**République Algérienne Démocratique et Populaire**

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**

**UNIVERSITE SAAD DAHLAB-BLIDA1**

**Faculté de Technologie**

**Département des Sciences de l'eau et Environnement**

**MEMOIRE DE MASTER**

Filière : **Hydraulique**

Spécialité : **Ressources Hydrauliques**

Thème :

# Apport de la géophysique et de l'hydrochimie à l'étude l'intrusion marine dans les zones côtières (Cas de la Baie d'Alger : Etat et actualisation)

Réalisé par :

**Taib solimane Zahra**

Devant les membres de jury composé de :

| | | |
|---|---|---|
| M.BENAZIZA.A | MCA, USD Blida 1 | Président |
| M.KHELFI. | MCB, USD Blida 1 | Examinateur |
| M. GUENDOUZ. A | Professeur,USD Blida 1 | Promoteur |

Promotion 2024/ 2025

# ***REMERCIEMENT***


- *Nous tenons avant tout à remercier « DIEU » pour nous avoir inspiré la volonté et le courage d'acheminer ce travail jusqu'à la fin.*
- *Toute notre gratitude pour notre promoteur* ***Mr. GUENDOUZ AbdelHamid****, pour ces judicieux conseils ainsi que sa disponibilité tout le long de l'élaboration de ce travail.*
- *Toute notre gratitude à nos professeurs et enseignants qui nous ont guidés au cours de notre formation, et nos respects aux membres du jury qui nous feront l'honneur d'apprécier ce travail.*

# ***Dédicaces***

Je dédie ce modeste travaille à :

**À moi-même,** Pour chaque nuit blanche, chaque doute, chaque moment de persévérance. Pour n'avoir jamais lâché, même quand c'était difficile. Cette étape franchie est la preuve que je suis capable d'aller au bout de mes rêves. Que ce soit le début d'un nouveau chapitre encore plus fort.

**À mon père,** Votre amour et votre confiance m'ont amené ici. Merci pour tout ce que vous avez fait et continuez de faire pour moi. Pour votre amour, votre patience et votre soutien constant tout au long de ce voyage. Ce mémoire est aussi le fruit de vos sacrifices. Merci du fond du cœur.

**À ma mère**, Pour ton amour inconditionnel, ton soutien sans faille, et ta force silencieuse qui m'a toujours inspirée. Ce mémoire est aussi le fruit de tout ce que tu m'as transmis.

**À ma sœur wafia**, ma compagne, mon soutien et mon soleil. Merci d'être toujours là, pour ton amour inconditionnel et ta force tranquille. Je t'aime tellement mon cœur.

**À mes sœurs et mes frères,** compagnons de vie, d'aventures, de fous rires et parfois de chamailleries. Vous êtres ma force, mon repère et mon trésor. Merci d'être ma famille. (Mounia, Nawal, Soumia, Ahlem, lotfi, riad, walid)

**À mes amis,** Merci pour votre présence, vos rires, votre soutien et toutes ces petites choses qui rendent la vie plus belle. (Zinou et Rania et Meroua)

**À Ma coach et ma meilleure amie Hania**

**À tous ceux que j'aime.**

**Taib solimane Zahra**

## ***Résumé***

L'Algérie, à l'instar de tous les pays riverains de la méditerranée, a connu une sécheresse au cours des trois dernières décennies. Les manques en eau ont entrainé une sollicitation très accrue des nappes pour les besoins de l'agriculture l'industrie et l'AEP notamment en zones côtières induisant la surexploitation de ces dernières, ce qui a eu pour conséquence la dégradation continuelle de la qualité des eaux souterraines.

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

Trois approches ont été utilisées pour Voir l'évolution et l'extension du biseau salée sur la Baie d'Alger : approche géophysique, hydrodynamique et hydrochimique.

Il ressort de ces analyses que le phénomène d'intrusion marine évolue toujours puisque l'exploitation de la nappe Mitidja au présente de plus en plus

L'interprétation des résultats de ces approches a permis de préciser les évolutions spatio-temporelles de la salinité ; de la piézométrie ainsi que le déplacement du front salé et son positionnement actuel.



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



## ***Summary***

Algeria, like all Mediterranean coastal countries, has experienced drought over the past three decades. Water shortages have led to significantly increased demands on groundwater for agriculture, industry, and drinking water supply, particularly in coastal areas, leading to overexploitation, resulting in the continual deterioration of groundwater quality.

The main purpose of this thesis is to assess the current state of marine invasion in the Bay of Algiers.

Three approaches were used to assess the evolution and expansion of the salt wedge in the Bay of Algiers: geophysical, hydrodynamic, and hydro chemical.

These analyses show that the phenomenon of marine intrusion is still evolving, as exploitation of the Mitidja aquifer is increasingly present.

Interpreting the results of these approaches made it possible to clarify the spatio-temporal changes in salinity; piezometry, as well as the displacement of the salt front and its current position.



**Keywords**: marine intrusion, salt wedge, hydrodynamics, hydrochemistry, Bay of Algiers.

## ***ملخص***

شهدت الجزائر، شأنها شأن جميع دول البحر الأبيض المتوسط، جفافًا على مدى العقود الثلاثة الماضية. وقد أدى نقص المياه إلى زيادة حادة في الطلب على المياه الجوفية للزراعة والصناعة وإمدادات مياه الشرب، لا سيما في المناطق الساحلية، مما أدى إلى الإفراط في استغلال هذه المياه، مما أدى إلى تدهور مستمر في جودة المياه الجوفية

الهدف الرئيسي من هذه الأطروحة هو إجراء تقييم للحالة الحالية للغزو البحري في خليج الجزائر

تم استخدام ثلاثة مناهج لرؤية تطور وامتداد الإسفين الملحي في خليج الجزائر: المنهج الجيوفيزيائي والمنهج الهيد وديناميكي والمنهج الهيد وكيميائي

يتضح من هذه التحليلات أن ظاهرة التسلل البحري لا تزال تتطور حيث أن استغلال طبقة المياه الجوفية في متيجة أصبح موجودًا بشكل متزايد

وقد أتاح تفسير نتائج هذه الأساليب تحديد التطورات المكانية والزمانية للملوحة، والبيزو متري، فضلاً عن إزاحة الجبهة الملحية وموقعها الحالي



**الكلمات المفتاحية**: التسلل البحري، إسفين الملح، الديناميكا المائية، الكيمياء المائية، خليج الجزائر


.

# ***SOMMAIRE***


***Introduction générale……...*** 01

**CHAPITRE 1 : Le phénomène de l'intrusion saline en zones côtières**

*Introduction*…… 04
*1.1. Généralités sur l'intrusion marine*…… 04
*1.1.1. Définition du phénomène* …….. 04
*1.1.2. Définition d'un biseau salé* ……. 05
*1.1.3. Description d'un aquifère côtier* …….. 05
*1.2. Origines de la salinité des eaux souterraines en zones côtières* ……. 05
1.3. Critères de reconnaissance de l'invasion marine …… 10
1.3.1. Critères géologique…… …… 10
1.3.2. Critères hydrodynamiques ……. 10
1.3.3. Critères géophysique …… 11
1.3.4. Critères hydro-chimiques …… 11
1.4. Mécanismes de l'intrusion marine …… 11
1.5. Facteurs déterminants de l'intrusion marine…….. 13
1.5.1 Effet de l'exploitation …… 13
1.5.2 Situation par rapport à la mer …….. 13
1.5.3 Alimentation de la nappe …… *13*
1.5.4 Hydrodynamique / Hydrogéologie ……..
1.6. Cas d'étude du phénomène de l'intrusion marine dans le monde ……. 14

15
21
Conclusion …….. 22

**CHAPITRE 2 : PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE**

Introduction …… 24
2.1. Etude géomorphologique…… 24
2.1.1. Situation géographique …….. 24
2.1.2. Situation de la région d'étude …….. 25
2.2. Aspects généraux sur la zone de l'étude …….. 26
2.2.1. Aspect hydrographique …… 26
2.3. Unités géomorphologiques…….. 26
2.3.1. Le Sahel …….. 26
2.3.2. La plaine …… 26
2.3.3. L'Atlas Blidéen……. 26
2.4. Réseau hydrographique. …….. 28
2.5. Les paramètres géomorphologiques …….. 28
2.5.1. Paramètres géométriques …….. 28

2.5.2. Les paramètres de forme ..... 28
2.5.3. Les paramètres de relief 29
.....
2.6. Etude hydro-climatologique ..... 30
2.6.1. Paramètre climatologique ..... 30
2.6.1.1. Réseau pluviométrique ..... 30
2.6.1.2. Les 31
précipitations .....
2.6.1.3. Précipitations mensuelles et annuelles ..... 31
2.6.1.4. Evaluation de la lame d'eau précipité ..... 34
2.6.2. Les 37
températures .....
2.6.3. Evapotranspiration ou déficit d'écoulement ..... 39
2.6.3.1. Calcul de l'ETP ..... 39
2.6.3.2. Evapotranspiration réelle (ETR) ..... 39
2.7. Bilan 41
hydrologique .....
2.7.1. Estimation de la lame 42
ruisselée .....
2.7.2. Estimation de l'infiltration..... 42
CONCLUSION ..... 43

## CHAPITRE 3 : METHODOLOGIE DE TRAVAIL

Introduction ..... 45
3.1. Partie Terrain ..... 45
3.1.1. Matériels utilisés ..... 46
3.1.2. Mesure du niveau statique ..... 48
3.1.3. Mesure de la conductivité ..... 49
3.1.4. Prélèvement des échantillons..... 49
3.2.Partie 52
géophysique.....
3.2.1. 52
Introduction.....
3.2.1. Etude géophysique du phénomène de l'intrusion marine dans la Mitidja Est : 52
3.2.2. Méthodes de prospection électrique ..... 52
3.3. Partie Laboratoire ..... 55
3.3.1. Dosage quelque élément chimique..... 56
3.4. Partie Logiciel..... 58
3.4.1. Logiciel ARCGIS PRO..... 58
3.4.2. Logiciel SUFER 2016 ..... 59
3.4.3. Logiciel Diagramme..... 60
3.4.4. Logiciel Photoshop CC 2020..... 61

