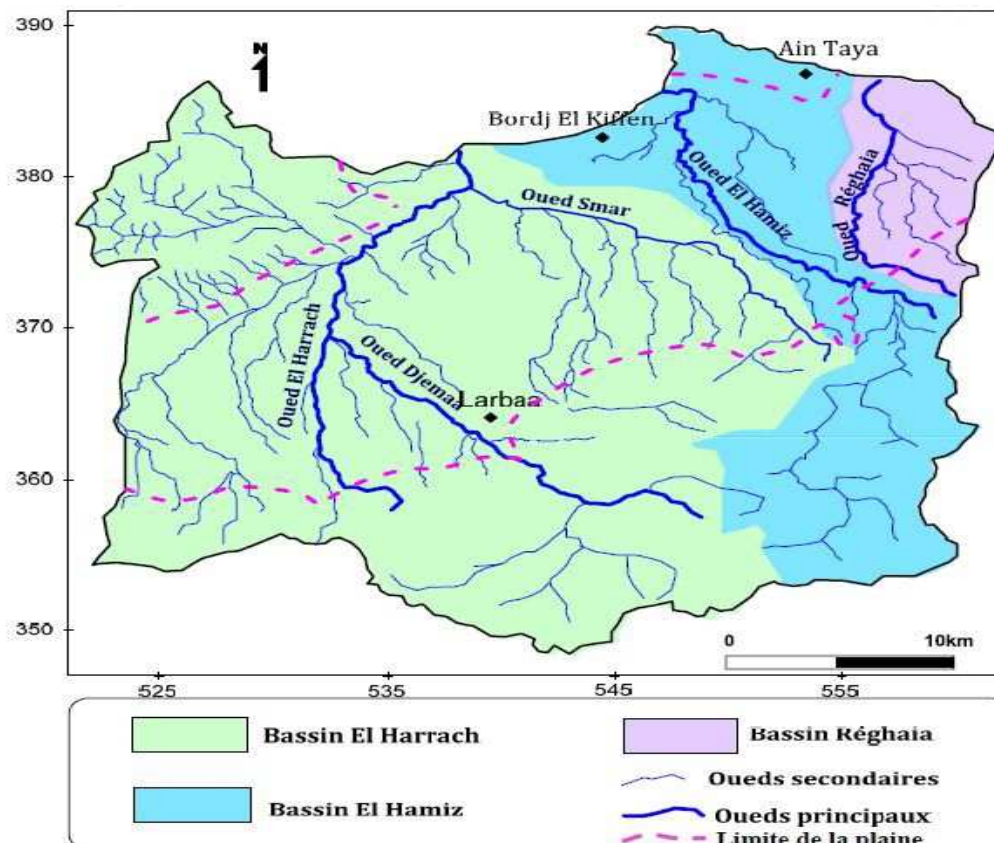


Figure 13: Réseau hydrographique de la Mitidja Est (Ait-Oauli, 2007).

II.6 Aperçu climatologique

Les données climatiques ont été recueillies au sein de l'Agence Nationale des Ressources Hydriques (ANRH) et l'Office National de la Météorologie (ONM) de Dar El Beida sur une période de 30 ans allant de 1980 à 2010.

II.6.1 Type de climat

La zone d'étude se situe à la côte de la mer Méditerranée, elle est caractérisée par un climat de type méditerranéen humide à deux saisons distinctes :

- Une saison hivernale humide et froide.
- Une saison estivale sèche et chaude.

II.6.2 Les précipitations

Deux stations (tableau 1) sont prises en compte dans la zone d'étude :

- La station de Dar El Beida
- La station de Réghaia

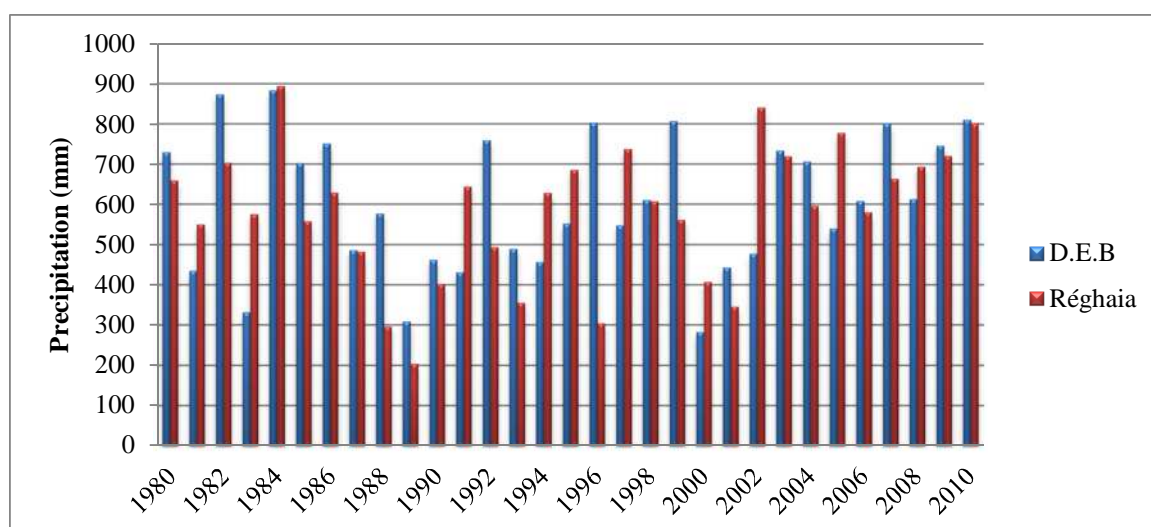
Tableau 1: Stations pluviométriques de Dar El Beida et Réghaia.

Stations pluviométriques	Longitude	Latitude	Altitude	Paramètres climatiques
Dar El Beida	3°13' E	36°41' N	25	Précipitation et température
Réghaia	3°20' E	36° 44' N	20	Précipitation

Les précipitations moyennes annuelles pour une période de 30 ans au niveau des deux stations considérées sont représentées dans le tableau suivant :

Tableau 2: Précipitations moyennes annuelles (mm) des deux stations.

Années	Dar El Beida	Réghaia
1980	729	659
1981	435	550
1982	873	703
1983	332	575
1984	883	894
1985	702	558
1986	751	629
1987	486	482
1988	577	296
1989	309	203
1990	462	401
1991	431	644
1992	759	493
1993	489	355
1994	456	628
1995	552	685
1996	803	304
1997	547	737
1998	610	607
1999	807	561
2000	282	407
2001	443	345
2002	477	840
2003	733	719
2004	706	596
2005	539	777
2006	608	580
2007	800	663
2008	613	693
2009	745	720
2010	810	801
Moyenne	604	584

**Figure 14:** Histogramme des précipitations moyennes annuelles (1980-2010).

a. Station de Dar El Beida

La moyenne annuelle des précipitations (1980-2010) est de 614 mm/an.

D'après l'histogramme des précipitations moyennes annuelles (figure 14), nous constatons une année sèche pour l'année 2000 avec une moyenne de 282 mm qui correspond à 46.73 % des précipitations moyennes annuelles. Cependant, l'année hydrologique 2009-2010 correspond à une année pluvieuse avec une moyenne de 810 mm, soit 134.23 % des précipitations moyennes annuelles.

b. Station de Réghaia

La moyenne annuelle des précipitations (1980-2010) est de 591 mm/an.

D'après l'histogramme des précipitations moyennes annuelles (figure 14), l'année 1984 correspond à une année pluvieuse avec une valeur de 894 mm, soit 153.07 % des précipitations moyennes annuelles. Par contre, l'année sèche a été enregistrée en 1989 avec une moyenne de 203 mm et qui correspond à 34.75 % des précipitations moyennes annuelles. Une année pluvieuse 2009-2010 a été enregistrée avec une valeur de 801 mm, soit 137.15 % des précipitations moyennes annuelles.

II.6.3 La température

Le choix est porté sur la station de Dar El-Beida dont les données sont les plus représentatives concernant les valeurs de température. Les relevés de température effectués dans la station de Dar El Beida sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau 3: Variation de la température moyenne enregistrée au niveau de la station de Dar El- Beida (1980-2010).

	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Moyenne annuelle
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	23.7
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

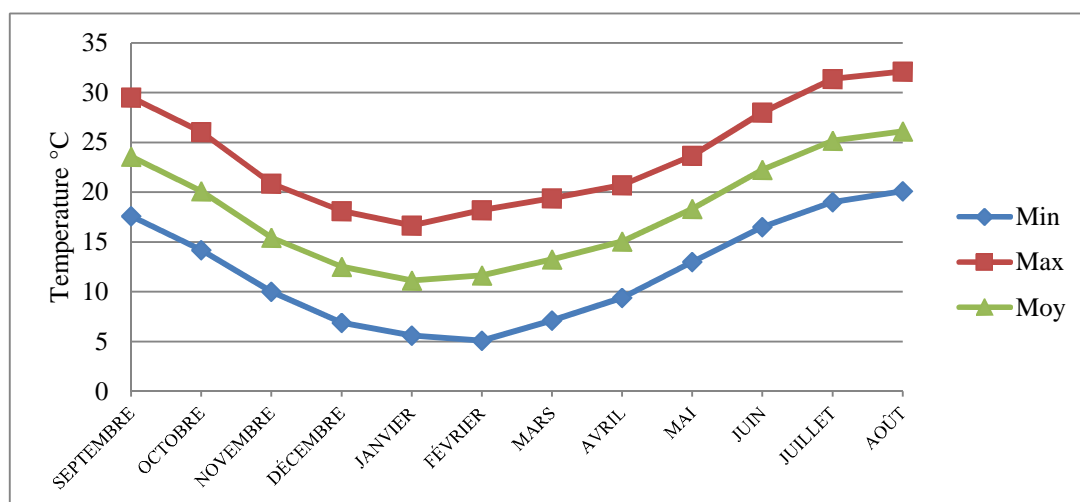


Figure 15: Variation de la température moyenne, maximale et minimale à la station de Dar El-Beida (1980-2010).

D'après les variations de température moyenne, on distingue :

- Une période froide s'étalant du mois de novembre jusqu'au mois de mai avec une température moyenne minimale de 11.13 °C enregistrée au mois janvier.
- Une période chaude s'étalant du mois de juin jusqu'au mois d'octobre. La température moyenne la plus élevée est observée au mois d'aout avec une valeur maximale de 26.11 °C.

II.7 Aperçu sur l'hydrodynamisme marin

Les données des vents, des courants, et des houles présentent une grande importance dans l'évolution du biseau salé dans la région d'étude. Ces facteurs hydrodynamiques exercent une pression sur la côte, notamment sur la bande littorale provoquant un déplacement remarquable de la ligne d'interface eau douce/eau salée vers l'intérieur des terres. Cette pression marine participe à l'intrusion de l'eau de mer dans la nappe phréatique côtière.

Parmi ces facteurs hydrodynamiques agissant au niveau de la zone d'étude, nous distinguons :

II.7.1 La marée

La marée en mer Méditerranée et en particulier sur les côtes algériennes est relativement faible inférieur à 0.5 mm en moyenne (*Leclaire, 1972*). Il s'agit plus d'une marée barométrique que d'une marée astronomique. De ce fait, il est plus intéressant de parler du niveau de la mer.

Quelques indications relatives de ce paramètre près des côtes Algériennes :

- Le niveau maximal : +0,60 m (NGA)
- La moyenne des hautes mers de vive eau : +0,10 m (NGA)
- Et enfin, les plus basses mers : -0,34 m (NGA)

Avec NGA : Nivellement Générale Algérien.

II.7.2 Les vents

La vitesse moyenne annuelle des vents à la station de Dar El Beida varie entre 2.8 m/s et 3.8 m/s pour la période allant de 1980 à 2010 (Tableau 4).

Tableau 4: Vitesse moyenne mensuelle du vent dans la station de Dar El Beida (1980-2010).

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout
Vitesse moyenne (m/s)	3.0	2.8	3.0	3.8	3.6	3.6	3.3	3.4	3.4	3.4	3.3	3.5

II.7.3 La houle

LECLAIRE (1972) considère que le régime des houles de la baie d'Alger est représentatif de la marge Algérienne. Le régime saisonnier est caractérisé par deux directions dominantes :

- Ouest-Nord-Ouest.
- Nord-Nord-Est.

En hiver, les houles prédominantes sont du secteur Ouest-Nord-Ouest avec un pourcentage supérieur à 80 % et la période moyenne est de 8 à 9 s. Des périodes supérieures à 10s et pouvant atteindre 13 s sont relevées lors des grandes tempêtes. L'amplitude moyenne la plus fréquente est de 2 à 3 m, avec des houles atteignant des amplitudes maximales, de 4 à 6 m ont été observées. Les houles qui correspondent à la période estivale sont de direction Nord-Nord-Est et se caractérisent par une période moyenne de 6 à 7 s et n'atteignent que très rarement les 3 m d'amplitude.

II.7.4 Les courants

1. Le courant général

C'est un courant de direction Ouest – Est, entraînant les eaux de l'Océan Atlantique par le détroit de Gibraltar et qui longe les côtes Algériennes. Généralement, la vitesse de ce courant est de l'ordre de 0,5 à 1 m/s au large des côtes algériennes (*Leclaire, 1972*). Dans la baie d'Alger, le courant atlantique induit des contres courants vers l'Ouest de faible vitesse sous l'influence du Cap Matifou.

2. Les courants liés au vent

L'intensité des courants générés par les vents varie selon la fréquence et la direction de ces derniers. Dans le cas de la baie d'Alger, seuls les courants induits par les vents du secteur Ouest à Nord – Ouest ont une influence sur notre zone d'étude.

3. Les courants liés à la houle

Dans notre zone d'étude, les courants induits par les houles de direction Nord-Ouest sont les plus fréquents. Ils induisent au niveau du littoral deux (02) courants distincts :

➤ Les courants de retour

Les houles de direction Nord-Ouest abordent d'une manière frontale la côte, donnent naissance à ces courants de retour : de direction inverse.

➤ Les courants de dérive littorale

Ces courants se créent lorsque les houles abordent la côte obliquement. D'où, dans la zone d'étude, seules les houles du secteur Ouest à Nord génèrent des courants de dérive littorale de direction Est.

II.8 Études antérieures réalisées sur la Mitidja Est

II.8.1 Évolution de la piézométrie

Depuis les années 1980, la piézométrie de la zone d'étude a beaucoup évolué. L'augmentation des prélèvements par la mise en exploitation des champs captant (Baraki, 1979, Dar El-Beida, 1980, Hamiz, 1983, Rouiba et Bouréah 2001) ainsi que par la présence de nombreux forages agricoles et industriels licites et illicites ont entraîné un rabattement de nappe de l'ordre de 25 m en 30 ans.

Afin de mieux contrôler le niveau piézométrique de la région d'étude, un réseau de surveillance constitué de 25 piézomètres de l'oued El-Harrach à l'Ouest jusqu'à Bordj El-Bahri à l'Est a été mis en place par l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH) pour le suivi de l'évolution de l'intrusion marine en baie d'Alger. Il est à noter que deux piézomètres (Pz 1H et Pz 2H) se trouvent au sein du champ captant du Hamiz (figure 16).

