

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

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

**Université Blida1
Faculté de Technologie**

Département des Sciences de l'Eau et de Environnement

Mémoire de fin d'études Master

Option : Sciences de l'eau

Thème :

**Contribution des méthodes
hydrodynamique hydrochimiques et
isotopiques à la connaissance de l'extension
du biseau salé sur la Baie d'Alger**

Présenté par : Mlle.ZOUGHBI Zineb

Promoteur : Pr. GUENDOOUZ Abdelhamid

Année universitaire : 2015-2016

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

Mes parents qui m'ont toujours soutenue dans mon travail et à qui je serais éternellement reconnaissant.

À mon frère et mes sœurs

A ma famille surtout ma Grande Mère paternelle

A mes amis

A tous qui m'aiment

ZOUGHBI Zineb

Remerciements

Avant tout, je remercie le bon Dieu qui a illuminé mon chemin et qui m'a armé de force et de sagesse, ainsi la bonne volonté pour achever ce modeste travail.

Toute ma gratitude pour mon promoteur Mr. GUENDOUZ Abdel-Hamid, pour ces judicieux conseils ainsi que sa disponibilité tout le long de l'élaboration de ce travail

Toute ma gratitude à mes professeurs et enseignants qui m'ont guidé au cours de ma formation, et mes respects aux membres du jury qui me feront l'honneur d'apprécier ce travail.

Un grand merci à l'équipe de l'Agence Nationale des Ressources Hydrique de Blida de m'avoir accordés les données les données nécessaire pour réaliser ce travail

A tous merci

Introduction générale

La dégradation de la qualité des ressources hydriques souterraines en zones côtières devient un sujet inquiétant, résultant de multiples actions naturelles et anthropiques.

La salinisation par l'intrusion marine constitue la principale cause de cette dégradation dans le domaine côtier algérien.

La région étudiée (Baie d'Alger), fait partie de ces plaines côtières. C'est une zone qui connaît un grand développement des activités agricoles, industrielles, et une expansion démographique.

Ce développement a été accompagné par une demande en eau de plus en plus forte. Ce qui a engendré une surexploitation des nappes côtières et une dégradation de leur qualité.

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

L'objectif de ce travail consiste d'une part à établir l'évolution spatio-temporelle du biseau salé et comprendre les processus qui gouvernent l'acquisition de la salinité des eaux de la nappe du quaternaire au niveau de la baie d'Alger, tout cela par l'étude de tous les paramètres hydro-chimiques, hydrodynamique et isotopiques

Ce mémoire est structuré en quatre chapitres dont le premier est essentiellement dédié à la présentation du phénomène de l'intrusion marine avec une étude d'un cas dans le monde.

Le deuxième chapitre est consacré à la présentation de la zone d'étude (Baie d'Alger) d'un point de vue géographique, géologique, hydrogéologique, et climatologique.

Le troisième chapitre présente la méthodologie du travail, ce dernier est partagé en deux parties :

- La première partie représente les données hystoriques de notre région.
- La deuxième partie représente l'état actuel(2016) et le travail réalisé sur le terrain.

Enfin, le dernier chapitre consiste en une synthèse générale des résultats obtenus (piézométrique, hydro-chimique, profil de la conductivité, et isotopique) sur la Baie d'Alger.

Résumé

L'intrusion marine est l'un des plus grands problèmes qui menace les zones côtières Algériennes. La baie d'Alger se trouve justement confrontée à ce phénomène

L'étude menée dans le cadre de ce mémoire s'inscrit dans cette optique et consiste à appliquer les méthodes hydrodynamiques, hydrochimiques, et isotopiques pour de connaître l'état d'avancement et l'évolution du biseau salé et de déterminer les mécanismes d'acquisition et l'origine de la salinisation des eaux souterraines de la nappe du quaternaire de la baie d'Alger.

La méthodologie adoptée consistait à utiliser la base de données antérieure acquise par l'ANRH et les conforter par des données récentes que nous avons réalisées afin de bien mettre en évidence l'évolution et l'extension de ce biseau.

Mots clé : intrusion marine, biseau salé, hydrodynamique, hydrochimique, isotopique, baie d'Alger.

Abstarct

The seawater intrusion is one of the biggest problems that threaten coastal Algerian. Algiers bay is precisely confronted with this phenomenon

The study conducted as part of this memory is in this context and of applying hydrodynamic methods, hydrochemical and isotopic for to know the status and evolution of the salt wedge and identify mechanisms acquisition and origin of groundwater salinization of groundwater from the quaternary in the Bay of Algiers.

The methodology adopted was to use the earlier database acquired by ANRH and reinforce them with recent data that we have done well to highlight the evolution and expansion of the bevel.

Keywords: seawater intrusion, salt wedge, hydrodynamic, hydrochirical, isotopic, bay of Algiers.

ملخص

تعتبر ظاهرة تقدم مياه البحر واحدة من أكبر الظواهر التي يتعرض إليها الساحل الجزائري؛ خاصة خليج الجزائر العاصمة.

الدراسة المعتمدة في هذه المذكرة تستند إلى تطبيق الطريقة الهيدروكيميائية؛ الديناميكية؛ و النظائر؛ لمعرفة إلى أي مدى وصل تقدم المياه المالحة؛ و تحديد آليات الاستحواذ و أصل ملوحة المياه الجوفية في خليج الجزائر.

المنهجية المتبعة تستند إلى استخدام البيانات السابقة المتحصل عليها من قبل الوكالة الوطنية للموارد المائية و مقارنتها مع البيانات الأخيرة التي قمنا بها لتسليط الضوء على تطور و توسع المياه المالحة.

SOMMAIRE

Introduction générale	1
Chapitre 1 : présentation du phénomène de l'intrusion marine	
1.1. Généralités sur l'intrusion marine.....	4
1.2. Origines de la salinité des eaux souterraines en zones côtières.....	4
1.3. Mécanismes de l'intrusion marine.....	5
1.4. Relation de Ghyben-Hezberg	6
1.5. Facteurs déterminants de l'intrusion marine.....	8
1.5.1 Effet de l'exploitation.....	8
1.5.2 Situation par rapport à la mer.....	9
1.5.3 Alimentation de la nappe	9
1.5.4 Hydrodynamique / Hydrogéologie.....	9
1.6 Cas d'étude du phénomène de l'intrusion marine dans le monde.....	9
Chapitre 2 : présentation de la zone d'étude	
2.1. Etude géomorphologique	10
2.1.1. Situation géographique	10
2.1.2. Aspect hydrographique.....	11
2.1.3. Réseau hydrographique.....	12
2.1.4. Les paramètres géomorphologiques.....	12
A. Paramètres géométriques	12
2.2. Etude hydro-climatologique	13
2.2.1. Paramètre climatologique	13
a) Réseau pluviométrique	13
b) Les précipitations.....	14
c) Les températures	15
2.3 Contexte géologique.....	16
2.3.1 .Cadre général.....	16
2.3.2. Stratigraphie et litho-stratigraphie	17
2.3.3. Le Miocène	17
2.3.4. Le pliocène.....	18
a) Plaisancien	19
b) L'Astien	19
2.3.5. Le villafranchien	19
2.3.6 .Le Soltano-Tensifien	19
2.3.7. Le Rharbien -Actuel	19
2.3.8. Tectonique	19
2.4. Contexte hydrogéologique.....	20
2.4.1. Contexte hydrogéologique local de la baie d'Alger	21
2.4.2. Caractéristiques hydrodynamiques	21
a) Transmissivité	22
b) Le coefficient d'emménagement	22
c) Perméabilité Verticale	23
2.4.3. Les mécanismes d'alimentation et d'écoulement des nappes	23

a) L'aquifère Astien.....	23
b) Ecoulement de la nappe de l'Astien	23
2.4.4. Bilan entrant et sortant des aquifères.....	24
a) Bilan d'eau de la nappe de l'Astien	24
b) Bilan d'eau de la nappe de la Mitidja	24
c) Débits entrants de la nappe de la Mitidja	24
Conclusion.....	25

Chapitre 3 : Méthodologie du travail

3.1. Historique de l'intrusion marine dans la Baie d'Alger	27
3.2. Approche hydrodynamique	27
3.2.1 Réseau piézométrique de la baie d'Alger	27
3.2.2. Présentation du réseau piézométrique de la baie d'Alger.....	28
3.3. Approche hydrochimique.....	29
3.3.1. Analyse des paramètres chimiques en laboratoire.....	29
3.4. Profil de la conductivité.....	31
3.5. Campagne de prélèvement	32
3.5.1. Matériels utilisés	32
3.5.2. Mesure du niveau statique.....	34
3.5.3. Mesure de la conductivité.....	35
3.5.4. Prélèvement des échantillons.....	36

Chapitre 4 : Interprétation des résultats

4.1- Evolution de la piézométrie	39
4.1.1- La piézométrie de la nappe en 1981	39
4.1.2- La piézométrie de la nappe en 1991	40
4.1.3- La piézométrie de la nappe en 1996	40
4.1.4- La piézométrie de la nappe en 1999.....	41
4.1.5- La piézométrie de la nappe en 2000	41
4.1.6- La piézométrie de la nappe en 2005	42
4.1.7- La piézométrie de la nappe en 2010	42
4.1.8- La piézométrie de la nappe en 2011	43
4.1.9- La piézométrie du PZ 2 Hamiz :.....	43
4.1.10- La piézométrie de la nappe en 2016	44
4.2- Approche hydro-chimique :.....	44
4.2.1-Analyses physico-chimiques.....	44
4.2.2- Classification hydro-chimique	46
a) Faciès chimiques	47
b) Etude de quelques couples chimiques	51
c) Indice de saturation	54
4.3. Etat actuel : mesure de la conductivité de surface	55
4.4. Profils des conductivités	58
4.4.1- Profil de conductivité vertical du piézomètre pz 58	58
4.4.2- Profil de conductivité vertical du piézomètre PZ B	59
4.4.3- Profil de conductivité vertical du piézomètre PZ E et PZ G	60
4.4.4- Profil de conductivité vertical du piézomètre PZ2 H	61
4.4.5- Profil de conductivité vertical du piézomètre PZ 41	62
4.4.6- Profil de conductivité vertical du piézomètre PZ 45.....	63

4.4.7- Profil de conductivité vertical du piézomètre PZ 50	64
4.5- Evolution de la position du biseau sale en fonction de la conductivité.....	65
4.5.1- la position du biseau salé en 1982	65
4.5.2- la position du biseau salé en 2005	66
4.5.3- la position du biseau salé en 2007	67
4.5.4- la position du biseau salé en 2009	68
4.5.5- la position du biseau salé en 2016	69
4.6. Approche isotopique	70
4.6.1. Rappels d'hydrologie isotopique.....	70
4.6.2. Notion de Géochimie Isotopique	70
4.6.3. Résultats obtenues	71
4.6.4. Relation oxygène 18-chlorures	72

Listes des figures

Chapitre 1 : présentation du phénomène de l'intrusion marine

Fig 1.1 : Situation naturelle de l'interface eau douce / eau de mer.....	2
Fig1.2 : Forage d'exploitation qui attire l'interface par pompage.....	3
Fig 1.3 : Forages contaminés par les eaux salées.....	3
Fig 1.4 : Représentation schématique de l'interface « eau douce-eau salée ».....	4
Fig1.5 : Sources potentielles des salinités des eaux souterraines côtières.....	5
Fig 1.6: Relation eau douce eau de mer.....	6
Fig1.7 : Schéma théorique de l'invasion marine le long du littoral	7
Fig 1.8 :Etude mathématique de l'interface.....	8

Chapitre 2 : présentation de la zone d'étude

Fig2.1 : situation géographique de la zone d'étude.....	10
Fig 2.2 : carte de réseaux hydrographique	11
Fig.2.3 : Carte de la répartition des stations pluviométriques.....	14
Fig 2.4 : Carte pluviométrique de la Mitidja.....	14
Fig 2.5 Précipitations moyennes annuelles période (1978-2010).....	15
Fig 2.6.graphe des Températures moyennes mensuelles.....	16
Fig 2.7.Carte géologique de la Mitidja	17
Fig 2.8. Coupes géologiques 1 et 2- SE/NW	18
Fig 2.9: Coupes géologiques au niveau de la Mitidia Est	18
Fig 2.10 : Loglitho stratigraphique de la plaine de la Mitidja.....	20
Fig.2.11.Schéma du système aquifère de la Mitidja Est	20
Fig.2.12 : localisation des dunes côtières	21

Chapitre 3 : Méthodologie du travail

Fig 3.1 : carte de situation du réseau de surveillance de la nappe.....	28
Fig 3.2 : Conductivimètre portable.....	31
Fig 3.3 : la voiture utilisée pour le déplacement sur terrain.....	32
Fig 3.4: la sonde électrique utilisée pour la mesure du niveau statique.....	33
Fig 3.5 : échelle utilisée.....	33
Fig 3.6 : conductivimètre utilisé pour les mesures de la conductivité.....	34
Fig 3.7 : les mesures du niveau statique sur les piézomètres au niveau de la Baie d'Alger....	34
Fig 3.8 : le premier prélèvement au niveau de l'usine de coca-cola.....	36
Fig 3.9 : prélèvement au niveau d'un forage à 100 m de PZ 50.....	36
Fig 3.10: prélèvement dans un forage en exploitation au niveau du PZ B.....	37
Fig 3.11 : prélèvement dans un forage à 50m de PZ G.....	37
Fig 3.12 : carte de situation des points d'eau prélevés.....	38

Chapitre 4 : Interprétation des résultats

Fig 4-1 : Carte piézométrique de juin juillet 1981	39
Fig 4.2 : Carte piézométrique d'Octobre Novembre 1991	40
Fig. 4.3 : Carte piézométrique de la Baie d'Alger mai (1996)	40
Fig.4.4: Carte piézométrique de la Mitidja orientale(1999)	41
Fig. 4.5: Carte piézométrique de la Mitidja orientale (2000)	41
Fig. 4.6 : Carte piézométrique de la Mitidja orientale (Mars 2005)	42
Fig. 4.7 : Carte piézométrique de la de la Baie d'Alger (Avril 2010)	42
Fig. 4.8: Carte piézométrique de la Baie d'Alger mai(2011)	43
Fig 4.9: Chronique piézométrique sur le piézomètre PZ 2 Hamiz	43
Fig 4.10: LA piézométrie actuelle de la nappe (2016).....	44
Fig 4.11 : Interface de commande du logiciel DIAGRAMME.....	46
Fig 4.12 : Représentation des points d'eau de la compagne Mai 2005.....	47
fig 4.13 : Représentation des points d'eau de la compagne Mai 2007.....	48
Fig 4.14 : Représentation des points d'eau de la compagne janvier 2010.....	49
Fig 4.15 : Représentation des points d'eau de la compagne janvier 2010.....	50
Fig 4.16 : variation de sodium en fonction de chlorures 2005.....	51
Fig 4.17: variation de sodium en fonction de chlorures 2007.....	52
Fig 4.18: variation de sodium en fonction de chlorures 2010.....	52
Fig 4.19: variation de bromures en fonction de chlorures 2005.....	53
Fig 4.20: variation de bromures en fonction de chlorures 2007.....	53
Fig 4.21 : Variation de l'indice de saturation dans la Mitidja est 2005.....	54
Fig 4.22 : Variation de l'indice de saturation dans la Mitidja est2007.....	55
Fig 4.23 : Variation de l'indice de saturation dans la Mitidja est 2010.....	55
Fig 4.24 : mesure de la conductivité sur un forage à 100m de PZ B.....	55
Fig 4.25: mesure de la conductivité sur un forage à 100m de PZ G.....	56
Fig 4.26 : mesure de la conductivité sur un forage à 400m de PZ E.....	56
Fig 4.27 : mesure de la conductivité sur un forage à 500m de PZ 41.....	57
Fig 4.28 : mesure de la conductivité sur un forage à 500m de PZ 45.....	57
Fig 4.29 : mesure de la conductivité sur un forage à 100m de PZ 50.....	58
Fig 4.30 : Profil de conductivité sur le piézomètre PZ 58.....	59
Fig 4.31 : profil de la conductivité sur le piézomètre PZ B.....	60
Fig 4.32: profil de la conductivité sur le piézomètre PZ E et PZ G.....	61
Fig 4.33 : profil de la conductivité sur le piézomètre PZ2 H.....	62
Fig 4.34 : profil de la conductivité sur le piézomètre PZ 41.....	63
Fig 4.35 : profil de la conductivité sur le piézomètre PZ 45.....	64
Fig 4.36 : profil de la conductivité sur le piézomètre PZ 50.....	65
Fig4.37 : Carte d'iso valeurs conductivité des eaux souterraines de 1982	66
Fig 4.38 : Carte d'iso valeurs de conductivité des eaux souterraines en octobre 2005.....	67
Fig 4.39: Carte d'iso valeurs de conductivité des eaux souterraines en septembre 2007.....	68
Fig 4.40 : Carte d'iso valeurs de conductivité des eaux souterraines en2009.....	69
Fig 4.41 : Carte d'iso valeurs de conductivité des eaux souterraines en Mai 2016.....	69
Fig 4.42 : variation des chlorures en fonction des teneurs en Oxygène-18.....	72

Liste des tableaux

Chapitre 2 : présentation de la zone d'étude

Tableau 2.1 : Paramètres géométriques des sous bassins versants.....	12
Tableau 2.2 : Paramètres de forme et de relief des deux sous bassins versants.....	13
Tableau 2.3 : Caractéristiques des stations pluviométriques.....	13
Tableau 2.4 : Variation de la température moyenne, maximale et minimale Dar El Beida....	15
Tableau 2.5 .Transmissivité dans la Mitidja	22
Tableau 2.6 .coefficient d'emmagasinement dans la Mitidja.....	22
Tableau 2.7 .Coefficient d'emmagasinement.....	22
Tableau 2.8 .Perméabilité verticale.....	23
Tableau 2.9 .Bilan d'eau de la nappe de l'Astien	24
Tableau 2.10 .Bilan d'eau de la nappe de la Mitidja.....	24
Tableau 2.11 .Débits sortants de la nappe de la Mitidja.....	25

Chapitre 3 : Méthodologie du travail

Tableau 3.1 : Résultats d'analyses hydro-chimiques des de l'année 2005	29
Tableau 3.2 : Résultats d'analyses hydro-chimiques de l'année 2007	30
Tableau 3.3 : Résultats d'analyses hydro-chimiques de l'année 2010	30
Tableau 3.4 :les résultats de la campagne piézométrique , Mai 2016	35
Tableau 3.5 : Résultats de la conductivité mesuré sur le terrain (Mai 2016).....	35

Chapitre 4 : Interprétation des résultats

Tableaux 4.1 : Statistique descriptive des analyses de campagne 1985.....	45
Tableaux 4.2 : Statistique descriptive des analyses de campagne 2000.....	45
Tableaux 4.3 : Statistique descriptive des analyses de campagne 2010.....	45
Tableau 4.4 : les valeurs de la conductivité des campagne (2007, 2009, et 2016).....	58
Tableau 4.5 : analyses isotopique des teneurs en Oxygène-18.....	71

CHAPITRE 1 :

PRESENTATION DU PHENOMENE DE L'INTRUSION MARINE

CHAPITRE 2 :

PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

CHAPITRE 3 :

METHODOLOGIE DE TRAVAIL

CHAPITRE 4 :

INTERPRETATION DES RESULTATS

INTRODUCTION

Les aquifères côtiers sont en général, en communication avec la mer. Ce sont des systèmes globaux aquifères/mers. Le niveau piézométrique de la nappe d'eau douce étant au-dessus de celui de la mer, l'eau douce s'écoule vers cette dernière et il s'établit un équilibre hydrostatique qui se traduit par une zone limite. Cette dernière est matérialisée par une interface eau douce/eau salée (fig1.1), dont la position est imposée par la différence d'altitude (différence de charge) entre le niveau piézométrique et le niveau moyen de la mer (cote zéro). Elle est schématisée par une surface courbe mais elle est plus complexe dans la réalité.

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



Fig 1.1 : Situation naturelle de l'interface eau douce / eau de mer [1]

Toute exploitation intensive, peut entraîner l'abaissement de la surface piézométrique qui pourrait atteindre des côtes inférieures au niveau de la mer, ce qui provoque une rupture de l'équilibre existant entre les deux fluides et engendre une intrusion saline à l'intérieur de la nappe (fig 1.2 et 1.3). Cette intrusion peut se traduire par une avancée pouvant atteindre plusieurs kilomètres. L'exemple de la plaine du Nador (wilaya de Tipaza) est dans ce sens assez édifiant; sous l'action d'une exploitation intensive et anarchique, toute la plaine s'est vue petit à petit envahi par des intrusions d'eau de mer, ce qui fait qu'actuellement presque toute la plaine est contaminée.[1]

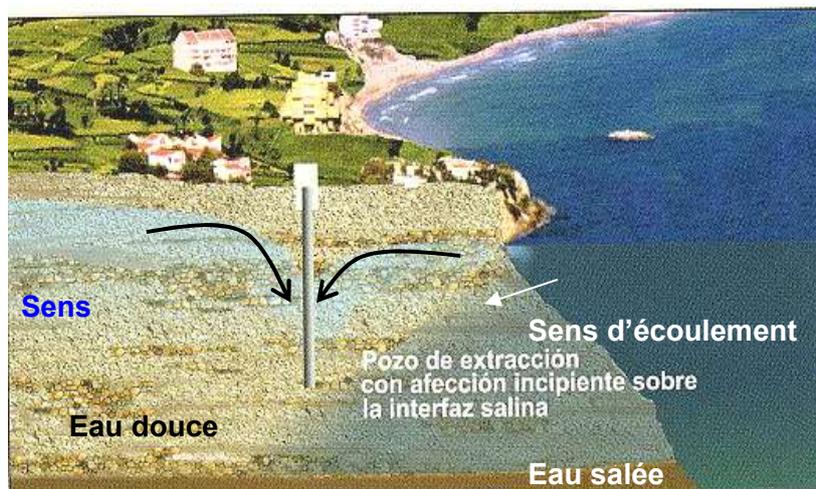


Fig1.2 : Forage d'exploitation qui attire l'interface par pompage[1]



Fig 1.3 : Forages contaminés par les eaux salées [1]

Le même phénomène commence à prendre une ampleur assez inquiétante au niveau de la baie d'Alger. Il est utile de signaler que dès 1970, des chercheurs hydrogéologues ont mis l'accent sur la nécessité d'étudier les risques d'invasion d'eau salée dans la nappe de la Mitidja (K.ACHI et AL - 1973).

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

1.1. Généralités sur l'intrusion marine

Le phénomène d'invasion marine pourrait présenter une origine majeure des fortes salinités des eaux souterraines dans les régions côtières où ces dernières constituent la source principale d'approvisionnement en eau. Sous certaines conditions, l'eau salée se propage à l'intérieur des terres et contamine les eaux de la nappe côtière. [2]

La transition entre l'eau douce et l'eau salée de la mer s'effectue brusquement sur une certaine épaisseur ne dépassent pas quelques mètres. Les deux liquides miscibles se trouvent ainsi séparés par une zone qui est souvent assimilée à une interface abrupte limitant un biseau d'eau salée, dont la pente est inclinée vers le continent (fig 1.4).

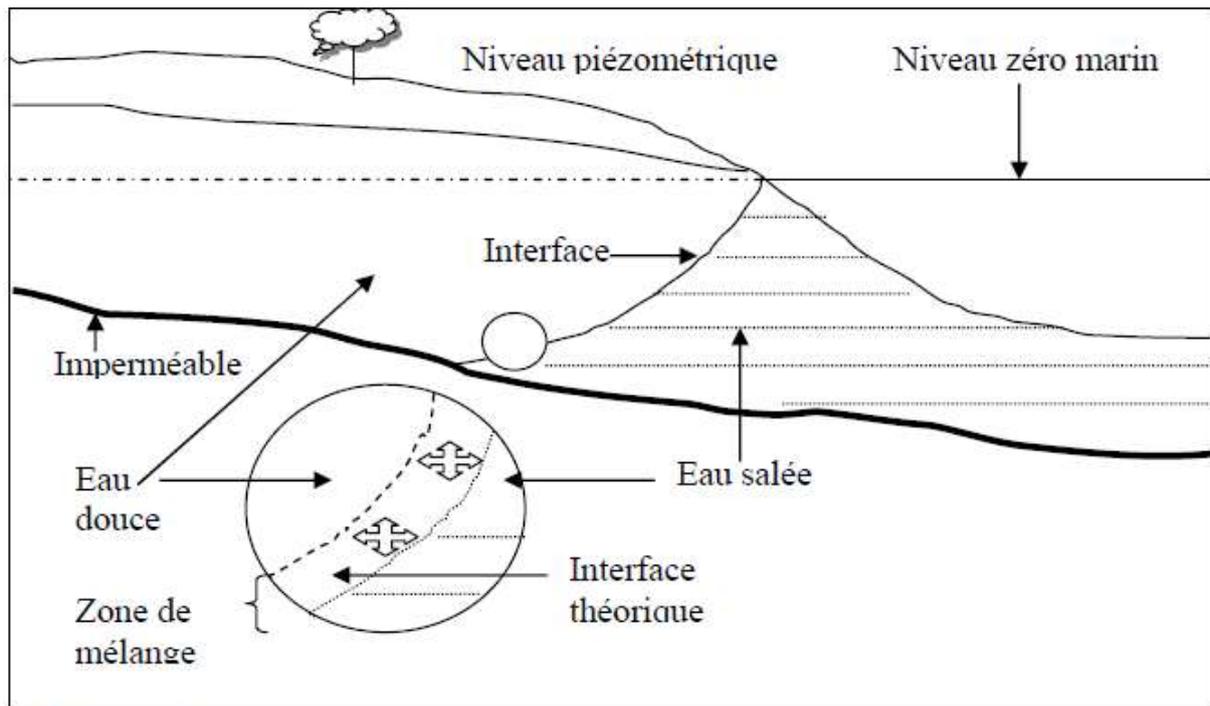


Fig 1.4 : Représentation schématique de l'interface « eau douce-eau salée »

1.2. Origines de la salinité des eaux souterraines en zones côtières

De manière générale dans les zones côtières irriguées et à climat aride et semi-aride où l'on observe une intensification des activités socio-économiques et essor démographique important, les sources potentielles des fortes salinités des eaux souterraines (fig 1.5) peuvent être soit naturelles (intrusion marine, embruns marins, lixiviation des roches réservoirs, évaporation), soit anthropiques (sur fertilisation, pesticides, eaux usées, lixiviats des déchets solides, salage des routes, émissions gazeuses), soit encore une combinaison des sources naturelles et anthropiques. [3]

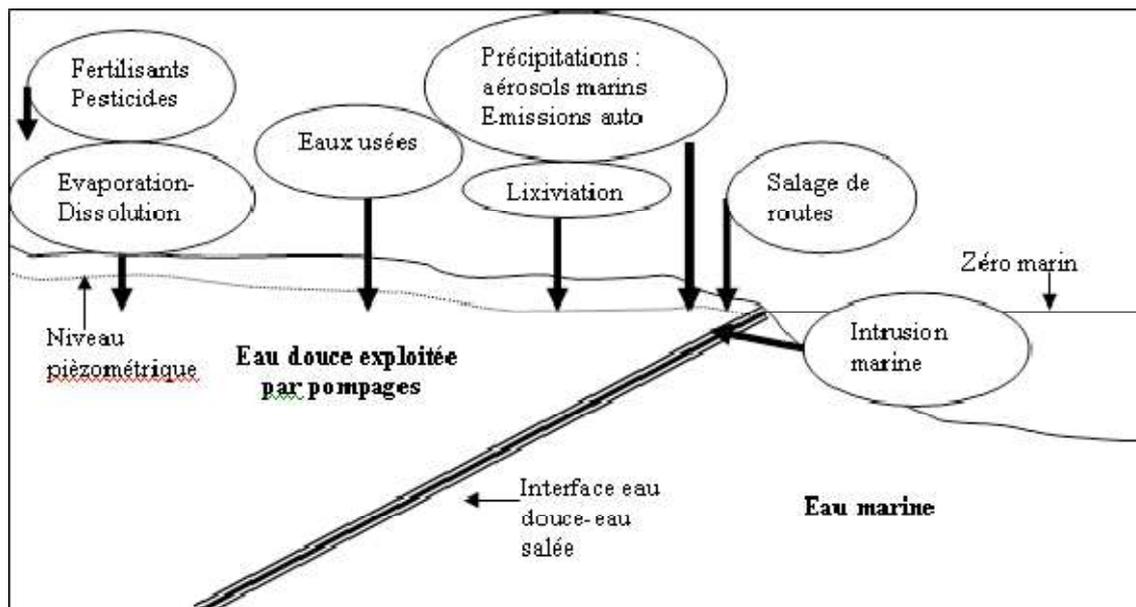


Fig1.5 : Sources potentielles des salinités des eaux souterraines côtières [3]

1.3. Mécanismes de l'intrusion marine

En l'absence de perturbation (surexploitation par exemple), la pénétration du niveau de la mer à l'intérieur des terres est naturellement régie par une différence de masse volumique (25 kg/m^3) entre deux eaux [4] (fig 1.6):

- l'une salée et marine, plus dense et donc plus assujettie aux forces gravitationnelles ;
- l'autre plus ou moins « douce » provenant de l'infiltration des précipitations et constituant ainsi une nappe côtière s'écoulant vers la mer.