## *CHAPITRE 4:*RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

Introduction ..... 63
4.1. Approche géophysique..... 63
4.1.1. Introduction..... 63
4.1.2.étalonnage du sondage électrique..... 66
4.1.3.échelle des résistivités..... 67
4.1.4. Interprétation des cartes et coupes géoélectriques..... 67
4.1.5. Conclusion..... 71
4.2. Approche hydrodynamique..... 71

4.2.1. Introduction …… 71
4.2.2. Mise en évidence de l'intrusion marine par la cartographie piézométrique….. 71
4.2.3. Évolution de la piézométrie de la période 1983 – 2020…… 72
4.3. Approche hydrochimique par l'étude des profils de conductivité …….. 79
4.3.1. Introduction…… 79
4.3.1. Historique de profil de conductivité…….. 91
4.3.2. Profile de conductivité de l'année 2020…… 104
4.3.3. Les facies chimique…… 104
4.3.3.1. Introduction…… 104
4.3.3.2. La méthode de classification…… 105
4.3.3. 3.Étude de couple chimique Na-Cl …… 106
4.4. Cartes iso-teneurs…… 107
4.5.État approximatif du biseau en2019/2020…… 113
Conclusion …… 113
**Conclusion *générale*. ……..** 114
**Recommandation……..** 115

# *Listes des figures*


| CHAPITRE 1 : Le phénomène de l'intrusion saline en zones côtières | |
|---|---|
| **Figure.1.** Phénomène d'intrusion marine | 04 |
| **Figure.2.**Représentation du biseau salé | 05 |
| **Figure.3**. Schéma théorique de l'invasion marine le long du littoral pour une nappe libre. **(D'après Ghyben-Herzberg)** | 06 |
| **Figure.4.** Etude mathématique de l'interface. (D'après M.K.Hubbert) | 07 |
| **Figure.5.**Situation naturelle de l'interface eau douce / eau de mer. | 08 |
| **Figure .6.** Forage d'exploitation qui attire l'interface par pompage. | 09 |
| **Figure .7.**Forages contaminés par les eaux salées | 09 |
| **Figure.8.** Sources potentielles des salinités des eaux souterraines côtières | 10 |
| **Figure.9.** Relation eau douce eau de mer. | 12 |
| **CHAPITRE 2 : PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE** | |
| **Figure.10.**Situation géographique générale de la plaine de la Mitidja | 24 |
| **Figure.11.** Situation géographique de la baie d'Alger | 25 |
| **Figure.12.** Orographie et hydrographie de la plaine de Mitidja Est (ANRH, Alger) | 27 |
| **Figure .13.**carte de la répartition des stations pluviométriques (ANRH) | 31 |
| **Figure.14.** Carte pluviométrique de la Mitidja (ANRH 2008) | 32 |
| **Figure.15.** Précipitations moyennes mensuelles période (1980-2008) | 33 |
| **Figure.16.** Précipitations moyennes annuelles période (1980-2008) | 33 |
| **Figure.17.**graphe des Températures moyennes mensuelles de Dar El Beida pour la période (1980-2008) | 38 |
| **CHAPITRE 3 : METHODOLOGIE DE TRAVAIL** | |
| **Figure.18.** Répartition des piézomètres de la baie d'Alger | 45 |
| **Figure.19.** Voiture utilisées pour le déplacement sur terrain | 46 |
| **Figure.20.** Sonde multi paramètres utilisée pour la mesure de différents paramètres | 46 |
| **Figure.21.** Escabeau utilisé | 47 |
| **Figure.22.**Sonde utilisée pour les mesures sur terrain. | 47 |
| **Figure.23.** Échantillons prélevés sur terrain avec l'étiquette. | 48 |
| **Figure.24.**Mesures du niveau statique sur les piézomètres au niveau de la Baie d'Alger. | 48 |
| **Figure.25.**Les échantillons | 49 |
| **Figure.26.**Le dispositif quadripôle de Schlumberger | 53 |
| **Figure.27.**Les matériels de sondages électriques. | 53 |
| **Figure.28.** Laboratoire de l'ANRH | 55 |
| **Figure.29.** Échantillons au laboratoire | 55 |
| **Figure.30.** Interface de Logiciel ARC GIS PRO | 58 |
| **Figure.31.** Interface de commande de logiciel ARCGIS PRO | 59 |

| | |
|---|---|
| **Figure.32.** Interface de logiciel Surfer | **59** |
| **Figure.33.**Interface de commande du logiciel Diagrammes | **60** |
| **Figure.34.**Interface de commande du logiciel Photoshop CC 2020 | **61** |
| ***CHAPITRE 4:*RÉSULTATS ET DISCUSSIONS** | |
| **Figure.35.** Etalonnage du sondage électrique A1 à l'aide de logiciel 1*1D | **64** |
| **Figure.36**.Etalonnage du sondage électrique A2 à l'aide de logiciel 1*1D | **65** |
| **Figure.37.** Etalonnage du sondage électrique B4 à l'aide de logiciel 1*1D | **66** |
| **Figure.38.** Carte de la résistance transversale(RT) correspond aux horizons profonds (Astien et les alluvions du quaternaire) (CGG, 1969). | **69** |
| **Figure. 39. a**. Coupe géoélectriques dans la partie Est de la plaine de la Mitidja (CGG, 1969) | **69** |
| **Figure.39.b**.Coupe géoélectriques dans la partie Est de la plaine de la Mitidja (CGG, 1969) | **70** |
| **Figure.40.** Carte du Mur de l'aquifère alluvial, l'allure du substratum (Macdonald & Partner, 1992). | **70** |
| **Figure.41.**Carte piézométrique de la Baie d'Alger 1983 réalisé à l'aide de logiciel surfer | **72** |
| **Figure.42.** Carte piézométrique de la Baie d'Alger mai 1996 réalisée à l'aide du logiciel surfer.10 | **73** |
| **Figure.43.** Carte piézométrique de la Baie d'Alger septembre 2003 réalisé à l'aide de logiciel surfer | **73** |
| **Figure.44.**Carte piézométrique de la Baie d'Alger septembre 2007 réalisé à l'aide de logiciel surfer | **74** |
| **Figure.45.**Carte piézométrique de la Baie d'Alger avril 2010 réalisé à l'aide de logiciel surfer | **75** |
| **Figure.46.** Carte piézométrique de la Baie d'Alger mai 2016 réalisé à l'aide de logiciel surfer | **76** |
| **Figure.47.**Carte piézométrique de la Baie d'Alger mars 2018 réalisé à l'aide de logiciel surfer | **77** |
| **Figure.48.**Carte piézométrique de la Baie d'Alger Aout 2020 réalisé à l'aide de logiciel surfer | **78** |
| **Figure.49.** Profil vertical de conductivité du PZ 58 | **79** |
| **Figure.50.**Profil vertical de conductivité du PZ 54 | **80** |
| **Figure.51.**Profil vertical de conductivité du PZ 48 | **81** |
| **Figure.52.** Profil vertical de conductivité du PZ 60 | **82** |
| **Figure.53.** Profil vertical de conductivité du PZ 61 | **83** |
| **Figure.54.** Profil vertical de conductivité du PZ 36 | **84** |
| **Figure.55.**Profil vertical de conductivité du PZ B | **85** |
| **Figure.56.** Profil vertical de conductivité du PZ D | **87** |
| **Figure.57.**Profil vertical de conductivité du PZ F | **87** |
| **Figure.58.** Profil vertical de conductivité du PZ 2 Hamiz | **88** |
| **Figure.59.**Profil vertical de conductivité du PZ 1 Hamiz | **89** |

| | |
|---|---|
| **Figure.60.**Profil vertical de conductivité du PZ 58 | **90** |
| **Figure.61.**Profil vertical de conductivité du PZ 54 | **91** |
| **Figure.62.** Profil vertical de conductivité du PZ 48 | **92** |
| **Figure.63.** Profil vertical de conductivité du PZ 60 | **93** |
| **Figure.64.** Profil vertical de conductivité du PZ 61 | **94** |
| **Figure.65.**Profil vertical de conductivité du PZ 36 | **95** |
| **Figure.66 .**Profil vertical de conductivité du PZ B | **96** |
| **Figure.67.** Profil vertical de conductivité du PZ D | **97** |
| **Figure.68.** Profil vertical de conductivité du PZ F | **98** |
| **Figure.69.** Profil vertical de conductivité du PZ E | **99** |
| **Figure.70.**Profil vertical de conductivité du PZ 1 Hamiz | **100** |
| **Figure.71.** Profil vertical de conductivité du PZ 2 Hamiz | **101** |
| **Figure.72.** Profil vertical de conductivité du PZ 41 | **102** |
| **Figure.73.**Le diagramme de piper | **103** |
| **Figure.74.**Variation de sodium en fonction de chlorures la Baie d'Alger en 2010 | **104** |
| **Figure.75**. Variation de sodium chlorures la Baie d'Alger en 2020 | **106** |
| **Figure.76.**Carte de conductivité à 35 m de Juillet 2007 réalisé à l'aide de logiciel surfer | **107** |
| **Figure.77.** Carte de conductivité à 35 m de Février 2020 réalisé à l'aide de logiciel surfer | **1098** |
| **Figure.78.** Carte iso-teneur en Na+ Février 2006 réalisé à l'aide de logiciel surfer | **109** |
| **Figure.79.**Carte iso-teneur en cl- Février 2006 réalisé à l'aide de logiciel surfer | **110** |
| **Figure.80.**Carte iso-teneur en Na+ Février 2020 réalisé à l'aide de logiciel surfer | **111** |
| **Figure.81.**Carte iso-teneur en Cl- Février 2020 réalisé à l'aide de logiciel surfer | **112** |
| **Figure.82.**État du approximatif du biseau en 2019/2020 la baie d'Alger | **113** |