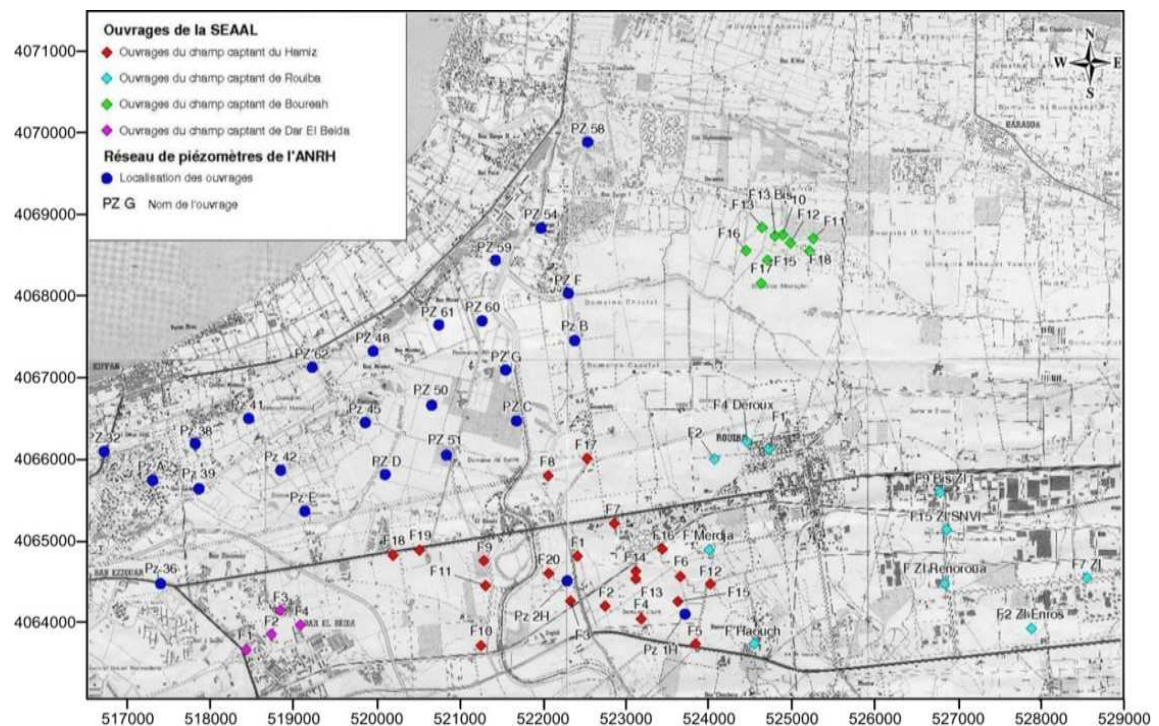


Figure 16: Carte des points d'accès à la nappe de la Mitidja Est.

Le niveau de nappe phréatique de la Mitidja Est a beaucoup évolué. Les cartes piézométriques anciennes permettent de préciser le rabattement à l'échelle de la baie d'Alger.

La carte piézométrique générale de la baie d'Alger de 1981, montre que les directions d'écoulement des eaux souterraines se font depuis le continent vers la mer. Les côtes piézométriques sont de l'ordre de 5 à 10 m dans la baie d'Alger et donc au-dessus du niveau de la mer (Figures 17).

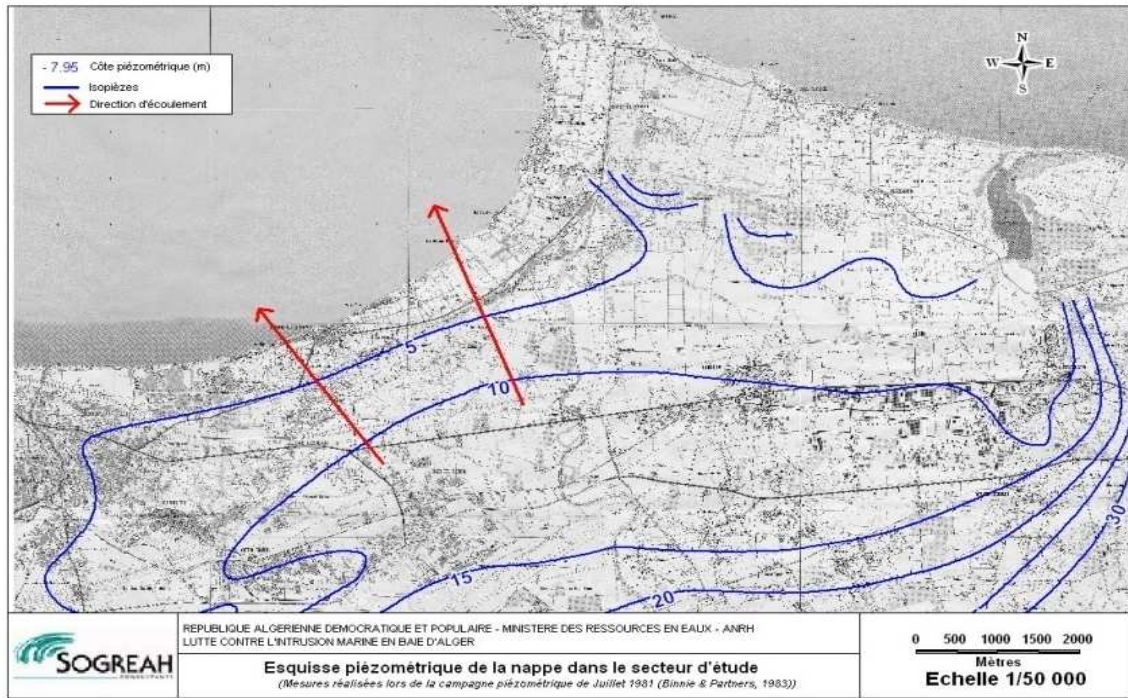


Figure 17: Esquisse piézométrique de la Mitidja Est (1981).

La carte piézométrique de 1992 montre déjà une baisse de niveau piézométrique par rapport à la situation de 1981. Au niveau de la baie d'Alger, les côtes piézométriques sont comprises entre 3 et 5 m au-dessus du niveau de la mer (figure 18).

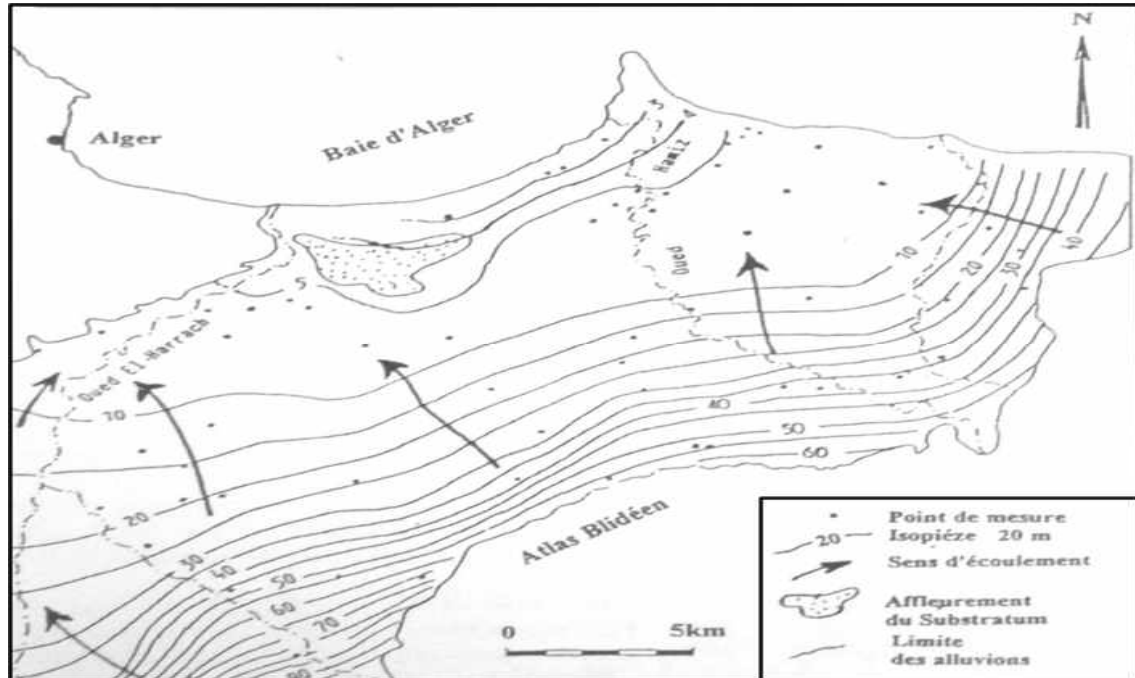


Figure 18: Carte piézométrique de 1992 (Benziada, 1994).

La piézométrie de la nappe en janvier 2010 a été établie lors de la campagne de prélèvement d'eau au niveau du réseau piézométrique de l'ANRH.

L'esquisse piézométrique réalisée montre au niveau des champs captant du Hamiz et Dar El-Beida une dépression piézométrique de -12 m. Par contre au niveau du champ captant de Bouréah et Rouiba montrent une dépression piézométrique équivalente à -5 m. La piézométrie en janvier 2010 dans le secteur d'étude est à plusieurs mètres sous la mer favorisant ainsi le phénomène d'intrusion marine (figure 19).

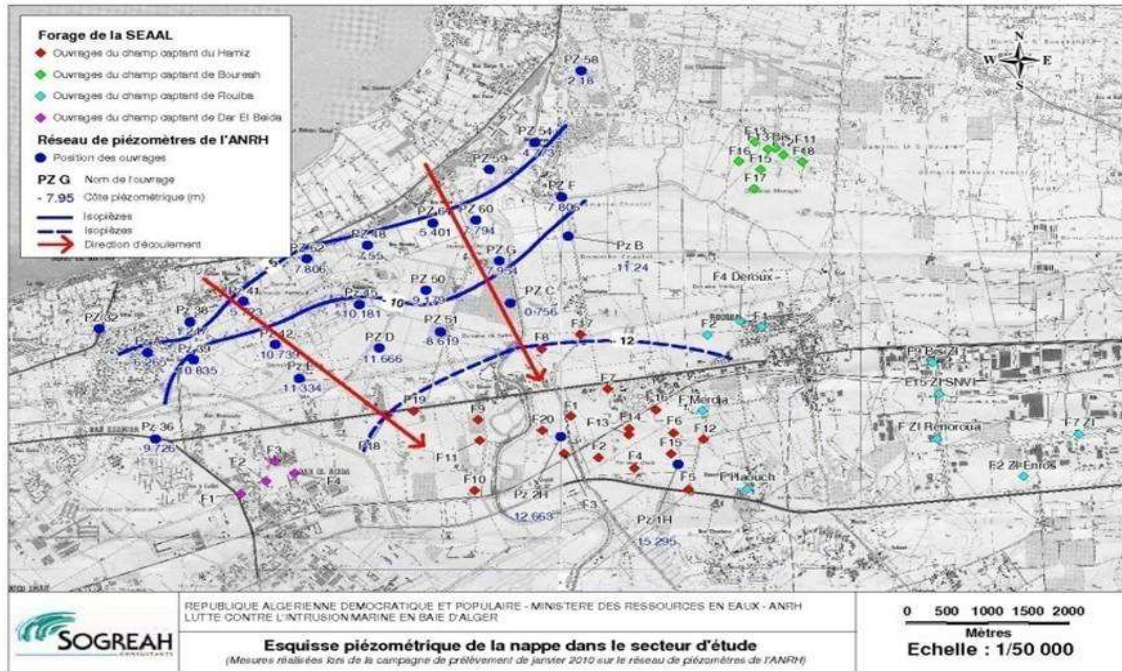


Figure 19: Esquisse piézométrique de la Baie d'Alger 2010.

II.8.2 Étude hydrochimique

a. La conductivité électrique

Plusieurs études de phénomène de l'intrusion marine ont été effectuées sur la zone de la Mitidja. J. Mania a commencé à étudier le phénomène d'intrusion marine en 1985 à partir des mesures de 1981 et de 1982. La carte d'isovaleurs des conductivités de 1982 a été tracée selon les observations et montre une situation normale avant la mise en exploitation du champ captant du Hamiz. Les valeurs de conductivité montrent la présence d'un front salé parallèle à la côte. La zone envahie (limitée par la courbe d'isovaleurs 4000 $\mu\text{S}/\text{cm}$) est extrêmement limitée et située au Nord du bateau cassé. Elle constitue un signe avant-coureur de l'évolution future du phénomène de l'intrusion marine (figure 20).

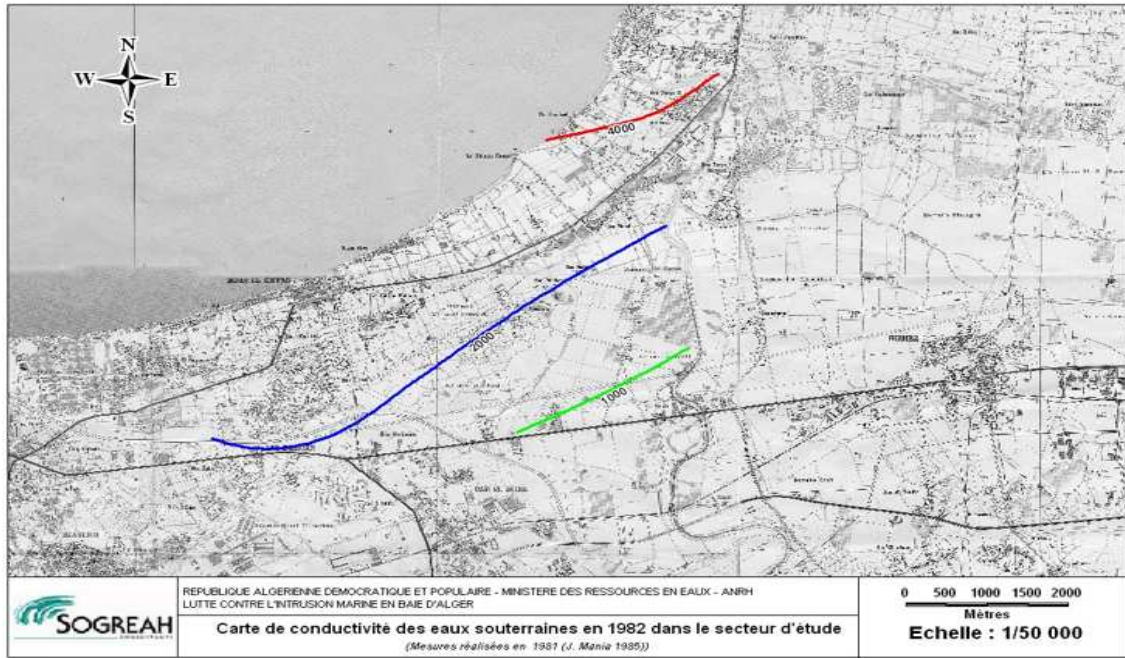


Figure 20: Carte d'isovaleurs des conductivités des eaux souterraines (Mania, et al., 1985).

L'ANRH en collaboration avec le CRNA a également étudié le phénomène de l'intrusion marine en 2005. La carte d'isovaleurs de la conductivité d'octobre 2005 montre une avancée du front salé depuis la côte à partir du bateau cassé (lieu dit les Dunes). Les valeurs de conductivité sont élevées et on constate que toute la bordure côtière est envahie. Le biseau salé se situe à plus de 2 km de la côte et l'iso-conductivité de valeur 1200µS/cm s'arrête à la limite du champ captant du Hamiz (figure 21).