L'interface eau douce- eau salée prend une allure hyperbolique, qui limite la partie basale nommée « biseau ». Dans la réalité, on observe une zone de transition dont l'épaisseur ne dépasse guère quelques mètres.

La forme et l'épaisseur de cette interface dépendent de plusieurs facteurs :

- les variations des niveaux de la nappe et du niveau de la mer ;
- la différence de densité entre les deux liquides qui tend à maintenir l'eau salée en profondeur ;
- la diffusion moléculaire du sel dans l'eau douce tendant à minimiser les gradients de concentration ;
- la dispersion hydrodynamique dans le réservoir aquifère due à l'écoulement le long de l'interface ;
- le débit de la nappe qui est fonction du régime d'exploitation et d'implantation des différents aménagements hydrauliques et de la recharge de la nappe ;
- la porosité et la perméabilité des terrains aquifères littoraux ;
- la géométrie de l'aquifère : topographie du substratum imperméable au niveau de l'interface eau douce- eau salée ;
- les variations barométriques...

Les pluies susceptibles de recharger une nappe côtière engendrent une augmentation du débit des eaux souterraines et une poussée de l'interface eau douce- eau salée vers la mer voire une expulsion des niveaux salés vers des niveaux plus profonds.

En présence de pompages intensifs et périodiques et lorsque l'aquifère est hétérogène, ce phénomène va engendrer une propagation des sels marins vers les eaux souterraines et une augmentation de la salinité de ces eaux pompées.

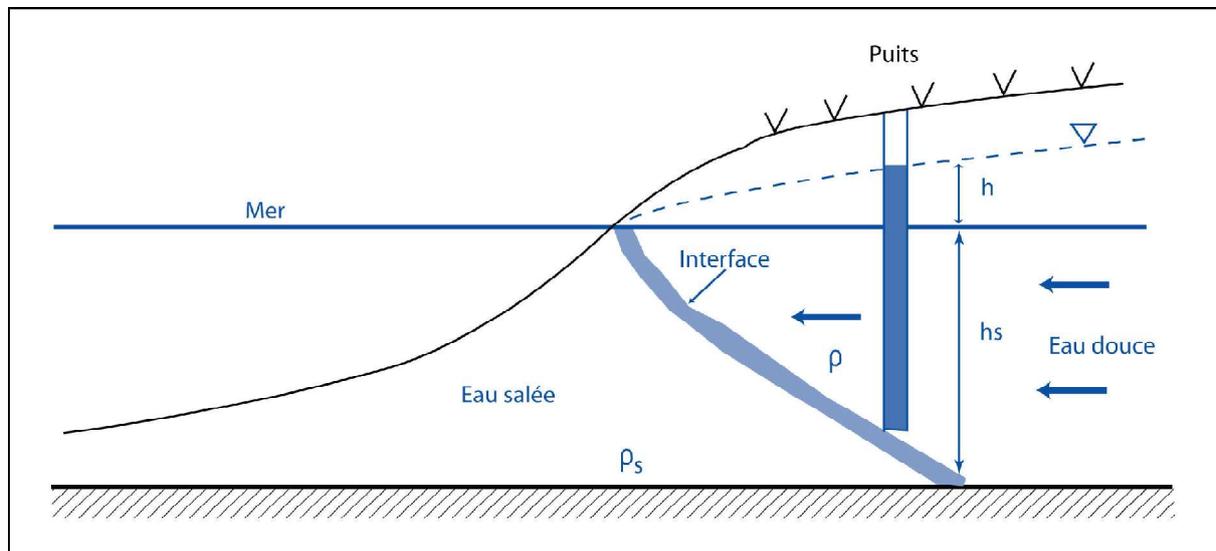


Fig 1.6: Relation eau douce eau de mer.

1.4. Relation de Ghyben-Hezberg :

Les aquifères côtiers sont en général, en communication avec la mer. Ce sont des systèmes globaux aquifères. Le niveau piézométrique de la nappe d'eau douce étant au-dessus de celui de la mer, l'eau douce s'écoule vers cette dernière et un équilibre hydrostatique s'établit qui se traduit par une zone limite. Cette dernière est matérialisée par une interface eau douce/eau salée, dont la position est imposée par la différence d'altitude (différence de charge) entre le niveau piézométrique et le niveau moyen de la mer (cote zéro). [5]

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

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

La loi de Ghyben-Hezberg définit la position du contact entre deux milieux à l'équilibre : (voir Fig 1.7)

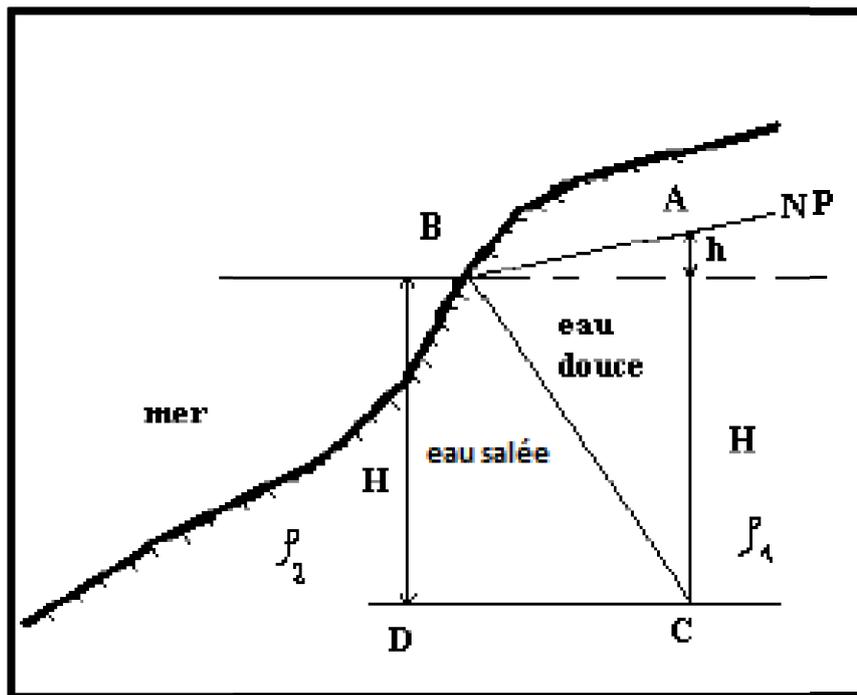


Fig1.7 : Schéma théorique de l'invasion marine le long du littoral pour une nappe libre.(D'après Ghyben-Herzberg)

NP : niveau piézométrique ;

BC : interface ;

H : niveau de l'eau salée ;

ρ_1 : densité de l'eau douce ;

ρ_2 : densité de l'eau salée ;

h : charge hydraulique ;

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

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

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

Donc la profondeur du biseau salé est :

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

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

Cela a conduit M.K.Hubbert (Fig1-8) à chercher une solution mathématique plus appropriée, il a étudié dans une coupe transversale, deux lignes équipotentiels séparées d'une distance ds .

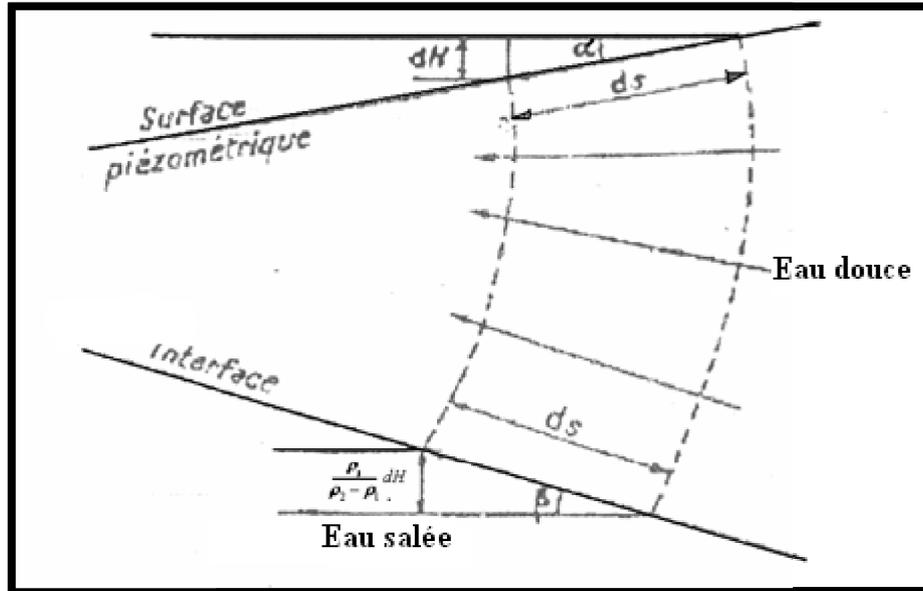


Fig 1.8 : Etude mathématique de l'interface. (D'après M.K.Hubbert)

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

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

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

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

- β : angle de l'interface horizontale.

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

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

1.5. Facteurs déterminants de l'intrusion marine

1.5.1 Effet de l'exploitation

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

Ainsi, les aspects liés à l'exploitation d'un aquifère en zone côtière peuvent être énumérés comme suite [6]; [7]:

- baisse du niveau de la nappe ;
- pénétration du biseau d'eau salée vers les terres ;
- salinisation des eaux de la nappe côtière à cause de cette pénétration, principalement dans les deux premiers kilomètres du rivage ;
- abandon des puits à cause des fortes salinités des eaux.

1.5.2 Situation par rapport à la mer

La distance du point de captage par rapport à la mer joue un rôle déterminant dans l'évolution de la qualité des eaux souterraines. En effet, ces eaux accusent une salinité de plus en plus élevée au fur et à mesure que l'on se rapproche du rivage.

1.5.3 Alimentation de la nappe

Généralement, les nappes d'eau souterraine côtières sont alimentées principalement par l'infiltration et la percolation efficaces des eaux de pluie. 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 élévation du niveau de la nappe, une augmentation de son débit et un phénomène de dilution de sa salinité. Dans le cas contraire d'une infiltration efficace moindre ou nulle combinée à des pompages intensifs, nous observons un abaissement du niveau de la nappe et une surconcentration saline des eaux souterraines.

1.5.4 Hydrodynamique / Hydrogéologie

La nature lithologique de l'aquifère, sa perméabilité, sa productivité, son épaisseur saturée, la topographie du substratum à proximité de la mer, sont tous des facteurs qui jouent des rôles importants dans les mécanismes de pollution des eaux souterraines. Les débits souterrains faibles, l'existence de l'isopièze zéro mètre à l'intérieur de la plaine, le plongement du substratum en dessous du zéro marin et une bonne perméabilité de l'aquifère côtier favorisent des intrusions marines dont l'extension dépend de l'intensité des pompages dans ces endroits vulnérables.

1.6 Cas d'étude du phénomène de l'intrusion marine dans le monde :

Un grand nombre de pays dans le monde souffrent du problème de l'**intrusion** marine. En Afrique on peut citer :

Tous les pays qui bordent l'Afrique du Nord : Algérie, Tunisie, Maroc (pour la Méditerranée).

Sur la bordure Atlantique on peut citer : la Mauritanie, le Sénégal, etc.

Sur la rive nord de la Méditerranée on peut évoquer le cas de la France où le risque a été soulevé pour onze aquifères :

- Nappe du Roussillon (région de Perpignan)
- Nappe de la Basse Vallée de l'Aude (région de Lézignan - Narbonne)
- Nappe de la Vallée de l'Orb (région de Béziers)
- Nappe de l'Astien (région de Béziers)
- Nappe de la vallée de l'Hérault (région d'Agde)
- Nappe de Maugio-Lunel (région de Montpellier)
- Nappe de Crau (région d'Arles)
- Nappe de Gapeau (région d'Hyères)
- Nappe de Giscle et Mole (région de Grimaud)
- Nappe d'Argens (région de Saint-Raphaël)
- Nappe côtière de Corse (région de Filitosa)

Introduction :

Afin de mieux connaître l'état de l'avancement du biseau salé ainsi que la variation de la qualité de l'eau souterraine dans la région ; il est nécessaire de procéder à une étude du contexte géographique, géomorphologique, hydro-climatologique et géologique.

2.1. Etude géomorphologique :

2.1.1. Situation géographique :

La région concernée par cette intrusion saline et qui fait l'objet de notre étude et de notre suivi est connu sous le nom de « la baie d'Alger » et fait partie de l'unité hydrogéologique de la Mitidja. Elle est située dans sa partie orientale, et se trouve à l'Est d'Alger (fig 2. 1). Elle est limitée par :

- la mer méditerranéenne au Nord. L'oued El Harrach à l'Est.
- la longitude passant par Bordj El Bahri. et la région d'El Hamiz au sud (autoroute est).

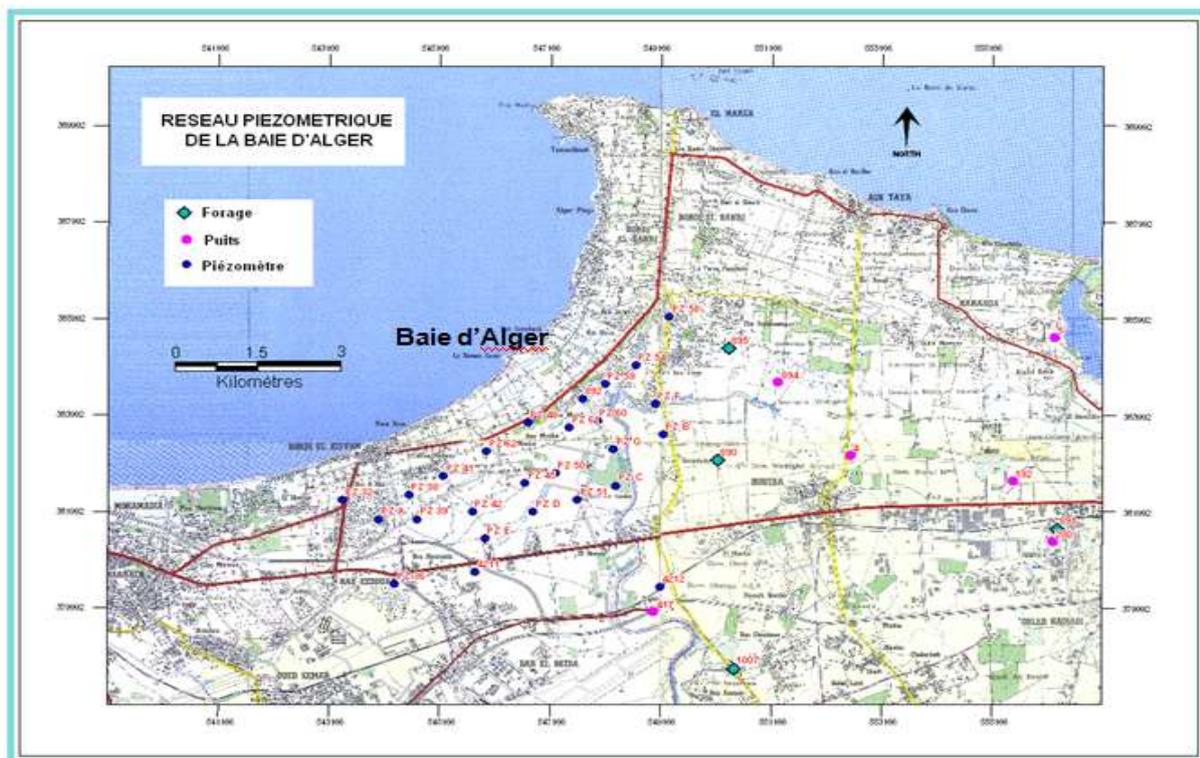


Fig2.1 : situation géographique de la zone d'étude [1]

2.1.2. Aspect hydrographique :

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

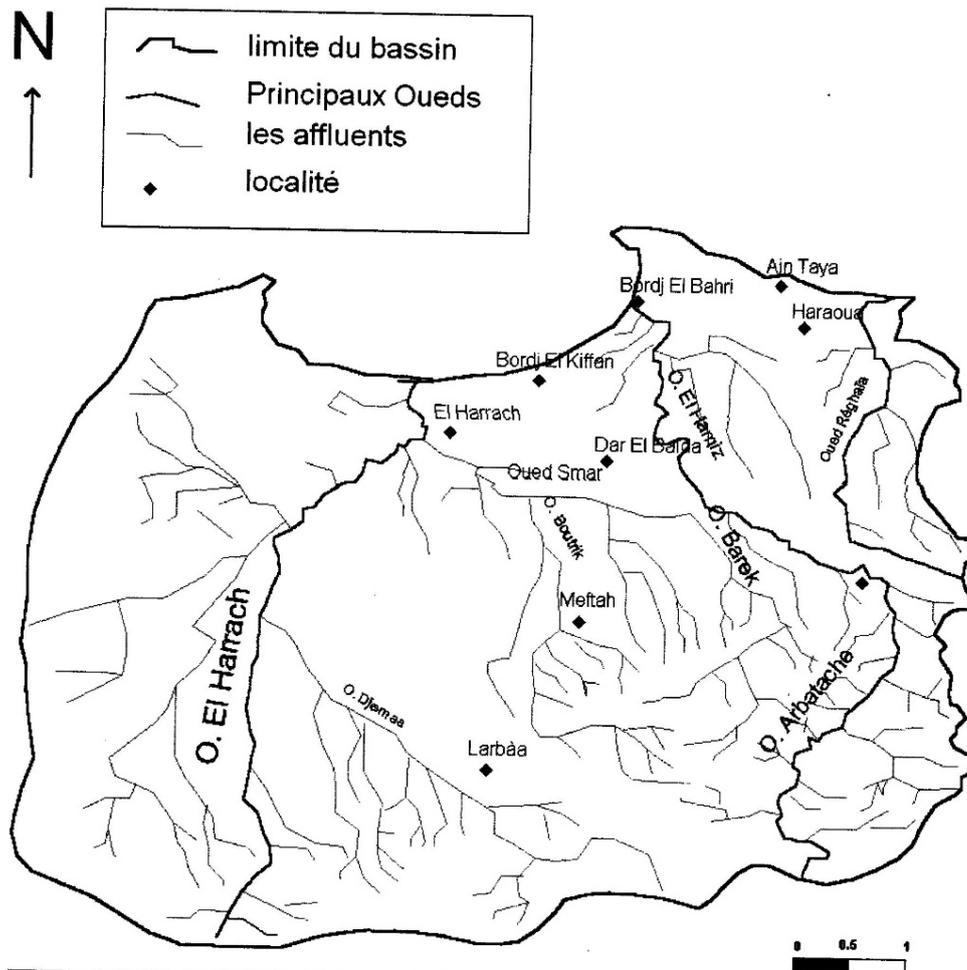


Fig 2.2 : carte de réseaux hydrographique [16]

- **Le sous bassin de l'oued El Harrach** : s'étale sur une superficie de 1260km². L'Oued El Harrach, qui représente l'un des principaux oueds qui sillonnent la Mitidja, prend sa source au Nord de l'Atlas Blidéen et se jette en mer Méditerranée après un parcours de 67km environ.

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

- **Le sous bassin de l'oued Hamiz** : est situé à l'Est de la plaine. Celui de Reghaia, En raison de son faible superficie, est intégré dans le sous bassin du Hamiz.

Les principaux exutoires de la plaine de Mitidja Est sont représentés par l'oued El Harrach, Hamiz, Reghaia. Les oueds alimentent la nappe dans la zone libre du piémont et la drainent vers l'aval au niveau de la zone de recharge. (Fig 2.2)

2.1.3. Réseau hydrographique :

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

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

2.1.4. Les paramètres géomorphologiques :

A. Paramètres géométriques

a) La surface

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

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

b) Le périmètre

Le périmètre correspond à la limite extérieure du bassin. De la même façon que précédemment on calcule le périmètre, en utilisant un curvimètre.

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

Tableau 2.1 : Paramètres géométriques des sous bassins versants [16]

c) Paramètres de forme

La forme du bassin versant influence fortement l'écoulement global et notamment le temps de réponse du bassin versant. C'est la configuration géométrique projetée sur un plan horizontal. Un bassin versant peut donc se présenter sous deux formes : allongée et ramassée. [17]

d) Les paramètres de relief

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

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

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

Tableau2.2 : Paramètres de forme et de relief des deux sous bassins versants(Oued El Hamiz et Oued El Harrach). [16]

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

- Les valeurs des pentes globales montrent que les deux sous bassins versants ont un relief faible, traduisant ainsi une infiltration favorable au dépend du ruissellement traduisant ainsi un temps de ruissellement long, ce qui indique une bonne possibilité d'infiltration des eaux superficielles.(Tableau 2.2)

2.2. Etude hydro-climatologique :

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

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

2.2.1. Paramètre climatologique :

a) Réseau pluviométrique :

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

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

stations pluviométriques	Coordonnées				Paramètres climatiques
	Code ANRH	Longitude	Latitude	Altitude	
Dar El Beida	02-06-2011	3°13' E	36°41' N	25	P, T°
Hamiz Barrage	02-06-2002	3°21' E	36°36' N	130	P
Réghaïa	02-06-1932	3°20' E	36° 44' N	20	P

Tableau2.3 :Caractéristiques des stations pluviométriques[16]

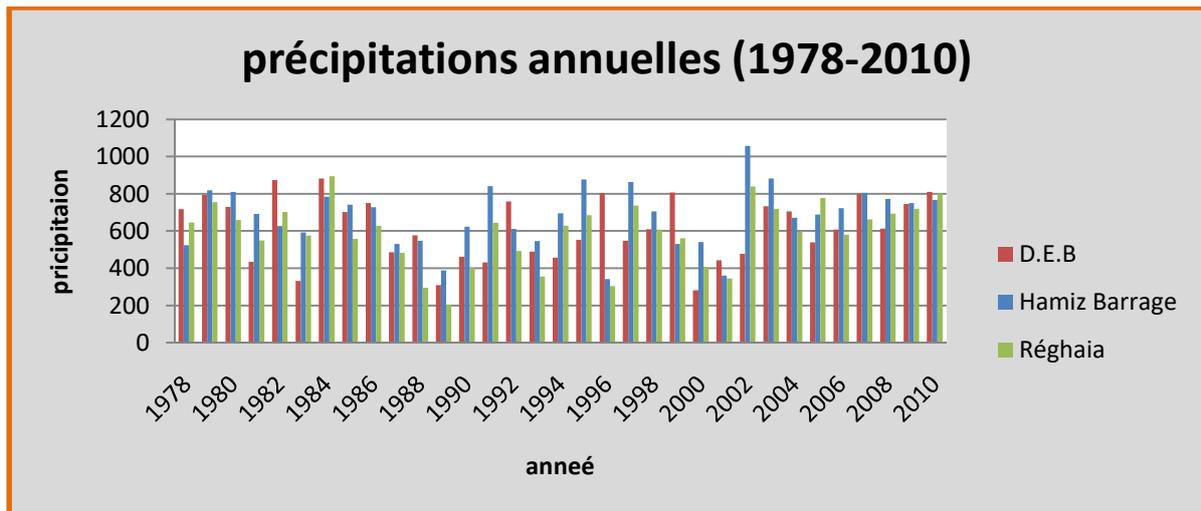


Fig 2.5 Précipitations moyennes annuelles période (1978-2010)

Les trois stations qui apparaissent dans le tableau 2.3 on peut déduire que :

i. La Station de Dar el Beida : D’après l’histogramme des précipitations :

- la précipitation moyenne annuelle (1978-2011) est de 613.96 mm/an.
- une année sèche est enregistré en 2000 avec une lame d’eau de 282 mm.
- une année pluvieuse est enregistré en 2010 avec une lame d’eau de 810 mm.

.la Station de Hamiz barrage :

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

ii. La station de Réghaia :

- la précipitation moyenne annuelle (1978-2011) est 591.6 mm/an.
- une année sèche est enregistré en 1989 avec une lame d’eau 203 mm.
- une année pluvieuse est enregistré en 1984 avec une lame d’eau de 894 mm.[18]

c)Les températures

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

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

Tableau2.4 : Variation de la température moyenne, maximale et minimale Dar El Beida (1978-2010). [16]

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

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

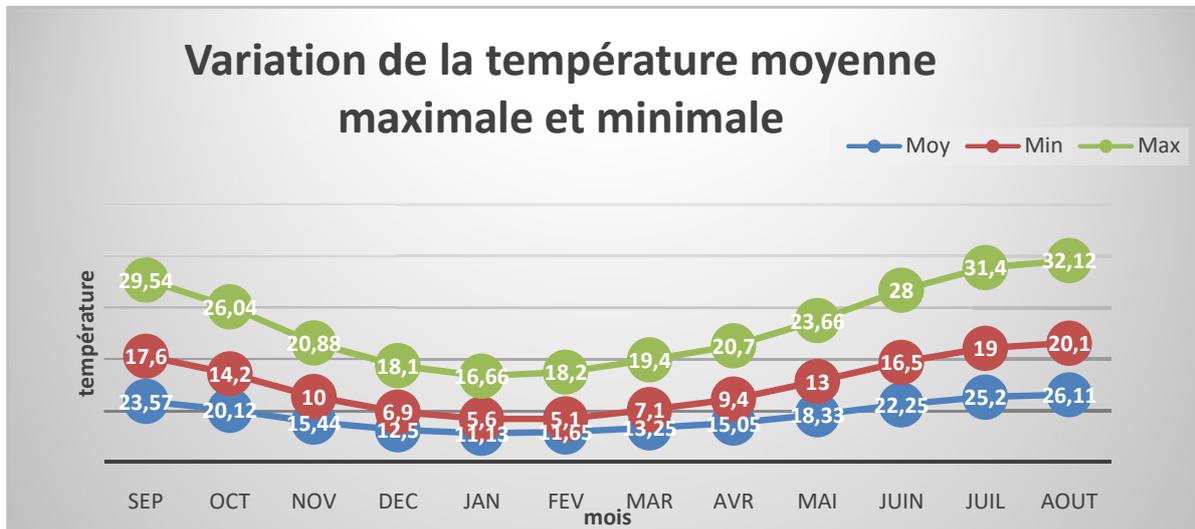


Fig 2.6 : graphe des Températures moyennes mensuelles de Dar El Beida pour la période (1978-2010)

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

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

2.3 Contexte géologique :

2.3.1 .Cadre général :

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

Elle est comprise entre deux blocs :

- Au Nord l'anticlinal du Sahel d'altitude moyenne de 270 m qui isole la plaine de la Mitidja de la mer, interrompue par la cluse de Mazafran. Le Sahel se raccorde à l'Ouest de l'oued Nador au massif de Chenoua, et à l'Est au massif de Bouzaréah.[19]
- Au sud l'Atlas Blidéen qui est un vaste massif montagneux, caractérisé par des séries épaisses de Crétacé

2.3.2. Stratigraphie et litho-stratigraphie :

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

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

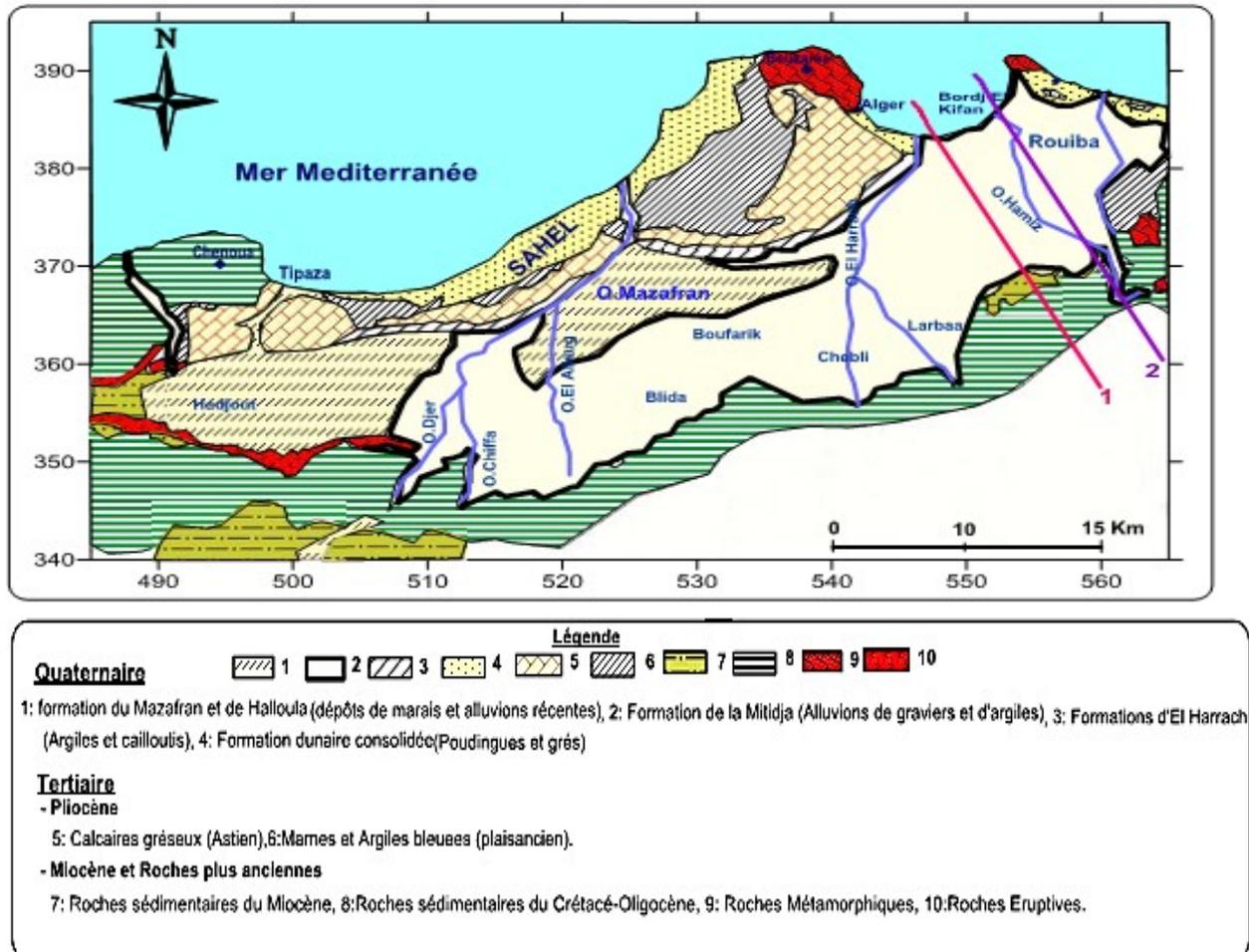


Fig 2.7 : Carte géologique de la Mitidja [16]

Les différents stades de l'évolution de la Mitidja sont aujourd'hui bien connus depuis les travaux de (L.Glangenaud et A. Aymé.1932). Ils sont résumés ci après ; Elle est identifiée par trois ensembles de données fixes : surfaces limites, localisation dans le sous-sol et structure.