# ***Liste des Tableaux***


| | |
|---|---|
| **Tableau 1.1.** Exemples d'aquifères côtiers affectés par l'intrusion marine dans le monde | **14** |
| **Tableau 2.1.** : Paramètres géométriques des sous bassins versants | **28** |
| **Tableau 2.2.** Paramètres de forme et de relief des deux sous bassins versants (Oued El Hamiz et Oued El Harrach). | **29** |
| **Tableau 2.3.** Caractéristiques des stations pluviométriques | **30** |
| **Tableau2.4.** précipitations moyennes mensuelles et annuelles (1980--2008) | **31** |
| **Tableau 2.5.**Calcul de la lame précipitée de la période (1980-2008) par la méthode arithmétique | **35** |
| **Tableau 2.6.**calcul de la lame précipitée par méthode Thiessen période (1980-2008) | **36** |
| **Tableau 2.7**. Résultats obtenus par la méthode des Isohyètes. | **37** |
| **Tableau 2.8.** Résultats obtenus par les 3 méthodes | **37** |
| **Tableau2.9.**Mensuelles des températures moyennes, maximales et minimales Période (sept 1980-aout 2008) Dar El Beida. | **38** |
| **Tableau2.10.**Détermination de l'ETP par la méthode de Thornthwaite Période (1980-2008) | **39** |
| **Tableau2.11.** résultats de l'ETR par la formule de Coutagne | **40** |
| **Tableau2.12.**bilan hydrique de C.W Thornthwaite à la station de Dar El Beida (1980-2008) | **41** |
| **Tableau2.13.**Récapitulatif des résultats d'ETR par les différentes méthodes Pour la période (1980-2008). | **41** |
| **Tableau2.14.**valeurs de la lame d'eau ruisselée (1980-2008) | **42** |
| **Tableau2.15.**récapitulations des différentes composantes du bilan hydrologique dans | **43** |
| La station de Dar El Beida (1980-2008). | **49** |
| **Tableau3.16.**Résultats de la compagne piézométrique sur terrain de la Baie d'Alger Février et Aout 2020. | **50** |
| **Tableau3.17.**Résultats de mesure de conductivité et TDS Février 2020 | **51** |
| **Tableau3.18.**Résultats de mesure de conductivité et TDS Août 2020 | **52** |
| **Tableau3.19.**Résultats de mesure sur le terrain (Février et Aout 2020) | **57** |
| **Tableau3.20.** Résultats des analyses physico chimique de l'année 2020 | **64** |
| **Tableau4.21.** Description de Sondage étalon A1 | **57** |
| **Tableau4.22.**Description de sondage étalon A2 | **66** |
| **Tableau4.23.** Description de sondage étalon B4 | **67** |
| **Tableau4.24.** Echelle des résistivités | **28** |

# ***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.

L'intrusion marine est la principale cause de la salinisation et de la dégradation des eaux souterraines dans les zones côtières algériennes.

La région étudiée (Baie d'Alger), fait partie de ces plaines côtières. C'est une zone qui connait 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.

Dans les conditions naturelles, sans perturbation, un état d'équilibre s'établit entre les deux fluides (eau de mer et eau douce), et la zone de contact sera stationnaire et située au sein de la nappe. Toute exploitation intensive, peut entraîner l'abaissement de la surface piézométrique qui pourrait atteindre des côtes inférieures au niveau de la mer, ce qui provoque une rupture de l'équilibre existant entre les deux fluides et engendre une intrusion saline à l'intérieur de la nappe. Cette intrusion peut se traduire par une avancée pouvant atteindre plusieurs kilomètres. Ce phénomène est connu sous le nom de l'intrusion marine.

Sur la baie d'Alger ce phénomène est apparu déjà vers les années 1985 suite à la prolifération des forages licites et illicites sur toute la Baie et donc une exploitation accélérée. Il a pris des dimensions alarmantes des dix dernières années.

Le présent travail s'intègre dans cette optique et son objectif consiste à appliquer différentes approches : Géophysique, Hydrodynamiques et hydrochimique :

Les sondages électriques verticaux, Technique des profils de conductivité ainsi que l'examen de l'évolution spatiotemporelle de tous les paramètres chimiques. Afin de d'examiner la situation actuelle et de voir l'évolution de la location de l'invasion ces deux dernières années.

## ***Introduction générale***

Le présent travail est structuré selon les chapitres suivants :

**1 ère chapitre :** Présentation du phénomène de l'intrusion marine.

**2 ème chapitre :** Présentation de la zone d'étude (la baie d'Alger).

**3 ème chapitre :** Méthodologie suivie pour réaliser ce travail (partie terrain, laboratoire et logiciel utiliser).

**4 ème chapitre :** Discussion et interprétation des résultats obtenus. Une synthèse générale des résultats obtenus (géophysique, piézométrique, hydrochimique, profil de la conductivité) sur la Baie d'Alger.

# CHAPITRE 1 :

Le phénomène de l'intrusion saline en zones côtières.

# Introduction

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

Ce risque s'accentue en raison de l'accroissement de la fréquence et de l'intensité des périodes de sécheresses, mais aussi en réponse à l'augmentation importante de la population vivant en zone côtière. Il deviendra encore plus important lors de la remontée du niveau de la mer corrélative du changement climatique. **[1]**

## *1.1. Généralités sur l'intrusion marine*

### *1.1.1. Définition du phénomène :*

L'intrusion d'eau de mer peut s'introduire dans des couches aquifères d'eau douce à cause des processus normaux ou aux activités humaines. L'intrusion d'eau de mer est provoquée par des diminutions des niveaux des eaux souterraines ou par des élévations des niveaux d'eau de mer. Quand vous pompez rapidement de l'eau douce, vous abaissez le niveau d'eau douce dans la couche aquifère formant ainsi un cône de dépression. (**Figure 1**). L'intrusion peut affecter non seulement la qualité de l'eau aux niveaux du pompage du puits, mais aussi d'autre puits, et des parties peu développées de la couche aquifère**. [1]**

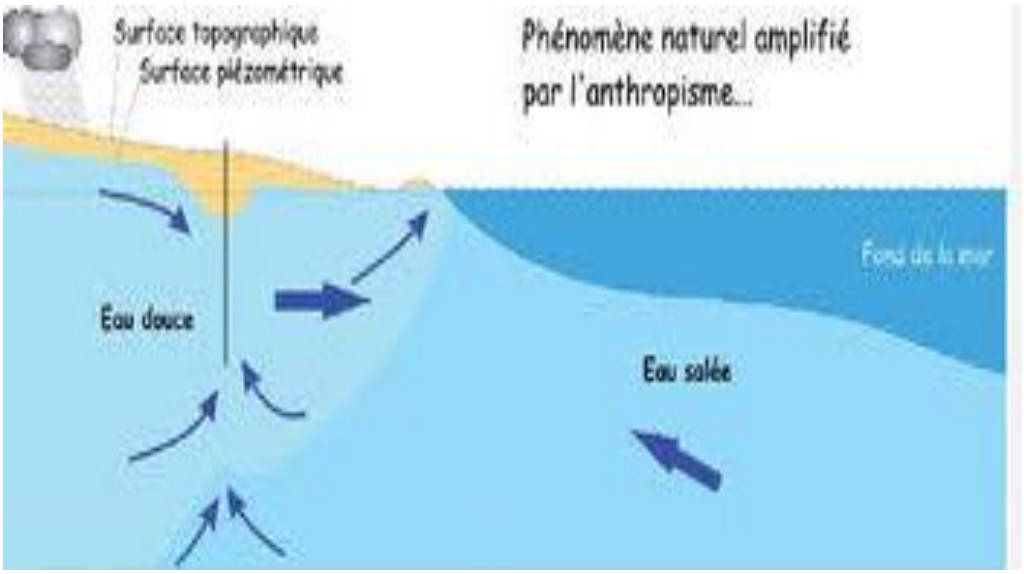



**Figure.1.** Phénomène d'intrusion marine **[1]**

### *1.1.2. Définition d'un biseau salé :*

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

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

Cette limite peut être plus ou moins franche (sur quelques mètres) ou progressive (plusieurs dizaines de mètres)**. [2]**

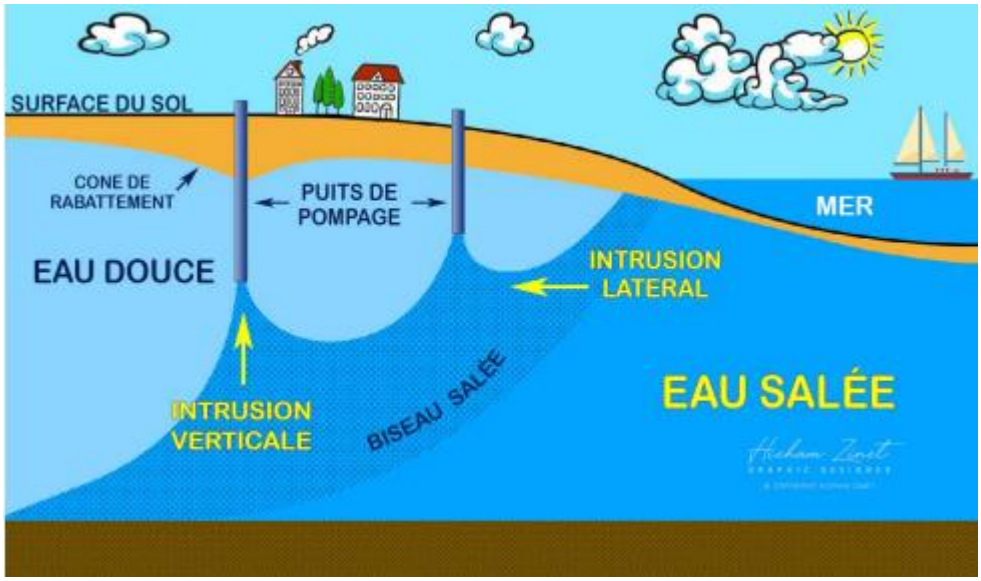



**Figure.2.** Représentation du biseau salé **[2]**

### *1.1.3. Description d'un aquifère côtier :*

Les aquifères côtiers sont en général, en communication avec la mer. Ce sont des systèmes globaux aquifères/mers. Le niveau piézométrique de la nappe d'eau douce étant au-dessus de celui de la mer, l'eau douce s'écoule vers cette dernière et il s'établit un équilibre hydrostatique qui se traduit par une zone limite. Cette dernière est matérialisée par une interface eau douce/eau salée, dont la position est imposée par la différence d'altitude (différence de charge) entre le niveau piézométrique et le niveau moyen de la mer (cote zéro). **[3]**

Dans les conditions naturelles, sans perturbations, un état d'équilibre s'établit entre les Dans les conditions naturelles, sans perturbations, un état d'équilibre s'établit entre les 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 d'eaux douces et les eaux salées. La zone de contact sera stationnaire et située au sein d'eaux douces et les eaux salées. La zone de contact sera stationnaire et située au sein de l'aquifère. **[3]**