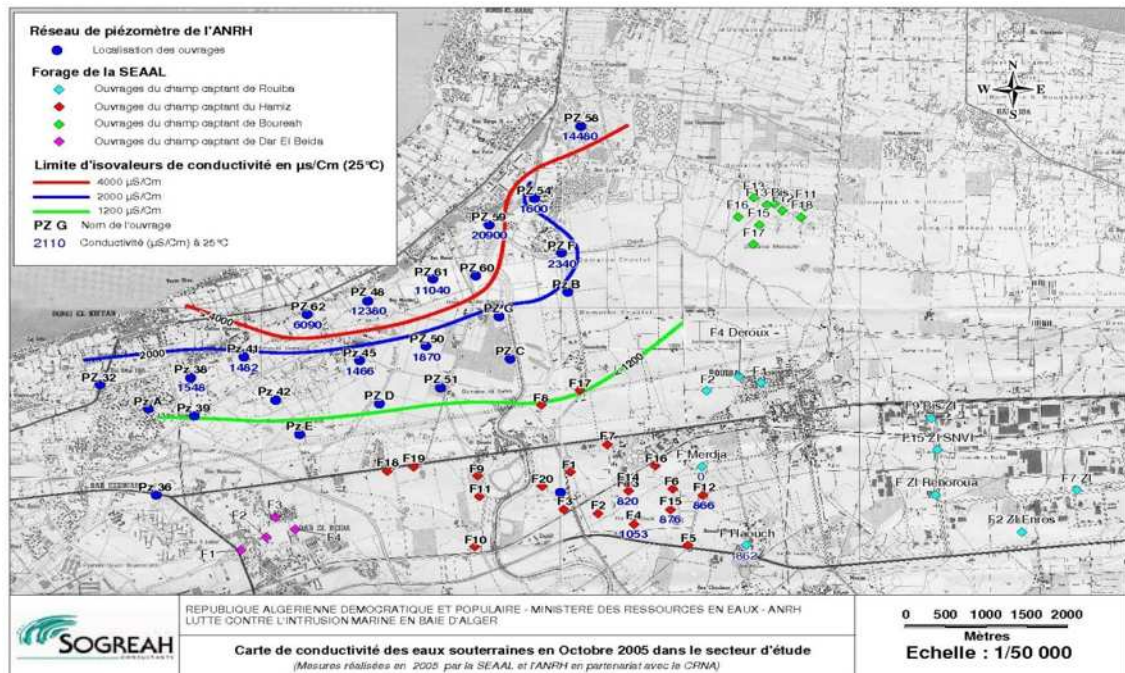


Figure 21: Carte d'isovaleurs des conductivités des eaux souterraines en octobre 2005.

La carte d'isovaleurs des conductivités réalisée en 2007 montre que le front salé provient globalement du secteur du bateau cassé et semble avoir avancé. En effet, la limite de 2000 μ S/cm se trouve désormais au-delà des piézomètres Pz C et Pz 51, ce qui n'était pas le cas en 2005. On constate que la limite de la courbe d'iso-conductivité 1200 μ S/cm atteint désormais les forages F8 et F17 du champ captant du Hamiz (figure 22).

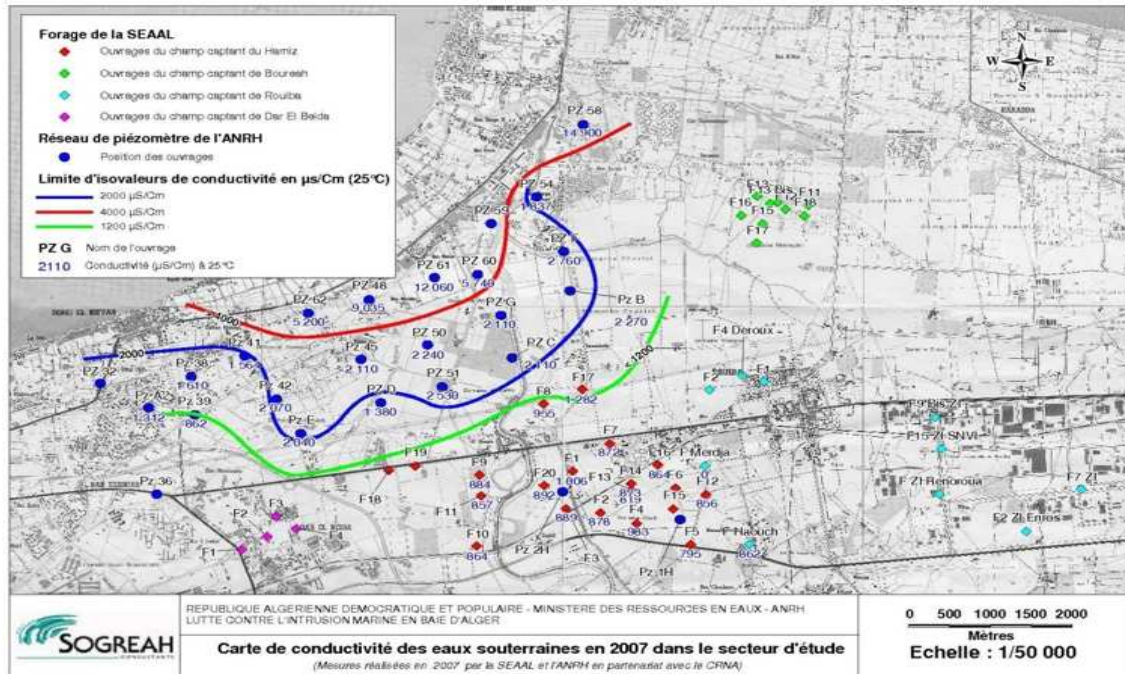


Figure 22: Carte d'isovaleurs des conductivités des eaux souterraines en septembre 2007.

La carte d'isovaleurs des conductivités réalisée en 2009 révèle que le biseau salé se situerait à environ 4 km des côtes en direction du champ captant du Hamiz. Les forages F8 et F17 du champ captant du Hamiz sont atteints par une contamination des eaux salées. La limite de conductivité inférieure à 1200 μ S/cm se trouve au niveau du champ captant du Hamiz et qui correspond à l'extension maximale de l'intrusion marine. En conclusion, il semble qu'il existe un axe préférentiel d'écoulement et donc d'évolution de l'intrusion marine depuis le bateau cassé jusqu'au champ captant du Hamiz (figure 23).

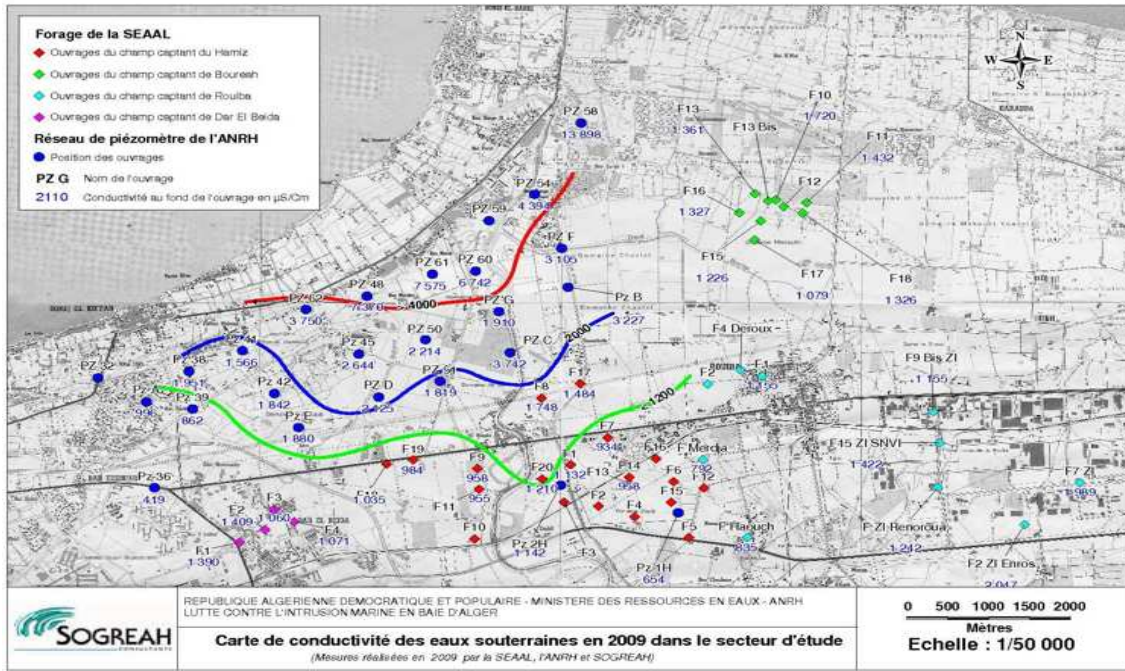


Figure 23: Carte d'isovaleurs des conductivités des eaux souterraines en décembre 2009.

b. Les faciès chimiques

Des études antérieures sur les faciès chimiques des eaux souterraines de la région de la Mitidja ont été réalisées depuis 2005 par l'ANRH en collaboration avec le CRNA sur le réseau de surveillance piézométriques et forages. Les résultats des analyses chimiques des eaux souterraines ont été représentés à l'aide d'un diagramme de Piper. Il devient ainsi aisé de déterminer le faciès chimique des eaux.

- **Faciès chimique de la baie d'Alger en mai 2005**

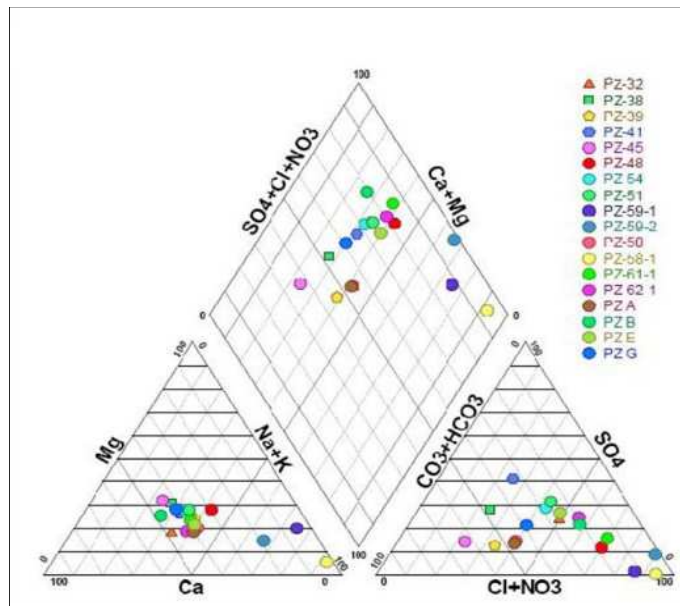


Figure 24: Diagramme de Piper de la partie supérieure de l'aquifère (mai 2005).

Le faciès chimique, d'après le diagramme de Piper, est en gros un faciès chloruré et sulfaté calcique et magnésien, sauf pour deux échantillons qui présentent un faciès hyperchloruré sodique, il s'agit de **Pz 59** et **Pz 58** qui sont fortement contaminés par les eaux salées (figure 24).

- **Faciès chimique de la baie d'Alger en 2006 :**

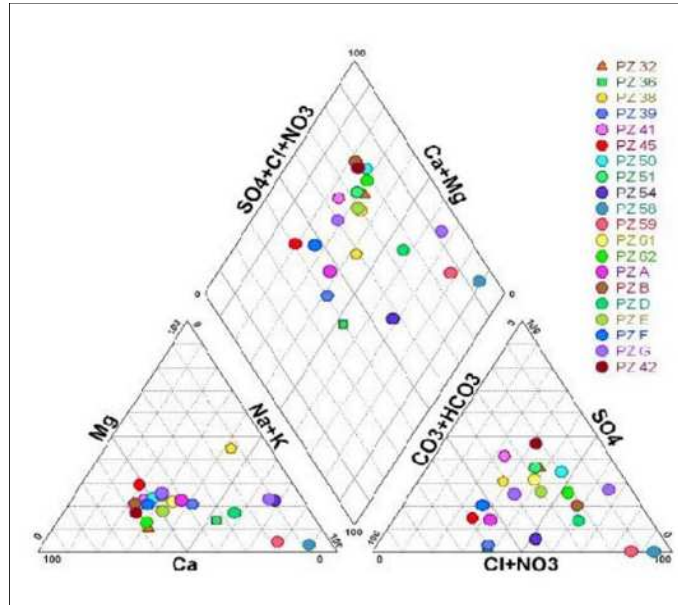


Figure 25: Diagramme de Piper des analyses d'eau à la surface des ouvrages (2006).

Ce diagramme est identique à celui de 2005, on remarque toutefois que le piézomètre **Pz G** présente un faciès hyperchloruré (figure 25).

- **Faciès chimique de la baie d'Alger en 2007 :**

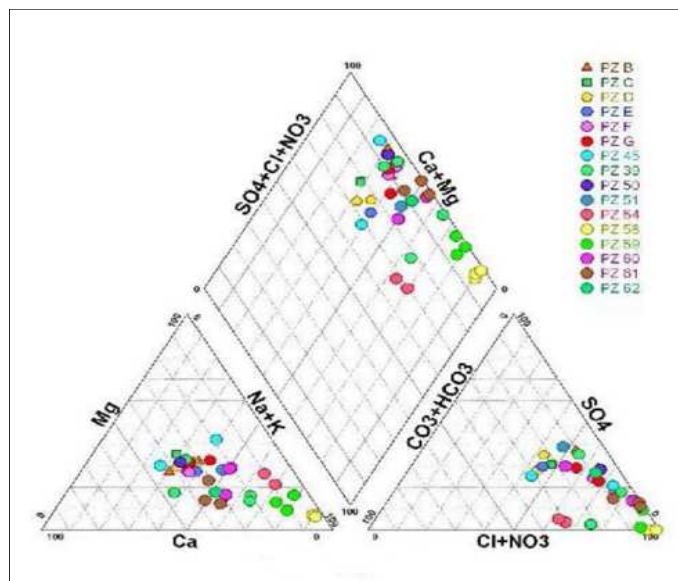


Figure 26: Diagramme de Piper des analyses d'eau à différentes profondeurs (septembre 2007).

On constate qu'en 2007, il y a moins d'ouvrages présentant un faciès hyperchloruré. Excepté les piézomètres qui se trouvent dans la zone envahie et qui montrent un faciès caractéristique d'une intrusion marine (figure 26).

II.8.3 Résultats des analyses isotopiques

Les données isotopiques ($^{18}\text{O}/^2\text{H}$) anciennes qui existent depuis une dizaine d'années ont été mises à notre disposition par l'ANRH. Ces données au nombre de 61 ont été analysées au laboratoire de l'hydrologie isotopique de l'AIEA en 2005 et concernent les points d'eau de la zone d'étude. Ces données sont d'un grand intérêt pour l'analyse de l'évolution du biseau salé.

En effet, traitées sur un diagramme $^{18}\text{O}/^2\text{H}$, elles montrent deux groupes de points distincts (figure 27) :

- ✓ Un nombre de points sur la droite météorique mondiale (DMM), ceci indique que ces eaux sont d'origine météorique et non évaporées.
- ✓ Un autre nombre de points qui se détachent de la DMM et qui montre clairement une droite de mélange eau douce /eau de mer avec une combinaison plus complexe entre mélange et effet d'évaporation.