2.3.3. Le Miocène

Le miocène affleure localement dans l'Atlas, plus particulièrement au Sud de Khemis EL Khechna et à l'Est d'oued Réghaïa. Il est représenté par des marnes de 50 m d'épaisseur du Vindobonien contenant des lentilles de calcaires, et aussi des lentilles de grès d'épaisseur variable du Burdigalien. (Fig 2.7)

2.3.4. Le pliocène :

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

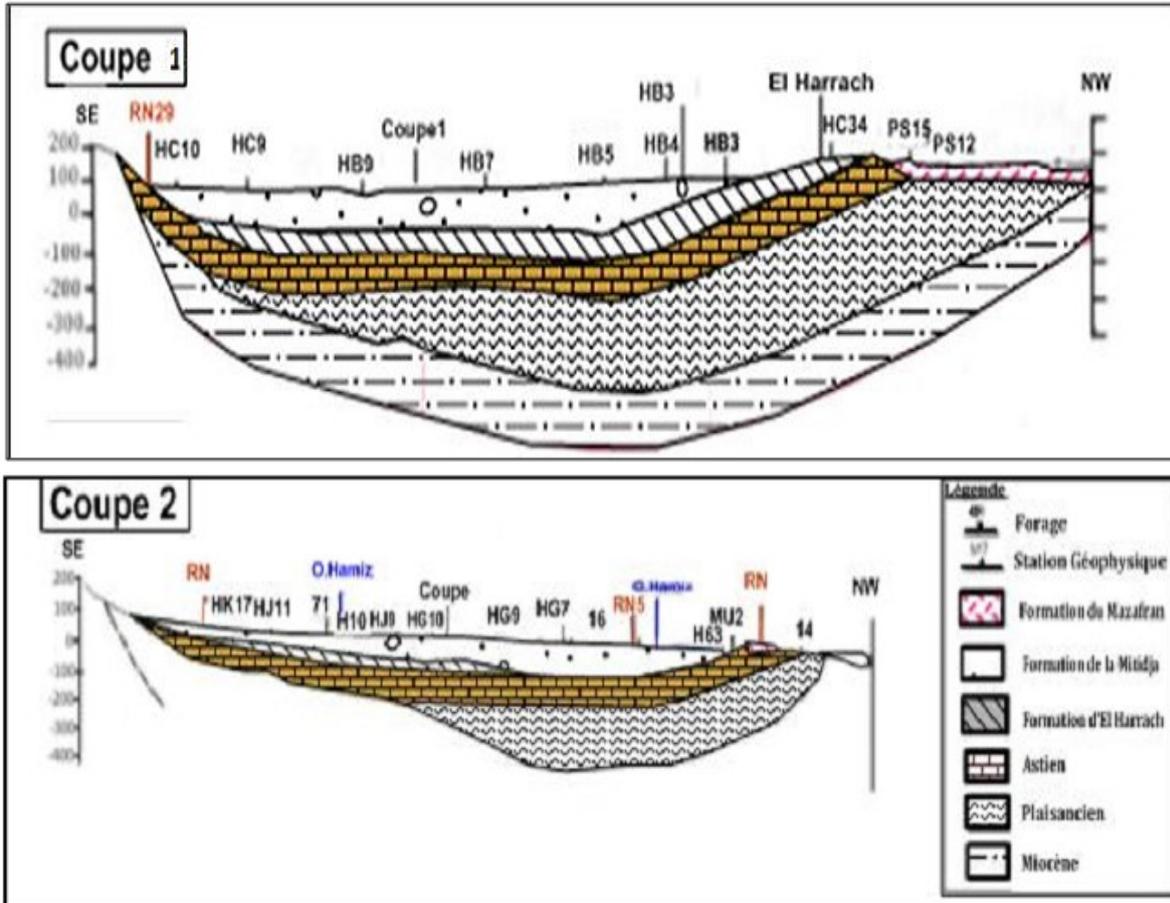


Fig 2.8 : Coupes géologiques 1 et 2- SE/NW (Bennie et Atkins, 1983)

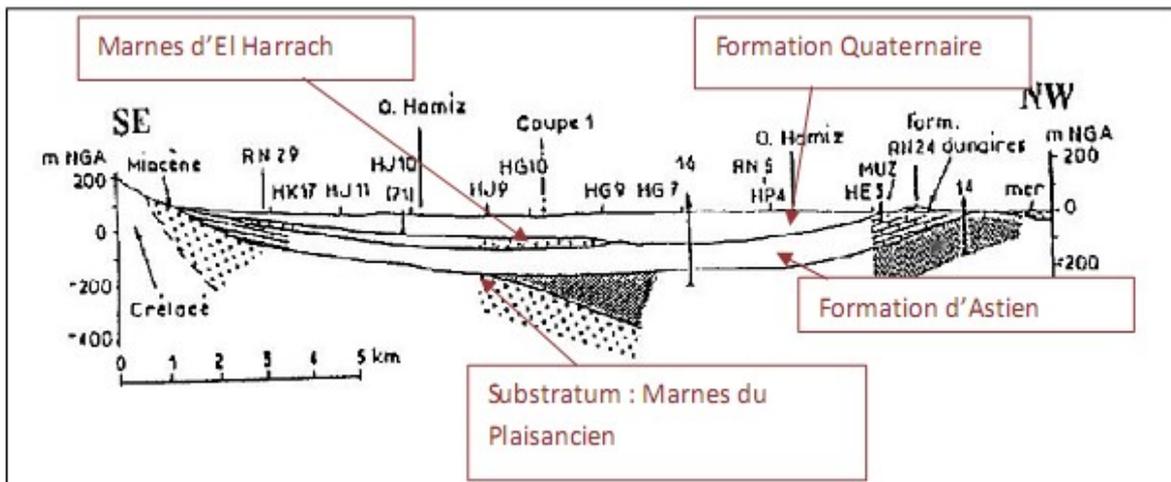


Fig 2.9 : Coupes géologiques au niveau de la Mitidja Est [20]

a) Plaisancien :

Le Plaisancien affleure uniquement dans les collines du Sahel au cœur d'un plissement anticlinal, dans la zone de Khemis EL Khechna et Réghaia où il constitue la formation Est du bassin. Il est représenté par une série épaisse uniforme de marnes grises ou bleues parfois sableuse. (Rivoirard, 1952)

b) L'Astien :

Il est bien développé sur la côte Sud du Sahel, contrairement à la bordure Sud de la Mitidja où il n'apparaît que très peu. La formation de l'Astien est caractérisée par un faciès varié associé à une sédimentation marine de haut fond. Cette série, d'une épaisseur de 100 à 130 m, débute par une couche glauconienne et se poursuit par de la molasse récifale ou sub-récifale, par des marnes jaunes ainsi que par un faciès calcaire ou calcaro-gréseux.

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

2.3.5. Le villafranchien :

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

Cette formation constitue une séquence relativement uniforme d'argile plastique jaune ou grise localement, légèrement caillouteuse, contenant un petit nombre de lentilles de graviers de 2 à 6 m d'épaisseur. (Mektaa Kheira ; Aymé 1954).

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

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

2.3.6 .Le Soltano-Tensifien :

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

L'ensemble présente des variations de granulométrie considérables aussi bien dans le sens horizontal que dans le sens vertical. Elle se compose principalement de matériaux alluviaux grossiers : graviers, limons, argiles et galets.

2.3.7. Le Rharbien -Actuel :

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

➤ **Dépôts de sables dunaires** : se localisent essentiellement dans la région de Réghaia sur 20 à 40 m d'épaisseur. [19]

➤ **Dépôts des lits des oueds actuels** : ils sont constitués de sables et de graviers, et présentent une épaisseur de quelques mètres.

➤ **Dépôts de piémont de l'Atlas** : ce sont des dépôts divers d'éléments anguleux et de couches de graviers.

2.3.8. Tectonique :

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

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

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

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

Fig 2.10 : Loglitho stratigraphique de la plaine de la Mitidja. [21]

2.4. Contexte hydrogéologique :

Sur le plan hydrogéologique la plaine de la Mitidja est composée de deux principaux aquifères :

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

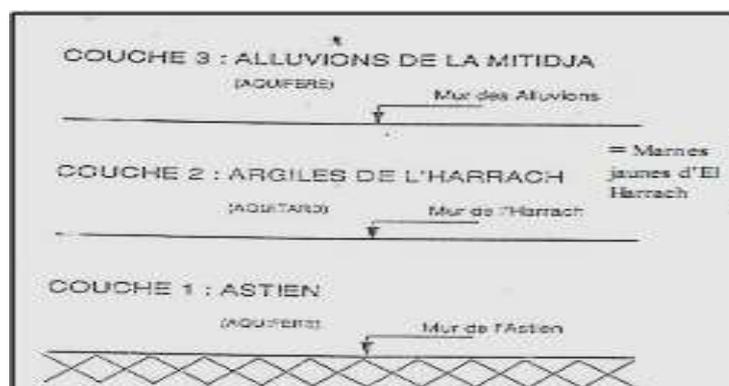


Fig.2.11.Schéma du système aquifère de la Mitidja Est [21]

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

2.4.1. Contexte hydrogéologique local de la baie d'Alger :

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

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

Globalement l'aquifère est en équilibre de pression hydrostatique avec la mer. Les directions naturelles d'écoulement des eaux souterraines vont globalement du sud vers le nord, du continent vers la mer. Cependant, l'exploitation intensive de la ressource au nord de la baie d'Alger là où se retrouve des champs captant, des forages d'irrigation et des forages d'industrie qui ont pour conséquence le rabattement de la nappe, la modification des directions d'écoulement des eaux souterraines et l'appel inévitable de l'intrusion marine.[22]

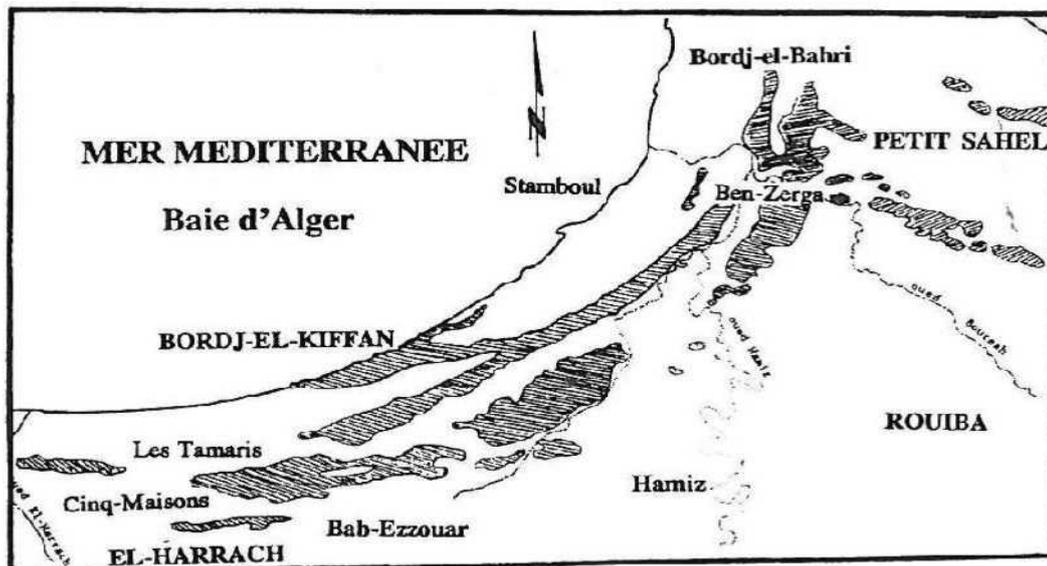


Fig.2.12 : localisation des dunes côtières (Ayme, 1962)

2.4.2. Caractéristiques hydrodynamiques :

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

a) Transmissivité :

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

Aquifère	Transmissivité (m ² /s)	Auteur
Astien	10 ⁻² - 2,3.10 ⁻²	Bennie et Partners (1971)
	1,1.10 ⁻³ à 2,2.10 ⁻³	Sir MacDonald and Partners 1992
	1,7. 10 ⁻² à 3. 10 ⁻²	Toubal, 1998

Tableau 2.5. Transmissivité dans la Mitidja [16]

b) Le coefficient d'emmagasinement

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

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

Aquifère	Coefficient d'emmagasinement	Auteur
Astien	5.10 ⁻⁶ à 5.10 ⁻³	Bennie et Partners (1980-1981)
Quaternaire	7.10 ⁻³	Bennie et Partners (1971)

Tableau 2.6. coefficient d'emmagasinement dans la Mitidja

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

Formation	Condition	valeurs
Astient	libre	0.03-0.05
	captive	5.10 ⁻³ -5.10 ⁻⁶
Mitidja	libre	0.02-0.07
	captive	3.10 ⁻³ -1.6.10 ⁻⁴

Tableau 2.7. Coefficient d'emmagasinemen. [21]

c) Perméabilité Verticale

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

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

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

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

Tableau 2.8. Perméabilité verticale

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

a) L'aquifère Astien :

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

Il est principalement alimenté par :

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

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

b) Ecoulement de la nappe de l'Astien :

Les exutoires de cette nappe sont constitués par :

- les fuites latérales de l'Astien le long de la limite Sud du Sahel, bien qu'il soit limité sur les cotés par des formations peu perméables ; un débit important sort à travers ces limites.
- La réalimentation par les écoulements verticaux de l'Astien vers la nappe de la Mitidja.
- La réalimentation par les écoulements des eaux souterraines de l'Atlas : ces écoulements d'eau souterraine ont été mis en évidence par des analyses chimiques des eaux.
- La réalimentation par distribution en eau potable et par les eaux usées.
- La réalimentation par les petits flux à travers les limites de l'aquifère : elle comprend les flux provenant du bassin versant du cours d'eau supérieur de l'oued Réghaia et les petits flux arrivant des formations de Halloula et d'El Harrach.

2.4.4. Bilan entrant et sortant des aquifères :

a) Bilan d'eau de la nappe de l'Astien :

Le bilan de la nappe de l'Astien n'est pas parfaitement connu, vu que les prélèvements et la réalimentation ne sont pas bien estimés. Les éléments connus du bilan d'eau sont données dans le tableau suivant : [20]

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

Tableau 2.9.Bilan d'eau de la nappe de l'Astien [20]

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

b) Bilan d'eau de la nappe de la Mitidja :

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

La réalimentation totale pour l'année hydrologique 1979/1980 dans les conditions climatiques moyennes étant de 900000 m³/jour, soit 328,5 hm³/an ; ce chiffre se décompose de la manière suivante [20]

c) Débits entrants de la nappe de la Mitidja :

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

Tableau 2.10.Bilan d'eau de la nappe de la Mitidja. [21]

Le total des débits sortants de la nappe de 1979/1980 était de 916000 m³/jour soit 335 hm³/an. Ce chiffre se décompose de la manière suivante [20]

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

Tableau 2.11.Débits sortants de la nappe de la Mitidja

Conclusion :

Géomorphologie

Cet aperçu nous a permis, en nous appuyant sur les différents paramètres géomorphologique, de dégager un certain nombre de caractéristiques du bassin versant considéré à partir de l'indice de compacité de Gravelius, on a pu démontrer la forme allongée de ce bassin versant, L'indice de pente global a fait ressortir un temps de concentration des eaux de ruissellement relativement étalé, Les valeurs faibles de la densité de drainage témoignent d'un réseau hydrographique peu dense.

Hydro-climatologie

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

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

La Baie d'Alger est assez homogène du point de vu climatique : la température moyenne est pratiquement constante environ 18°C par contre la pluviométrie présente une hétérogénéité dans sa répartition spatiale et même temporelle. Elle marque un premier pic pluvial en Décembre-Janvier et un second pic en Février- Mars.

Hydrogéologie :

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

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

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

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

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

Introduction

Sur le plan méthodologique, nous présenterons dans l'ordre chronologique les aspects historiques de l'étude du phénomène, des études réalisées, avec le réseau de base installé par l'Agence Nationale des Ressources Hydriques (ANRH) (vers les années 2004/2005) et étoffé par la suite (de 2010 à 2015) ainsi que les mesures des relevés piézométriques, les prélèvements pour la chimie, la réalisation des profils, et les analyses réalisées dans différentes laboratoires. Aussi, nous exposerons la dernière campagne (Hautes eau) que nous avons effectuées avec l'équipe de la surveillance des nappes de l'ANRH (Direction centre Soumaa).

3.1. Historique de l'intrusion marine dans la Baie d'Alger :

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

La nappe côtière de la baie d'Alger s'est révélée très vulnérable aux phénomènes d'invasion marine, la contamination de la nappe se produit d'avantage plus facilement le long des chenaux (embouchure de oued El Harrach et Hamiz, le Lido, Stamboul et le secteur de la verte rive) et des enclaves plus ou moins salées existant même loin à l'intérieur de la plaine.[23]

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

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

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

En janvier 2001, l'invasion marine a atteint les forages gérés par l'EPEAL sur une distance de plus de 2,5 km tout près de Lalla Dergana à Ouled Maàmar et à 2 km à partir de la côte à l'Est de Oued Réghaia. [23]

3.2. Approche hydrodynamique :

3.2.1Réseau piézométrique de la baie d'Alger :

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

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

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

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

Sachant que la piézométrie est un élément fondamental dans l'étude de l'évolution du comportement hydrodynamique et hydro chimique de la nappe, nous avons choisi de faire l'historique piézométrique de la nappe étudiée sur la période 1968-2011. [24]

3.2.2. Présentation du réseau piézométrique de la baie d'Alger :

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

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

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

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

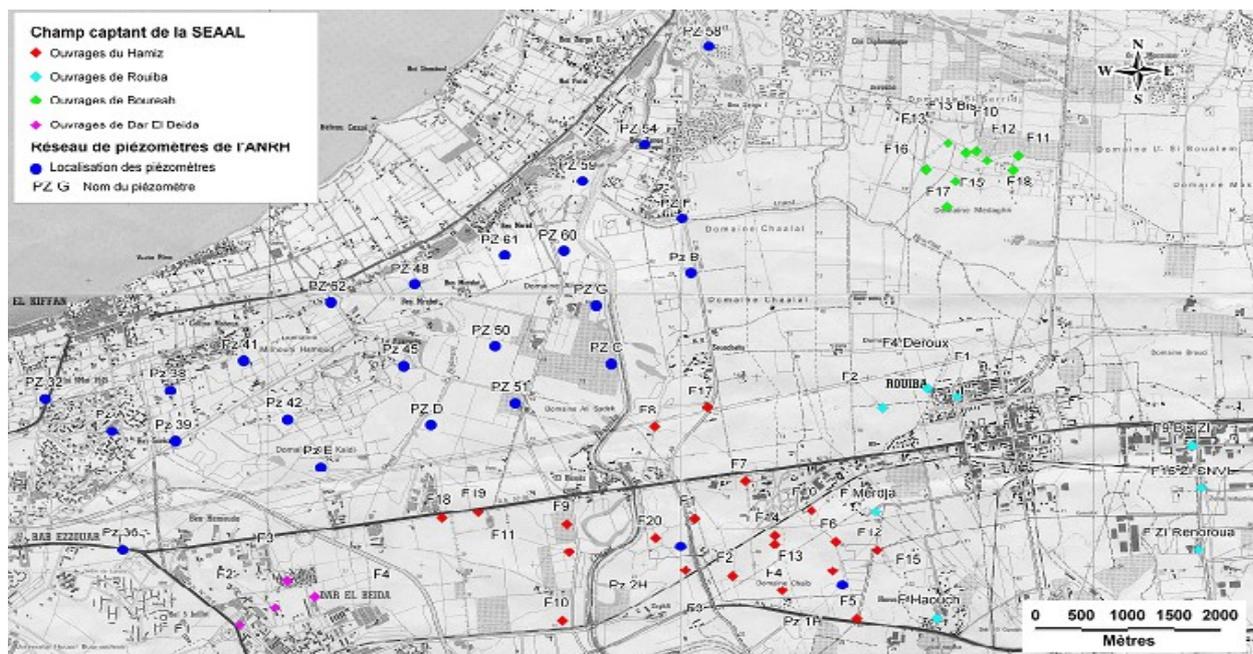


Fig 3.1 : carte de situation du réseau de surveillance de la nappe [16]

3.3. Approche hydro-chimique :

3.3.1. Analyse des paramètres chimiques en laboratoire :

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

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

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

N°	Référence échantillon	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	Li ⁺	Sr ⁺⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	F ⁻	Br ⁻
mg/l													
1	F.EM	939,2	1411,6	11590,8	441,5	0,00	0,0	21986,1	3327,3	121,0	3,6	0,0	0,0
2	F.MC	331,9	80,5	228,3	3,6	0,00	2,4	685,8	412,1	215,0	109,9	0,3	2,6
3	F.PZ	121,3	43,4	100,4	2,3	0,03	0,9	156,0	180,4	305,0	69,0	0,4	1,4
4	F.PZ 38	104,8	33,0	81,9	3,4	0,04	0,9	99,1	167,9	221,0	58,5	0,4	1,0
5	F.PZ 45	136,2	43,9	81,3	1,6	0,02	1,1	221,9	153,1	207,0	84,6	0,4	1,2
6	F.PZ 58	157,1	44,3	155,4	9,7	0,03	1,4	240,9	169,7	315,0	152,7	0,3	1,3
7	F.PZ A	105,8	32,1	108,5	2,9	0,04	0,9	142,1	159,5	299,0	4,1	0,4	1,0
8	PZ.32	147,9	33,4	117,8	3,0	0,02	1,3	182,9	190,6	272,0	197,4	0,3	1,1
9	PZ.38	144,4	65,1	105,7	3,9	0,05	2,0	146,8	232,8	500,0	3,1	0,3	1,1
10	PZ.39	60,9	24,1	72,3	1,8	0,03	0,0	89,2	46,2	250,0	3,2	0,4	0,9
11	PZ.41	126,8	49,2	110,9	4,2	0,05	2,1	139,0	309,3	315,0	0,0	0,4	1,0
12	PZ.45	105,7	46,3	58,6	11,4	0,02	0,0	63,7	82,1	458,0	57,3	0,3	1,0
13	PZ.48-1	76,8	43,7	120,6	9,5	0,02	2,2	301,0	70,6	140,0	12,1	0,5	1,5
14	PZ.48-2	569,1	172,1	1371,8	7,4	0,00	3,4	3334,0	561,8	218,0	97,2	0,0	8,5
15	PZ.50	156,2	67,4	148,7	2,2	0,03	1,7	256,9	281,3	355,0	93,4	0,5	1,5
16	PZ.51	174,5	79,9	189,0	1,7	0,03	1,6	302,3	348,0	355,0	86,7	0,4	1,5
17	PZ.53-1	17,7	44,3	308,7	8,9	0,03	0,0	526,5	12,7	128,0	10,5	0,4	2,0
18	PZ.53-2	917,0	426,6	3648,8	25,1	0,03	0,6	8318,6	1121,1	260,0	50,9	0,0	20,9
19	PZ.54	113,8	36,6	138,8	8,0	0,03	1,3	184,9	100,4	403,0	30,4	0,4	1,1
20	PZ.58	200,3	28,6	122,1	7,4	0,02	0,0	221,2	220,2	268,0	160,2	0,3	1,3
21	PZ.58-1	9,8	14,5	457,4	18,9	0,04	0,0	704,0	3,5	75,0	3,0	0,7	3,5
22	PZ.58-2	53,9	57,0	1434,0	37,1	0,00	1,2	2470,1	3,1	35,0	3,1	0,4	11,6
23	PZ.61-1	216,7	79,6	239,6	2,5	0,03	1,8	676,4	228,0	267,0	120,9	0,4	2,5
24	PZ.61-2	751,7	217,1	688,6	4,8	0,00	5,0	2700,9	470,6	165,0	139,1	0,0	7,5
25	PZ.62-1	164,5	43,8	164,2	7,8	0,03	0,0	345,6	239,6	241,0	96,5	0,4	1,6
26	PZ.62-2	329,7	114,4	1075,2	6,7	0,05	2,1	1868,4	574,6	297,0	112,9	0,0	5,5
27	PZ. A	80,4	22,5	93,4	2,5	0,04	0,6	123,9	59,0	256,0	3,6	0,4	1,0
28	PZ. B	166,2	53,3	103,9	1,7	0,03	1,3	332,1	193,1	234,0	78,1	0,4	1,7
29	PZ. E	157,68	54,07	183,53	9	0,03	1,22	268,68	254,63	303	131,2	0,4	1,39
30	PZ. G	142,35	58,39	114,52	6,43	0,03	1,31	182,14	172,1	399	95,27	0,4	1,11

Tableau 3.1 : Résultats d'analyses hydro-chimiques des échantillons de la baie d'Alger de l'année 2005 [16]

Echantillon	mg/l							
	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻
PZ								
pzB/50m	164,1	62,8	132,9	2,5	513,6	184,8	61,6	75,1
pzB/28,5m	87,5	55,8	124,3	2	222,6	250	87,8	72,2
pzC	70,9	42	63,1	2,6	144,4	147,8	134	45,9
pzE	69,3	34,4	89,3	7,6	127,4	140,8	154	53,6
pzF/32m	152	69,5	181,3	3,6	485,5	190,4	84,7	161,2
pzD/48m	64,9	29,9	60,4	2,1	113,4	115,9	144,8	39,6
pz39	81,5	47,5	89,8	3	128,4	190,4	69,3	158,6
pz51/29m	103,5	74,4	240,3	3,6	323	396,9	177,1	67,6
pz54/15,8m	15,4	21,2	126,7	8,2	177,6	14,6	150,9	21,9
pz54/22,46m	20,2	31,1	136,8	9,4	200,6	24,6	192,5	33,1
pz58/14m	20	27,3	676,5	23,2	1029,3	4,2	95,5	9,5
pz59/33m	450,7	226,6	3632,6	155,5	6945	999,5	147,9	59,8
pz59/19,5m	29,6	57,5	514,4	15,9	935,5	18,9	101,7	25,7
pz59/25,52m	163,6	101	1080,3	9,8	1969,3	446	67,8	36,6
pzF/26,8m	123,3	56,6	143,1	2,6	288	180	100,1	121,9
pz61/19,5m	141,3	63,3	235,5	3,7	474,8	147	110,9	167,3
pz60/23m	52,7	44,8	146,6	3,3	204,2	163,7	123,3	20,4
pz58/25,44m	29,9	35,4	847,3	26,1	1363,2	2,9	94	9,8
pz61/26m	845,4	191,5	1290	5,5	3657,6	758,3	63,2	113,7
pz60/26,83m	55,7	44,9	148,5	2,2	209,3	167,4	126,3	20,6
pzG/28m	71,9	54,5	128,3	8,1	207,2	172,4	107,8	75,2
pzG/36m	107,7	61,5	126,2	7,3	317,6	161,8	86,3	71,5
pz61/40m	796,1	183,3	1554,6	5,8	4015,4	691,5	95,5	113,5
pz58/43m	54,5	67,1	1800,9	41,4	2824,2	3	53,9	20,9
pz60/46m	253,1	87,9	555	4,1	1317,2	298,8	72,4	70
pz48/21,5m	53,5	25,6	155	64,9	313,2	15,8	163,3	13,4
pz48/25,92m	359,5	83,1	318,4	24,7	951,3	313,8	97	121,5
pzD/27,5m	48,8	29,4	63,3	1,6	99,2	117,7	97	14,9
pz50/27,73m	158,8	83	156,9	5,1	408,5	259,5	73,9	75
pz45/29,54m	34,9	47,2	76,6	10,1	83,9	101,1	160,2	79,3
pz45/36m	161,3	66,5	106,1	4,9	442,2	194,8	67,8	120,2
pz48/46m	407,2	152,4	1384	9,5	2964,9	640,6	69,3	101
pz62/26,82m	180,7	61,6	330,3	8,3	545,1	336,4	137,1	100,6

Tableau 3.2 : Résultats d'analyses hydro-chimiques des échantillons de la baie d'Alger de l'année 2007 [16]

Nom	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₂	NO ₃
Eau de mer	446,8	1615,3	11580	400	317,2	19887	6244	0,06	2,6
PZ 1 à 60m	142,77	36,88	56	3	610	104	164	0,03	78,05
PZ 2 à 65m	115,08	43,48	69	3	579,5	133	172	0,03	48,28
PZ 36 à 60m	13,17	6,5	57	3	91,5	102	13	0,02	0,15
PZ 38(BA) à 40m	137,88	44,83	176	2	122	273	313	0,5	219,52
PZ 39(BA) à 50m	93,75	21,9	95	2	671	97	86	0,03	32,92
PZ 42 à 60m	227,63	41,8	135	16	732	180	436		90,6
PZ 45 à 45m	330	70	177	2	549	626	234	0,04	116,61
PZ 48(BA) à 50m	429,45	148,63	1115	8	768,6	2198	649	0,02	58,21
PZ 50(BA) à 32m	260	80	214	8	854	450	338	0,04	80,85
PZ 51(BA) à 40m	199,5	63,23	215	1	1037	247	355	0,04	79,43
PZ 54(BA) à 50m	285	80	400	9	1037	722	325	0,12	86,45
PZ 58(BA) à 40m	11,36	22,11	1570	40	183	2331	280	0,03	0
PZ 60 à 45m	521,48	147,05	862	7	634,4	2085	599	0,03	75,78
PZ 61(BA) à 50m	425	104	1400	4	957,7	2240	696	0,02	111,28
PZ 62(BA) à 40m	261	71	560	5	799,1	839	499	0,04	70,19
PZ A(BA) à 45m	86,47	19,82	122	2	695,4	128	79	0,04	0,12
Pz B(BA) à 55m	390	84,25	335	2	610	923	232	0,05	99,78
PZ C à 50m	403,76	100,5	283	5	757,62	1005	268	0,79	39,79
PZ D(BA) à 55m	293	65	115	2	488	575	138	0,04	64,09
PZ E à 50m	206,51	44,15	145	30	706,99	240	248	0,04	156,85
PZ F(BA) à 50m	406	79	380	2	701,5	1025	223	0,04	151,49
PZ G à 50m	208,48	66,53	136	16	884,5	242	314	0,03	131,39

Tableau 3.3 : Résultats d'analyses hydro-chimiques des échantillons de la baie d'Alger de l'année 2010 [16]

3.4- Profil de la conductivité : (variation vertical de la conductivité)

L'aspect nouveau dans l'étude du phénomène de l'intrusion marine est l'introduction de la notion de la mesure verticale de la conductivité (examen de la stratification chimique au niveau de chaque point d'eau), cette technique a été introduite par le Centre de Recherche Nucléaire d'Alger (CRNA) avec l'équipe de l'Agence National des Ressources Hydriques (ANRH) vers les années 2005/2007.