Les aquifères littoraux poreux ont été étudiés à la fin du XIX 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 Hezberg. À un plan, dont la position est liée à la diffère un plan, dont la position est liée à la différence de densité des deux milieux. **[3]**

La loi de Ghyben-Herzberg définis la position du contact entre deux milieux à l'équilibre (**Figure3)**

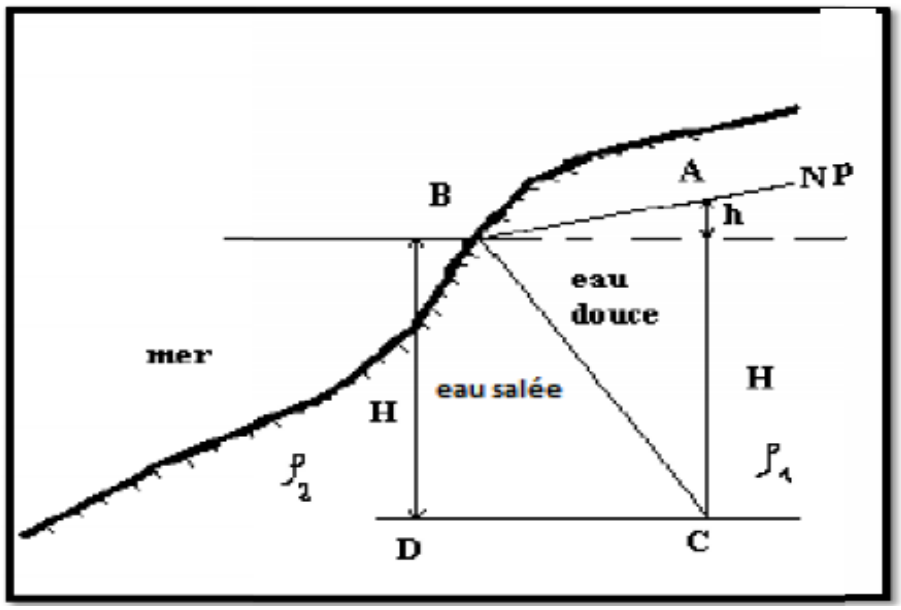



**Figure.3**. Schéma théorique de l'invasion marine le long du littoral pour une nappe libre. **(D'après Ghyben-Herzberg) [3]**

NP : niveau piézométrique ;

BC : interface ;

H : niveau de l'eau salée ;

ρ1 : densité de l'eau douce ;

ρ2 : densité de l'eau salée ;

h : charge hydraulique ;

PD : la pression hydrostatique au point D. (PD = ρ2 x g H) ;

PC : la pression hydrostatique au point C. (Pc = ρ1 (H + h) g) ;

En hydrostatique Pc = PD (C et D au même niveau)

Donc la profondeur du biseau salé est :

$$H = (\rho 1 \times h) / (\rho 2 - \rho 1)$$

Dans la réalité, un mélange se produit par diffusion et le système n'est pas statique, car Dans la réalité, un mélange se produit par diffusion et le système n'est pas statique, car 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'aquifère l'oscillation de la marée. Les deux milieux peuvent se mélanger et forment l'oscillation de la marée. Les deux milieux peuvent se mélanger et forment 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 profondément que la droite théorique de Ghyben-Herzberg.

Cela a conduit M.K. Hubbert (Figure a conduit M.K. Hubbert. **[3] (Figure.4.)** à chercher une solution mathématique plus) à chercher une solution mathématique plus appropriée, il a étudié dans une coupe transversale, deux lignes équipotentielles séparées appropriée, ds.

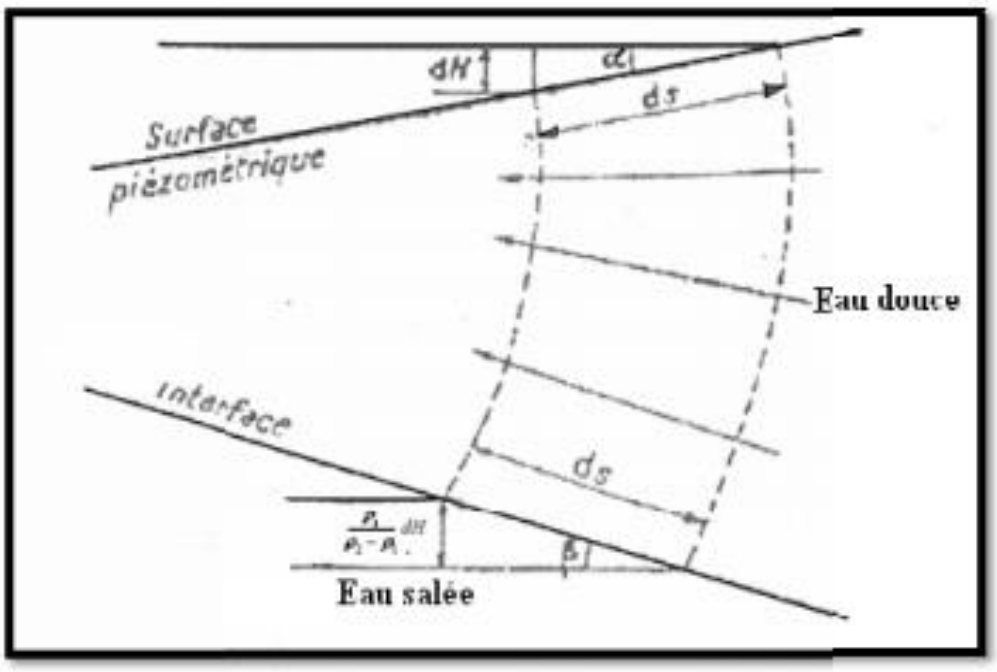



**Figure.4.** Etude mathématique de l'interface. (D'après M.K. Hubbert). **[3]**

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

D'après Darcy :

$$Sin\alpha = (Dh/Ds) = (v/k)$$

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

$$(\rho 1/ \rho 2 - \rho 1)\, Dh$$

Ɓ : angle de l'interface horizontale.

$$sin Ɓ = (\rho 1 \times v/ \rho 2 - \rho 1) \times (v/k)$$

Comme les droites convergentes vers la mer, la vitesse
les droites convergent vers la mer, la vitesse v décroît dans cette direction, donc décroît dans cette direction, donc l'interface est une courbe concave. **[3]**

**Figure.5. :** Situation naturelle de l'interface eau douce / eau de mer. **[3]**

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

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

Toute exploitation intensive, peut entraîner l'abaissement de la surface piézométrique qui pourrait atteindre des côtes inférieures au niveau de la mer, ce qui provoque une rupture de l'équilibre existant entre les deux fluides et engendre une intrusion saline à l'intérieur de la nappe. Cette intrusion peut se traduire par une avancée pouvant atteindre plusieurs kilomètres**. [4]**

**Figure .6.** : Forage d'exploitation qui attire l'interface par pompage. .

**[4]**

**Figure .7.** Forages contaminés par les eaux salées. **[4]**

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**. [4]**

Beaucoup de pays, ayant des aquifères côtiers, sont touchés par ce phénomène comme les USA et particulièrement en Californie ou 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. **[4]**

## 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 **(Figure.8.)** 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. **[5]**

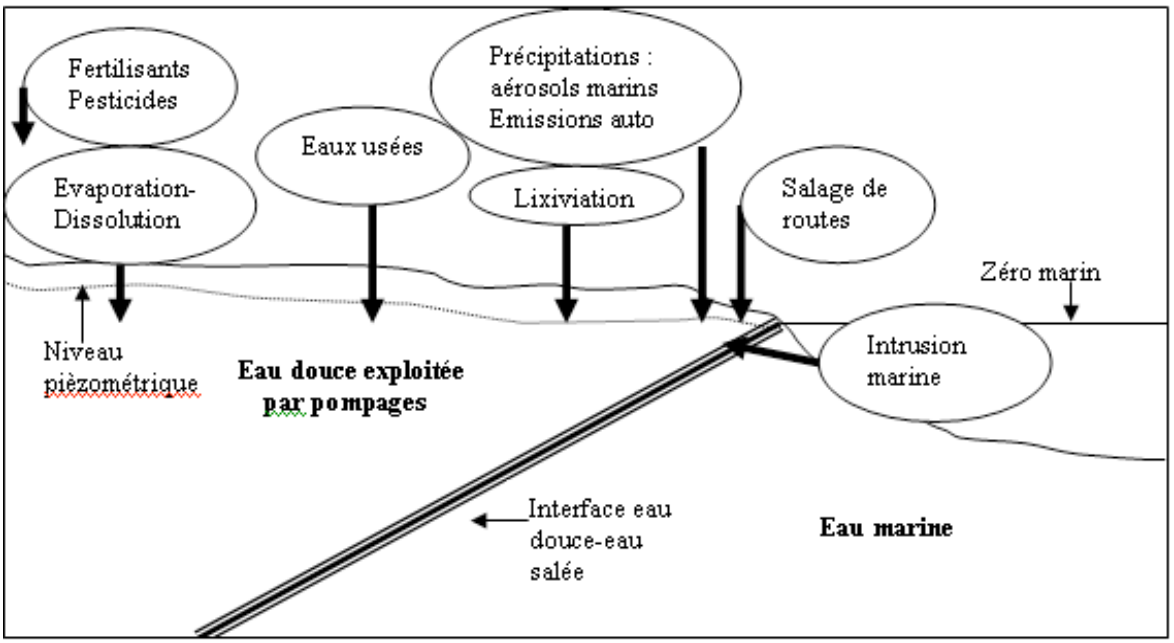



**Figure.8.** Sources potentielles des salinités des eaux souterraines côtières. **[5]**

## 1.3. Critères de reconnaissance de l'invasion marine

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

1.3.1. Critères géologique :

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

La connaissance de la géologie fine sur le littoral sur un profil terre-mer permet d'optimiser la gestion des aquifères côtiers d'une part et de mieux appréhender les problèmes d'intrusion saline d'autre part. **[6]**

1.3.2. Critères hydrodynamiques :

L'établissement d'une carte piézométrique permet de définir le sens de l'écoulement qui peut s'avérer significatif de l'intrusion marine (cas d'écoulement de la mer vers la nappe). **[5]**