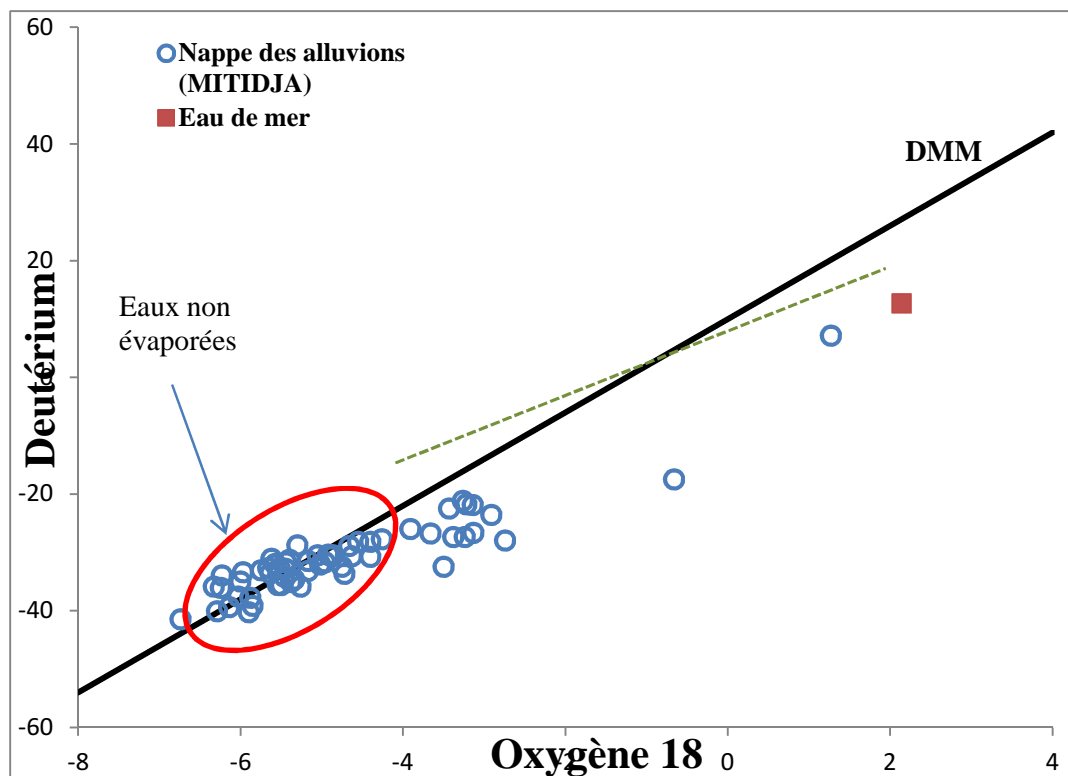


Figure 27: Diagramme $^{18}\text{O}/^2\text{H}$ sur les eaux souterraines de la Mitidja Est.

Chapitre III :

Matériel et méthodes

III.1. Prélèvement et conservation des échantillons d'eau

Les activités menées dans le cadre de cette étude sont la réalisation des campagnes de mesures et de prélèvements d'eau sur 48 ouvrages (forages et piézomètres) de la région de la Mitidja Est plus précisément la partie Nord de l'aquifère, dans la zone de recharge à proximité de la mer. Plusieurs profils de conductivité et température ont été aussi réalisés pour localiser et caractériser le biseau salé. Ces échantillons d'eau ont fait l'objet d'analyse isotopique (Oxygène-18 et Deutérium) au laboratoire du CRNA et analyse chimique des eaux au laboratoire d'analyse de l'ANRH. Ces campagnes de prélèvements et de mesures ont concerné les différents champs captant de Bordj-El-Kiffan, Bouréah, Hamiz, Dar-El-Beida, Rouiba et Réghaia.

Les prélèvements d'eau au niveau des forages et des piézomètres accessibles ont été réalisés à l'aide d'un échantillonneur d'eau de type Bailer (figure 28) et un préleveur d'eau de type Niskin (figure 29). Certains forages sont équipés par des robinets et donc plus accessibles pour les prélèvements d'eau.

Les échantillons d'eau ont été prélevés dans des flacons en polyéthylène de différents volumes pour les analyses chimiques et isotopiques au laboratoire. Chacun des flacons est numéroté soigneusement avec la date de prélèvement, le numéro de l'ouvrage, et la nature des analyses à effectuer.

Ils ont été ensuite rincés deux ou trois fois avec l'eau à analyser afin qu'ils gardent les mêmes caractéristiques des eaux. Les échantillons d'eau sont ensuite transportés dans des glacières et conservés dans le réfrigérateur à 4 °C au laboratoire (Rodier, 2009).

III.2. Moyens et méthodes d'analyses

III.2.1. Mesure des caractéristiques physico-chimiques in situ

Les mesures in situ des paramètres physico-chimiques tels que la conductivité électrique, la température et le pH ont été effectuées au moment de l'échantillonnage. Ces mesures ont été réalisées avec un conductivimètre de type WTW relié à une sonde (figure 30) et la sonde de mesure de pH. Des profils de conductivité et température ont été effectués au niveau des piézomètres accessibles et des forages à l'arrêt au niveau des différents champs captant.

Les différents types d'équipements et matériels utilisés sur le terrain sont :

- Préleveur d'eau de type **Bailer** et 100 m de câble.
- Préleveur d'eau de type **Niskin** et 100 m de câble.
- Conductivimètre de type **WTW** avec sonde et 100 m de câble.
- Sonde de mesure de pH de type **Hanna** avec une précision de 0,01.
- GPS (Global Position System) de type **Garmin**.
- Plusieurs flacons de différents volumes (500ml, 250 ml, 100 ml, 60 ml, etc...).
- Système de filtration de type **EZ FitHOLD1** au laboratoire.



Figure 28: *Préleveur de type Bailer.*



Figure 29: *Préleveur d'eau de type NISKIN.*



Figure 30: *Conductivimètre avec sonde.*



Figure 31: *pH-mètre.*



Figure 32: *Flacons en polyéthylène.*



Figure 33: *GPS.*

III.2.2. Analyses au laboratoire

1. Analyse des ions majeurs

Les échantillons d'eau prélevés au niveau des champs captant ont été analysés au laboratoire de l'ANRH qui dispose d'une **chaîne automatique d'analyse par colorimétrie** (figure 34) capable d'analyser la plupart des éléments majeurs dans l'eau, et d'un **spectrophotomètre d'émission de flamme modèle 410** (figure 35).

Ces deux dispositifs permettent d'analyser les concentrations en éléments suivants :

- Les cations (Ca^{+2} , Mg^{+2} , K^+ , Na^+)
- Les anions (HCO_3^- , SO_4^{-2} , Cl^- , NO_3^-)

2. Analyse des isotopes stables de l'eau par spectromètre Laser

Le spectromètre laser permet de mesurer les teneurs en isotopes stables de la molécule d'eau (Oxygène-18 et Deutérium). Le spectromètre Laser de type **Picarro L 2110 i** (figure 36) a été récemment développé pour mesurer les teneurs isotopiques des rapports moléculaires $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ et $^2\text{H}/^1\text{H}$ dans les échantillons d'eau avec une bonne précision.

L'analyse est basée sur la loi de Beer-Lambert un nanoéchantillon d'eau est vaporisé sur le trajet du faisceau laser et les interférences créées sont proportionnelles aux rapports isotopiques de l'échantillon.

Le spectromètre laser permet d'analyser des échantillons aussi petits que 100 μl . La précision sur les mesures est de $\pm 1 \text{ ‰}$ pour $\delta^2\text{H}/\text{H}$ et $\pm 0,2 \text{ ‰}$ pour $\delta^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$. La séparation entre les isotopes lourds et légers se base sur les valeurs de l'absorption d'un rayonnement Laser.



Figure 34: Chaîne automatique d'analyse par colorimétrie.



Figure 35: *Spectrophotomètre d'émission de flamme modèle 410.*



Figure 36: *Spectromètre laser de type Picarro L 2110 i.*

Chapitre IV :

Résultats et discussion

IV.1 La piézométrie actuelle de la nappe aquifère de la Mitidja Est

La piézométrie actuelle de la nappe a été établie avec les niveaux statiques mesurés lors de la campagne de prélèvement d'eau durant la période juin 2013 sur le réseau piézométrique de l'ANRH et quelques forages à l'arrêt dans le champ captant de Hamiz, il s'agit de **F1**, **F7**, **F8 bis**, **F17**, et **F20**.

On remarque que le niveau piézométrique sur la quasi-totalité des points est inférieur au niveau de la mer. Au niveau du champ captant du Hamiz, le niveau piézométrique peut atteindre 19 m sous le niveau de la mer (Pz 1 Hamiz). Le sens d'écoulement actuel se fait de la mer vers le continent (figure37).

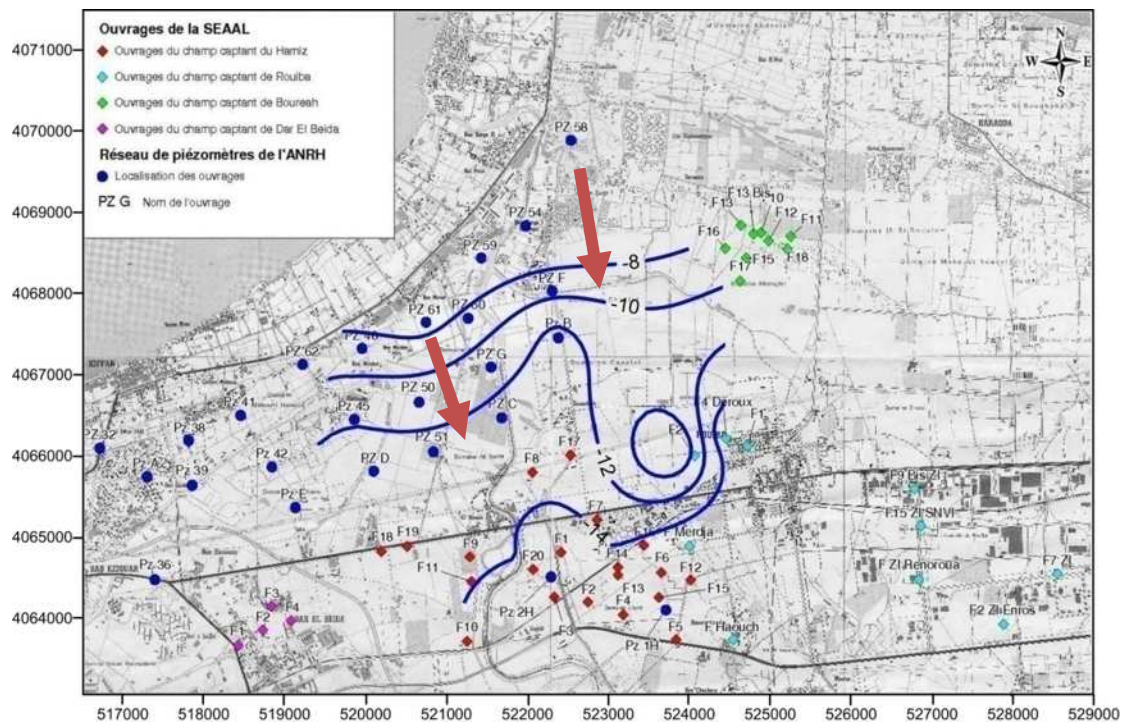


Figure 37: Esquisse piézométrique de la nappe aquifère de Mitidja Est en juin 2013.

IV.2 La température

Les valeurs de la température varient entre 19 et 23 °C avec une moyenne de $20,53 \pm 1,11$ °C. Tous les ouvrages mesurés ont presque les mêmes grandeurs de température.

IV.3 Le pH

Les valeurs de pH varient entre une valeur minimale de l'ordre de 6,75 enregistrée au niveau du forage **F7** du champ captant de Hamiz à 40 m et une valeur maximale de 8,64 enregistrée au niveau du piézomètre **Pz 58** située à Bordj-El-Bahri. Avec une valeur moyenne de $7,19 \pm 0,12$, en général, les eaux souterraines de la région d'étude présentent un pH neutre.

IV.4 La conductivité électrique

La carte de conductivité des eaux souterraines en juin 2013 montre une avancée importante du front salé depuis la côte. La plupart des piézomètres contaminés par les eaux salées se trouvent dans la zone où la conductivité est supérieure à 4000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. On remarque que l'isovaleurs 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ se trouve à l'intérieur du champ captant du Hamiz. Par contre, celle de 1200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ correspond à l'avancée du front salé à la limite du champ captant du Hamiz (figure 38).

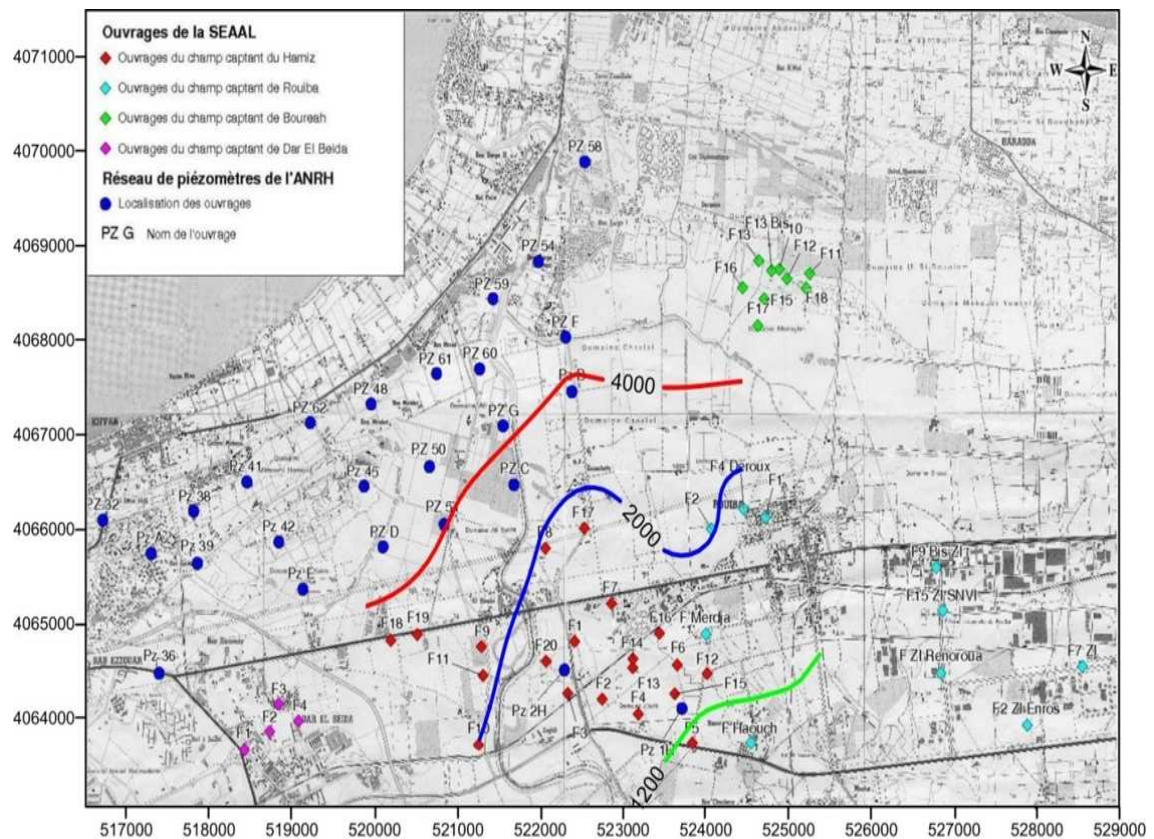


Figure 38: Carte de conductivité des eaux souterraines en juin 2013 dans le secteur d'étude

- **Profils de conductivité et température**

Plusieurs profils de conductivité et température ont été aussi réalisés pour localiser et caractériser le biseau salé au niveau de la Mitidja Est. Ces profils ont été tracés au niveau des piézomètres accessibles et forages à l'arrêt (09 piézomètres et 06 forages). Les profils ont fait l'objet d'une interprétation selon des transects et suivant le sens actuel d'écoulement (figure 39).