La technique consiste à faire descendre un câble (de 100 m de longueur) relié à une électrode qui elle même est relié a un conductivimètre portable. La mesure se fait du haut vers le bas avec un pas de 1 à 2 m. La mesure inclut la conductivité en micro siemens/cm et la température en °C



Fig 3.2 : Conductivimètre portable

L'intérêt de réaliser des profils de conductivité à différentes profondeurs permet de mettre en évidence les variations verticales de conductivité, représentative de la problématique des intrusions marines dans les milieux côtiers.

Des simples mesures à la surface des ouvrages ne sont pas suffisantes du fait qu'il existe un effet densitaire lié aux eaux salées plus denses que les eaux douces.

Ces profils de conductivité ont ensuite été comparés avec la coupe technique et géologique de chaque ouvrage.[24]

Les résultats obtenus permettent de tracer des profils de conductivité et de températures qui seront dépouilles et interprétés.

Mission de terrain (Mai 2016)

3.4. Campagne de prélèvement : (état actuel du prélèvement)

Afin d'examiner l'évolution de prélèvement. En 2016, nous avons effectuée une mission de terrain avec l'équipe de l'ANRH (22, 24, 26, et le 29 Mai 2016).

Cette équipe était composé de :

- Ingénieur Chef de suivie surveillance des nappes
- Deux Ingénieurs hydrogéologues
- Une étudiante Master 2
- Un chauffeur.

Le matériel utilisé :

- Une sonde électrique (mesure du niveau piézométrique NP)
- Un conductivimètre
- Des flacons pour échantillonnage (analyse hydrochimique : cations, anions ; isotopique : oxygène 18, deutérium)
- Voiture de terrain.

3.4.1- Matériels utilisés :

- ✓ Voiture de terrain



Fig 3.3 : la voiture utilisée pour le déplacement sur terrain

✓ Sonde électrique



Fig 3.4: la sonde électrique utilisée pour la mesure du niveau statique

✓ Une échelle :

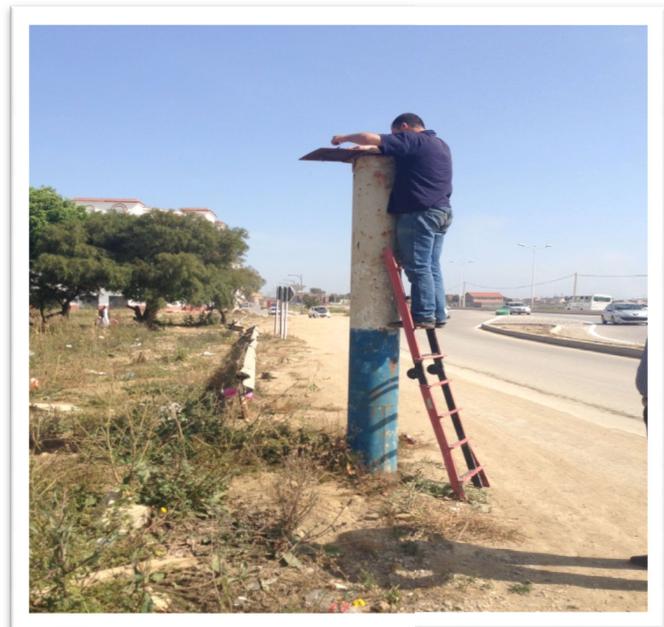


Fig 3.5 : échelle utilisée

✓ Conductivimètre



Fig 3.6 : conductivimètre utilisé pour les mesures de la conductivité

34.2- Mesure du niveau statique :

A l'aide d'une sonde électrique nous avons mesurés le niveau d'eau dans chaque piézomètre pour l'objectif de connaître le niveau d'eau actuel de la nappe de la région de la Baie d'Alger.

L'image suivante représente les mesures piézométriques qu'on a faites sur le terrain au niveau de la Baie d'Alger :



Fig 3.7 : les mesures du niveau statique sur les piézomètres au niveau de la Baie d'Alger

N°BIRH	Date	Niveau Statique (NS) en mètre
PZ B	24-05-2016	24.35
PZ F	24-05-2016	19.68
PZ 59	24-05-2016	Inaccessible
PZ 54	24-05-2016	12.12
PZ 58	24-05-2016	10.45
PZ 61	22-05-2016	17.25
PZ 60	22-05-2016	20.30
PZ G	26-05-2016	19.90
PZ C	26-05-2016	Inaccessible
PZ 51	24-05-2016	25.35
PZ 45	24-05-2016	24.85
PZ D		
PZ 50	24-05-2016	21.90
PZ 48	26-05-2016	18.98
PZ 62	26-05-2016	20.10
PZ 41	26-05-2016	21.35
PZ 42	26-05-2016	31.50
PZ E	26-05-2016	Impossible
PZ 39		
PZ 38	29-05-2016	16.40
PZ 32	29-05-2016	26.40
PZ A		
PZ 36	29-05-2016	27.00
PZ 2H	24-05-2016	37.05

Tableau 3.4 : les résultats de la campagne piézométrique de la Baie d'Alger, Hauts eaux Mai 2016 :

3.4.3- Mesure de la conductivité :

Plusieurs piézomètres présentent des signes de contamination, pour la représentativité des résultats nous étions contraints de prélever sur des forages situés à proximité des piézomètres

Nom du forage	Etat du forage	Conductivité en $\mu\text{s/cm}$
F à 500m de PZ B	Début de pompage	1937
F à 100m de PZ B	Après 3 heures de pompage	5000
F PZ G	Après 4 heures de pompage	4500
F PZ 41	En exploitation	1594
F PZ E	En exploitation	1549
F 893 a 500m de PZ 50	Début de pompage	2500
F à 100 m de PZ 50	Après certain temps du pompage	6800
F PZ 45	En exploitation	6500
Forage dans l'usine de coca-cola	En exploitation	1074
PZ 32	Eau de piézomètre	1129
F PZ 36	En exploitation	<1000
F PZ 2H	En exploitation	1000
Eau de mer		58000

Tableau 3.5 : Résultats de la conductivité mesuré sur le terrain (Mai 2016)

3.4.4- Prélèvement des échantillons :

Les prélèvements effectués (flacons de 500cc) pour les besoins d'analyse hydrochimiques (cation, anions et quelques éléments du traces) et isotopiques dosage des isotopes stables de la molécule d'eau (oxygène 18 et deutérium)

- ✓ Premier prélèvement au niveau d'un forage dans l'usine de coca-cola (Rouïba)



Fig 3.8 : le premier prélèvement au niveau de l'usine de coca-cola

- ✓ Deuxième prélèvement au niveau des forages les plus proches à PZ 50 :



Fig 3.9 : prélèvement au niveau d'un forage à 100 m de PZ 50

✓ Troisième prélèvement au niveau de PZ B :



Fig 3-10: prélèvement dans un forage en exploitation au niveau du PZ B

✓ Quatrième prélèvement au niveau du PZ G :



Fig 3.11 : prélèvement dans un forage à 50m de PZ G

Nous avons prélevé une douzaine des échantillons pour les analysés :

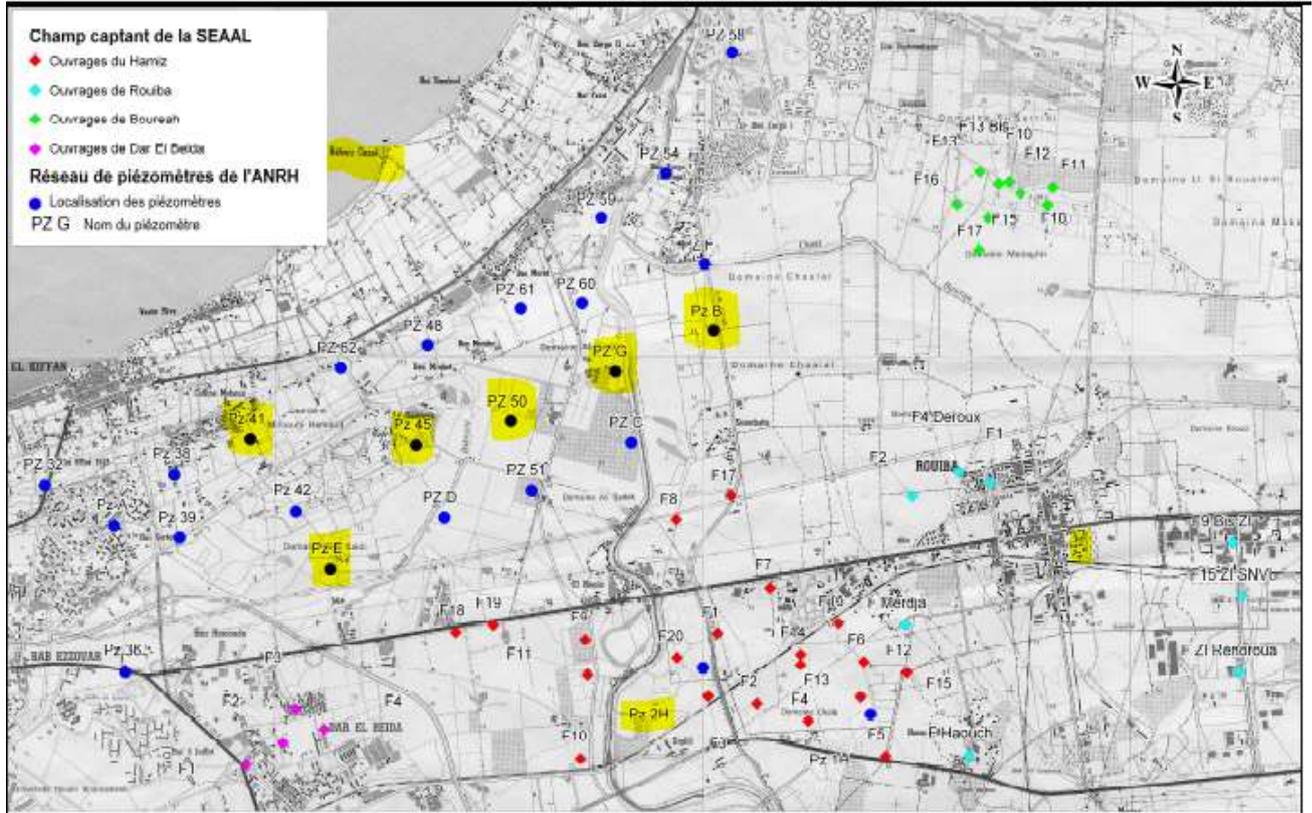


Fig 3.12 : carte de situation des points d'eau prélevés

Introduction :

Notre approche consiste à examiner l'évolution spatio-temporelle du phénomène étudié (extension du biseau salé) par l'utilisation des outils hydrodynamiques, hydro-chimique, et isotopiques : l'approche hydrodynamique (évolution de la piézométrie), approche hydro-chimique (faciès chimique, quelque couple), approche isotopique.

4.1- Evolution de la piézométrie :

Depuis les années 1980, la piézométrie de la zone d'étude a beaucoup évoluée. L'augmentation de prélèvements par la mise en exploitation des champs captant ainsi que par la présence de nombreux forages agricoles et industriels, licites et illicites, ont entraîné un rabattement de la nappe de l'ordre de 25 mètres en 30ans.

Les cartes piézométriques anciennes permettent de préciser ce rabattement à l'échelle de la Baie d'Alger.

4.1.1- La piézométrie de la nappe en 1981 :

La carte piézométrique générale de la plaine de la Mitidja de 1981 montre que les directions d'écoulement se font depuis le continent vers la mer Méditerranée. Les gradients sont faibles au sud de l'aérodrome. Les cotes piézométriques sont de l'ordre de 10 à 5m dans la Baie d'Alger, et donc au dessus du niveau de la mer.

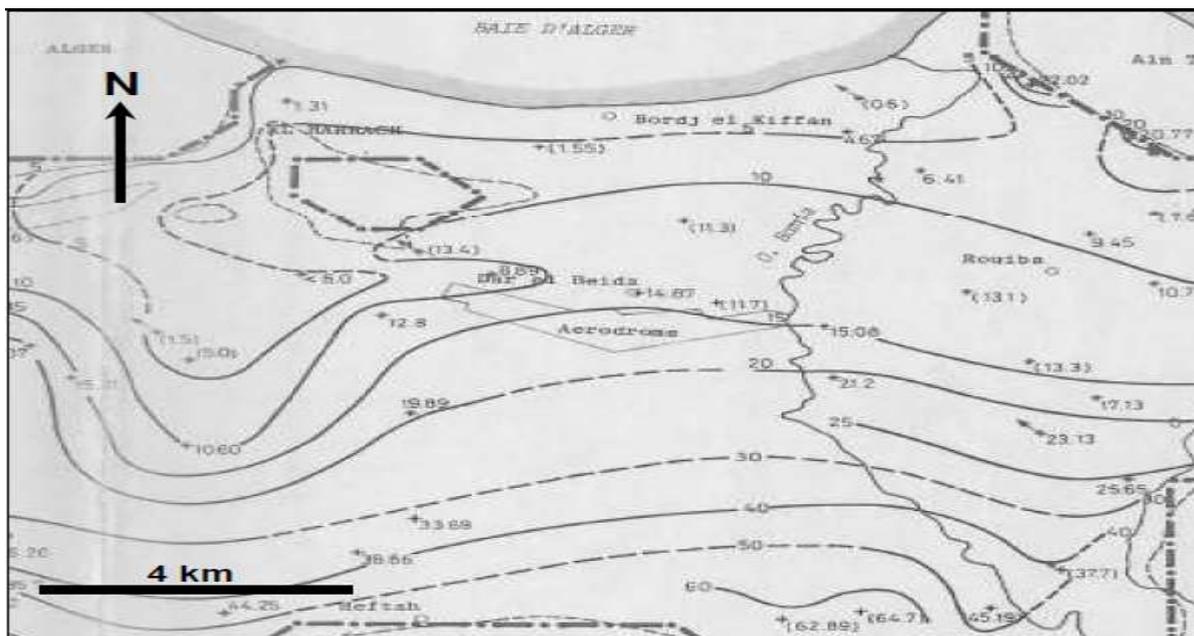


Fig 4-1 : Carte piézométrique de juin juillet 1981 [20]

4.1.2- La piézométrie de la nappe en 1991 :

La carte piézométrique de 1991 montre déjà une baisse du niveau piézométrique par rapport à la situation de 1981. On observe de forts gradients au sud de l'aérodrome (0,8 %) dû aux écoulements provenant de l'Atlas Blidéen. Sur la Baie d'Alger, les côtes piézométriques sont comprises entre 3 et 5 m au dessus du niveau de la mer.

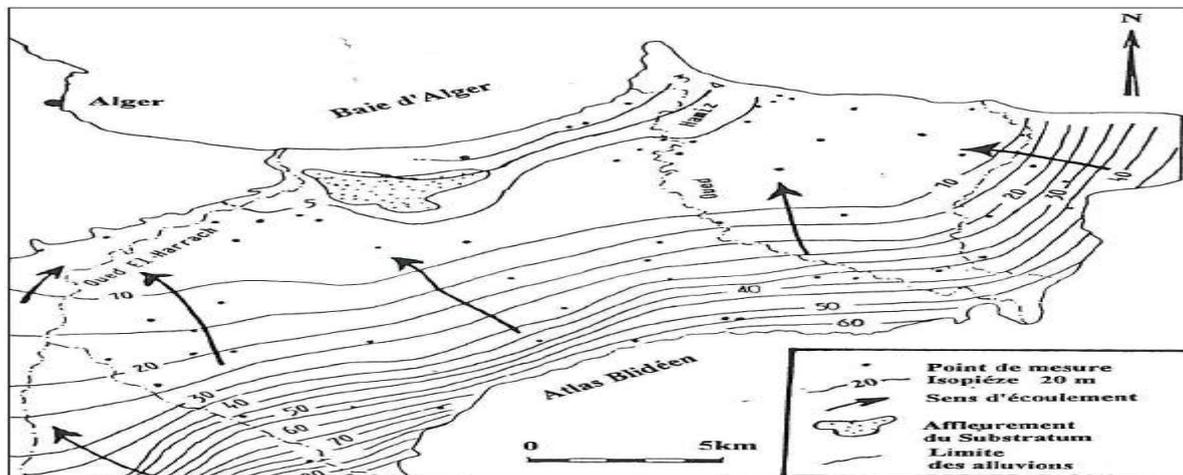


Fig 4.2 : Carte piézométrique d'Octobre Novembre 1991 (Benziada, 1994)

4.1.3- La piézométrie de la nappe en 1996 :

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

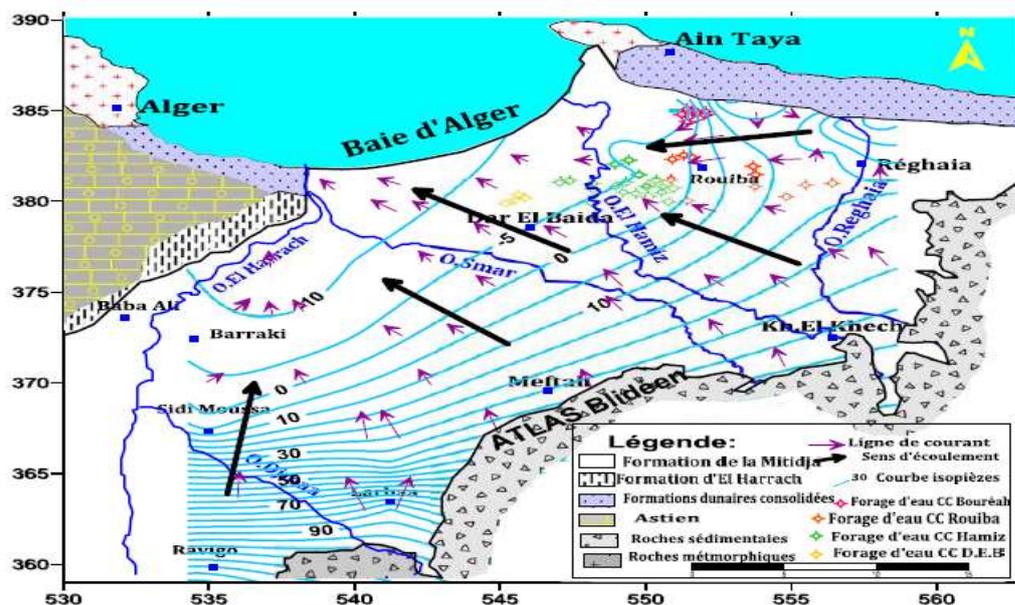


Fig. 4.3 : Carte piézométrique de la Baie d'Alger mai (1996) réalisée à l'aide du logiciel surfer.10[25]

4.1.4- La piézométrie de la nappe en 1999 :

La carte piézométrique de 1999, montre un écoulement souterrain qui se fait du sud vers le nord dans la partie sud, mais le long du littoral on note un inversement du sens d'écoulement de la mer vers le continent (vers le champ de captage de Baraki) ce qui s'explique par l'intrusion de l'eau sale dans cette zone.

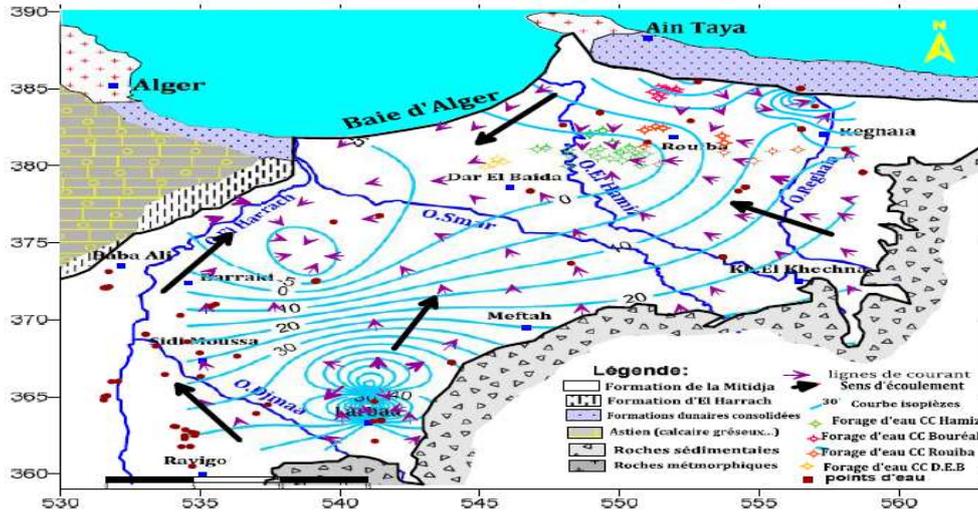


Fig.4.4: Carte piézométrique de la Mitidja orientale(1999) réalisée à l'aide du logiciel surfer.10 [25]

4.1.5- La piézométrie de la nappe en 2000 :

La carte de la campagne de mesures de 2000, montre que le sens d'écoulement se fait toujours du sud vers le nord. Dans la partie sud on note un resserrement des courbes isopièzes indiquant une valeur importante du gradient hydraulique, donc une vitesse de circulation des eaux souterraine élevée contrairement au nord où les courbes isopièzes sont espacées traduisant les faibles valeurs du gradient hydraulique et des valeurs de perméabilité élevées.

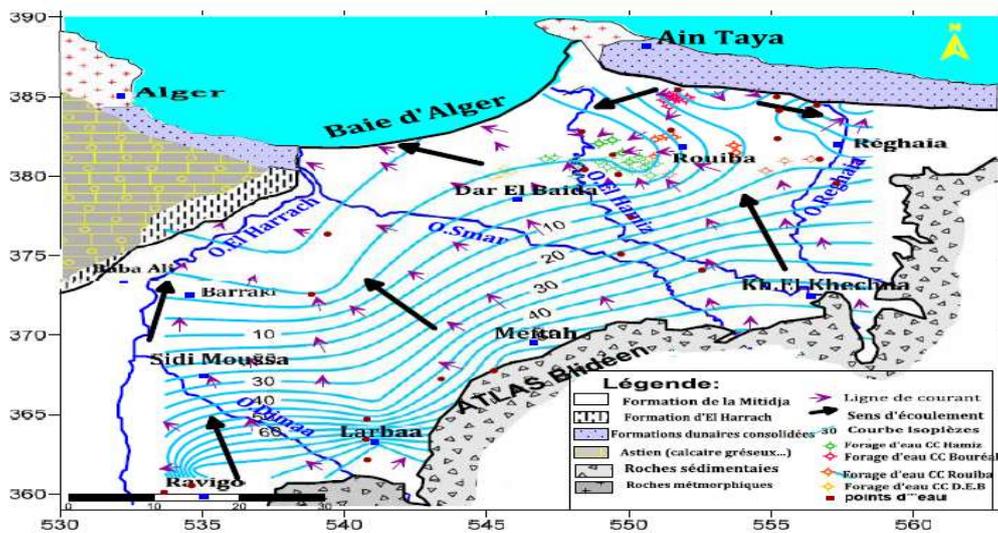


Fig. 4.5: Carte piézométrique de la Mitidja orientale (2000) réalisée à l'aide du logiciel surfer.10 [25]

4.1.6- La piézométrie de la nappe en 2005 :

La carte piézométrique de l'année 2005, montre un écoulement global du nord vers le sud c'est-à-dire une invasion prononcée des eaux douces par les eaux de la mer. Une zone d'appelle par le pompage important exerce au niveau du champ de captage du Hamiz se dessine au nord et trace une courbe en iso valeur de -8m.

Les courbes piézométriques sont espacées traduisant une faible pression hydraulique et vitesse d'écoulement et de grandes valeurs de perméabilité.

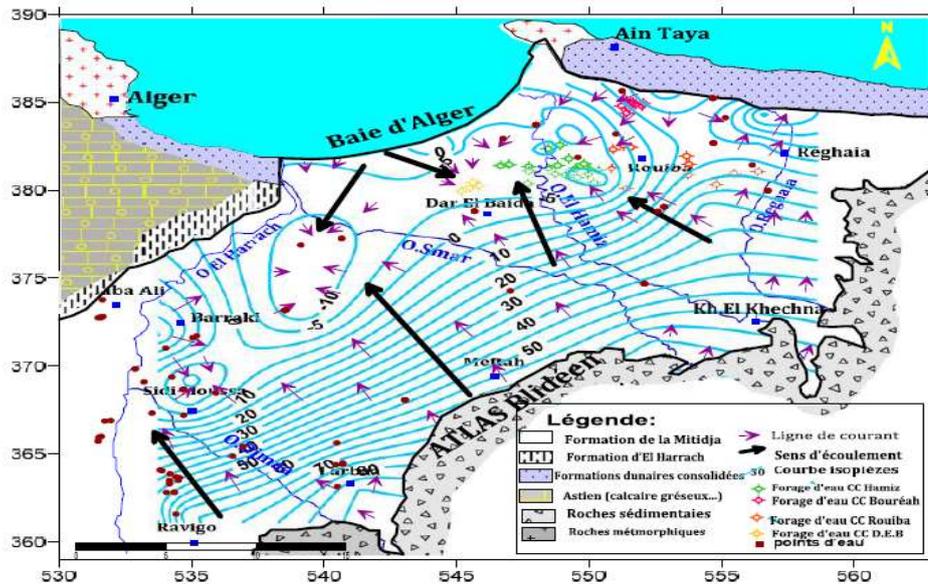


Fig. 4.6 : Carte piézométrique de la Mitidja orientale (Mars 2005) réalisée à l'aide du logiciel surfer.10 [25]

4.1.7- La piézométrie de la nappe en 2010 :

La carte piézométrique de l'année 2010, montre une baisse du niveau piézométrique poursuit du coté du champ de captage de Baraki à l'ouest et au champ du captage du Hamiz, Dar el beida, Bouréah et Rouiba favorisant ainsi le phénomène d'intrusion marine.