1.3.3. Critères géophysique :

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

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

Comparable à la mise en œuvre pour les plans d'eau, les mesures de conductivité (bon marqueur de la salinité) sont réalisées à différentes profondeurs. **[6]**

1.3.4. Critères hydro-chimiques :

L'analyse hydro-chimique des éléments majeurs ($Na^+$, $CI^-$, $HCO_3$ …etc.) et l'étude de certains rapports caractéristiques comme le rapport de Todd ($rCI^-/rHCO_3$) sont caractéristiques de l'invasion marine. **[6]**

## 1.4. 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/m3) entre deux eaux **[7] (Figure.9.)**

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. **[7]**

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 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… **[7]**

Les pluies susceptibles de recharger une nappe côtière engendrent une augmentation du dé bit 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. **[7]**

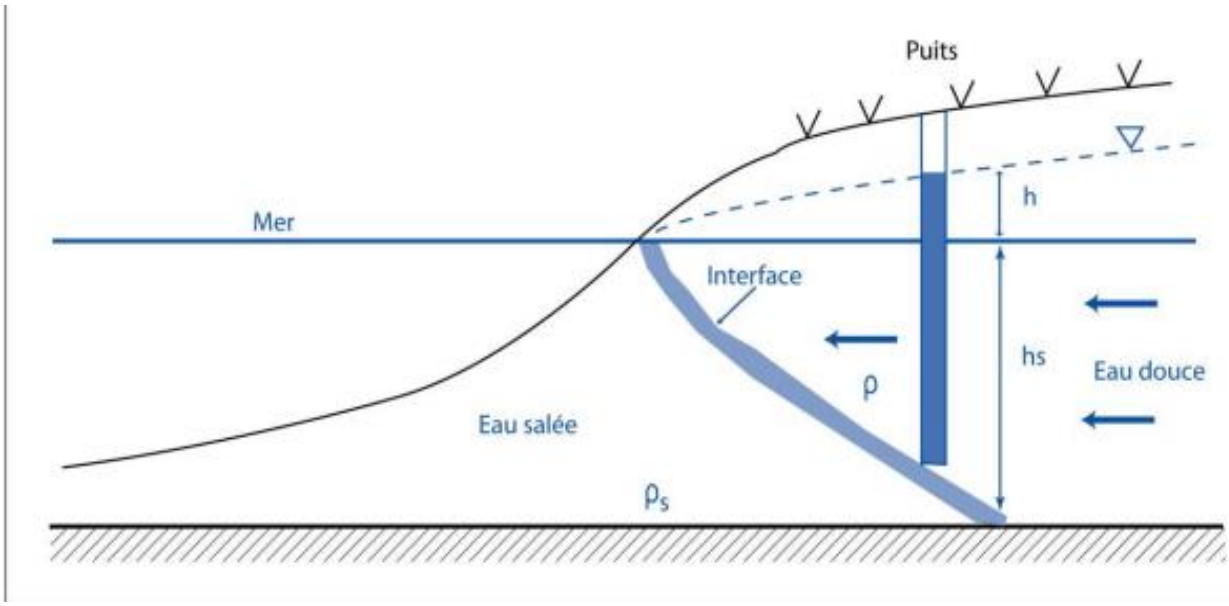



**Figure.9.** Relation eau douce eau de mer. **[7]**

## 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 **[8] ; [9] :**

- 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. **[8] ; [9]**

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. **[8] ; [9]**

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'iso-pièze 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. **[8] ; [9]**

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

**Tableau 1.1.** Exemples d'aquifères côtiers affectés par l'intrusion marine dans le monde **[10] ; [11]**

| Zone geographies | Pays / Région concernés | Exemples d'aquifères touches |
|---|---|---|
| Afrique du Nord (bordure méditerranéenne) | Algérie, Tunisie, Maroc | — |
| | Tunisie (région de Sfax) | Nappe côtière de Sfax |
| Atlantique (Afrique de l'Ouest) | Mauritanie, Sénégal | — |
| France (rive nord de la Méditerranée) | Roussillon (région de Perpignan) | Nappe du Roussillon |
| | Basse Vallée de l'Aude (région de Lézignan – Narbonne) | Nappe de la Basse Vallée de l'Aude |
| | Vallée de l'Orb (région de Béziers) | Nappe de la Vallée de l'Orb |
| | Astien (région de Béziers) | Nappe de l'Astien |
| | Vallée de l'Hérault (région d'Agde) | Nappe de la vallée de l'Hérault |
| | Mauguio-Lunel (région de Montpellier) | Nappe de Mauguio-Lunel |
| | Crau (région d'Arles) | Nappe de Crau |
| | Gapeau (région d'Hyères) | Nappe de Gapeau |
| | Giscle et Mole (région de Grimaud) | Nappe de Giscle et Mole |
| | Argens (région de Saint-Raphaël) | Nappe d'Argens |
| | Corse (région de Filitosa) | Nappe côtière de Corse |

## Conclusion

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

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

Plusieurs critères sont utilisés pour la reconnaissance de l'intrusion marine : **(**géologiques, hydrodynamiques, géophysique et Hydro-chimique.**) [6]**

# CHAPITRE 2 :

PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

## Introduction

Ce chapitre comporte deux parties étude géomorphologique ayant pour objet d'illustrer et de définir les paramètres physiques et géomorphologiques de la région d'étude. Ces paramètres ont une influence importante sur la circulation des eaux à l'intérieur du bassin Et étude hydro-climatologique, où on va étudier les paramètres hydro-climatologiques qui servent comme support pour le calcul du bilan hydrologique.**[6]**

## 2.1. Etude géomorphologique

2.1.1. Situation géographique :

La Mitidja est une dépression allongée d'Ouest en Est qui s'étend sur une longueur moyenne de 90 km depuis Hadjout à l'ouest jusqu'à la vallée de l'oued Boudouaou à l'Est, avec une largeur moyenne de 15 km environ, elle est la plus vaste plaine sub littoral, elle occupe une superficie d'environ occupe une superficie d'environ 1450km$^2$ répartie entre les wilayas d'Alger, Blida, Tipaza et de Boumerdès.

Les limites de la nappe aquifère se confondent avec celles de la plaine de la Mitidja proprement dite et s'étendent depuis la région de Hadjout à l'Ouest jusqu'à la région de Réghaïa à L'EST. **[6]**

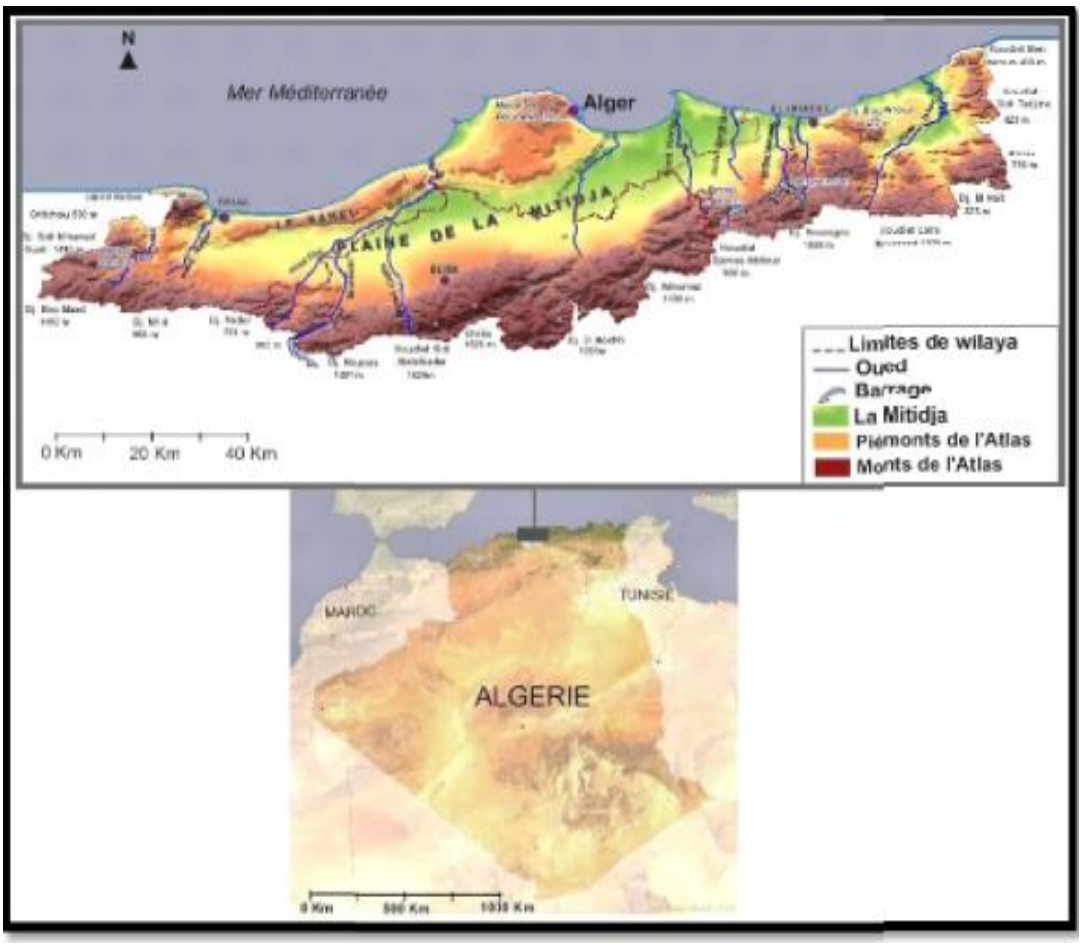



**Figure.10.**Situation géographique générale de la plaine de la Mitidja**. [6]**

2.1.2. Situation de la région d'étude :

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

La baie d'Alger est située dans la partie centrale de la côte algérienne. Elle s'inscrit en creux dans la plaine de Mitidja de forme semi-circulaire d'une superficie approximative de l'ordre de 180 $Km^2$ elle est limitée par :

- la mer méditerranée au Nord.
- la limite géologique étanche au Nord-est
- l'Oued El Harrach à l'Ouest
- l'Oued El Hamiz à l'Est.
- Les montagnes de chréa au sud **[6]**

**Figure.11.** Situation géographique de la baie d'Alger **[6]**

## 2.2. Aspects généraux sur la zone de l'étude :

2.2.1. Aspect hydrographique :

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

- **Le sous bassin de l'oued El Harrach** : s'étale sur une superficie de 1260km$^{2.}$

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.