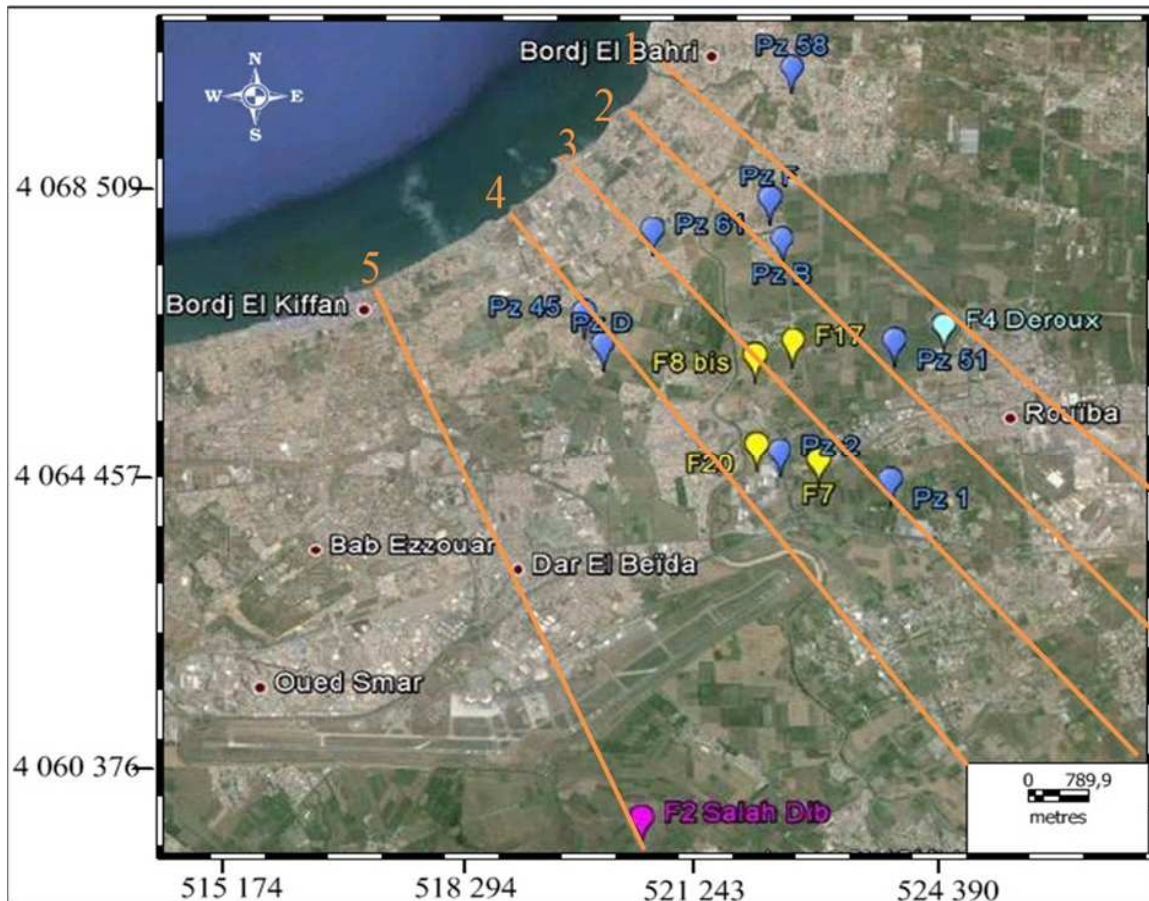


Figure 39: Répartition des points de mesure de conductivité selon les transects.

➤ **Transect 1**

✓ **Profil de conductivité et température sur le piézomètre Pz 58** (figure 40)

Le Piézomètre **Pz 58** se situe à Bordj El Bahri. Le profil de conductivité montre des valeurs constantes de $3000 \mu\text{S}/\text{cm}$ jusqu'à la profondeur de 22 m puis augmente progressivement pour atteindre la valeur de $15000 \mu\text{S}/\text{cm}$ à la profondeur de 45 m. On peut conclure que le piézomètre Pz 58 qui se trouve à la côte présente une forte contamination par les eaux salées à partir de la profondeur de 25 m.

Le profil de température montre des valeurs constantes où on enregistre 19.5°C à la surface et 20.5°C en profondeur.

✓ **Profil de conductivité et température sur le forage F4 Deroux** (figure 41)

Le Forage **F4 Deroux-Rouïba** se trouve dans le champ captant du Rouïba. Le profil de conductivité présente des valeurs similaires entre $1450 \mu\text{S}/\text{cm}$ et $1500 \mu\text{S}/\text{cm}$ sur toute la colonne d'eau.

Le profil de température présente des valeurs plus ou moins constantes de 19.4°C jusqu'à la profondeur de 60 m puis augmente légèrement pour atteindre la valeur de 19.7°C .

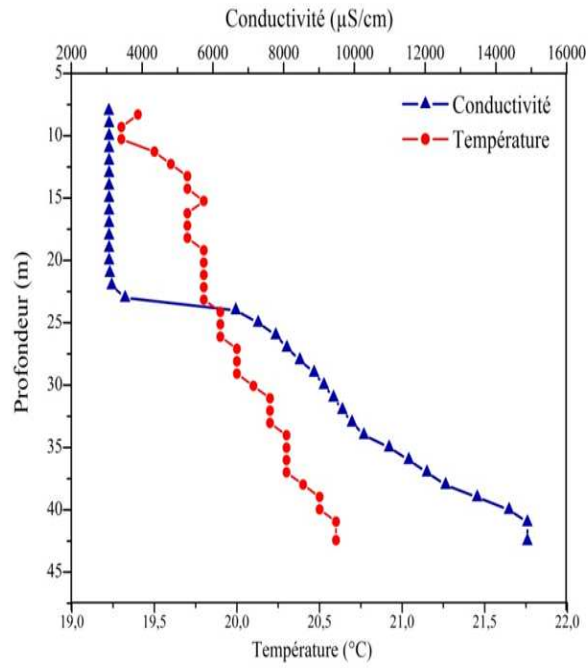


Figure 40: Profil de conductivité et température sur le piézomètre Pz 58.

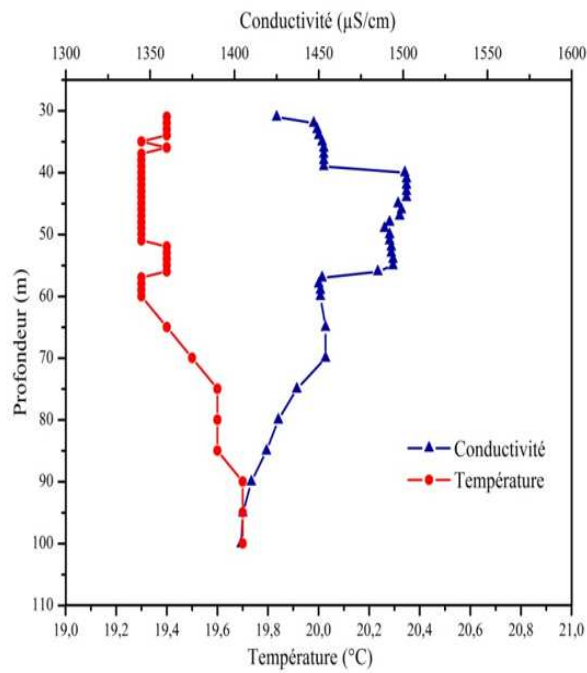


Figure 41: Profil de conductivité et température sur le forage F4 Deroux.

➤ **Transect 2**

✓ **Profil de conductivité et température sur le piézomètre Pz F** (figure 42)

Le Piézomètre **Pz F** se trouve près de Bordj El Bahri. Le profil montre des valeurs constantes de conductivité jusqu'à la profondeur de 40 m, avec des valeurs entre $2000\mu\text{S}/\text{cm}$ et $3000\mu\text{S}/\text{cm}$ puis il augmente brutalement pour atteindre la valeur de $7000\mu\text{S}/\text{cm}$ en profondeur. Le changement brutal de la conductivité indique la présence du front salé à partir de la profondeur de 40 m.

Le profil de température présente des valeurs constantes de $19.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ de la surface jusqu'en profondeur.

✓ **Profil de conductivité et température sur le piézomètre Pz B** (figure 43)

Le piézomètre **Pz B** se trouve près de Bordj El Bahri. Le profil de conductivité croît rapidement de la surface jusqu'à la profondeur de 30 m, puis il présente des valeurs constantes de conductivité de $3700\mu\text{S}/\text{cm}$ jusqu'à la profondeur de 60 m.

Le profil de température présente des valeurs rapprochées autour de la valeur de $19,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ sur tout le profil.

✓ **Profil de conductivité et température sur le piézomètre Pz 51** (figure 44)

Le piézomètre **Pz 51** se situe près du champ captant de Hamiz. Le profil de conductivité présente des valeurs variables en surface, puis il devient stable avec la valeur de $2660\mu\text{S}/\text{cm}$ jusqu'à atteindre la profondeur de 45 m.

Le profil de température est stable sur toute la colonne d'eau avec une valeur de $19,3\text{ }^{\circ}\text{C}$.

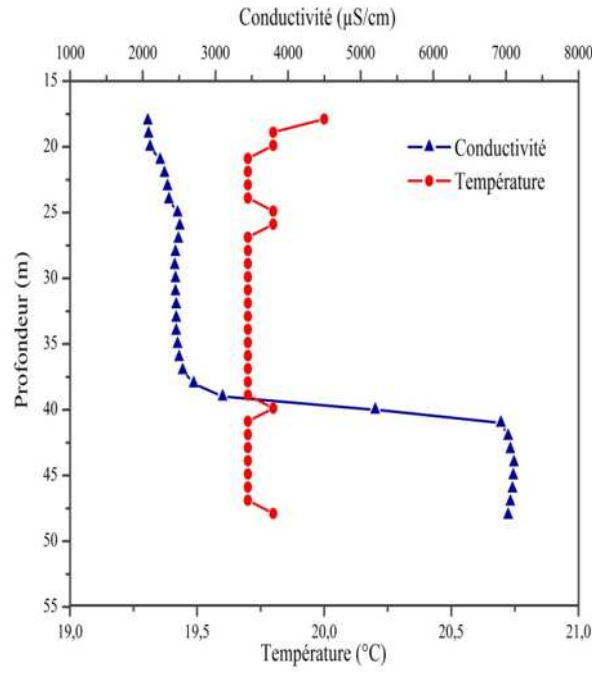


Figure 42: Profil de conductivité et température sur le piézomètre Pz F.

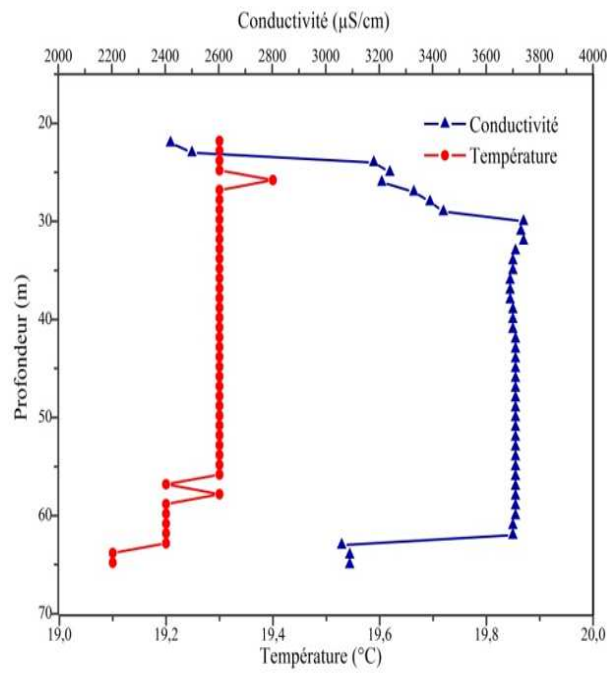


Figure 43: Profil de conductivité et température sur le piézomètre Pz B.

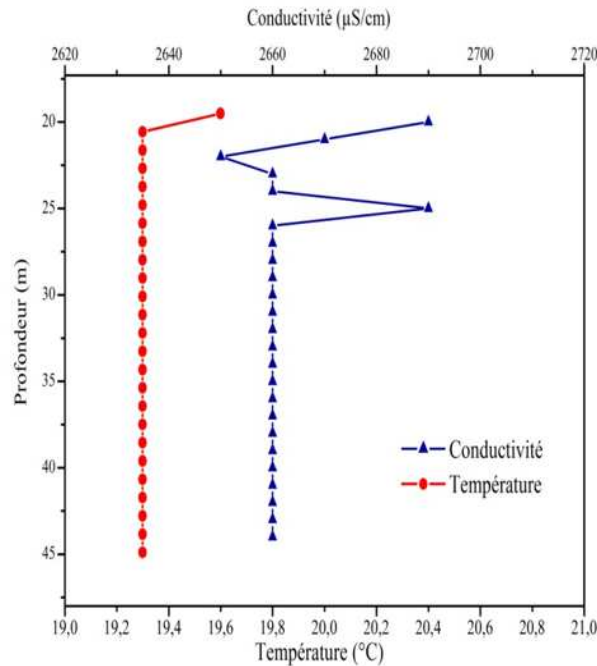


Figure 44: Profil de conductivité et température sur le piézomètre Pz 51.

➤ Transect 3

✓ Profil de conductivité et température sur le piézomètre Pz 61 (figure 45)

Le piézomètre **Pz 61** se trouve près de la côte. Le profil de conductivité du piézomètre Pz 61 montre des valeurs stables de la surface (2000 µS/cm) puis une croissance rapide vers des valeurs de 7000 µS/cm jusqu'au fond. Part conséquent, le piézomètre Pz 61 est localisé dans la zone contaminée par l'intrusion marine.

Le profil de température présente une variation à la surface comprise entre 20 °C et 19,1 °C et se stabilise sur le reste de la colonne d'eau.

✓ Profil de conductivité et température sur le forage F8 bis (figure 46)

Le Forage **F8 bis** se trouve dans le champ captant du Hamiz. Le profil de conductivité montre une augmentation variable des points de conductivité en surface jusqu'à la profondeur de 35 m et à partir de là on enregistre des valeurs constantes de conductivité de 1950µS/cm jusqu'au fond du piézomètre.

Le profil de température indique des valeurs homogènes au voisinage de 19,5 °C au niveau du piézomètre.

✓ Profil de conductivité et température sur le forage F17 (figure 47)

Le Forage **F17** se trouve dans le champ captant du Hamiz. Le profil de conductivité présente des variations de conductivité à la surface de 35 m puis augmente en se stabilisant jusqu'à la profondeur de 100 m avec la valeur de 1560 µS/cm.

Le profil de température présente des valeurs homogènes autour de 19,7 °C dans la quasi-totalité de la colonne d'eau.

✓ **Profil de conductivité et température sur le forage F7** (figure 48)

Le forage **F7** se situe dans le champ captant du Hamiz. Le profil de conductivité montre des valeurs homogènes autour de 1620 $\mu\text{S}/\text{cm}$ jusqu'à la profondeur de 50 m, puis on constate une diminution significative de la conductivité avec une valeur moyenne de 1615 $\mu\text{S}/\text{cm}$ jusqu'à la profondeur de 70 m.

Le profil de température est pratiquement constant avec une valeur de 19,7 °C au niveau du forage F7.

✓ **Profil de conductivité et température sur le piézomètre Pz 1** (figure 49)

Le piézomètre **Pz 1** se trouve dans le champ captant du Hamiz. Le profil de conductivité montre une conductivité oscillante entre 1240 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 1255 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en fonction de la profondeur.

Le profil de température enregistre des valeurs constantes de température jusqu'à la profondeur de 60 m puis augmente en profondeur pour atteindre la valeur de 20.6 °C.

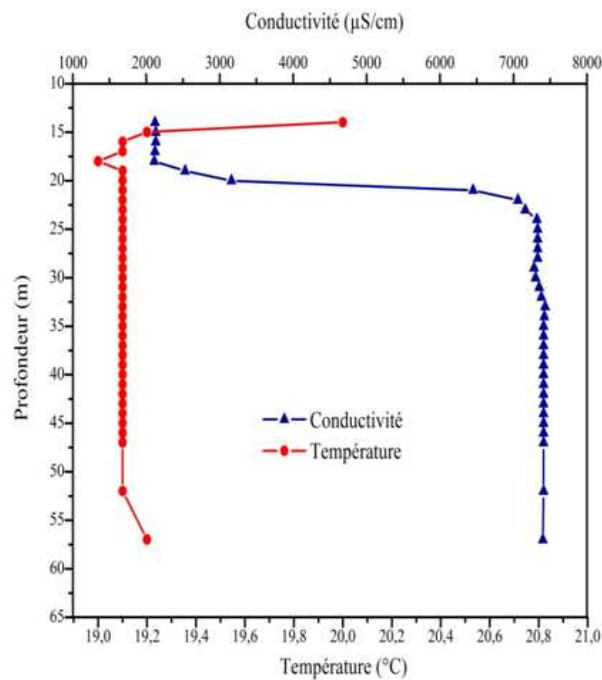


Figure 45: Profil de conductivité et température sur le piézomètre Pz 61.