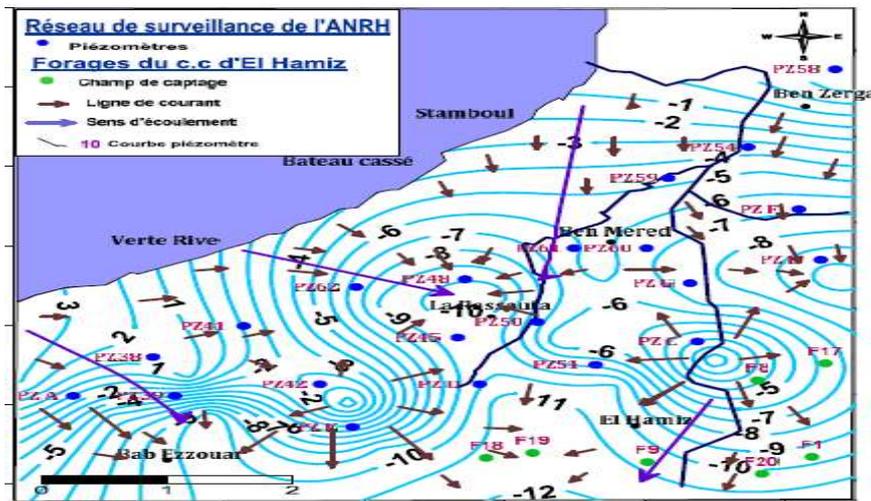


Fig. 4.7 : Carte piézométrique de la de la Baie d'Alger (Avril 2010) réalisée à l'aide du logiciel surfer.10

4.1.8- La piézométrie de la nappe en 2011 :

Le niveau piézométrique est à plusieurs mètres sous le niveau de la mer impliquant la persistance du phénomène d'intrusion marine. La dépression du champ de captage du Hamiz est bien tracée par la courbe en isovaleur -11 m faisant un appel inévitable à l'intrusion saline.

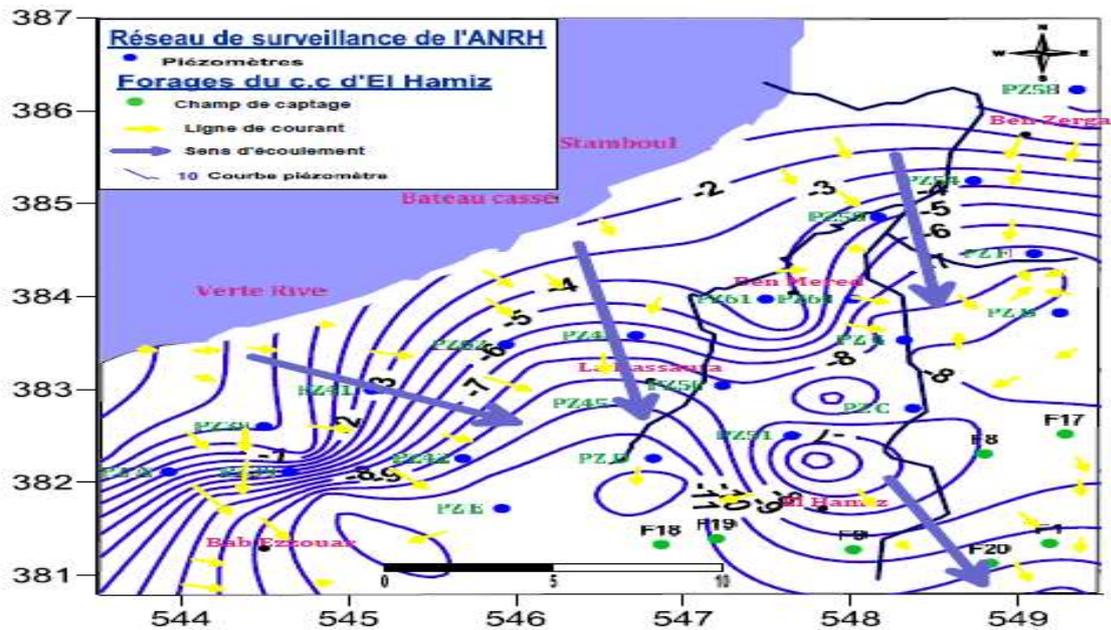


Fig. 4.8: Carte piézométrique de la Baie d'Alger mai(2011) réalisée à l'aide du logiciel surfer.10

4.1.9- La piézométrie du PZ 2 Hamiz :

La chronique piézométrique au niveau du piézomètre suivi PZ 2 Hamiz, suivi depuis 1995 montres l'évolution du niveau de la nappe au sein du champ captant du Hamiz. Cette figure présente une baisse progressivement du niveau d'eau pour ce PZ de 1995 jusqu'a 2008 là où il atteint son seuil à -16m

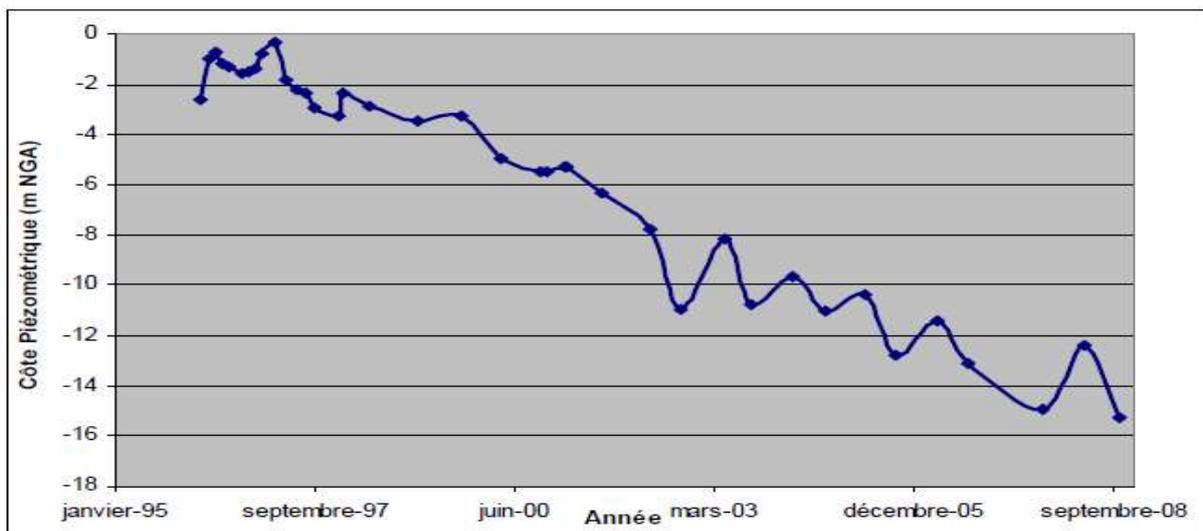


Fig 4.9: Chronique piézométrique sur le piézomètre PZ 2 Hamiz [24]

4.1.10- La piézométrie de la nappe en 2016 : (notre campagne)

La figure 4.10 montre la comparaison entre le niveau piézométrique en Mai 2016 par rapport au Mai 2015 dans la période de hautes eaux.

On remarque que le niveau piézométrique reste presque stable dans la majorité des PZ sauf dans le PZ F, PZ 50, et PZ 62 ou on a noté une baisse dans le niveau piézo et dans les PZ 51, PZ 32, et PZ 36 nous avons noté une légère augmentation dans le niveau piézo

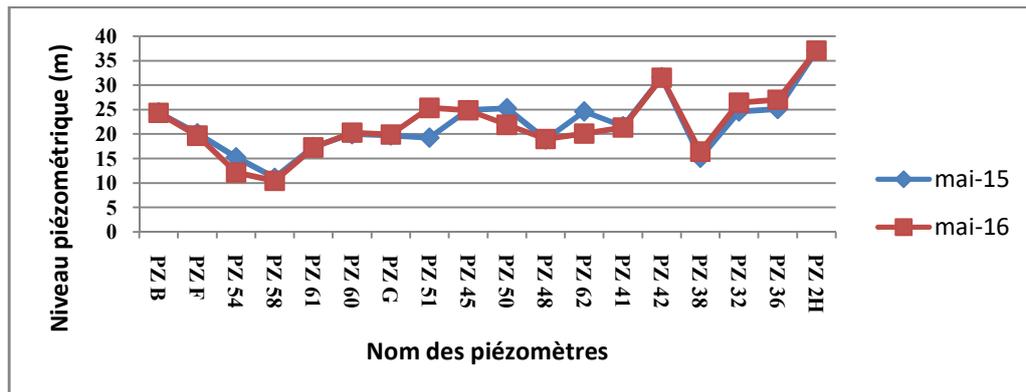


Fig 4.10: LA piézométrie actuelle de la nappe (2016)

L'abaissement du niveau piézométrique continuera à évoluer, tant que la demande en eau est en accroissement sans cesse et la recharge de la nappe insuffisante pour freiner l'intrusion marine vers les zones internes. L'évolution piézométrique traitée dans cette partie montre bien que le déclenchement du phénomène de l'invasion marine a été depuis les années 85 (selon J. Mania) et se poursuivait au 90. Il s'est d'abord présente par l'abaissement du niveau piézométrique avec des valeurs de 0m dans les zones internes et -5m près de la côte. L'inversion du sens d'écoulement de la mer vers le continent a été très bien marquée en 1992 le long du littoral

4.2- Approche hydro-chimique :

4.2.1-Analyses physico-chimiques :

◆ Température :

La température des eaux de la nappe alluviale est assez homogène. Les valeurs s'échelonnent entre 21°C à 23,5 °C liées à la profondeur relativement faible des forages.

◆ Le potentiel d'Hydrogène (pH) :

Selon les résultats des statistiques descriptives des analyses des campagnes 1985,2000 et 2010 représentés dans les tableaux ci-dessous, les moyennes et médianes des pH des campagnes de 1985, 2000 et 2010, sont très proches et varient peu d'une campagne à l'autre (entre 7,2 et 7,4). Les écart-types sont très faibles, compris entre 0,18 et 0,32.

La campagne de 1985 regroupe des valeurs comprises entre 6,8 et 7,6. Ces valeurs sont ainsi très proches de la neutralité. Les mêmes valeurs sont observées pour les campagnes 2000 et 2010 qui enregistrent respectivement des valeurs maximums de 7.6, 7.8 et 7.9.

Donc on remarque une légère évolution du pH des eaux au cours de la période 1985-2010.

Statistique	Ca ²⁺ (mg/l)	Mg ²⁺ (mg/l)	Na ⁺ (mg/l)	Cl ⁻ (mg/l)	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	HCO ₃ ⁻ (mg/l)	NO ₃ ⁻ (mg/l)	CE mhos/m	R.Sec (mg/l)	pH
Nb. d'observations	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
Minimum	80	17	45	28	60	195	5	0.8	353	6.8
Maximum	230	83	249	346	309	463	100	2.6	2018	7.6
Médiane	136	39	125	210	265	303	47	1.6	1074	7.2
Moyenne	143	40	132	196	277	320	104	1.57	1131	7.2
Variance	1310	239	4569	10160	12004	5805	4674	0.28	226472	0.03
Écart-type	36.2	15.5	67.6	100.8	109.6	76.2	68.4	0.53	476	0.18
Coeff de variation	0.25	0.39	0.51	0.51	0.40	0.24	0.65	0.34	0.42	0.02

Tableaux 4.1 : Statistique descriptive des analyses de campagne 1985

Statistique	Ca ²⁺ (mg/l)	Mg ²⁺ (mg/l)	Na ⁺ (mg/l)	Cl ⁻ (mg/l)	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	HCO ₃ ⁻ (mg/l)	NO ₃ ⁻ (mg/l)	CE mhos/m	R.Sec (mg/l)	pH
Nb. d'observations	38	38	38	38	38	38	38	38	38	38
Minimum	60	14	23	25	50	194	5	1	372	6.8
Maximum	270	73	193	413	363	467	190	2.3	1768	7.8
Médiane	170	34	102	195	223	334	99	1.5	1005	7.4
Moyenne	167	37	101	200	174	336	53	74	1046	7.38
Variance	2856	140	2080	12910	4701	2675	699	7000	105600	0.04
Écart-type	53	12	46	114	69	52	26	84	325	0.21
Coeff de variation	0.32	0.32	0.45	0.57	0.39	0.15	0.50	1.13	0.31	0.03

Tableaux 4.2 : Statistique descriptive des analyses de campagne 2000

Statistique	Ca ²⁺ (mg/l)	Mg ²⁺ (mg/l)	Na ⁺ (mg/l)	Cl ⁻ (mg/l)	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	HCO ₃ ⁻ (mg/l)	NO ₃ ⁻ (mg/l)	CE mhos/m	R.Sec (mg/l)	pH
Nb. d'observations	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32
Minimum	28	6	13	31	31	198	13	1	574	6.9
Maximum	484	131	430	1475	380	534	291	7	4741	7.9
Médiane	169	36	100	159	204	387	53	4	1043	7.4
Moyenne	165	44	119	228	212	314	63	3.4	2156	7.5
Variance	7151	651	6443	61059	5331	8416	2571	2	161082	1.73
Écart-type	85	26	80	247	73	92	51	1.5	4013.5	0.31
Coeff de variation	0.55	0.57	0.67	1.09	0.34	0.29	0.81	0.77	1.86	0.19

Tableaux 4.3 : Statistique descriptive des analyses de campagne 2010

4.2.2- Classification hydro-chimique des eaux souterraines du réseau de contrôle de la baie d'Alger :

L'outil utilisé est le logiciel DIAGRAMMES (Fig4-11) crée par le Laboratoire d'Hydrogéologie d'Avignon.

Les fonctions sont variées et complètes, en voici quelques unes:

- Les diagrammes:
 - Piper -Stiff
 - Schoeller-Berkalov - Binaire
 - Korjinski - Rose des vents
- Les paramètres calculés:
 - balances ionique - teneurs en cations
 - dureté - teneurs en anions
 - indice de saturation (calcite, dolomite, aragonite, gypse)

On a utilisé ce logiciel pour traiter les données hydrochimiques relevé sur la baie d'Alger :

- Diagramme de piper
- Indice de saturation

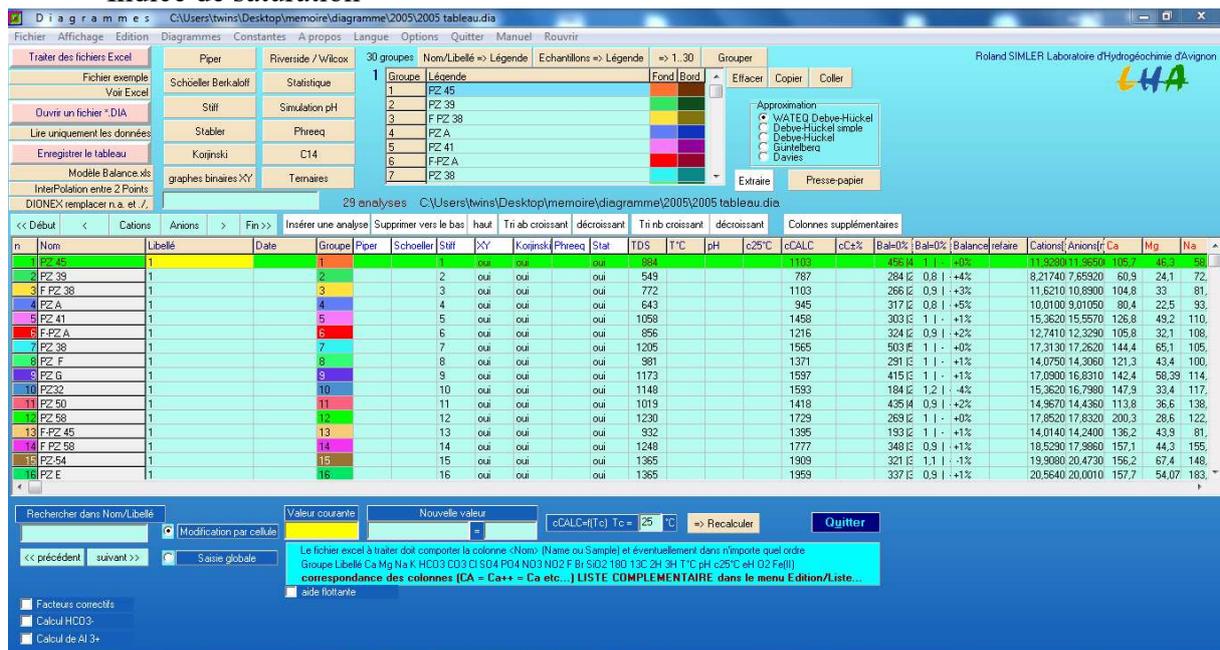


Fig 4.11 : Interface de commande du logiciel DIAGRAMME

a) Faciès chimiques :

◆ Faciès chimiques sur la baie d'Alger en mai 2005 :

Les résultats de la campagne de Mai 2005, montrent globalement que les points d'eau présentent un **faciès chloruré et sulfaté calcique et magnésienne** à l'exception de piézomètre PZ 58 qui présente un **faciès de type hyper chloruré sodique** et qui signale la contamination par les eaux de mer salées.

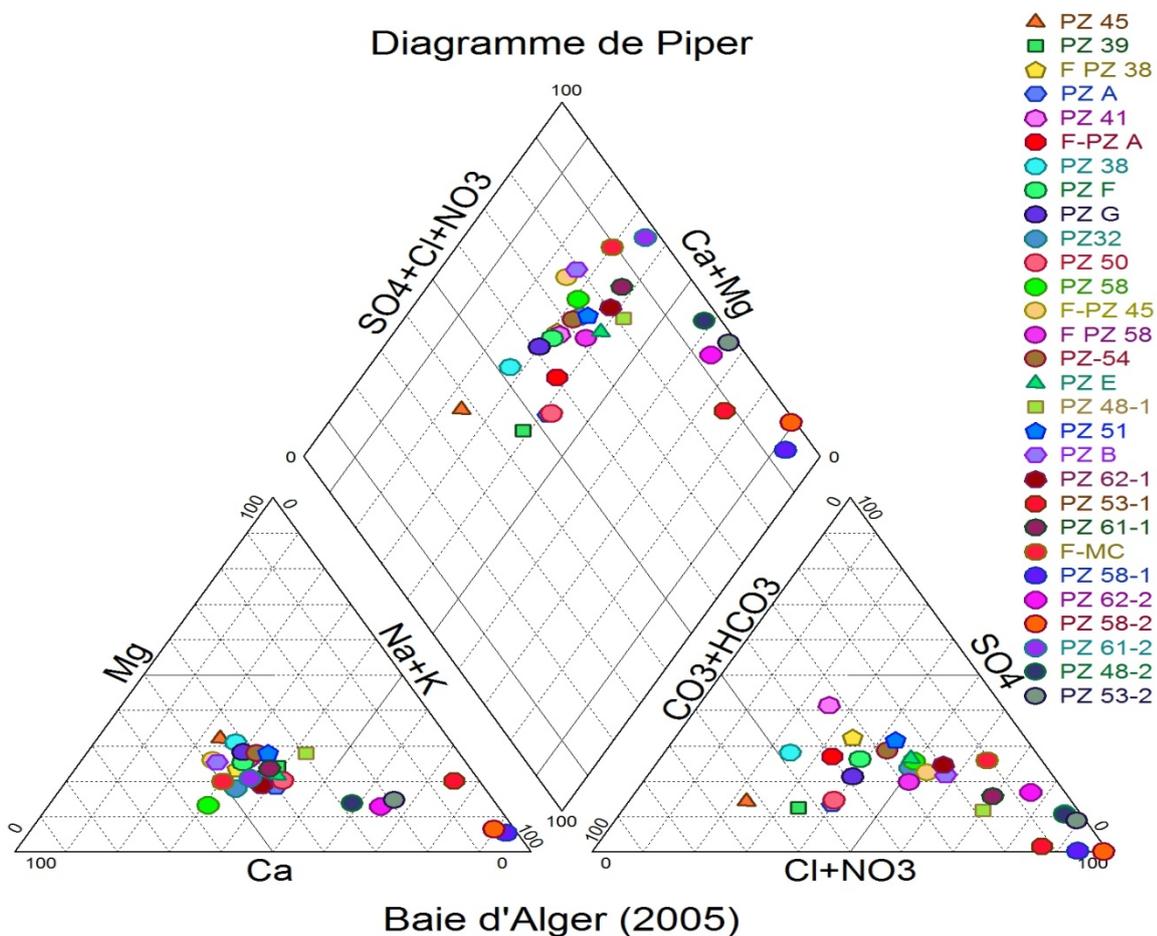


Fig 4.12 : Représentation des points d'eau de la campagne Mai 2005

◆ Faciès chimiques sur la baie d'Alger en 2007 :

Pour la campagne 2007(fig 4.13), nous constatons un glissement progressif des faciès vers **chlorurée sodique et potassique**.

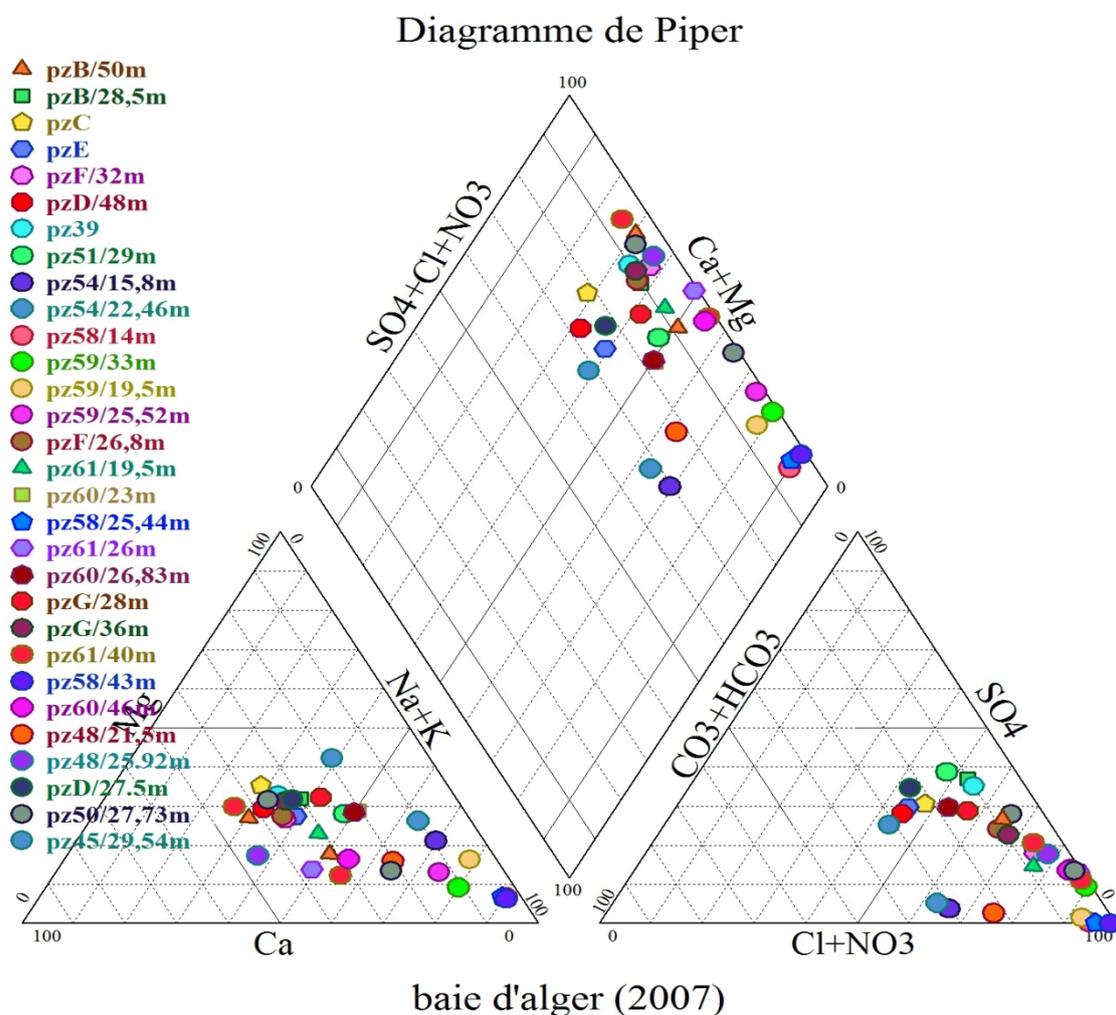


fig 4.13 : Représentation des points d'eau de la compagnie Mai 2007

◆ **Facies chimiques selon la verticale sur la baie d'Alger en 2010 :**

Des prélèvements ont été effectués selon la verticale (Hauteurs) sur un certain nombre de piézomètres (PZ 58, 38 et 54), il a été constaté que les ouvrages les plus contaminés définissent un faciès **hyper chloruré sodique**. C'est le cas du Pz 58. À des profondeurs différentes les piézomètres montrent une minéralisation distincte, on note entre 20 et 30m que le PZ 38 et le PZ 54 présentent un faciès chloruré sodique et potassique ou sulfaté sodique par contre à 50m ils évoluent vers le faciès chloruré et sulfaté calcique et Magnésien

Diagramme de Piper Baie d'Alger (prélèvement 20 à 30m)

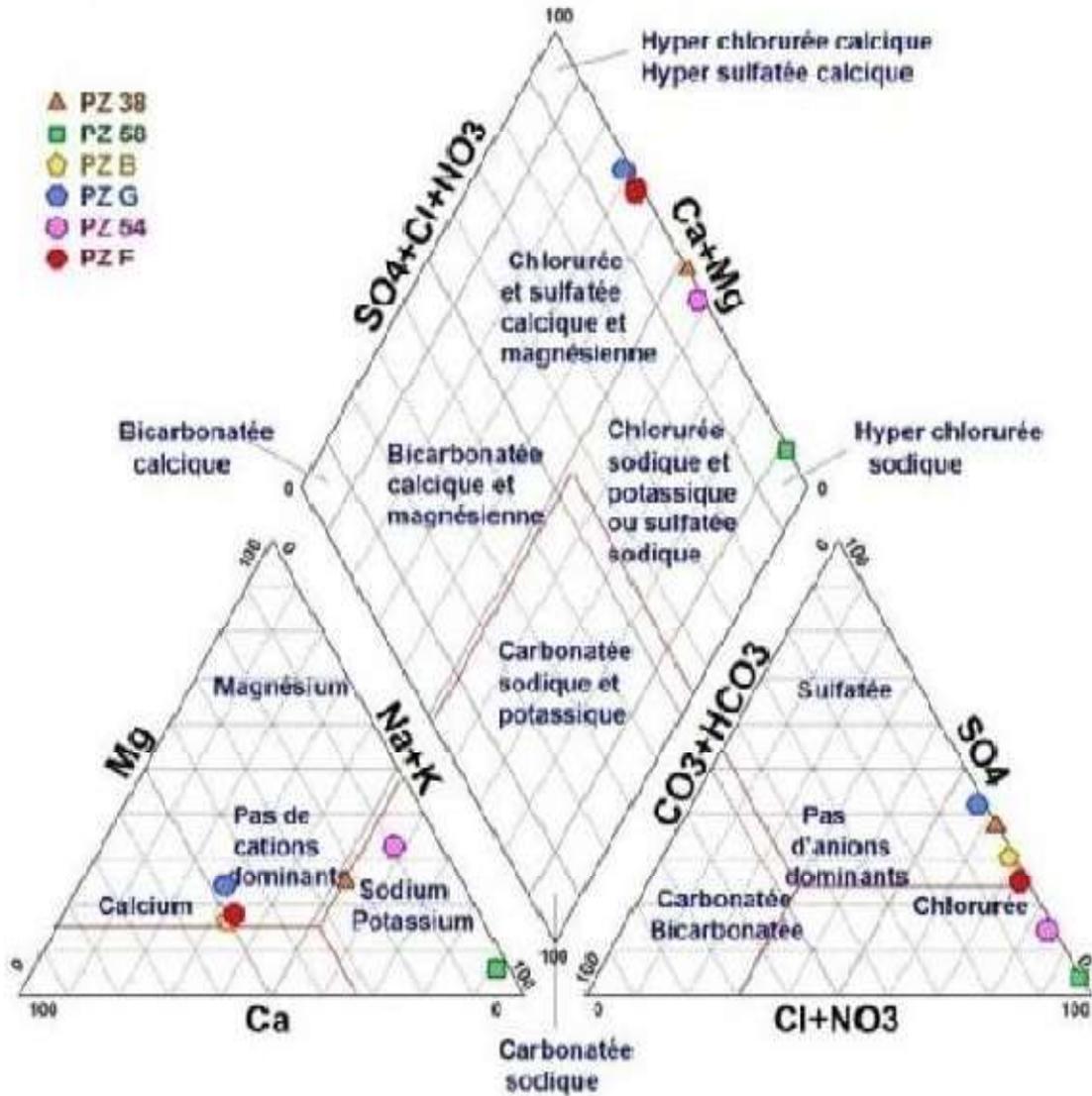


Fig 4.14 : Représentation des points d'eau de la campagne janvier 2010[25]

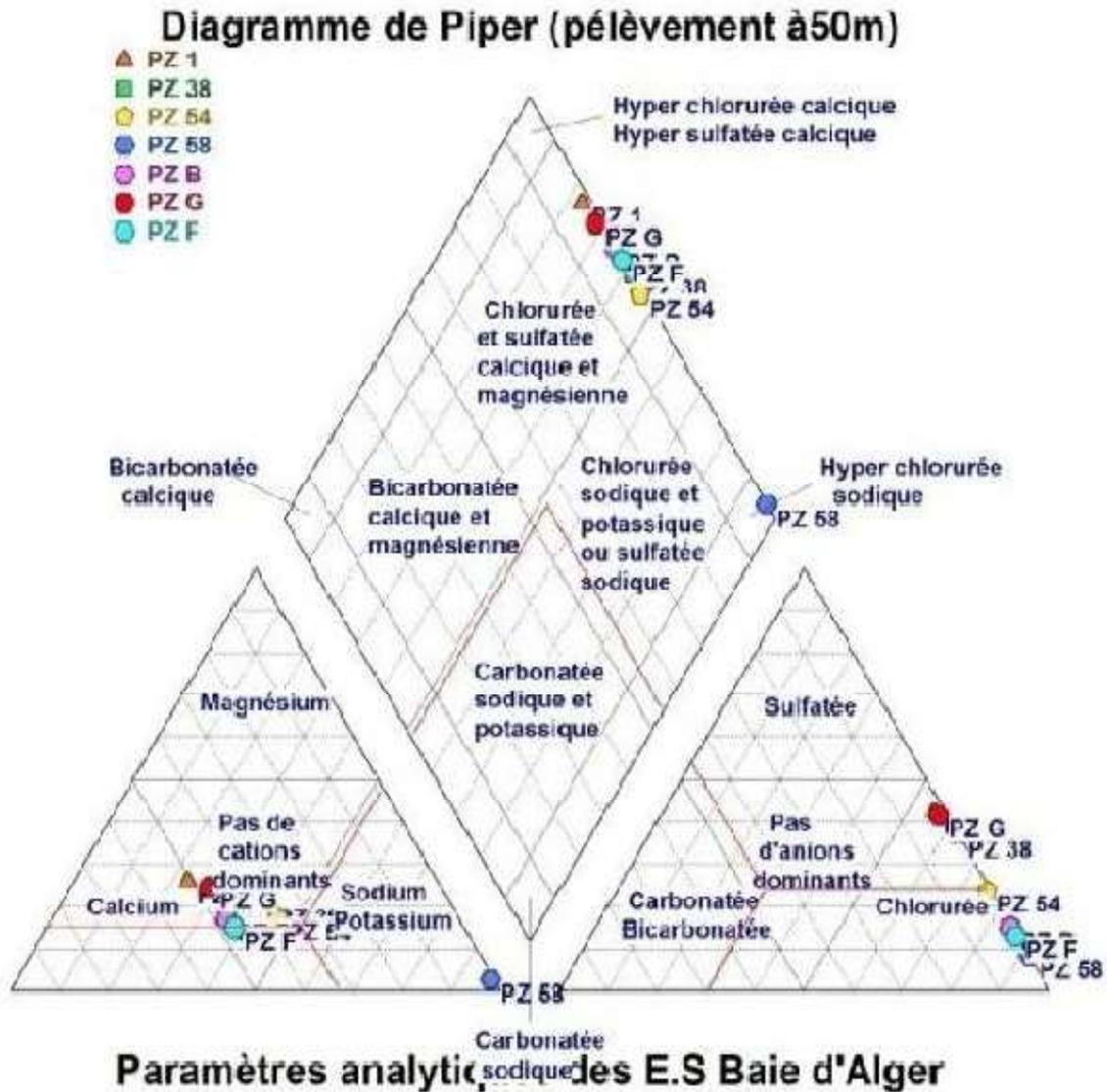


Fig 4.15 : Représentation des points d'eau de la campagne janvier 2010[25]

b) Etude de quelques couples chimiques :**◆ Le couple Na-Cl :**

Les points qui se répartissent sur la droite de dissolution de la halite (DDH) ont une origine commune dissolution des niveaux de sel présent dans l'aquifère (NaCl).