II 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 au sous bassin du Hamiz.

Les principaux exutoires de la plaine de Mitidja Est sont représentés par l'oued El Harrach, Hamiz, Reghaia. Les oueds alimentent la nappe dans la zone libre du piémont et la drainent vers l'aval au niveau de la zone de recharge. **[6]**

## 2.3. Unités géomorphologiques

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

2.3.1. Le Sahel

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

2.3.2. La plaine

C'est une zone d'affaissement général suivant un axe orienté

ENE-OSO.

2.3.3. L'Atlas Blidéen

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

Il est le siège d'une érosion active due au ruissellement favorisé par le manque du couvert végétal. **[6]**

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

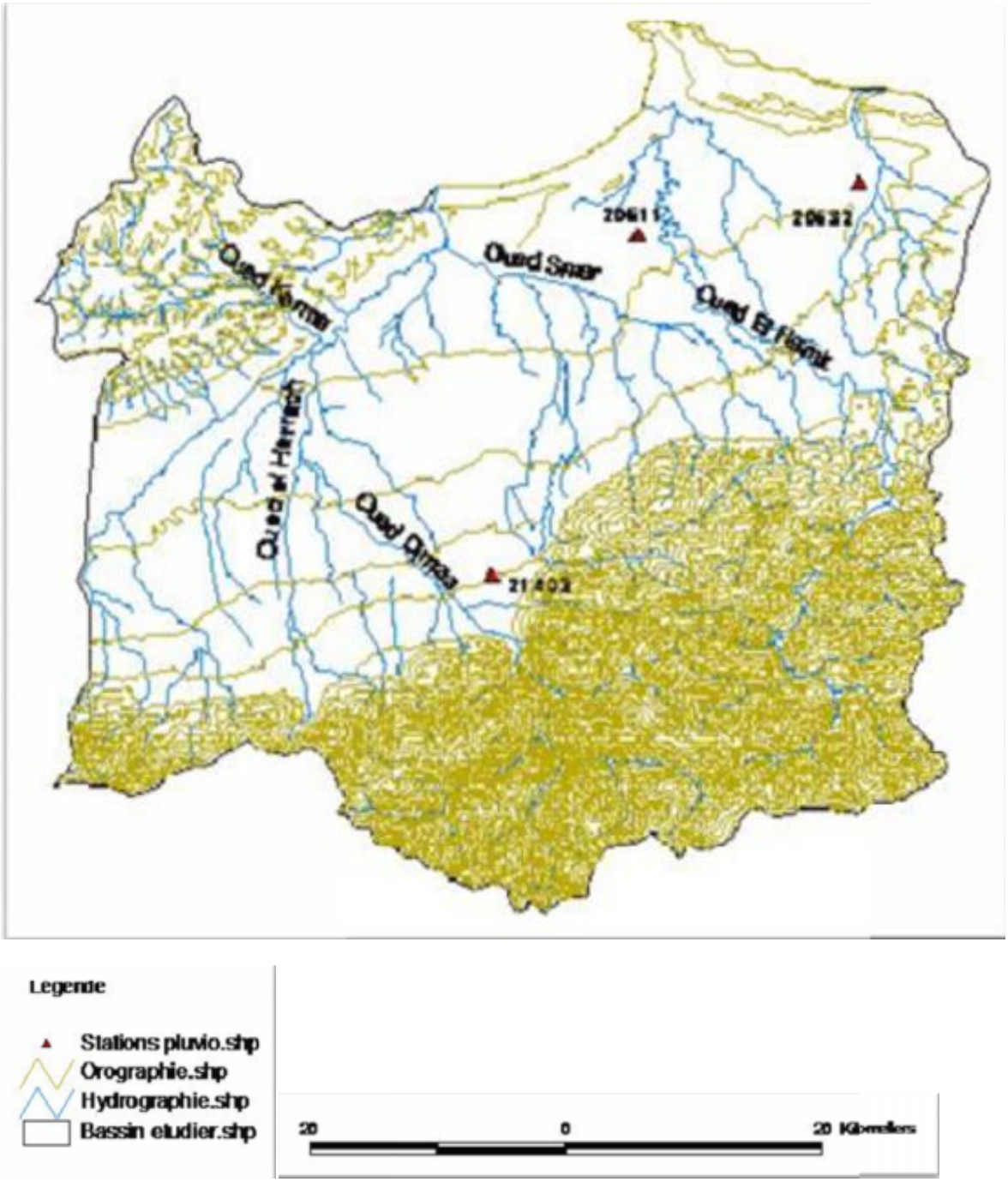



**Figure.12.** Orographie et hydrographie de la plaine de Mitidja Est (ANRH, Alger) l'Oued El Hamiz à l'Est. **[6]**

## 2.4. Réseau hydrographique :

La plaine de la Mitidja est traversée par un réseau hydrographique composé de trois oueds principaux. Il s'agit de l'oued El Harrach, de l'oued djemaa, ainsi que de l'oued El hamiz. Ces cours eau jouent un rôle important dans le drainage de la plaine est influencent la dynamique hydrologique de région **[6]**

## 2.5. Les paramètres géomorphologiques

### 2.5.1. Paramètres géométriques :

- La surface

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

- Elle peut être déterminée en utilisant un planimètre sur cartes topographiques. **[12]**

- 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. **[12]**

**Tableau2 .1.** : Paramètres géométriques des sous bassins versants. **[12]**

| Sous bassins versants | Code | Surface ($km^2$) | Périmètre (km) |
|---|---|---|---|
| **Oued El Hamiz** | **02-06** | **283,21** | **102,11** |
| **Oued El Harrach** | **02-14** | **1236,28** | **188,71** |

**Source : ARNH**

### 2.5.2. Les 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. **[12]**

2.5.3. Les paramètres de relief

L e relief est défini comme étant la variation des altitudes ; ces variations influent sur des facteurs comme l'écoulement, les précipitations, la végétation etc. **[13]**

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

**Tableau 2.2.** Paramètres de forme et de relief des deux sous bassins versants (Oued El Hamiz et Oued El Harrach). **[13]**

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

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

-Les valeurs des pentes globales montrent que les deux sous bassins versants ont un relief faible, traduisant ainsi une infiltration favorable au dépend du ruissellement traduisant ainsi un temps de ruissellement long, ce qui indique une bonne possibilité d'infiltration des eaux superficielles. **[13]**

## 2.6. 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. . **[6]**

2.6.1. Paramètre climatologique :

2.6.1.1. Réseau pluviométrique :

Les quatre stations qui ont été retenues non seulement en fonction de leur bonne répartition dans le sous bassin versant de la Mitidja Est mais aussi de la fiabilité de leurs données. Nous avons donc choisi les stations et les postes suivants : l'Arbaa, Dar El Beida, Hamiz barrage et Reghaia. . **[6]**

**Tableau 2.3.** Caractéristiques des stations pluviométriques **[6]**

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

**Source : ARNH**

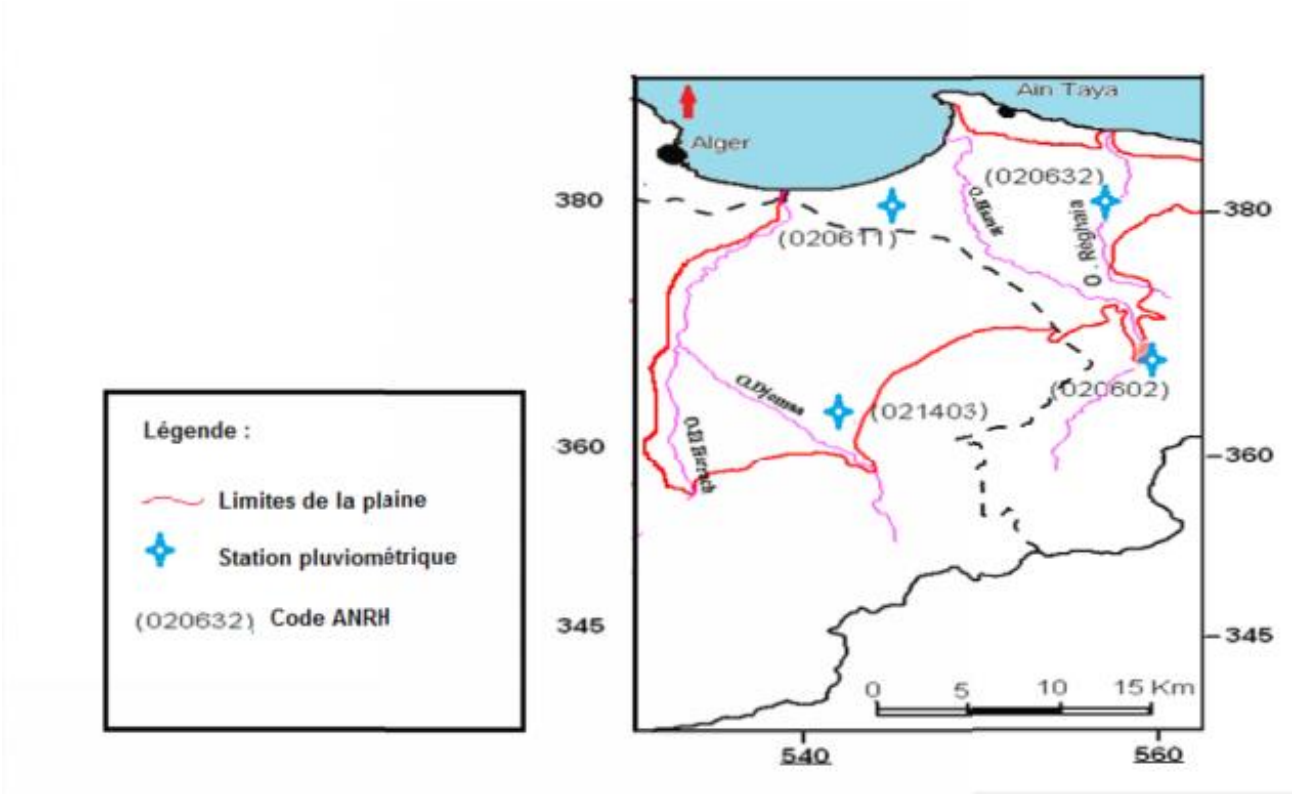



**Figure .13.**carte de la répartition des stations pluviométriques (ANRH) **[6]**

2.6.1.2. Les précipitations :

Les précipitations moyennes mensuelles sur une période d'observation de 28ans (1980 à2008) pour les quatre stations sont représentées dans **le tableau .4. (Les séries pluviométriques sont représentées dans l'Annexe). [6]**