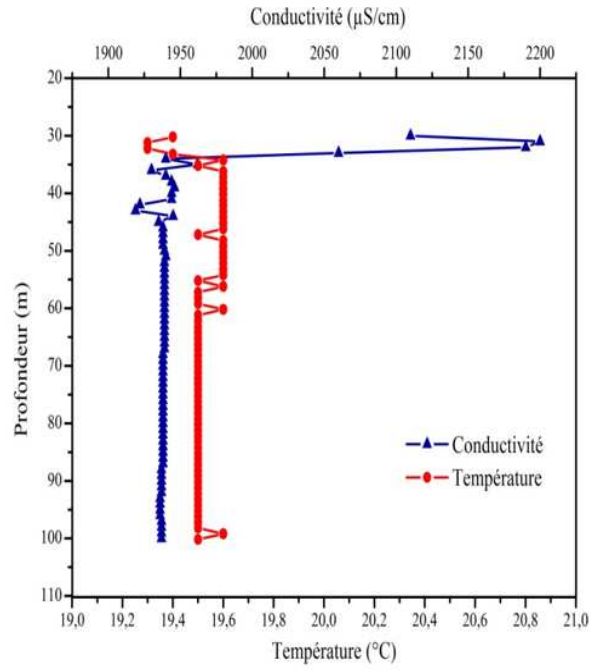


Figure 46: Profil de conductivité et température sur le forage F8 bis.

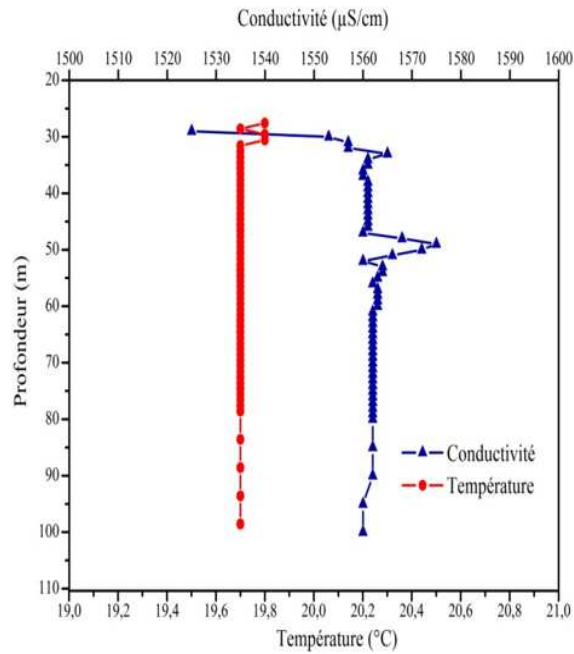


Figure 47: Profil de conductivité et température sur le forage F17.

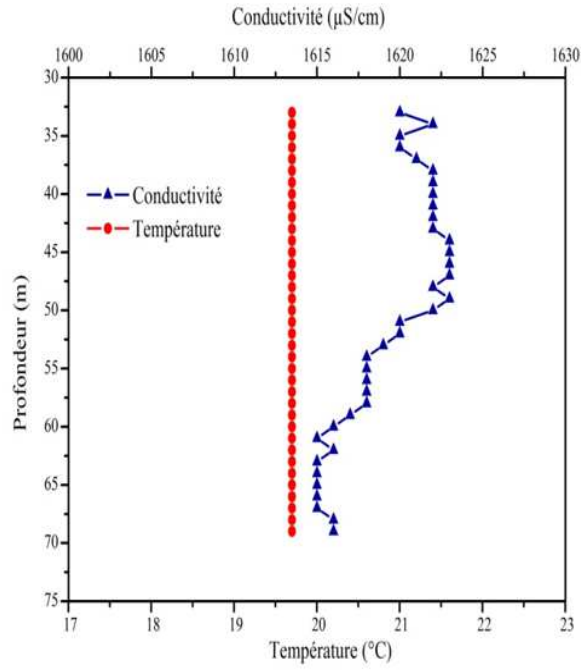


Figure 48: Profil de conductivité et température sur le forage F7.

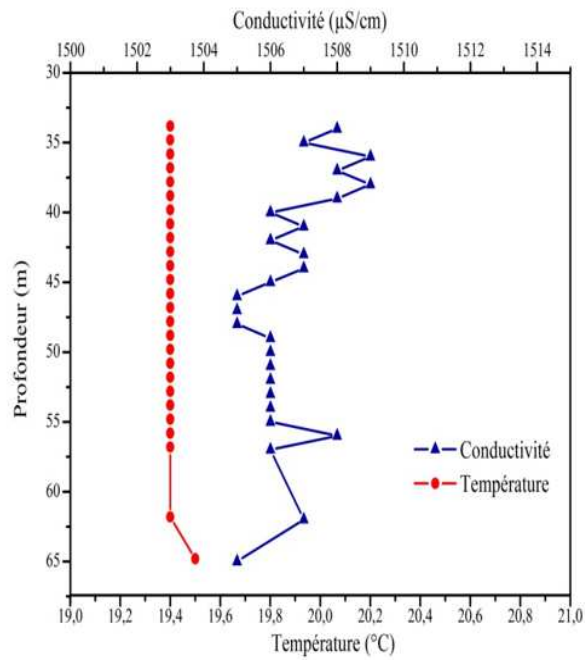


Figure 49: Profil de conductivité et température sur le piézomètre Pz 1.

➤ **Transect 4**

✓ **Profil de conductivité et température sur le piézomètre Pz 45** (figure 50)

Le Piézomètre **Pz 45** est localisé dans champ captant du Hamiz. Le profil de conductivité montre des valeurs constantes de 2890 $\mu\text{S}/\text{cm}$ jusqu'à la profondeur de 30 m. Il augmente progressivement pour atteindre la valeur de 3500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ jusqu'au fond du piézomètre.

Le profil de température présente une régression graduelle de 20,8 °C à 20 °C jusqu'à la profondeur de 33 m, puis il devient constant sur le reste de la colonne d'eau.

✓ **Profil de conductivité et température sur le piézomètre Pz D** (figure 51)

Le piézomètre **Pz D** se situe dans le champ captant du Hamiz. Le profil de conductivité présente des valeurs plus ou moins homogènes autour de 1100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ jusqu'à la profondeur de 33 m, puis augmente graduellement pour atteindre la valeur de 5340 $\mu\text{S}/\text{cm}$ à la profondeur de 45 m. À partir de 45 m, les valeurs sont constantes jusqu'en profondeur. Le piézomètre Pz D présente une contamination par les eaux salées à partir de la profondeur de 45 m.

Le profil de température présente des valeurs rapprochées de 19,7 °C jusqu'à la profondeur de 60 m.

✓ **Profil de conductivité et température sur le forage F20** (figure 52)

Le Forage **F20** se situe dans le champ captant du Hamiz. Le profil de conductivité présente des valeurs inférieures à 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ à la surface jusqu'à la profondeur de 40 m, puis une augmentation brusque avec des valeurs constantes de 1460 $\mu\text{S}/\text{cm}$ jusqu'à la profondeur de 100 m.

Le profil de température présente des valeurs rapprochées de 19,5 °C jusqu'à la profondeur de 100 m.

✓ **Profil de conductivité et température sur le piézomètre Pz 2** (figure 53)

Le Piézomètre **Pz 2** se trouve dans le champ captant du Hamiz. Le profil de la conductivité présente des valeurs comprises entre 1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 1510 $\mu\text{S}/\text{cm}$ dans toute la colonne d'eau.

Le profil de température est pratiquement constant au niveau du piézomètre Pz 2.

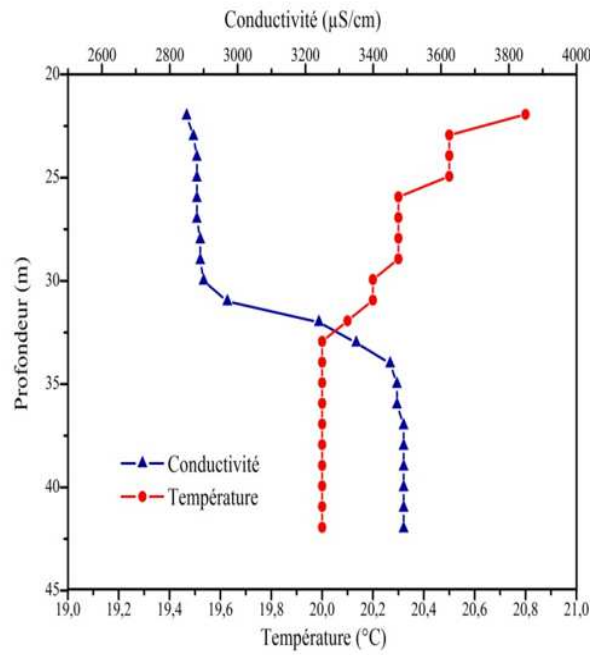


Figure 50: Profil de conductivité et température sur le piézomètre Pz 45.

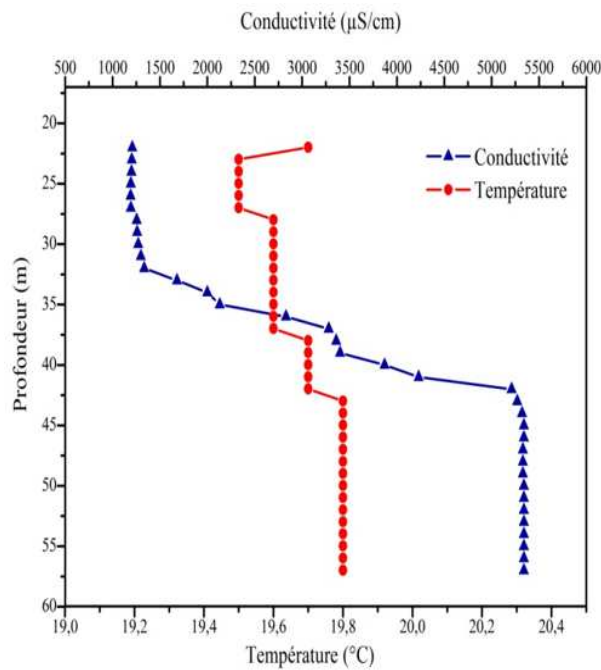


Figure 51: Profil de conductivité et température sur le piézomètre Pz D.

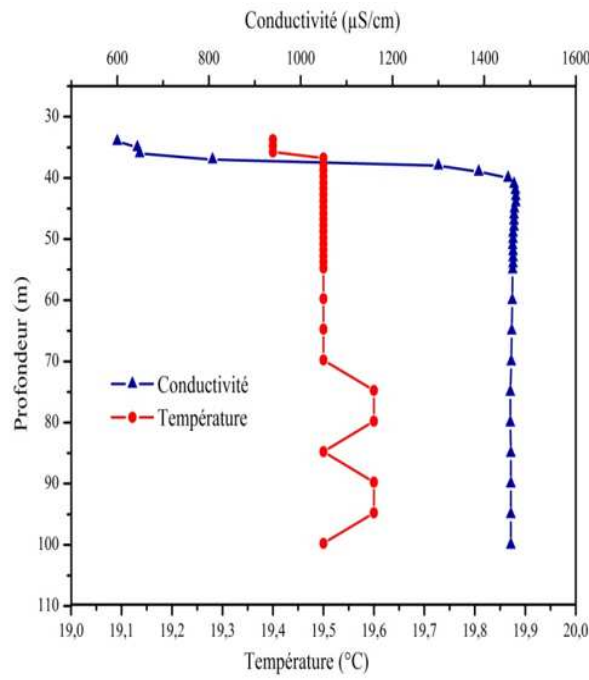


Figure 52: Profil de conductivité et température sur le forage F20.

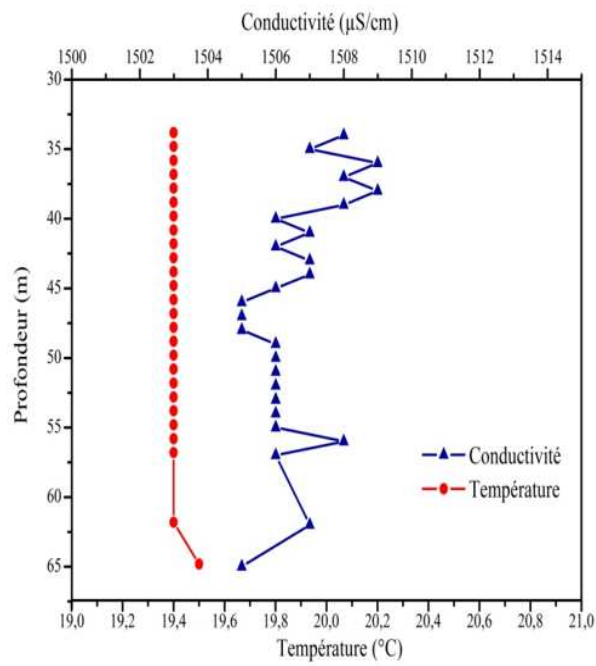


Figure 53: Profil de conductivité et température sur le piézomètre Pz 2.

➤ **Transect 5**

✓ **Profil de conductivité et température sur le forage F2 Salah Dib (figure54)**

Le Forage **F2** Salah Dib se situe dans le champ captant de Dar El Beida. Le profil de conductivité montre une légère progression de conductivité en surface puis il devient en général constant jusqu'au fond du forage F2 avec la valeur de 1380 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Le profil de température présente des valeurs proches de 19,6 °C dans toute la colonne d'eau du forage F2.

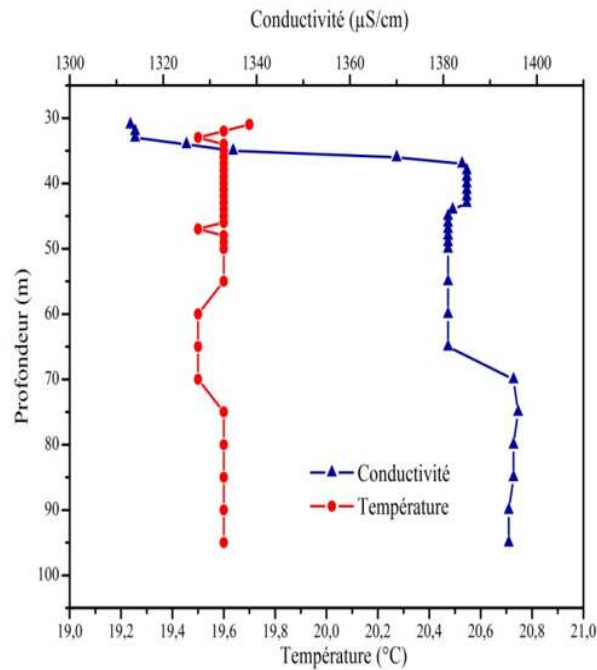


Figure 54: Profil de conductivité et température sur le forage F2 Salah Dib.

IV.5 Faciès chimiques de la région d'étude

Les résultats des analyses chimiques des eaux de la nappe, reportés sur le diagramme de Piper montrent une homogénéité chimique. Le faciès chimique est de type chloruré, sulfaté calcique et magnésien à l'exception du piézomètre Pz 58 qui présente un faciès hyper chloruré sodique (figure 55).