Les points qui se répartissent sur la droite de dilution de l'eau de mer constituent un mélange entre l'eau douce de l'aquifère et l'eau de mer.

Les fig.4.10, 4.11, et 4.12 montrent que les points représentatifs se localisent en dessous de la droite de dissolution de la halite et se répartissent le long de la droite de dilution de l'eau de mer qui constituent un mélange « eaux de pluies » ou de l'aquifère quaternaire avec l'eau de mer (mélange binaire).

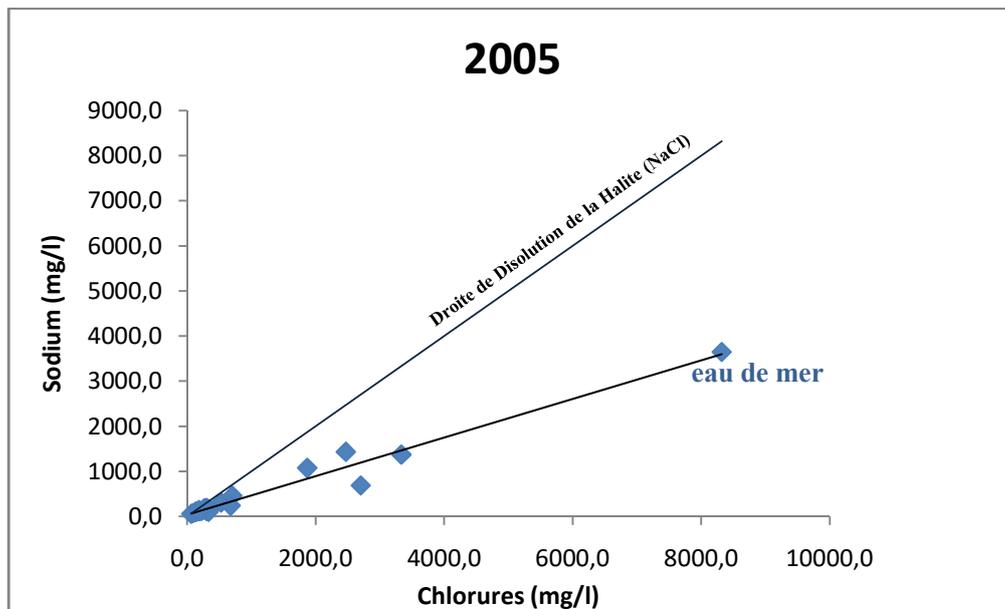


Fig 4.16 : variation de sodium en fonction de chlorures 2005

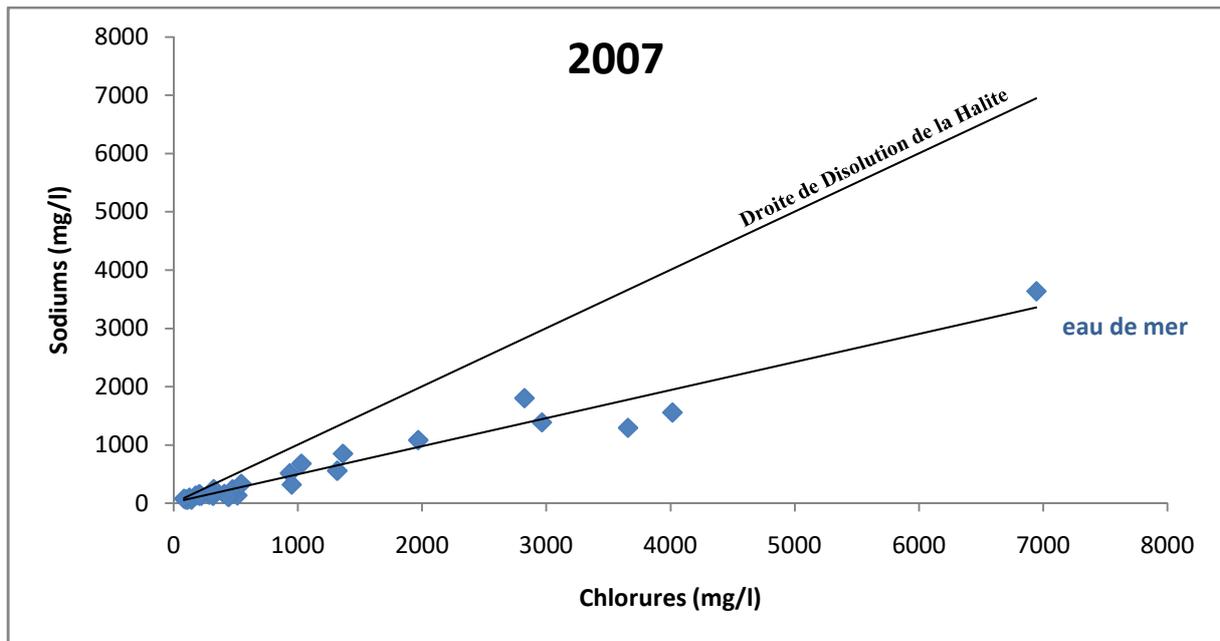


Fig 4.17: variation de sodium en fonction de chlorures 2007

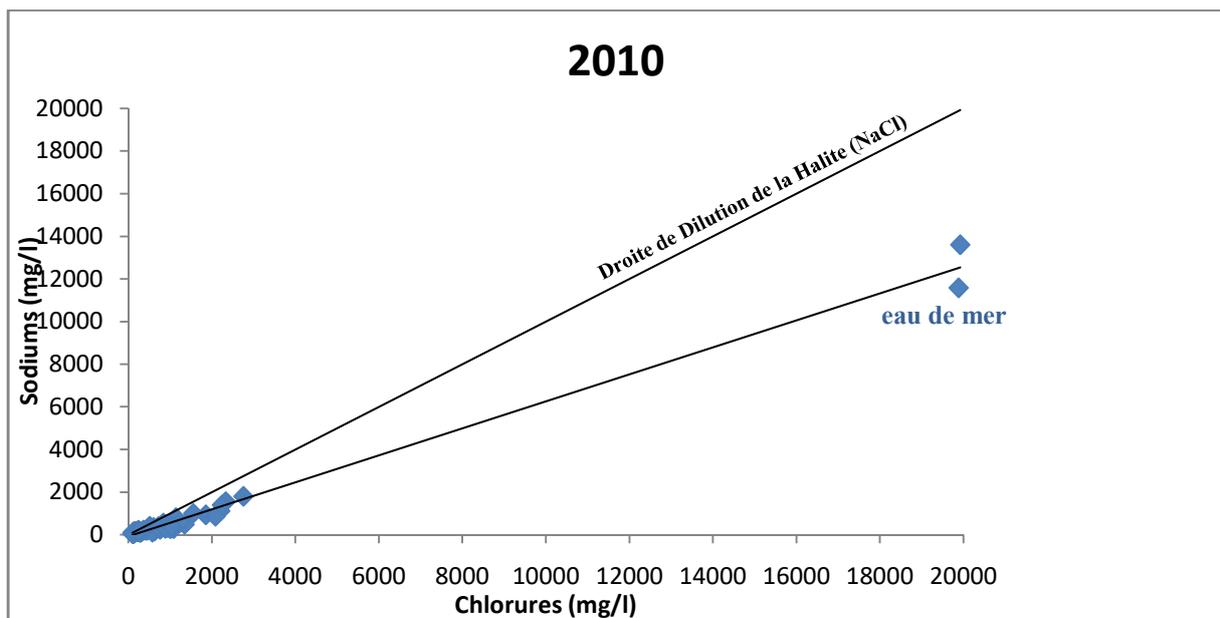


Fig 4.18: variation de sodium en fonction de chlorures 2010

◆ **Diagramme Br-Cl :**

Le rapport du Br/Cl de l'eau de mer est de l'ordre de $1.5 \cdot 10^{-3}$, donc il est utile d'utiliser ce rapport pour connaître l'origine de la salinité des eaux souterraines de la baie d'Alger.

Sur le diagramme Br vs Cl la majorité de points se répartissent sur la droite de dilution de l'eau de mer et confirment donc l'origine mixte des eaux.

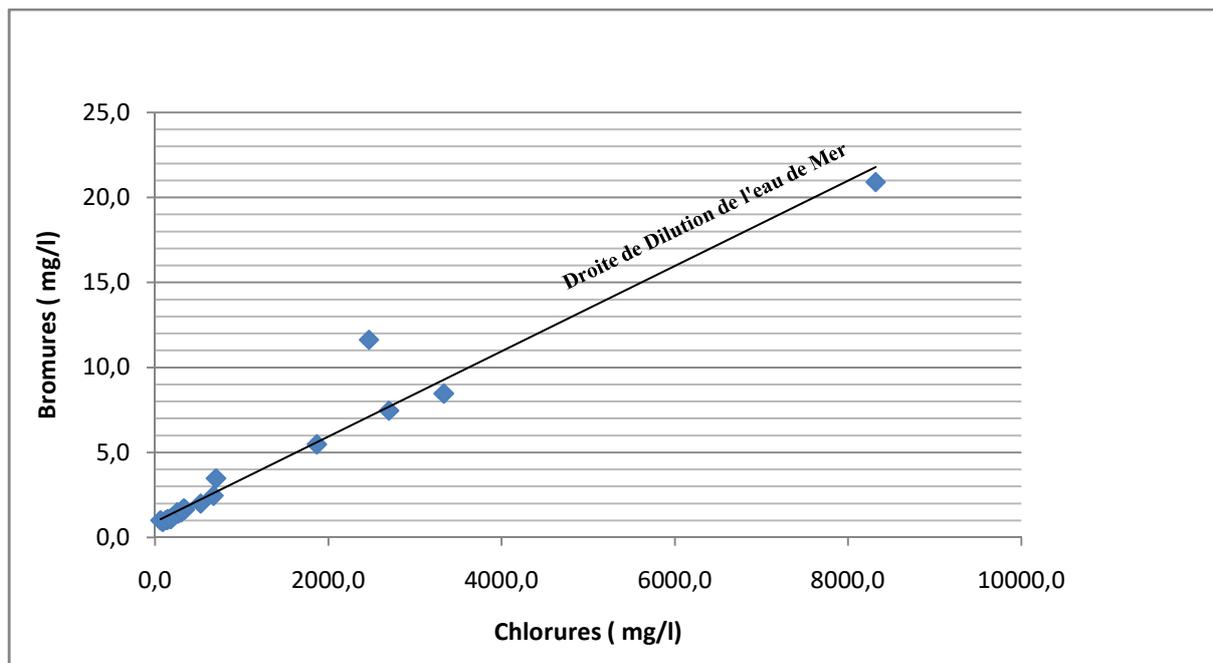


Fig 4.19: variation de bromures en fonction de chlorures 2005

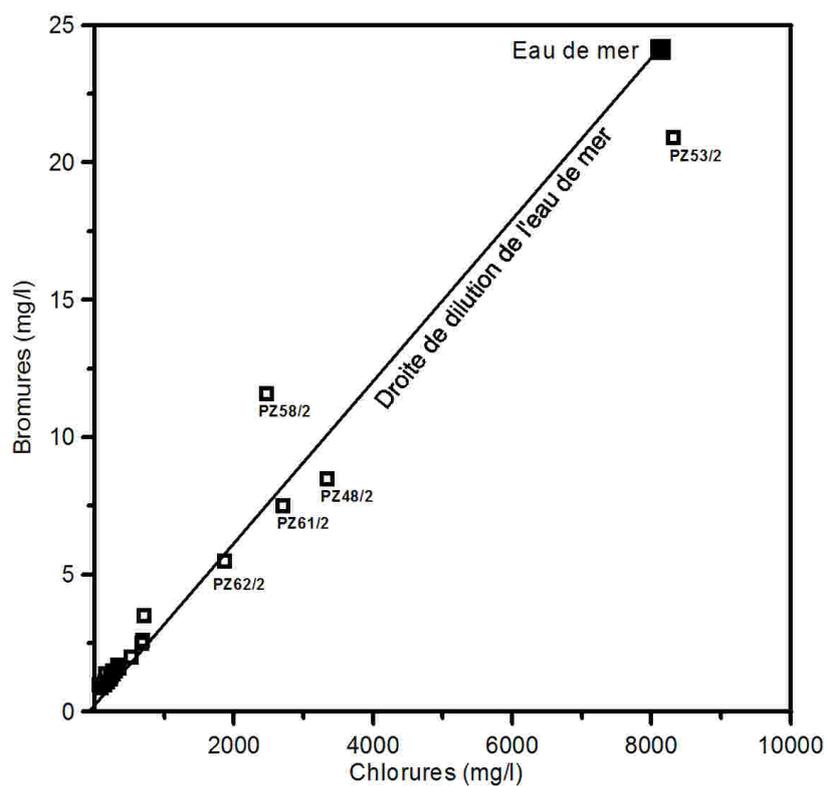


Fig 4.20: variation de bromures en fonction de chlorures 2007

c) Indice de saturation :

L'indice de saturation de Langelier est un nombre sans dimension permettant de déterminer la stabilité du carbonate de calcium dans l'eau. Il indique si l'eau va précipiter, dissoudre ou être en équilibre avec le carbonate de calcium. En 1936, Wilfred F. Langelier a développé une méthode pour prédire le pH auquel l'eau est saturée en carbonate de calcium (pH_s). Il. Le LSI est exprimé par la différence entre le pH actuel de l'eau et le pH de saturation :

$$LSI = pH_{\text{mesuré}} - pH_s$$

- Lorsque le $LSI > 0$, l'eau est super saturée et tend à précipiter et former des dépôts de $CaCO_3$.
- Lorsque le $LSI = 0$, l'eau est saturée (en équilibre) en $CaCO_3$. Des dépôts de $CaCO_3$ ne sont ni déposés ni dissous.
- Lorsque le $LSI < 0$, l'eau est sous saturée et tend à dissoudre le $CaCO_3$ solide.

◆ Indice de saturation de l'eau dans la baie d'Alger pour les années 2005, 2007, 2010 :

L'évolution spatiale et temporelle de l'indice de saturation (IS) de 2005 à 2010 montre que les eaux sont en équilibre par rapport à la calcite, Aragonite et la Dolomite, ceci est lié à la solubilité des eaux minérales. Par contre elles sont sous saturées par rapport au gypse et l'Anhydrite, car le gypse est très soluble.

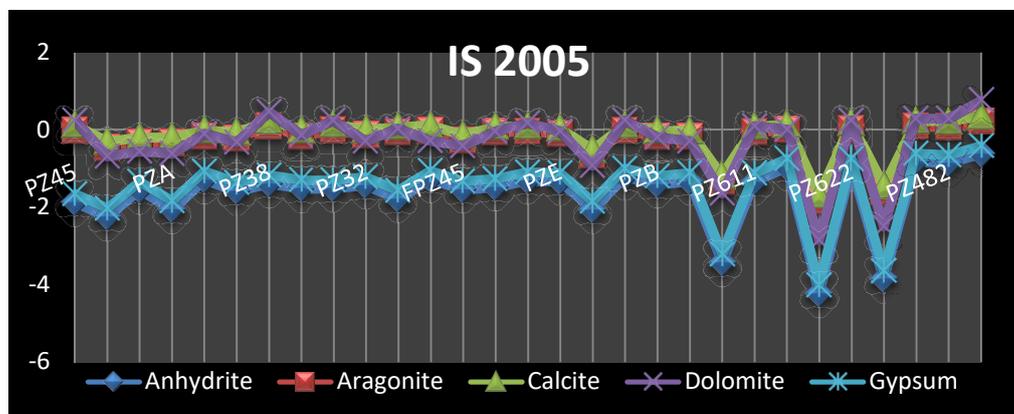


Fig 4.21 : Variation de l'indice de saturation des minéraux des eaux de la nappe de la Mitidja est 2005

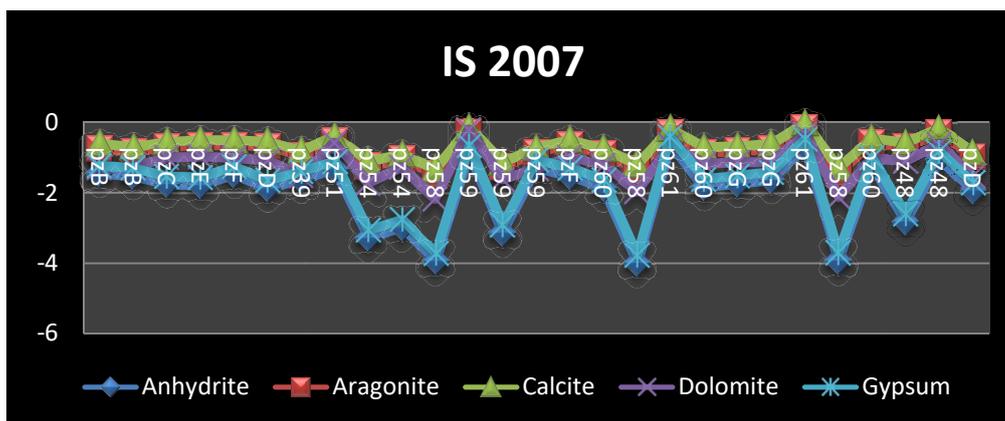


Fig 4.22 : Variation de l'indice de saturation des minéraux des eaux de la nappe de la Mitidja est 2007

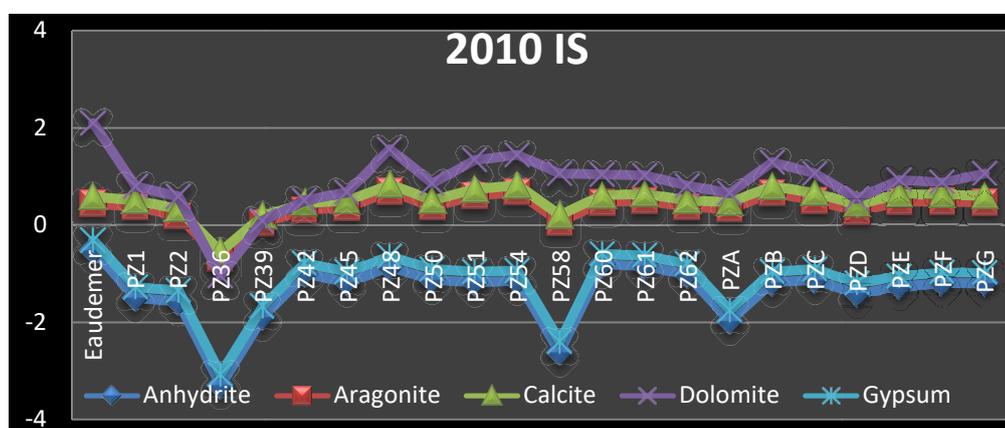


Fig 4.23 : Variation de l'indice de saturation des minéraux des eaux de la nappe de la Mitidja est 2010

4.3. Etat actuel : mesure de la conductivité de surface (Mai 2016)

- ✓ Mesure de la conductivité sur une eau d'un forage à 100 mètre de PZ B :
Le profil de conductivité de PZ B en 2009 montre une valeur maximale de 3500 $\mu\text{s}/\text{cm}$ dans la campagne qu'on a réalisé avec l'équipe de l'ANRH nous avons trouvé une conductivité de 5000 $\mu\text{s}/\text{cm}$.



Fig 4.24 : mesure de la conductivité sur un forage à 100m de PZ B

- ✓ Mesure de la conductivité sur une eau d'un forage à 100 mètre de PZ G :
La conductivité électrique sur le piézomètre PZ G en 2007 et en 2009 se coïncident sur une valeur de 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Actuellement ce piézomètre a une valeur de conductivité 4500 $\mu\text{S}/\text{cm}$. En peut dire qu'elle est doublée.



Fig 4.25: mesure de la conductivité sur un forage à 100m de PZ G

- ✓ Mesure de la conductivité sur une eau d'un forage à 400 mètre de PZ E :
Au niveau de piézomètre PZ E la conductivité actuelle est presque comme l'ancienne



Fig 4.26 : mesure de la conductivité sur un forage à 400m de PZ E

- ✓ Mesure de la conductivité sur une eau d'un forage à 500 mètre de PZ 41 :
Ce piézomètre a une conductivité stable de 2007 jusqu'à maintenant elle varie entre 1500 à 1594 $\mu\text{S}/\text{cm}$.



Fig 4.27 : mesure de la conductivité sur un forage à 500m de PZ 41

- ✓ Mesure de la conductivité sur une eau d'un forage à 500 mètre de PZ 45 :
Dans ce piézomètre les deux profils enregistrés en 2007 et en 2009 se ressemblent avec une valeur qui se rapproche de 3000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Actuellement, cette valeur est augmentée jusqu'à 6500 $\mu\text{S}/\text{cm}$. On peut dire que la conductivité est doublée durant cette période de 2009 à 2016.



Fig 4.28 : mesure de la conductivité sur un forage à 500m de PZ 45

- ✓ Mesure de la conductivité sur une eau d'un forage à 100 mètre de PZ 50 :

Dans ce piézomètre les profils effectués en 2007 et en 2009 ont enregistré une même valeur de conductivité de 2100 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Dans la campagne de Mai 2016 nous avons fait deux mesures au niveau d'un forage en exploitation, la première mesure est au début du pompage, la valeur enregistrée est de 2500 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Après un certain temps du pompage environ 4 heures nous avons enregistré une autre valeur de conductivité est de 6800 $\mu\text{S}/\text{cm}$.



Fig 4.29 : mesure de la conductivité sur un forage à 100m de PZ 50

Le tableau suivant résume la variation de la conductivité dans quelque point d'eau :

N°	Nom du piézomètre	Conductivité en $\mu\text{S}/\text{cm}$		
		2007	2009	2016
1	PZ B	2270	3227	5000
2	PZ G	2110	1910	4500
3	PZ 50	2240	2214	6800
4	PZ 45	2110	2644	6500
5	PZ 41	1564	1560	1594
6	PZ E	2040	1880	1549
7	PZ 2H	1006	1142	1000
8	PZ 36		419	<1000

Tableau 4.4 : les valeurs de la conductivité des compagnes (2007, 2009, et 2016)

4.4. Profils des conductivités :

Un certain nombre de piézomètre ont été retenues afin de mesurer la variation verticale de la conductivité, ce qui permettra de localiser avec précision l'interface « Eau douce-Eau salée »

4.4.1- Profil de conductivité vertical du piézomètre pz 58 :

Le profil de conductivité vertical réalisé dans le Pz 58 (Figure 2-15) montre une augmentation significative de la conductivité passant de 3 mS/cm (à 5 m sous le niveau 0) à 15 mS/cm en fond d'ouvrage (30 m sous le niveau de la mer) pour la période de fin 2009. La température est relativement stable et augmente peu avec la profondeur, de l'ordre de 1°C.

L'effet densitaire semble bien marqué dans cet ouvrage et est caractéristique du phénomène d'intrusion marine, toute chose étant égale par ailleurs.

Nous constatons que l'augmentation de la conductivité et de la température se fait par palier et correspond à la position des crépines dans l'ouvrage.

Il y aurait donc des flux d'eau importants transitant au niveau de cet ouvrage provenant des formations perméables du Quaternaire (Sables et graviers).

Ce piézomètre Pz 58 se trouve en zone fortement contaminée par l'intrusion marine.

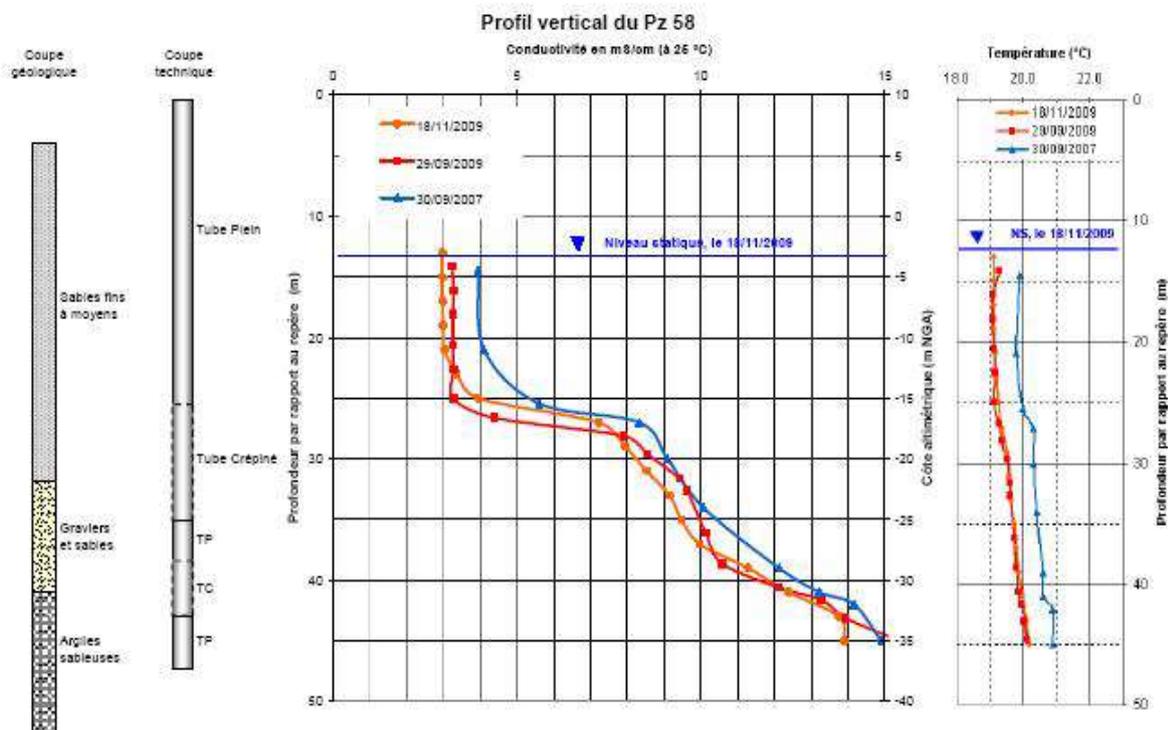


Fig 4.30 : Profil de conductivité sur le piézomètre PZ 58[16]

4.4.2- Profil de conductivité vertical du piézomètre PZ B :

Sur ce piézomètre quatre profils ont été établis : un profil en 2007 et en 2008 et deux profils en 2009. Cette surveillance a été nécessaire car ce piézomètre est situé à environ 1Km du champ de captage du Hamiz.