2.7.1.3. Précipitations mensuelles et annuelles :

Les précipitations moyennes mensuelles et annuelles observées

Chaque station durant la période allant de 1980 à 2008 sont données dans le tableau suivant :

**Tableau2.4.** précipitations moyennes mensuelles et annuelles (1980--2008) **[6]**

| stations | S | O | N | D | J | F | M | A | M | J | J | O | Année |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **L'Arbaa** | **29** | **55.9** | **85.2** | **117.8** | **98.3** | **78.1** | **70.3** | **62.2** | **50.2** | **9.1** | **3.5** | **4.2** | **659.7** |
| **Dar El Beida** | **27.9** | **60.1** | **80.8** | **102.5** | **83.2** | **72.2** | **65.6** | **52.1** | **39.7** | **11.2** | **3.9** | **9.1** | **582.1** |
| **Hamiz Barrage** | **32.9** | **62.2** | **94.1** | **124.4** | **97.4** | **81.1** | **67.2** | **40.2** | **50.7** | **9.3** | **2.9** | **4.75** | **671** |
| **Reghaia** | **26.2** | **55.8** | **95.21** | **102.1** | **82.25** | **66.3** | **53.9** | **44.8** | **47.2** | **8.4** | **3.1** | **3.7** | **585** |

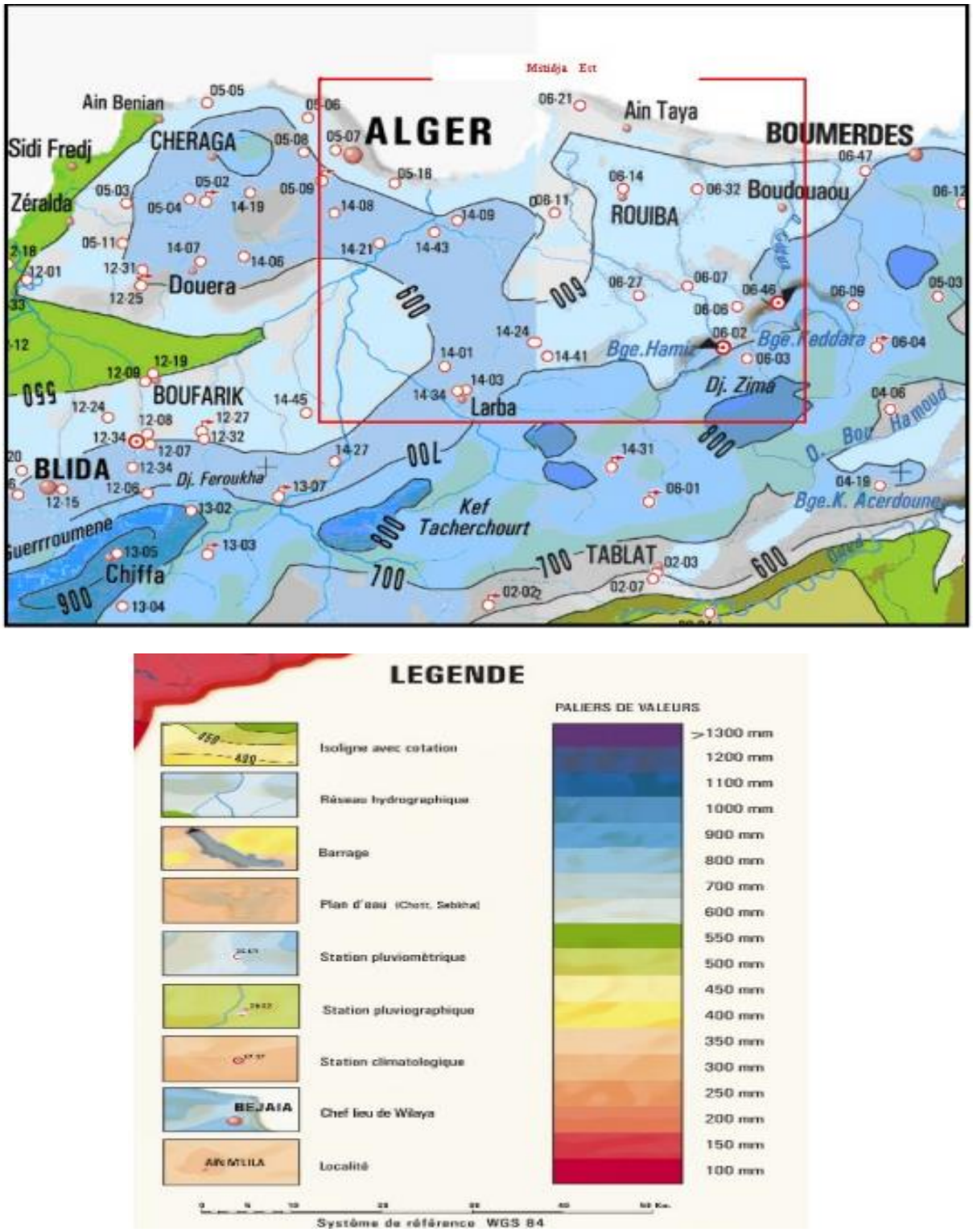



**Figure.14.** Carte pluviométrique de la Mitidja (ANRH 2008) **[6]**

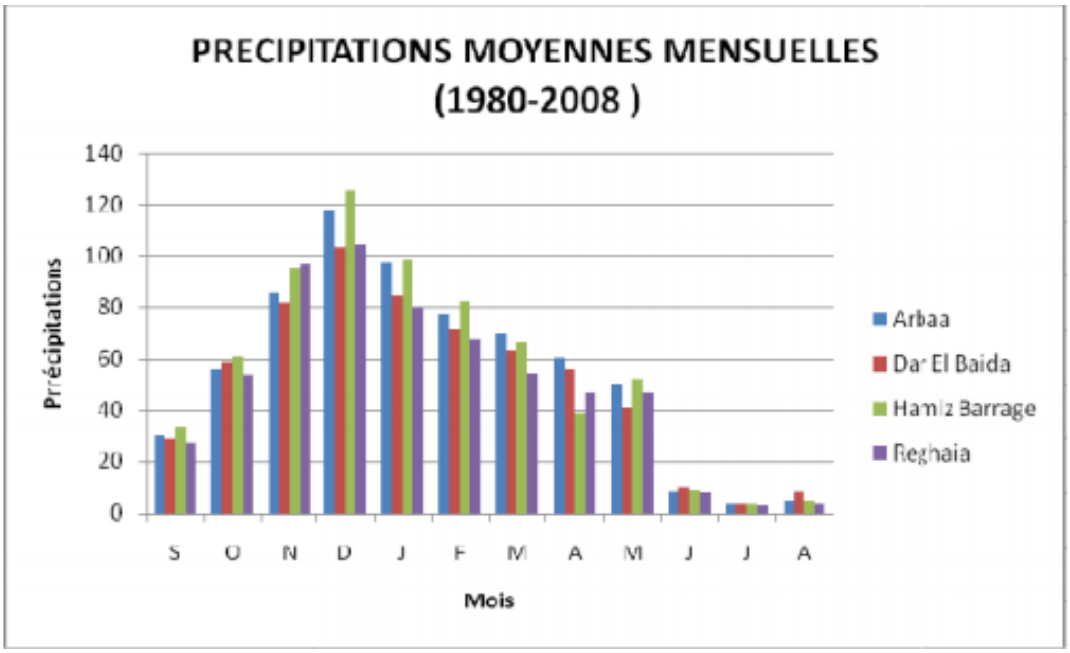



**Figure.15.** Précipitations moyennes mensuelles période (1980-2008) **[6]**

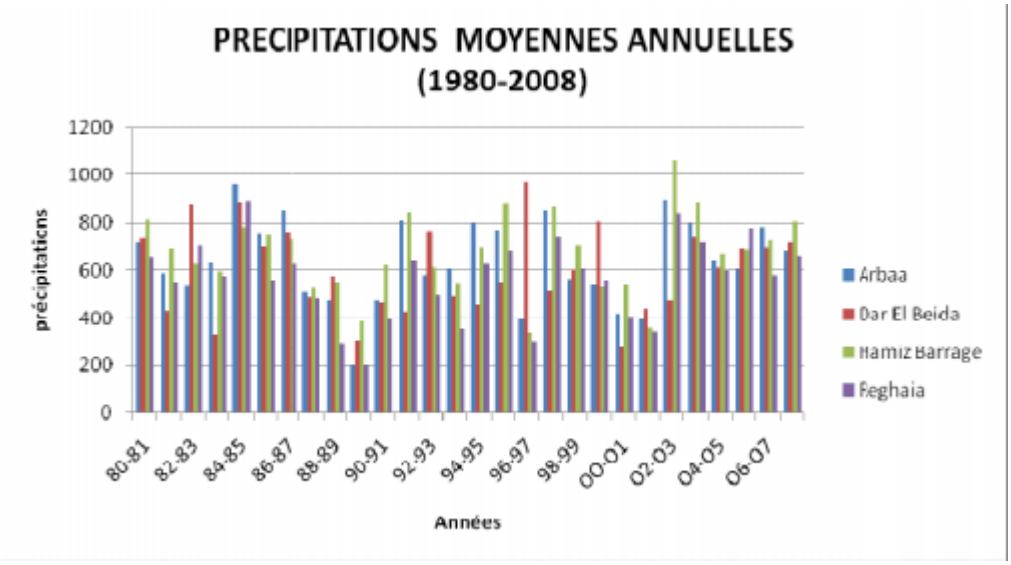



**Figure.16.** Précipitations moyennes annuelles période (1980-2008) **[6]**

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

**-station de l'Arbaa :**

La période (1980-2008) est caractérisée par une moyenne annuelle des précipitations de 659,7 mm/an et d'une moyenne mensuelle des précipitations plus élevée au mois décembre avec une valeur de 119 mm et plus faible au mois de juillet avec une valeur de 2,9mm. **[6]**