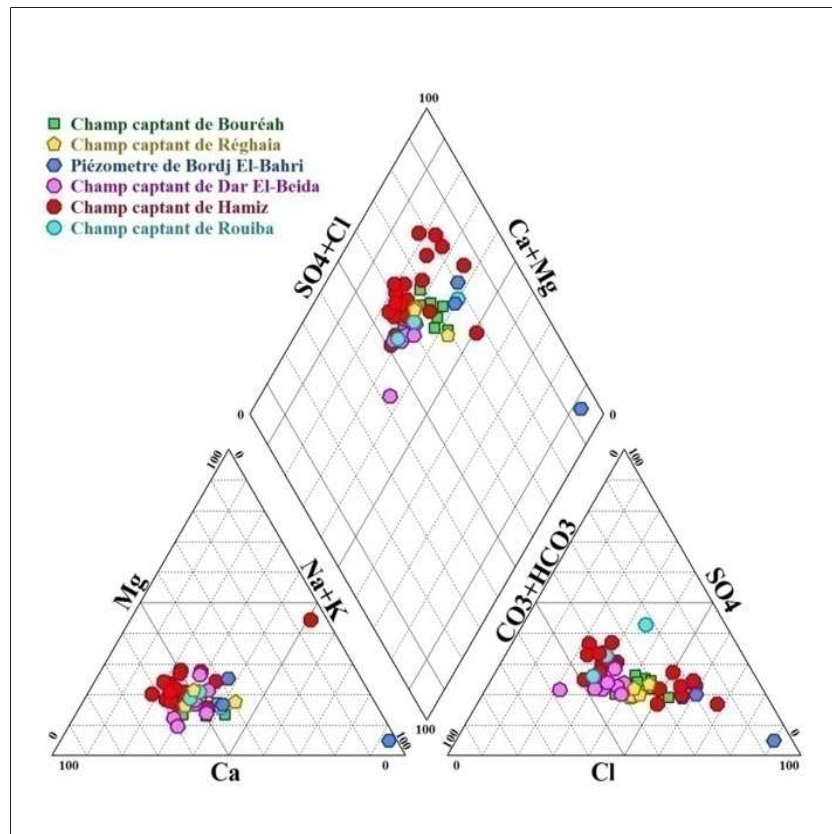


Figure 55: Faciès chimique globale de la zone d'étude selon Piper.

- Faciès chimiques des champs captant

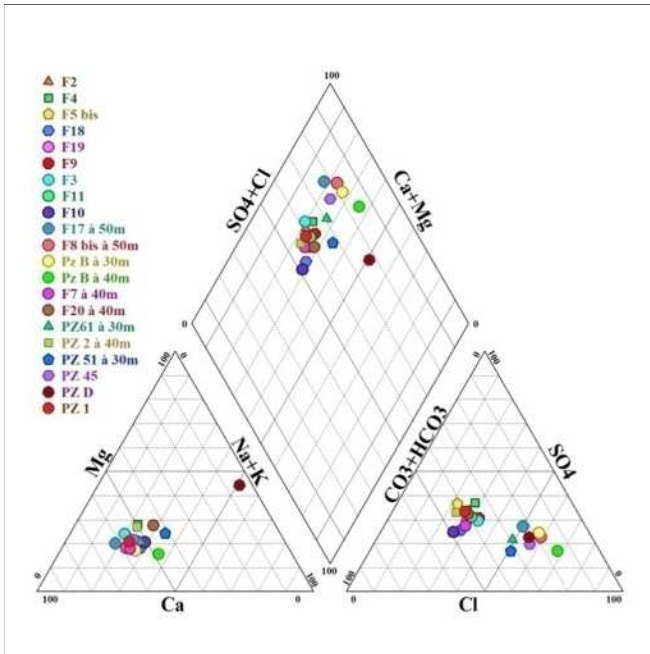


Figure 56: Diagramme de Piper du champ captant de Hamiz.

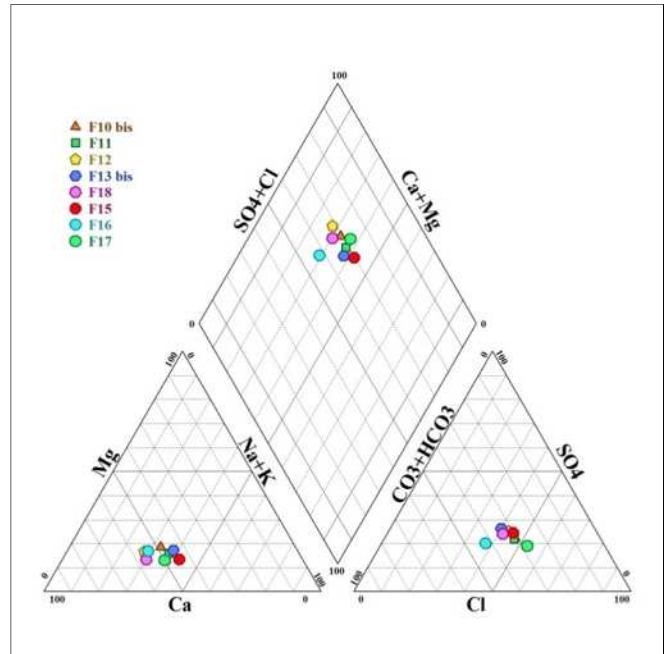


Figure 57: Diagramme de Piper du champ captant de Bouréah.

- Le diagramme de Piper du champ captant du Hamiz montre que les eaux ont globalement un faciès chloruré et sulfaté calcique et magnésien (figure 56).
- Le diagramme de Piper montre que les eaux du champ captant de Bouréah ont un faciès chimique chloruré et sulfaté calcique et magnésien (figure 57).

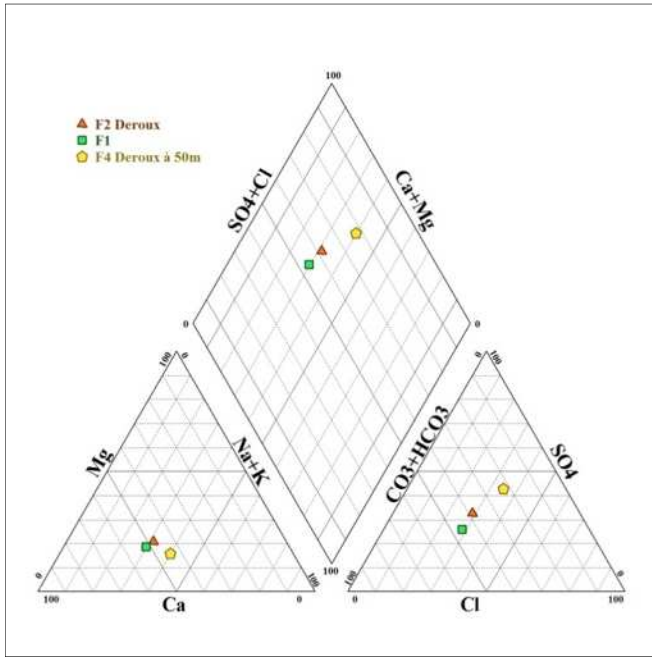


Figure 58: Diagramme de Piper du champ captant de Rouiba.

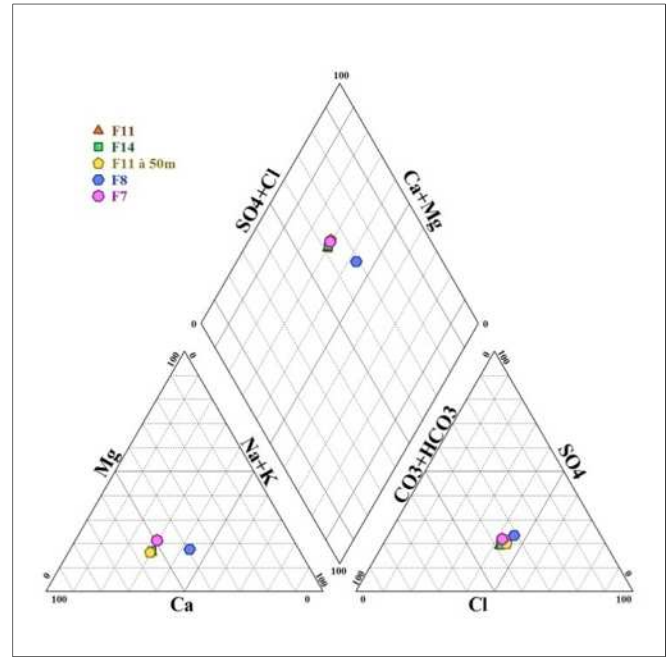


Figure 59: Diagramme de Piper du champ captant de Réghaia.

- Les trois points d'eau échantillonnés au niveau du champ captant de Rouiba montrent un faciès chimique chloruré et sulfaté calcique et magnésien (figure 58).
- Le faciès chimique des eaux du champ captant de Réghaia est chloruré et sulfaté calcique et magnésien (figure 59).

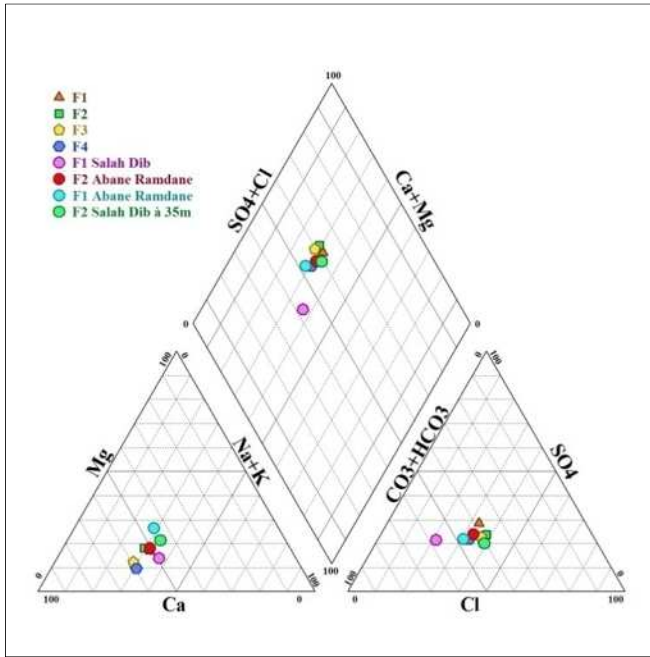


Figure 60: Diagramme de Piper du champ captant de Dar El-Beida.

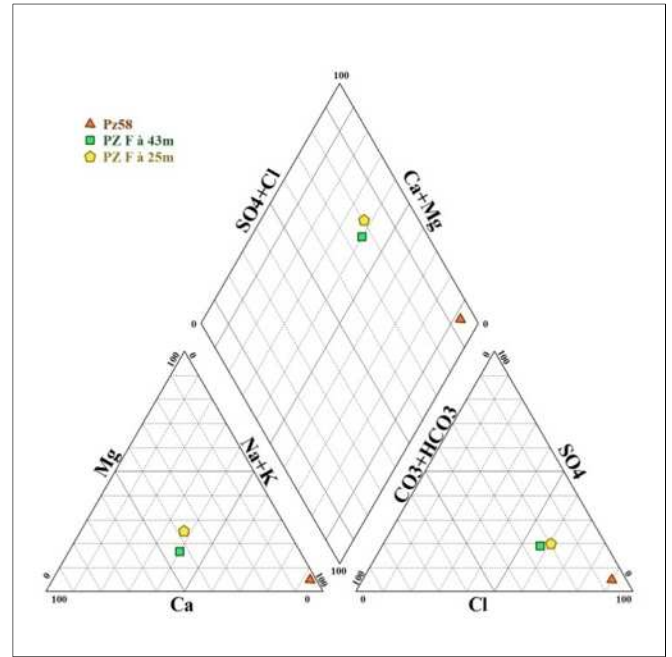


Figure 61: Diagramme de Piper du champ captant de Bordj El-Bahri.

- Les eaux prélevées du champ captant de Dar El-Beida sont de faciès chloruré et sulfaté calcique et magnésien, à l'exception du forage **F1 Salah Dib** qui présente un faciès bi/carbonaté calcique et magnésien (figure 60).
- Le diagramme de Piper du champ captant de Bordj El-Bahri montre que les eaux sont chlorurées et sulfatées, calciques et magnésiennes, excepté le piézomètre **Pz 58** qui présente un faciès de type hyper chloruré sodique (figure 61).

IV.6 Résultats isotopiques

Les résultats isotopiques des échantillons d'eaux sont déterminés au laboratoire de CRNA. Les points sont alignés en grande partie sur une droite positionnée entre la Droite météorique mondiale (DMM) et la Droite météorique de la Méditerranée Orientale (DMMO). Cette droite pourrait correspondre à la recharge de l'aquifère de Mitidja-Est.

On observe toutefois une certaine variabilité de composition isotopique des points qui tombent sur cette droite. Ceci ne permet pas d'utiliser ces renseignements pour identifier des aquifères ou des types d'eau différents, et laisse soupçonner que les forages captent un aquifère multicouche en mettant en connexion et mélangeant différentes eaux.

De plus, 3-4 points de prélèvement (F1 Rouiba ; F17 Hamiz; F12 et F13 bis à Bouréah) se détachent remarquablement de cette droite et se positionnent sur ou en dessous de la DMM. Ces points indiquent la présence de phénomènes qui modifient la composition isotopique des eaux souterraines qui ne peuvent pas être clairement identifiés (il ne semble pas s'agir d'évaporation ni de mélange avec de l'eau de mer)

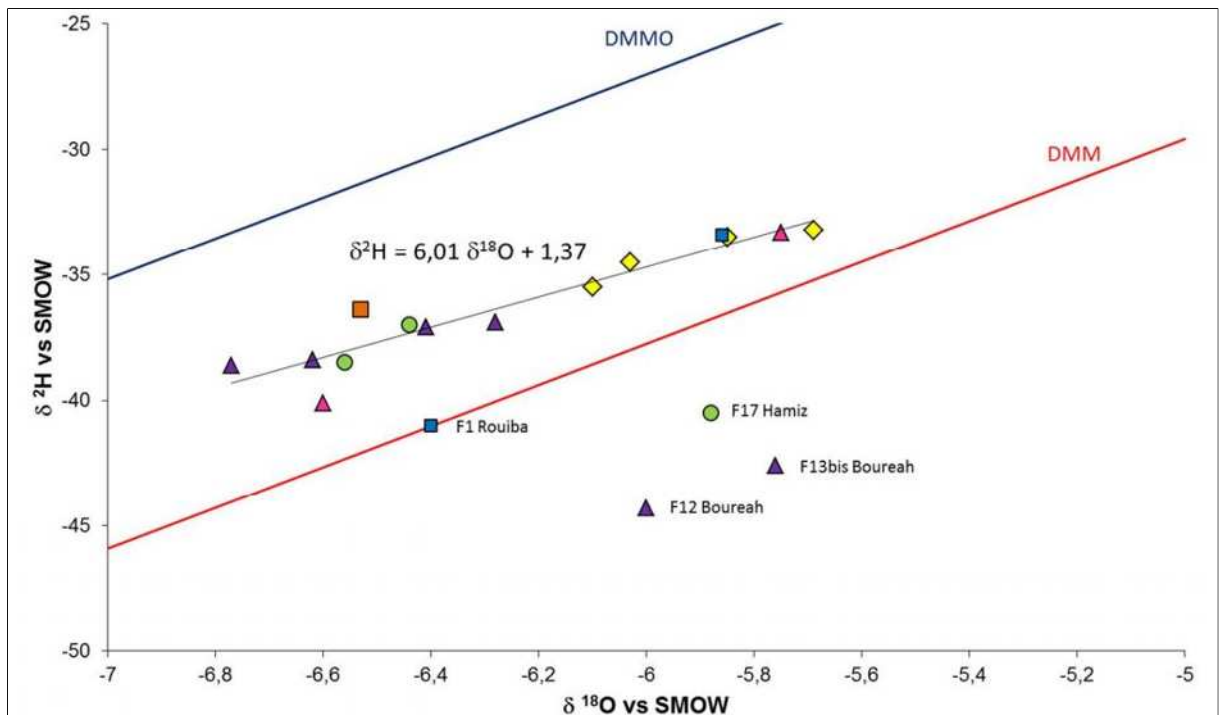


Figure 62: Composition isotopique de l'eau. Les points ont une couleur différente en fonction du champ captant.