Les quatre profils présentent une conductivité de 1900 $\mu\text{S}/\text{Cm}$ à partir du niveau statique situé à la côte 29m et soulignent une augmentation à partir des parcelles de captage des eaux souterraines spécifiées par des crépines, pour donner par la suite une valeur constante de 2200 $\mu\text{S}/\text{Cm}$ en 2007 jusqu'au top du profil, 3500 $\mu\text{S}/\text{Cm}$ en 2009 et une valeur intermédiaire de 2900 $\mu\text{S}/\text{Cm}$ en 2008 marquée par un seul point d'enregistrement. On voit très bien que par rapport aux profils précédents que les valeurs de conductivité n'ont pas diminuées en 2009 malgré les précipitations importantes de cette année. Cela pourra s'expliquer par la formation géologique dans laquelle le piézomètre a été implante, il s'agit d'une formation argileuse semi-perméable (de 00 à 7m), une faible proportion de graviers et sables (de 7m à 15m) et une grande proportion d'argiles graveleuse semi-perméable de 15m à 70m (fond du piézomètre). Les températures sont de 19°C en 2009 et de 19.5°C en 2007. Ce piézomètre est proche du champ de captage du Hamiz. Dans le cas où les pompages dans ce champ restent tels qu'ils sont exercés, ce piézomètre enregistrera des conductivités supérieures. Dans l'ensemble ce piézomètre est contaminé par le biseau salé.

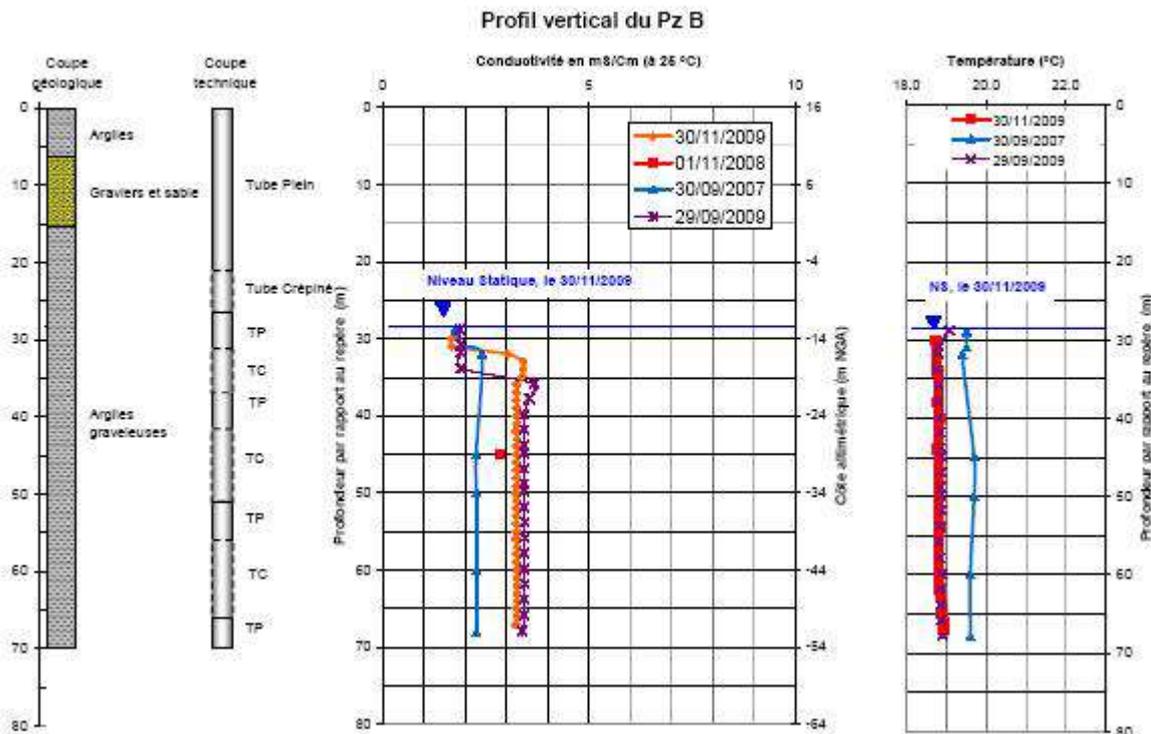


Fig 4.31 : profil de la conductivité sur le piézomètre PZ B [16]

4.4.3- Profil de conductivité vertical du piézomètre PZ E et PZ G :

Pour les deux piézomètres, les deux profils établis en 2009 et en 2007 se coïncident de 30m à 60m sur une valeur de 2000 $\mu\text{S}/\text{Cm}$. Pour les températures on note une différence d'un degré entre les deux années (en 2007 nous avons 20°C et en 2009 on note 19°C). Ces deux piézomètres sont en voie de contamination.

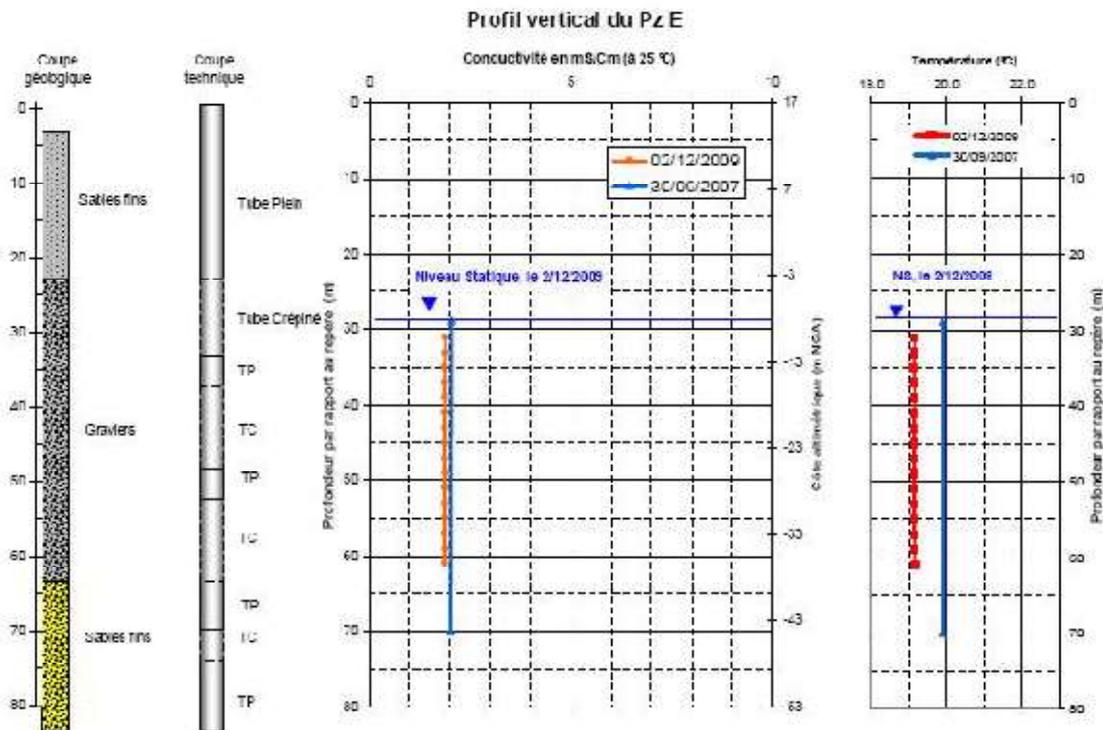
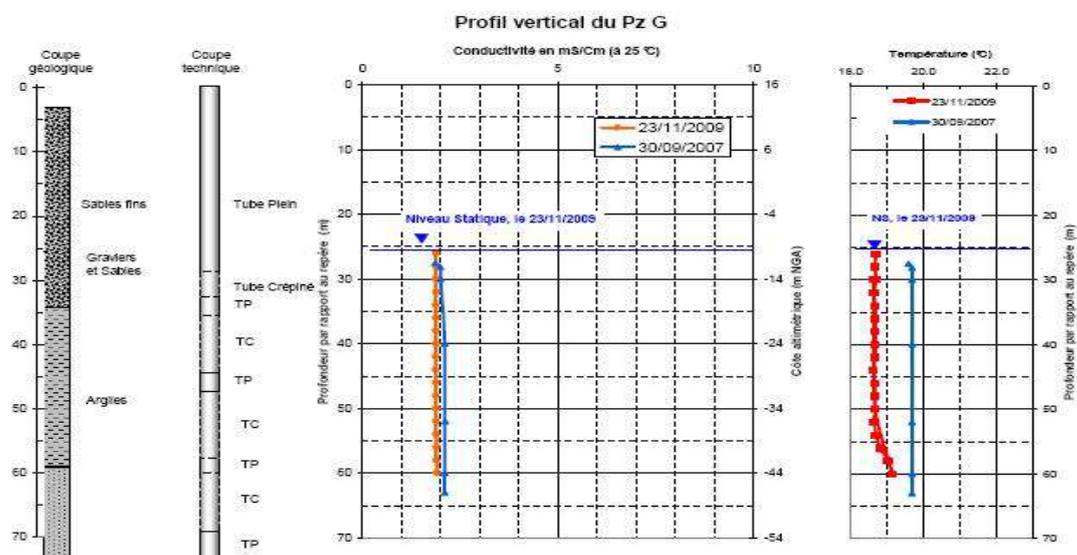


Fig 4.32: profil de la conductivité sur le piézomètre PZ E et PZ G[16]



4.4.4- Profil de conductivité vertical du piézomètre PZ2 H :

Un seul profil a été enregistré en 2009 pour le piézomètre **PZ2 Hamiz**.

On remarque un tracé constant de profil de conductivité au tour de 1000 μ S/Cm de 40m à 90m avec une température autour de 19°C. Ce piézomètre capte des formations à grande perméabilité formée de grès pour le PZ2.

Ce piézomètre n'est pas contaminé par les eaux salées de la mer.

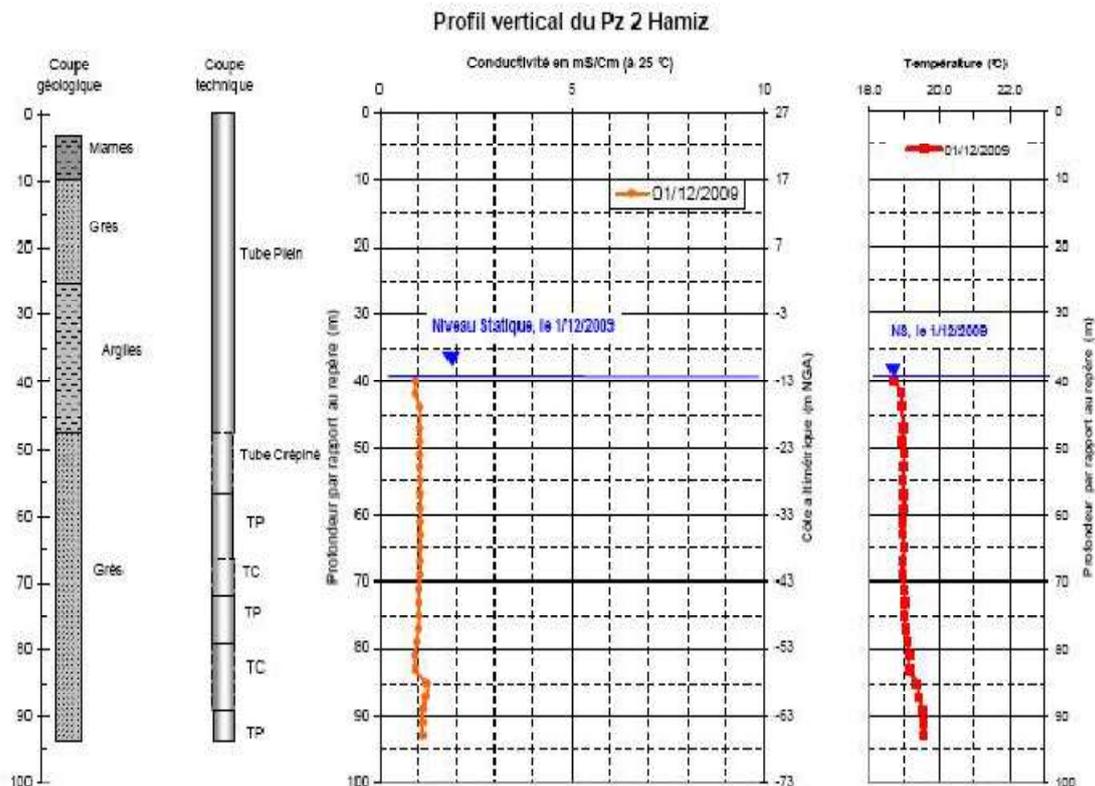


Fig 4.33 : profil de la conductivité sur le piézomètre PZ2 H[16]

4.4.5- Profil de conductivité vertical du piézomètre PZ 41 :

Ce profil enregistre une valeur de conductivité de 1500 $\mu\text{S}/\text{Cm}$ de 25m à environ 45m pour les deux années 2007 et 2009 dans des formations captives composées de gravier et de sables fins avec des températures proches de 22°C en 2007 et stables de 21°C en 2009.

Ce piézomètre marque une valeur limite de conductivité qui pourra être constante avec le temps si les pompages des eaux souterraines diminues ou bien supérieure à 1500 $\mu\text{S}/\text{Cm}$ dans le cas contraire en faisant appel aux eaux salées de la mer

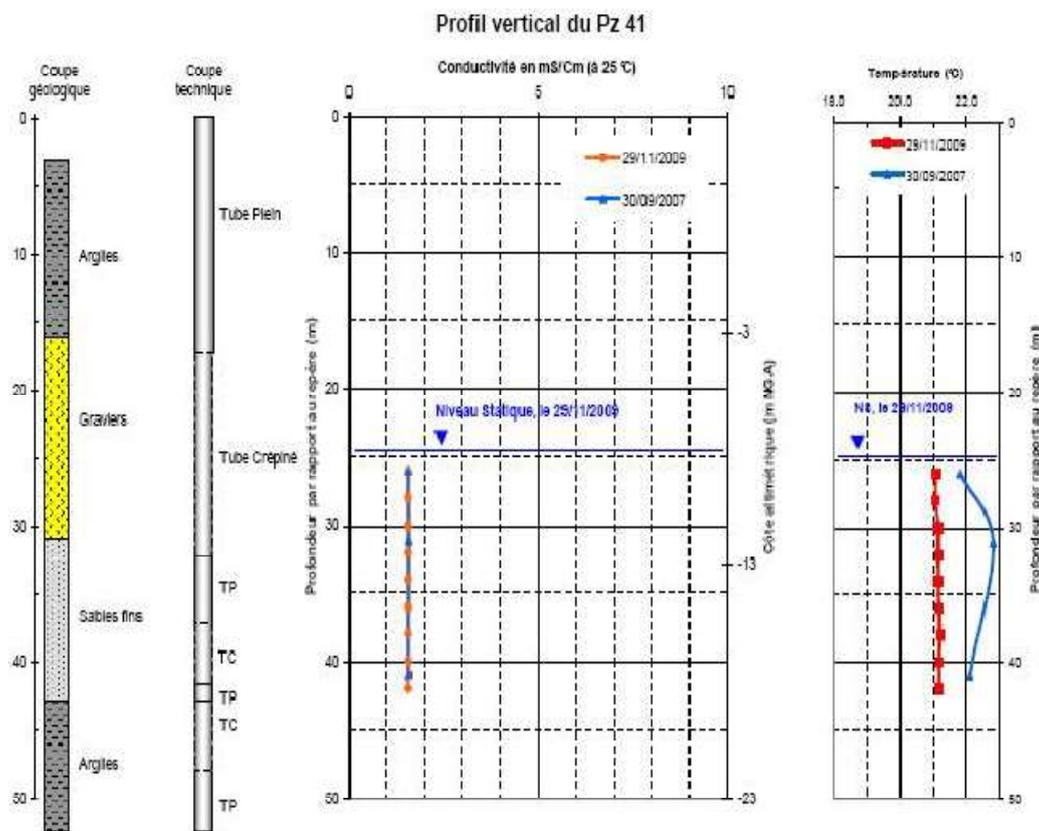


Fig 4.34 : profil de la conductivité sur le piézomètre PZ 41[16]

4.4.6- Profil de conductivité vertical du piézomètre PZ 45 :

Dans ce piézomètre les deux profils enregistrés en 2007 et en 2009 se ressemblent avec des valeurs différentes mais qui se rapprochent de $3000 \mu\text{S}/\text{Cm}$ pour les deux années à partir de 28m.

En 2008 un seul point a pu être enregistré ayant une valeur de $2300 \mu\text{S}/\text{Cm}$ marquant la transition ou l'évolution des conductivités de 2007 à 2009

Les températures sont de 20°C et 21°C respectivement pour les années 2009 et 2007. Ce piézomètre est contaminé par le biseau salé.

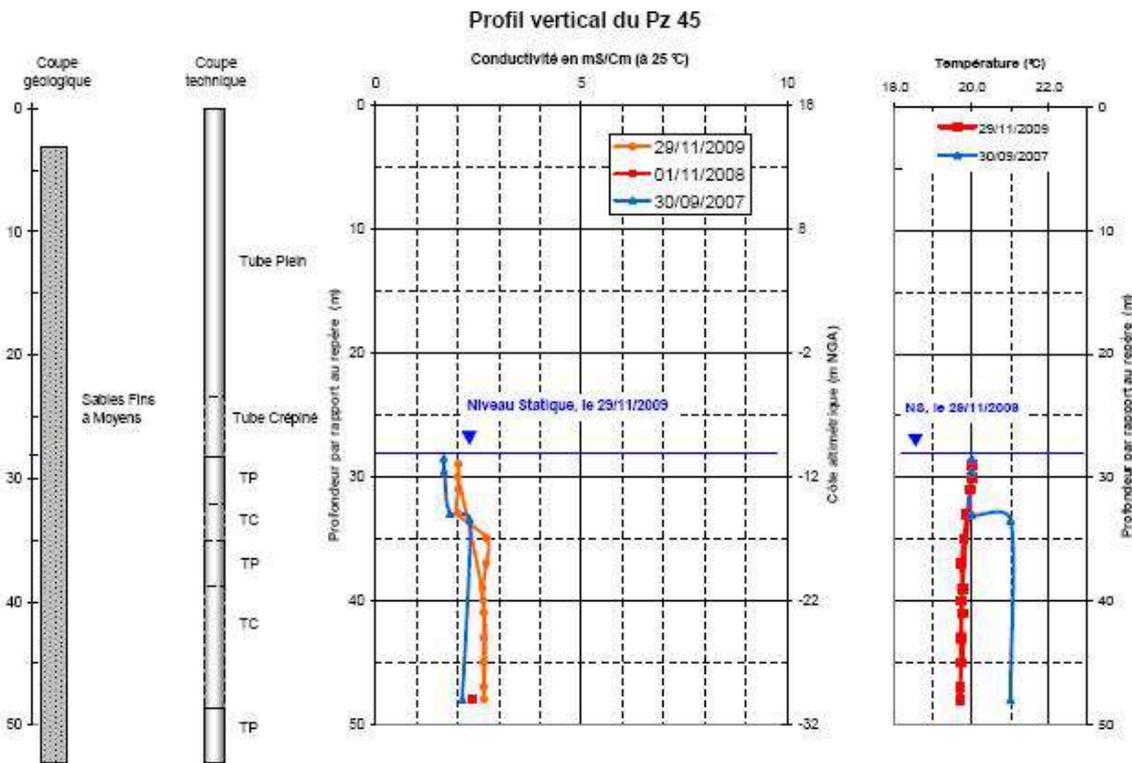


Fig 4.35 : profil de la conductivité sur le piézomètre PZ 45[16]

4.4.7- Profil de conductivité vertical du piézomètre PZ 50 :

Dans ce piézomètre situé dans des formations perméables de gravier argileux, gravier et argiles graveleuses, deux profils ont été effectués en 2007 et en 2009 qui ont enregistré une même valeur de conductivité de 2100 $\mu\text{S}/\text{Cm}$ de 25m jusqu'à 45m avec des températures d'environ 19°C.

On pourra constater que ce piézomètre est contaminé par les eaux de la mer

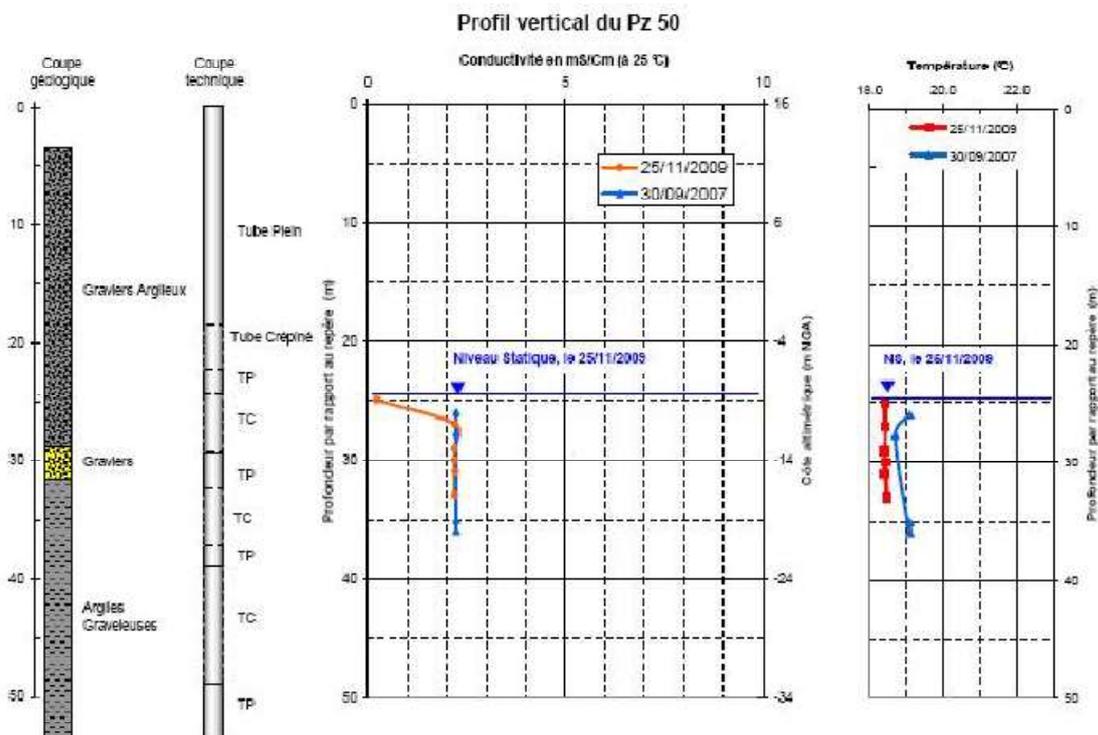


Fig 4.36 : profil de la conductivité sur le piézomètre PZ 50[16]

4.5- Evolution de la position du biseau sale en fonction de la conductivité :

Les cartes d'iso valeurs de conductivité suivantes ont pu être tracées à partir des données issues des différentes campagnes.[16]

Ces iso valeurs de conductivités correspondent à la conductivité en fond d'ouvrages à une profondeur moyenne de 60 m sous environ 30 m d'eau en moyenne.

4.5.1- La position du biseau salé en 1982 :

La carte d'iso valeurs de conductivité de 1982 (Fig 4.31) a été tracée selon les observations de J. Mania et montre la situation « normale » avant la mise en exploitation du champ captant du Hamiz. Les courbes présentent un front de salinité faible, globalement parallèle à la côte.

Les valeurs de conductivité sont cohérentes avec les eaux de la nappe. La zone envahie (limitée par la courbe d'iso valeurs 4000 $\mu\text{S}/\text{cm}$) est extrêmement limitée et située au nord de Bateau Cassé. Elle constitue un signe avant coureur de l'évolution future du phénomène d'intrusion marine.

On a vu précédemment que la piézométrie présentait un sens des écoulements de la nappe vers la mer ne favorisant pas le phénomène d'intrusion marine.

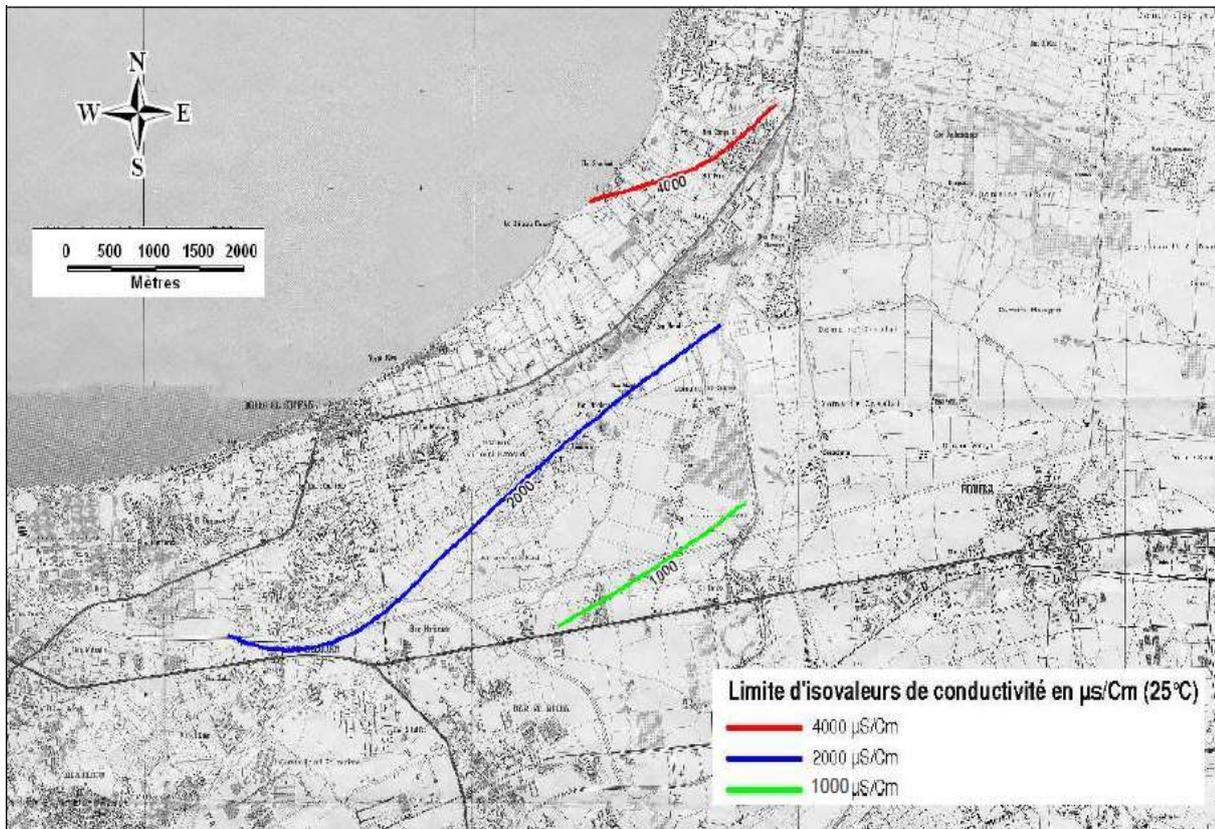


Fig4.37 : Carte d'iso valeurs conductivité des eaux souterraines de 1982 [16]

4.5.2- La position du biseau salé en 2005 :

La carte d'iso valeurs de conductivité de octobre 2005 (Fig 4.32) montre une avancée du front salé depuis la côte à partir de Bateau Cassé (lieux dit Les Dunes).

Les valeurs sont élevées et on constate que toute la bordure côtière est envahie. Le biseau salé se limite à plus de 2 km de la côte et l'iso-conductivité 1200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ s'arrête à la limite du champ captant du Hamiz.

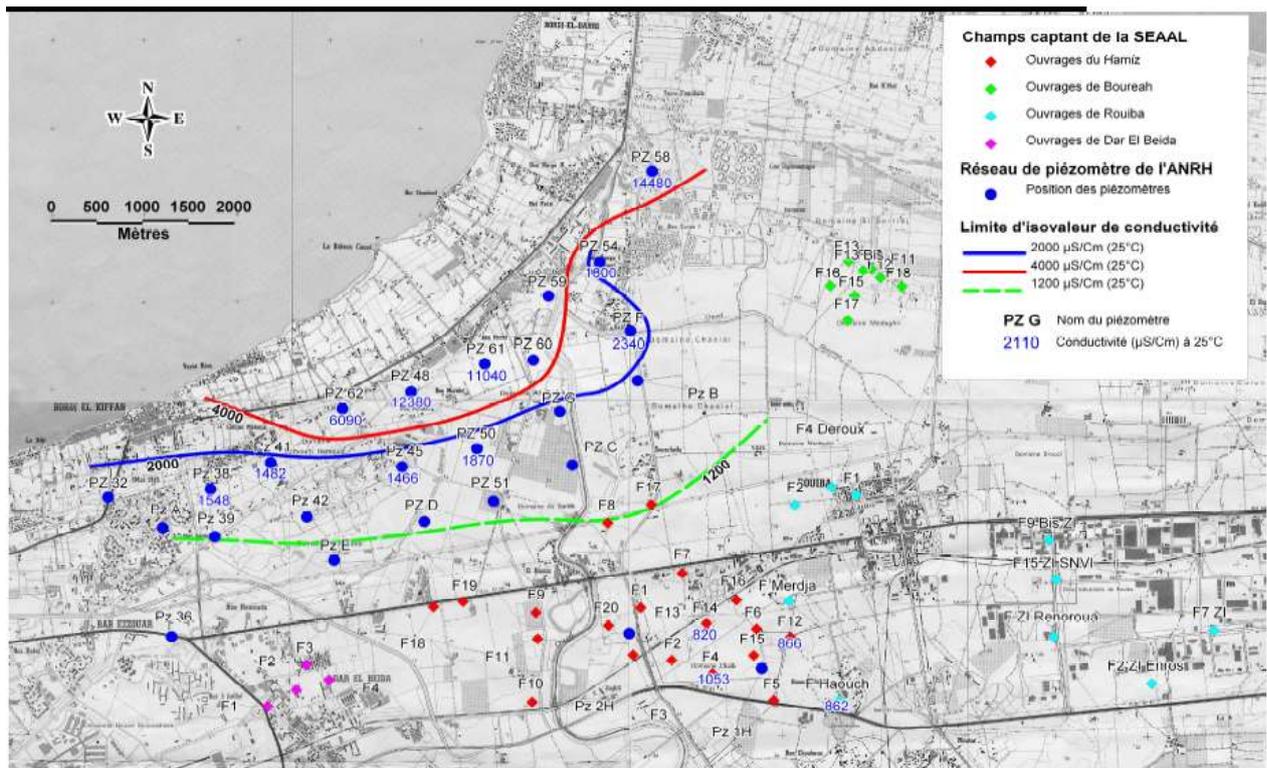


Fig 4.38 : Carte d'iso valeurs de conductivité des eaux souterraines en octobre 2005[16]

4.45.3- La position du biseau salé en 2007 :

En 2007 (carte Fig 4.33), le front salé provient globalement du secteur de Bateau Cassé et semble avoir avancé.

En effet, la limite de 2000 $\mu\text{S}/\text{Cm}$ se trouve désormais au-delà des piézomètres Pz C et Pz 51, ce qui n'était pas le cas en 2005.

De plus, on constate que la limite des 1200 $\mu\text{S}/\text{Cm}$ atteint désormais le champ captant du Hamiz au niveau du forage F17.

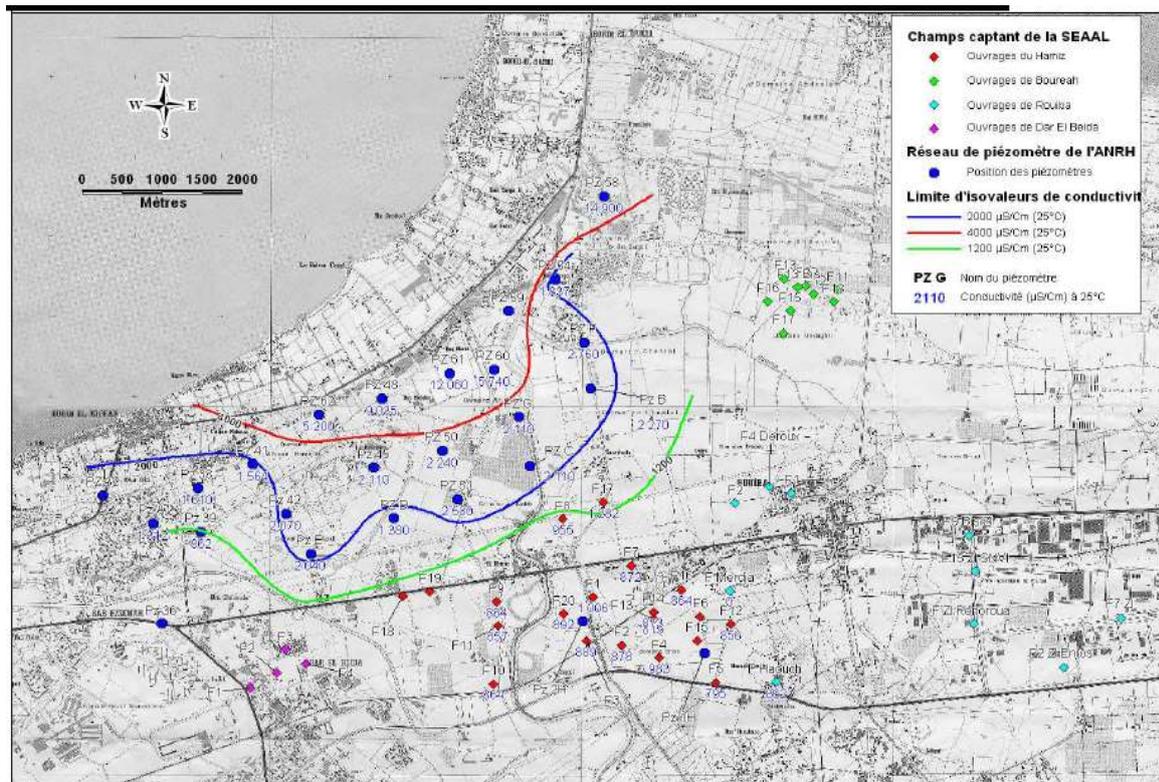


Fig 4.39: Carte d'iso valeurs de conductivité des eaux souterraines en septembre 2007[16]

4.5.4- La position du biseau salé en 2009 :

La carte des conductivités de 2009 (Fig 4.34) 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 déjà atteints par l'intrusion marine.

Il est à noter que la limite de conductivité $< 1200 \mu\text{S}/\text{cm}$ se trouve au niveau du champ captant du Hamiz. Cette zone correspond à l'extension maximale de l'intrusion marine.

Il semble qu'il existe un axe préférentiel d'écoulement et donc d'évolution de l'intrusion marine depuis Bateau cassé jusqu'au champ captant du Hamiz.

Les autres champs captant de la SEAAL ne semblent pas contaminés par l'intrusion marine. Cependant, on constate des conductivités supérieures à $1200 \mu\text{S}/\text{cm}$ sur un grand nombre d'ouvrage, valeurs liées au fond géochimique du terrain naturel.

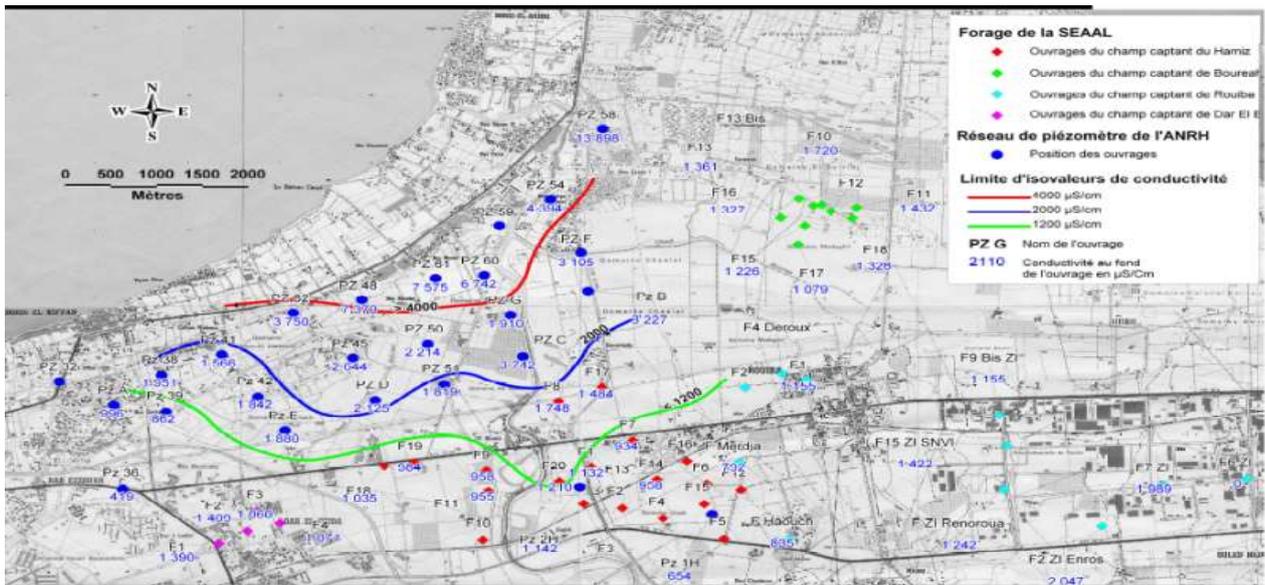


Fig 4.40 : Carte d'iso valeurs de conductivité des eaux souterraines en novembre et décembre 2009 [16]

4.5.5- La position du biseau salé en 2016 :

La carte des conductivités actuelle (2016) montre que le front salé provient du secteur de Bateau cassé et semble avoir avancé.

La limite de 4000 µs/cm se trouve désormais au-delà des piézomètres PZ B, PZ G, PZ 50, PZ 45. Se qui n'était pas en 2009.

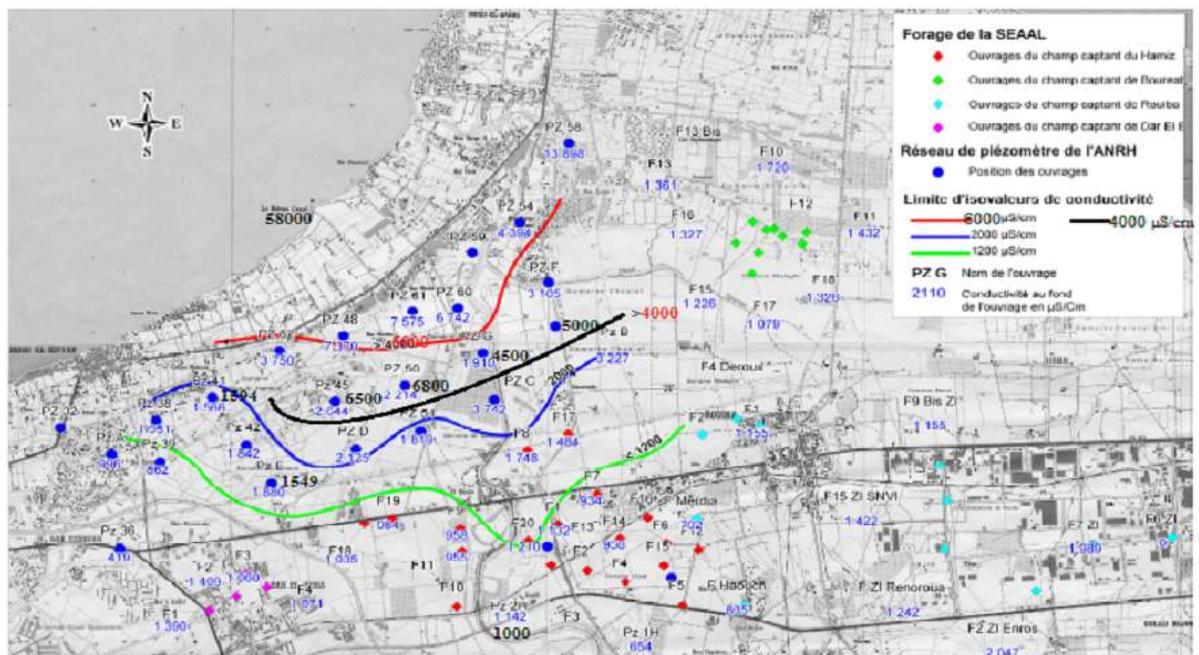


Fig 4.41 : Carte d'iso valeurs de conductivité des eaux souterraines en Mai 2016

4.6. Approche isotopique :

4.6.1. Rappels d'hydrologie isotopique :

Les isotopes les plus communément utilisés en hydrologie isotopique sont logiquement ceux qui font partie intégrante de la molécule d'eau à savoir : l'oxygène-18 (^{18}O), le Deutérium ou Hydrogène lourd (^2H ou D) et le Tritium ou Hydrogène radioactif (^3H ou T) qui sont dits traceurs intrinsèques. Les autres isotopes sont ceux de la forme dissoute : le Carbone-13 qui est stable (^{13}C) et le radiocarbone (^{14}C).

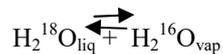
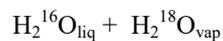
Considérant seulement les isotopes stables d'intérêt, les espèces isotopiques possibles qui peuvent être rencontrées pour l'eau sont : H_2^{16}O , HD^{16}O , D_2^{16}O , H_2^{18}O , HD^{18}O , D_2^{18}O .

4.6.2. Notion de Géochimie Isotopique :

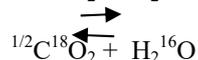
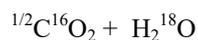
Dans la nature, deux mécanismes peuvent modifier la composition isotopique d'une eau naturelle. Ce sont :

- Le changement de phase (condensation, évaporation) ;
- Les réactions d'échange.

Qui peuvent être illustrées pour O-18 respectivement par les deux réactions suivantes :



Et



Dans le cas d'un équilibre chimique et isotopique, et pour une température donnée, les rapports isotopiques des composés impliqués sont reliés par une constante appelée « facteur de fractionnement isotopique, noté α . Ainsi pour deux réactions décrites auparavant, le facteur de fractionnement isotopique sera respectivement comme suit :

$$\alpha_{\text{A-B}} = \frac{R_A}{R_B} = \frac{\left(\frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \right)_L}{\left(\frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \right)_V}$$

$$\alpha_{\text{A-B}} = \frac{R_A}{R_B} = \frac{\left(\frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \right)_{\text{CO}}}{\left(\frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \right)_{\text{H}_2\text{O}}}$$

En géochimie isotopique, les mesures sont réalisées sur un spectromètre de masse et les résultats sont exprimés en différence de ces rapports isotopiques R entre deux substances. Cette différence appelée communément de l'échantillon E par rapport à un standard S donné, s'exprime en pour mille (‰) et est défini comme suit :

$$\delta_E = \left[\frac{R_E}{R_S} - 1 \right] \cdot 10^3$$

Les standards ou étalons ont par définition une composition isotopique $\delta_s = 0$ ‰. Pour les eaux naturelles, le standard utilisé est le « SMOW » (Standard Mean Ocean Water).

Ainsi, si $\delta_E > 0$, on dira que l'eau est enrichie en isotopes lourds (^{18}O , ^2H) et si $\delta_E < 0$, on dira alors que l'eau en est appauvrie.

A l'échelle du globe, les teneurs en Oxygène-18 et Deutérium des pluies d'origine océanique sont corrélées entre elles d'une façon linéaire. L'équation de cette droite météorique mondiale a été trouvée comme suit :

$$\delta^2\text{H} = 8 \delta^{18}\text{O} + 10$$

Par ailleurs, il existe une relation simple entre teneurs des pluies en isotopes lourds et la température de condensation. Celle-ci se traduit notamment par des effets de latitude, d'altitude et de saison. Ainsi à l'échelle mondiale, Dansgaard a proposé en 1964 une corrélation linéaire entre les teneurs moyennes annuelles en isotopes des précipitations et la température moyenne annuelle du sol :

$$\delta^{18}\text{O} = 0.69 \bar{T} - 13.6$$

$$\delta^2\text{H} = 5.6 \bar{T} - 100$$

4.6.3. Résultats obtenues :

Des analyses isotopiques (teneurs en Oxygène-18) ont été réalisées au laboratoire d'hydrologie et de géochimie isotopique du Centre de Recherche Nucléaire d'Alger (CRNA), (tableau 4.5)

Points d'eaux	Oxygène-18(en pour mille vs SMOW)	Points d'eaux	Oxygène-18(en pour mille vs SMOW)	Points d'eaux	Oxygène-18(en pour mille vs SMOW)	Points d'eaux	Oxygène-18(en pour mille vs SMOW)
F-EM	1,27	PZ38	-5,45	PZ53/1	-5,5	PZ62/1	-5,52
F-MC	-5,34	PZ39	-4,75	PZ53/2	-3,26	PZ62/2	-4,55
PZF	-5,46	PZ41	-6,23	PZ50	-5,54	PZA	-6,14
F-PZ38	-5,97	PZ45	-5,38	PZ58	-4,66	PZB	-5,3
F-PZ45	-5,17	PZ48/1	-5,57	PZ58/1	-5,57	PZE	-4,72
F-PZ58	-5,26	PZ48/2	-3,43	PZ58/2	-2,91	PZG	-5,05
F-PZA	-4,92	PZ54	-4,88	PZ61/1	-5,66		
PZ32	-3,5	PZ51	-6,03	PZ61/2	-4,96		

Tableau 4.5 : analyses isotopique des teneurs en Oxygène-18

4.6.4. Relation oxygène 18-chlorures :

Les analyses isotopiques réalisées ont concernées l'isotope stable de la molécule d'eau (l'oxygène-18), les résultats obtenus montrent que les concentrations sont assez dispersées et varient entre -6.5% et +1%. Les points les plus appauvries sont proches de la zone de recharge près du piémont de l'Atlas Blidéen, alors que ceux plus enrichies sont proches de la mer.

Afin de déterminer l'origine de la salinité dans les eaux de la baie d'Alger, nous avons reportés sur le diagramme de la figure N°4.42, la relation entre les chlorures et l'oxygène 18. Cette figure montre que points se distribuent selon un schéma de mélange binaire avec un pôle composée des eaux de recharge (sans traces d'eau de mer) avec des concentration en chlorure moyennes de 150mg/l et une composition isotopique moyenne de -5.5% en O18, et un pôle constitué par l'eau de mer avec une concentration en chlorure de 19 g/l et une composition isotopique de +1% en O18. Les points qui se trouvent sur la droite sont composées de proportions de mélange entre les eaux marines et les eaux douces, Une équation de mélange de type :

$$X\delta_{18O} + (1-X)\delta_{18O} = \delta_{18O}$$

Eau de mer + Eau douce = Eau du point d'eau

X représente la fraction de mélange en %

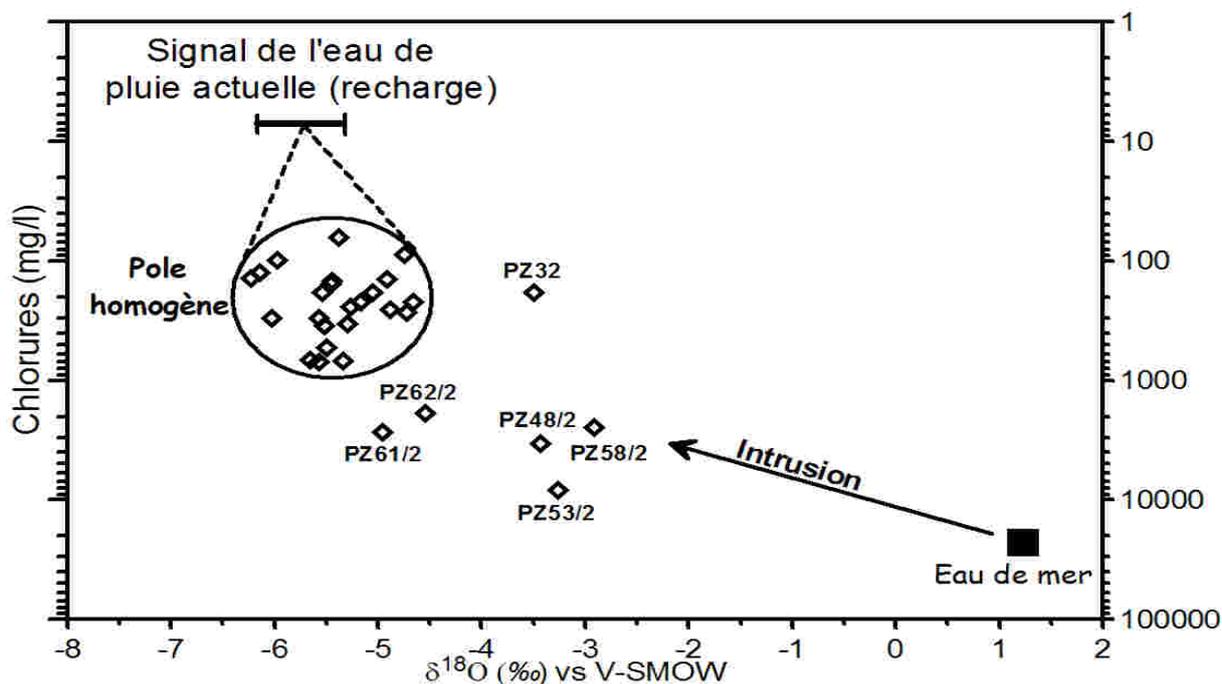


Fig 4.42 : variation des chlorures en fonction des teneurs en Oxygène-18

Conclusion générale

La baie d'Alger est l'une des régions d'Algérie les plus touchées par le phénomène de l'intrusion marine, elle est soumise à un climat méditerranéen, caractérisé par une température moyenne de 17.8°, et une précipitation moyenne annuelle de l'ordre de 596.5mm.

Dans le secteur côtier au niveau de la baie d'Alger, les cartes piézométrique montrent un abaissement du niveau de la nappe, avec inversement du sens d'écoulement, ce qui se traduit par l'avancé du front salé.

L'évolution piézométrique depuis le déclenchement de ce phénomène vers les années (90) a été présentée et montre clairement les périodes d'inversion du gradient d'écoulement qui était au départ Continent-Mer.

Les données hydrochimiques montrent que le faciès chlorurée et sulfatée calcique et magnésien est prédominant dans le secteur d'étude et le faciès hyper chloruré caractérise les points très proches de la cote.

Les teneurs en sodium et en chlorure atteignent par endroits des concentrations respectivement de 430 mg/l et 800mg/l en 2010. L'étude des couples Na-Cl et Br-Cl montrent l'origine de ces éléments dans les eaux, confirment la contamination de la nappe quaternaire par l'eau de mer et suggèrent une origine mixte de la salinité (mélanges).

Si l'on considère que le chimisme rudimentaire des eaux de la baie d'Alger se caractérise par des valeurs de conductivité qui varient entre 500 à 900 $\mu\text{s}/\text{cm}$ cela conduit à conclure que le chimisme de l'eau a complètement changé surtout dans les zones côtières où elles atteignent des valeurs supérieures à 6000 $\mu\text{s}/\text{cm}$, ce qui explique l'avancée de la langue d'eau salée vers le continent.

Fait nouveau, la mesure de la conductivité sur le plan vertical a permis d'établir des profils verticaux de conductivité qui ont montrés que l'avancée de l'intrusion marine s'effectue préférentiellement selon un axe allant de la zone du Bateau Casse jusqu'au champ captant du Hamiz. L'extension maximale de l'intrusion marine s'étend actuellement sur près de 7.5 km vers le champ captant du Hamiz (Campagne mai 2016).

Les mesures isotopiques (oxygène 18), réalisées sur un certain nombre de piézomètre confirment l'origine de la salinité acquise par les eaux à savoir un mélange entre deux processus d'acquisition : Eau de mer et dissolution dans l'aquifère, ce qui confortent les résultats hydrochimiques et hydrodynamiques

L'intrusion marine est un phénomène irréversible pour cette raison les solutions qui doivent être adoptées doivent aboutir à un freinage de ce phénomène.

Nous exposerons quelques solutions et recommandations à prendre :

- Faire une investigation complète des forages licites et illicites d'industrie et d'agriculture, les piquages d'eau d'AEP et leur quantification en mètre cube.
- Définir la ressource en eau disponible pour la recharge
- Racheter la quantité d'eau qui ne sera pas prélevé dans la nappe dans le champ captant du Hamiz pour l'alimentation en eau potable, industrielle et d'irrigation ;

- Assurer le volume d'eau suffisant et la ressource adéquate pour la recharge artificielle en nappe. La principale contrainte réside donc dans la disponibilité de la ressource en eau afin de mettre en place ces solutions.

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

- Mise en place d'un réseau de surveillance
- Utilisation de la Recharge artificielle des nappes par bassins d'infiltration ou par forage d'injection.
- Recyclage et réutilisation des eaux usées
- Dessalement de l'eau de mer
- La lutte contre les fuites des différents réseaux et réalisation des nouveaux réseaux

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE

1. **SIDI MUSSA Mohamed Fouzi, Avril 2005** : Le phénomène d'intrusion marine de la nappe de la Mitidja dans la Baie d'Alger.
2. **Zhor Oulaaross,2009** : Etude climatologique, hydrogéologique et géophysique du sahel côtier des Doukkala (Maroc). Apport de l'analyse statistique et de l'inversion des données géo électriques à l'étude du biseau salé de la lagune de sidi moussa.
3. **Younsi A, 2001** : Méthodologie de mise en évidence de mécanismes de salure des eaux souterraines côtières en zone semi-aride irriguée (chaouia cotière, Maroc). Thèse d'Etat. Univ Doukali El Jadida.
4. **Calvache,M.L. et Polido-Bosch,A , 1996** : Processus d'intrusion-extrusion marine dans les aquifères côtiers du sud de l'Espagne.C.R.Acad.Sci. Paris.323, série 2a, 673-679.
5. **Toubal, A.C., 1997** : La problématique de l'invasion marine dans la baie d'Alger. Etat des connaissances et recommandation, ANR(Blida).
6. **Olive I., 1996** : Introduction à la géochimie des eaux continentales. Tempus S-JEP 09781/95, Gestion et protection des ressources en eau.
7. **Simmers I.1997**. Recharge of phreatic Aquifers in (semi-) Arid.Areas. Intern. Ass-hydrogeol, 19, F 7918.
8. **Nadjib S., 2014** : Etude de la salinisation de l'aquifère de la chaouia côtière (Azemmour-BirJadid, Maroc) : climatologie, hydrogéologie, hydrochimie et tomographie électrique. Thèse de Doctorat univ. Chouaib Doukkali Maroc.
9. **Nadjib S, Fadili A, Mahdi K, Riss J, 2015** : Etude de l'évolution de l'intrusion marine dans l'aquifère de la chaouia côtière.
10. **Ahmed S and Marsily G.,1987** : Comparaison of geostatistical methods for estimating transmissivity using data on ransmissivitannd specific capacity. Water Ressources. Research.
11. **Ally W.M, 1993** : Geostatistical models. In Regional Ground-Water Quality.
12. **Andres A.S., and Martin M.J., 2005** : Estimation of the water table for the Inland Bays Waters hed. Dela ware Geological survery : Nework. N68.
13. **Fidelibus M.D. and Tulipano L., 1996** : Regional flow of intruding sea water in the carbonate aquifers of apulia (southem Italy). 14th Salt water Intrusion Meeting. Ochmeddelonden, 87 :230-241.
14. **Baur P., Supper R., Zimmermann S., and Kinzel bach W., 2006** : Geoelectrical imaging of ground water salinization inth okavango delta, Botswana.Journal of Applied Geopgysics, 60(2) : 126-141.
15. **Nowroozi A.A., Stephen B.H., and Henderson P. 1999** : Salt water intrusion into the fresh water aquifer in the eastern shore of virginia : A reconnaissance electrical resistivity survey. Journal of Applied Geophysics, 42(1) :22
16. **Agence Nationale Des Ressources Hydriques (ANRH)**
17. **LABORDE .J.P, 2000** : Elément d'hydrogéologie de surface. Centre Nationale de la recherche Scientifique, université de Nice- Sophia Antipolis.
18. **CASTANY.G, 1982** : Hydrogéologie : principes et méthodes, Edition Dunord, Paris.
19. **GLANGEAUD,L., 1952** : Histoire géologique de la province d'Alger. congrès géologique international. Monographie région d'Alger. ANRH d'Alger.
20. **BENNIE & PARTNERS. 1983** : Evolution du système d'eau potable existant dans le grand Alger. ANRH d'Alger.

- 21. Mac Donald M. et Partners, 1992 :** Etude de l'aménagement hydro-agricole de la plaine de la Mitidja.
- 22. Mania J., Imersoukène S., Brailon J M ., 1985 :** Pollution saline de la nappe côtière à l'est d'Alger.
- 23. TOUBAL A.C. DJOUDAR/ HALLAL Dahbia, 2007 :** Etat actuel de l'invasion marine de la baie d'Alger. Ecole Nationale Supérieure de l'Hydraulique.
- 24. Agence Nationale des Ressources Hydriques, Rapport final 2010 :** Lutte contre l'intrusion marine en baie d'Alger. Note interne
- 25. Mme MAKHLOUF Epouse BEHIRI Nouara , 2011 .**Cartographie et évolution de l'état actuel du biseau salé de la baie d'Alger et son impact sur l'AEP (champ de captage du Hamiz) et l'industrie (champ de captage de Rouiba)