(violet = Bouréah; rond vert = forages Hamiz; carré vert = piézomètres Hamiz ; jaune = Réghaia ; bleu = Rouiba ; marron = Dar el Beida ; mauve = Abane Ramdane et Salah Dib). DMM = Droite Météorique Mondiale (Rozanski et al, 1993) ; DMMO = Droite Météorique de la Méditerranée Orientale (Gat et Carmi, 1970).

Conclusion et recommandations

Conclusion et recommandations

Cette étude rentre dans le cadre du projet de coopération technique avec l'Agence International de l'Énergie Atomique (AIEA) et intitulé « Préservation et protection des eaux souterraines contre les risques de pollution en utilisant les techniques isotopiques ».

Cette étude est réalisée au niveau de la nappe aquifère de la Mitidja Est qui est la plus vaste et la plus riche en eau douce, de bonne qualité. Elle approvisionne en eau l'agglomération d'Alger et sa périphérie ainsi que d'importants périmètres irrigués et de nombreuses industries.

Compte tenu de son importance sur le plan socio-économique, de son étendue relativement importante et de sa relative complexité, cette nappe a bénéficié très tôt des techniques les plus avancées en matière de prospection et d'études.

Dans le cas de notre étude, nous présentons les résultats essentiels acquis lors de ce travail qui a consisté à l'utilisation combinée des techniques hydrochimiques et isotopiques pour étudier le problème de salinisation de la nappe aquifère de la Mitidja Est.

L'étude et l'observation des différentes cartes géologiques de la région montrent l'existence de deux grands ensembles de terrain l'un sédimentaire et l'autre métamorphique. Les formations dunaires et alluvionnaires d'âge quaternaire constituent l'une des roches réservoir du système aquifère de la Mitidja Est.

Sur le plan hydrogéologique, l'analyse des séries stratigraphiques réalisées dans la plaine permet de mettre en évidence deux aquifères principaux :

- L'aquifère contenu dans les calcaires et les grès de l'Astien.
- Les alluvions du Quaternaire qui affleurent sur la majeure partie de la plaine.

Ces deux aquifères sont séparés par la formation d'El Harrach, sauf dans la partie Nord-Ouest où ils sont en contact direct.

L'analyse des données météorologiques disponibles de la Mitidja Est montre une moyenne pluviométrique de 594 mm sur l'ensemble de la région d'étude. Il apparaît également une succession des années sèches entrecoupées par des années humides. Les températures varient entre 12 °C et 24 °C.

Le niveau piézométrique de la région d'étude est inférieur à celui de la mer. Le champ captant du Hamiz (Pz 1) atteint un niveau piézométrique de 19m sous le niveau de la mer. On remarque que le sens d'écoulement actuel se fait de la mer vers le continent.

Les paramètres physico-chimiques (température, conductivité et pH) de la nappe aquifère de la Mitidja montrent des températures homogènes comprises entre 19 et 23 mesurées dans tous les ouvrages. Les pH ont des valeurs comprises entre 6 et 7, en général, les eaux souterraines de la région d'étude présentent un pH neutre.

Les mesures de conductivités de juin 2013 montrent une avancée importante du front salé depuis la côte. La plupart des piézomètres contaminés par les eaux salées se trouvent dans la zone où la conductivité est supérieure à 4000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. On remarque que les valeurs de

Conclusion et recommandations

conductivité comprises entre 1200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ont été mesurées à l'intérieur du champ captant du Hamiz.

Plusieurs profils de conductivité et température ont fait l'objet d'interprétation selon les transects et suivant le sens actuel d'écoulement pour localiser et caractériser le biseau salé au niveau de la Mitidja Est.

Les faciès chimiques des eaux de la région représentés sur le diagramme de Piper montrent une homogénéité chimique. Le faciès chimique est dominé par les eaux de type chloruré, sulfaté calcique et magnésien. Exception faite pour le piézomètre Pz 58 qui présente un faciès hyper chloruré sodique.

L'étude isotopique a permis de caractériser la recharge de l'aquifère de Mitidja-Est. On observe toutefois une certaine variabilité de composition isotopique des points qui tombent sur cette droite. Ceci ne permet pas d'utiliser ces renseignements pour identifier des aquifères ou des types d'eau différents, et laisse soupçonner que les forages captent un aquifère multicouche en mettant en connexion et mélangeant différentes eaux.

Ce projet sur l'aquifère de la Mitidja est d'importance capitale pour le pays et la région d'Alger. La nappe est affectée par des prélèvements non règlementés qui engendrent une intrusion d'eau salée. Cette zone étudiée est fortement compromise et il devient urgent de protéger la ressource en eau de l'impact anthropique. De nombreux forages sont actuellement à l'arrêt pour l'une ou l'autre raison, et les phénomènes observés ne cessent de s'empirer.

Il est nécessaire de procéder à un inventaire et à une réglementation des prélèvements effectués par les privés (puits agricoles et forages industriels) afin d'éviter la surexploitation de la nappe. Dans ce cadre, les outils isotopiques fournissent des renseignements indispensables pour la compréhension de l'hydrodynamique et des sources de pollution.

Références bibliographiques

- AICHOURI, I. (2009).** Contribution à la mise en évidence de l'intrusion marine dans la plaine d'Annaba. *Mémoire de magister*, université de Badji Mokhtar, Annaba. 140p.
- AIT-OAULI, A. (2007).** Synthèse hydrogéologique et vulnérabilité à la pollution du système aquifère Quartenaire de la Mitidja. *Mémoire de Magister*, USTHB, Alger. 188p.
- AYME, A. (1964).** Carte géologique au 1/50000 Alger. Publication, carte, série, géologie, Alger. N°21.
- BANTON, O., BANGOY, L. (1999).** Hydrogéologie : multiscience environnementale des eaux souterraines. Presses de l'Université du Québec : AUPELF, 978-2-10-05179-9. pp 137-142, 368-386.
- BARAN, N., et al. (2006).** Suivi de la qualité des eaux souterraines de la Martinique, campagne de saison des pluies 2005 : résultats et comparaison avec la 1^{er} campagne de basses eaux (2004) et 1^{er} campagne de saison des pluies (2004). *Rapport final, BRGM/RP-54717-FR*. 101 p.
- BENALLAL, K., OURABIA, K. (1989).** Monographie géologique et géotechnique de la région d'Alger. Office des publications universitaires, Alger. 109p.
- BENNIE et ATKINS. (1982).** Schéma d'aménagement des ressources en eau dans la région d'Alger.
- BENNIE et PARTNERS. (1983).** Évaluation du système d'eau potable existant dans le grand Alger. ANRH, Alger.
- BENZIADA, M. (1994).** Étude hydrogéologique et hydrologique de la plaine de la Mitidja Est : Application d'un modèle mathématique au bassin côtier algérois. *Thèse de Doctorat*, université de Besançon, France.
- BOUKHROUF, M., CHERIFI, E. (2012).** Évaluation des fréquences de résonance du sol de l'Est de la baie d'Alger par la méthode H/V-bruit de fond. *Mémoire d'ingénieur*, ENSSMAL, Alger.
- CHABOUR, N. (2006).** Hydrogéologie des domaines de transition entre l'atlas saharien et la plateforme saharienne à l'Est de l'Algérie. *Thèse de Doctorat*, université de Mentouri, Constantine. 168p.
- CHARAKDJI, F., DJENIDI, R., IFAIDI, F. (2006).** État du littoral de l'Est Algérois Bordj El Kiffan et Bordj El Bahri (Causes et conséquences de l'érosion). *Mémoire d'ingénieur*, ISMAL, Alger. 59p.
- CRAIG, H. (1961).** Isotopic variations in meteoric waters. Science, New Series, Vol 133, N° 3465. Published by: American Association for the Advancement of Science. pp 1702-1703.
- DEBBAKH, A. (2012).** Qualité et dynamique des eaux des systèmes lacustres en amont de l'Oued Righ. *Mémoire de magister*, université de Kasdi Merbah, Ouargla. 123p.
- DEBIECHE, T.H. (2002).** Évolution de la qualité des eaux (salinité, azote et métaux lourds) sous l'effet de la pollution saline agricole et industrielle: Application à la basse plaine de la Seybouse - Nord-Est Algérien. *Thèse de Doctorat*, université de Franche-Comté, France. 199p.
- DETAY, M. (1997).** *La gestion active des aquifères*. Paris : MASSON, 2-22585623-0.
- DORFLIGER, N., et al. (2013).** Quels outils pour caractériser l'intrusion marine et l'impact potentiel du niveau marin sur les aquifères littoraux. France, *Rapport BRGM/ONEMA*, 979-10-91047-16-6. 12p.

- GAT, J.R., CARMI, I. (1970).** Evolution of the isotopic composition of atmospheric waters in the mediterranean sea area. *Journal of geophysical research* 75, ISSN 0148-0227.
- GAT, J.R. (2010).** Isotope Hydrology : A study of water cycle. Series on Environmental Science and Management Vol 6. Imperial College Press, 185p.
- GILLI, E., MANGAN, CH., MUDRY, J. (2008).** Hydrogéologie : objets, méthodes, applications. Paris : Dunod, 978-2-10-051528-8. pp 22-33, 61-92, 117-136.
- GLANGEAUD, L., et al. (1952).** Histoire géologique de la province d'Alger. *Publication XIXème CGI*. Monographie Région, 1^{ère} série Algérie, n° 25, Alger. 142p.
- HADDANI, H. (2010).** Mise en évidence de l'intrusion marine vers les aquifères côtiers de la zone comprise entre El jadida et Oualidia (Maroc). *Mémoire de fin d'études*, université de Cadi Ayyad, Maroc. 43p.
- HALLAL, D. (2003).** Vulnérabilité et protection des régions côtières. Application aux alluvions de la Mitidja Orientale. *Thèse de magistère*, USTHB, Alger.
- IKHLEF, A., MOKRANI, S. (2006).** Étude géologique, géophysique et géotechnique du projet « City Center » Pins Maritimes. *Mémoire d'ingénieur*, USTHB, Alger. 95p.
- JICA. (2006).** Étude de Microzonage sismique de la Wilaya d'Alger. Alger, Ministère de l'Habitat et de l'Urbanisme, CGS.2006. 319p.
- KABEN, O. (2012).** Identification hydrodynamique d'un système aquifère hétérogène, exemple de la Mitidja orientale. *Thèse de Magister*, USTHB, Alger. 123p.
- KAID RASSOU, K. (2009).** Étude des interactions entre les eaux souterraines et les eaux de surface dans le bassin côtier d'Oualidia. *Thèse de Doctorat*, université de Cadi Ayyad, Maroc. 189p.
- KLOPPMANN, W., et al. (2011).** Salinisation des masses d'eaux en France : du constat au diagnostic. *Rapport BRGM/RP-60186-FR*.
- KOUZANA, L., BEN MAMMOU, A., GAALOUL, N. (2007).** Intrusion marine et salinisation des eaux d'une nappe phréatique côtière (Korba, Cap-Bon, Tunisie). Article, *Géo-Eco-Trop*, n°31. pp 57-70.
- LALLAHEM, S. (2002).** Structure et modélisation hydrodynamique des eaux souterraines : Application à l'aquifère crayeux de la bordure nord du bassin de Paris. *Thèse de Doctorat*, université des sciences et technologie de LILLE , France. 181p.
- LECLAIRE, L. (1972).** La sédimentation holocène sur le versant méridional du Bassin Algéro-Baléares (précontinent algérien) : Muséum National d'Histoire Naturelle. Editions du Muséum Paris. 391p.
- MAKHLOUF, N. (2012).** 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). *Thèse de Magister*, USTHB, Alger. 149p.
- MANIA, J., et al. (1985).** Pollution saline de la nappe côtière à l'Est d'Alger. *Revue Hydrogéologie*. N°3. pp 213-226.
- MEGHRAOUI, M. (1988).** Géologie des zones sismiques du nord de l'Algérie. Paléo-sismologie, tectonique active et synthèse sismo-tectonique. *Thèse de doctorat*, université de Paris- Sud, France. 356p.
- METAHRI, M. (2012).** Élimination simultanée de la pollution azotée et phosphatée des eaux usées traitées, par des procédés mixtes : cas de la STEP Est de Tizi-Ouzou. *Thèse de Doctorat*, université de Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou. 135p.

- OLIVE, PH. (1996).** Introduction à la géochimie des eaux continentales. ARDEALUL, 973-30-5648-0. pp 7-10, 31.
- PERRINE, F. (2005).** Sources sous-marines et aquifères karstiques côtiers méditerranéens. *Thèse de doctorat*, université Paris VI Pierre et Marie Curie, France. 49p.
- POOL, M., CORRERA, J. (2011).** A correction factor to account for mixing in Ghyben-Herzberg and critical pumping rate approximations of seawater intrusion in coastal aquifers, *Water Resour. Res.*, 47, W05506, doi:10.1029/2010WR010256.
- REMINE, B. (2010).** La problématique de l'eau en Algérie du Nord. *Larhyss Journal*, ISSN 1112-3680, N° 08. pp 27-46.
- RODIER, J., et al. (2009).** L'Analyse de l'eau. 1. France : DUNOD, 987-2-10-05179-9.
- ROZANSKI, K., ARAGUAS-ARAGUAS, L., GONFIANTINI R. (1993).** Isotopic patterns in modern global precipitation. *Climate Change in Continental Isotopic Records*. Am. Geophys. Union, Geophys. Monogr. 78: 1–36.
- SAAD, A. (2006).** Aléa et scénario de risque sismique dans la vallée de la Tinée. *Master de recherche Génie civil*, École polytechnique universitaire de Lille, Lille. 78p.
- SEKKAL, R. (1986).** Hydrologie de la nappe de la Mitidja -Algérie- Etude hydrodynamique des champs captants de la ville d'Alger. *Thèse de Doctorat*, université de Grenoble 1, France. 403p.
- SOGREAH. (2010).** Programme de la coopération Alghero-Belge Gire Algérois: Lutte contre l'intrusion marine dans la baie d'Alger. *Rapport final, SOGREAH-MBS/SLS/WFI – 1741274 -R6.* 63 p.
- TANIGUCHI, M., WANG, K., GAMO, T. (2003).** Land And Marine Hydrology. Tokyo : ELSEVIER, 0-444-51479-1. 199 p.
- TOUBAL, A. (1998).** Approche géophysique des problèmes d'hydrodynamique et d'invasion marine en milieu souterrain. Exemple des plaines d'Annaba, de la Mitidja et de la baie d'Alger. *Thèse de Doctorat*. USTHB, Alger.
- YOUNSI, A. (2011).** Méthodologie de mise en évidence des mécanismes de salure des eaux souterraines côtières en zone semi-aride irriguée (Chaouia côtière, Maroc). *Thèse de Doctorat*, université de Chouaib Doukkali, El Jadida, Maroc.
- ZOUARI, K., et al. (2008).** Vulnérabilité des ressources en eaux des aquifères côtiers en zones semi-arides – Étude comparative entre les bassins d'Essaouira (Maroc) et de la Jeffara (Tunisie). *Communication géologique*. pp 107-121.