**- La Station de Dar El Beida :**

La moyenne annuelle des précipitations de la période (1980-2008) est de 582,1mm, la moyenne mensuelle des précipitations la plus élevée est celle du mois de décembre avec une valeur de 105 mm et la plus faible est celle du mois de juillet avec 3,5mm. **[6]**

**- La station de Hamiz Barrage :**

La moyenne annuelle des précipitations de la période (1980-2008) est de 671mm/an, cette période est caractérisée au mois de décembre par une moyenne des précipitations mensuelles la plus élevée de l'ordre de 124,9 mm, et au mois de juillet par une moyenne des précipitations la plus basse de l'ordre de 3,2 mm . **[6]**

**- La station de Reghaia :**

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

2.6.1.4. Evaluation de la lame d'eau précipité :

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

- La méthode Arithmétique
- La méthode de Thiessen
- La méthode des isohyètes **[6]**

➢ **La méthode arithmétique :**

La méthode la plus simple qui consiste à calculer la moyenne arithmétique des valeurs obtenues aux stations étudiées, s'applique uniquement si les stations sont bien reparties et si le relief du bassin est homogène**. [14]**

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

**Avec :**

P : précipitations moyennes annuelles (mm)

$P_i$ : précipitation moyenne annuelle de la station (mm)

n : nombre de stations considérées, dans notre cas n=4

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

**Tableau 2.5.**Calcul de la lame précipitée de la période (1980-2008) par la méthode arithmétique **[14]**.

| Station | Précipitations (mm) |
|---|---|
| **l'Arbaa** | **659.7** |
| **Dar El Beida** | **582.1** |
| **Hamiz Barrage** | **671** |
| **Reghaia** | **585** |
| | **599.45** |

D'où $P_i$=599,45 mm

- **La méthode du polygone de Thiessen :**

La méthode du polygone de Thiessen est la plus couramment utilisée, parce que son application est aisée et qu'elle donne de bons résultats. **[14]**.

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

**Avec:**

P: précipitations moyennes annuelles (mm)

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

Ai : surface du polygone (km2)

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

Les résultats du calcul apparaissent dans le tableau suivant :

**Tableau 2.6.**calcul de la lame précipitée par méthode Thiessen période (1980-2008) **[14]**.

| station | Surface de polygone ($km^2$) | précipitation | | Volume d'eau ($10.m^3$) |
|---|---|---|---|---|
| | | (mm) | (m) | |
| Arbaa | 159 | 659.7 | 6.597 | 1033.55 |
| Dar El Beida | 196 | 582.1 | 5.821 | 1140.91 |
| Hamiz Barrage | 32 | 671 | 6.71 | 214.72 |
| Reghaia | 88 | 585 | 5.85 | 514.8 |
| | Σst=472 | | | $\Sigma p_i s_i$=2903.98 |

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

## ➢ Méthode des isohyètes :

C'est la méthode la plus fiable, Le principe de cette méthode consiste à tracer les courbes d'égales hauteurs de précipitations à l'échelle du bassin étudié par triangulation et à déterminer les surfaces comprises entre deux isohyètes consécutifs**.[12]**

$$Lp= \Sigma(PiSi)/st$$

Avec :

Lp: Lame moyenne annuelle précipitée en mm.

Pi : Précipitation moyennes annuelles inter-isohyètes en mm.

Si : Surfaces inter-isohyètes considérés en km2

St : Surfaces totale du bassin versant en km2.

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

**Tableau 2.7**. Résultats obtenus par la méthode des Isohyètes. **[4]**

| Classes inter-isohyètes (mm | Précipitation $P_i$ | | Surface inter-isohyètes Si (Km2 | Volume d'eau Pi*Si (10 6m3) |
|---|---|---|---|---|
| | (mm) | (m) | | |
| 588 | 588 | 5.8 | 60.5 | 350.9 |
| 588-608 | 590 | 5.9 | 30.4 | 179.36 |
| 608-628 | 610 | 6.1 | 65.2 | 397.72 |
| 628-648 | 630 | 6.3 | 35.5 | 223.65 |
| 648-668 | 650 | 6.5 | 42.3 | 274.95 |
| 668 | 660 | 6.6 | 61 | 407.48 |
| | | | $S_i$=295 | $p_{iSi}$=1834 |

Soit : **Lp= Σ(PiSi)/st**

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

**Tableau 2.8.** Résultats obtenus par les 3 méthodes **[6]**.

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

2.6.2. Les températures :

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

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

**Tableau2.9.**Mensuelles des températures moyennes, maximales et minimales Période (sept 1980-aout 2008) Dar El Beida. **[6]**.

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

Moyenne Annuelle : 17.8°C.

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

Les valeurs des températures moyennes mensuelles de Dar El Beida pour la période (1980-2008) indiquées dans le graphe ci après : **[6]**.

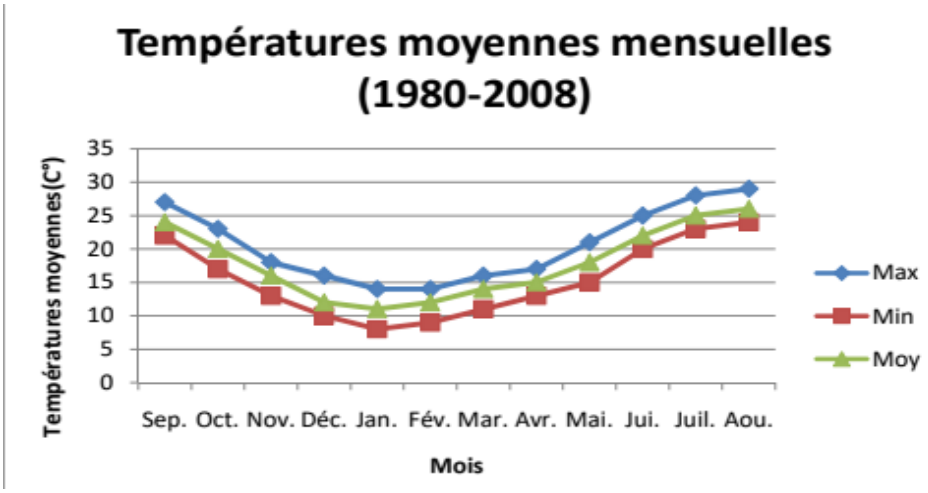



**Figure.17.**graphe des Températures moyennes mensuelles de Dar El Beida pour la période (1980-2008) **[6].**

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

1. **Une période froide** : depuis Novembre jusqu'à Avril avec une température moyenne inférieure à la température moyenne annuelle.

2. **Une période chaude :** de Mai jusqu'à Octobre dont la température moyenne est supérieure à la température moyenne annuelle. **[6]**.

2.6.3. Evapotranspiration ou déficit d'écoulement :

Il existe deux types d'évapotranspiration :

1. l'évapotranspiration potentielle.
2. l'évapotranspiration réelle. **[6]**.

### 2.6.3.1. Calcul de l'ETP :

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

**1. Application de la méthode de Thornthwaite :**

L'ETP est calculée par la formule :

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

**Avec :**

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

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

**i=** Indice thermique mensuelle

**T=** Température moyenne mensuelle en °C **[6]**.

**Tableau2.10.**Détermination de l'ETP par la méthode de Thornthwaite Période (1980-2008) **[6]**.

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

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

### 2.6.3.2. Evapotranspiration réelle (ETR)

L'évaluation de la lame d'eau évaporée se fera à partir de formules empiriques usuelles, il s'agit de celles de **Turc, Coutagne** et **Thornthwaite**. **[6]**.

1. **Formule de Turc :**

$$ETP=(p)/\sqrt{0.9+(p^2/L^2)}$$

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

**Avec :**

**ETR :** Evapotranspiration réelle moyenne annuelle en (mm)

**P :** précipitation moyenne annuelle en (mm)

**T :** température moyenne annuelle en (°c) ;

**P :** Pouvoir évaporant.

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

**2. Formule de Coutagne :**

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

**Dans laquelle**:

$\Lambda=(1)/(0.8+0.14T)$ Avec limite d'application **1/8 λ<P<1/2 λ**

**ETR :** évapotranspiration réelle en mm.

**P :** précipitation moyenne annuelle en mm.

**T :** température moyenne annuelle en °C. **[6]**.

**Tableau2.11.** résultats de l'ETR par la formule de Coutagne **[6]**.

| Paramètre | ג | 1/8ג | P(m) | 1/2ג | ETR (mm) |
|---|---|---|---|---|---|
| Résultats | 0.3 | 0.42 | 0.623 | 1.67 | 541 |

## Méthode de bilan hydrique de C.W Thornthwaite :

**Tableau2.12.**bilan hydrique de C.W Thornthwaite à la station de Dar El Beida (1980-2008) **[6].**

| | sep | oct | Nov | Déc. | Jan | Fev | Mar | Avr | Mai | Jui | Juil | Aou | Total |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **P** | **28.3** | **59.3** | **81.4** | **103.3** | **84.4** | **71.1** | **56.2** | **56.2** | **40.7** | **10.4** | **3.9** | **8.9** | **583.4** |
| **ETPc** | **110.57** | **7.47** | **42.58** | **27.19** | **22.56** | **23.94** | **51.92** | **51.92** | **76.47** | **109.36** | **150.21** | **146.7** | **879.1** |
| **ETR** | **28.3** | **59.3** | **42.58** | **27.19** | **22.56** | **23.94** | **51.92** | **51.92** | **76.47** | **86.88** | **3.9** | **8.9** | **472.04** |
| **Ru** | **0** | **0** | **38.82** | **100** | **100** | **100** | **100** | **100** | **61.18** | **0** | **0** | **0** | **-** |
| **Déficit** | **82.27** | **18.17** | **0** | **0** | **0** | **0** | **0** | **0** | **0** | **37.78** | **146.31** | **137.84** | **422.37** |
| **Excédent** | **0** | **0** | **0** | **9.02** | **61.84** | **47.16** | **4.28** | **0** | **0** | **0** | **0** | **0** | **145.6** |

**Tableau2.13.**Récapitulatif des résultats d'ETR par les différentes méthodes Pour la période (1980-2008). **[6]**.

| Paramètre | Méthodes | Résultats (mm) | (ETR/P)(%) |
|---|---|---|---|
| **ETR** | **Turc** | **500** | **80** |
| | **Coutagne** | **541** | **87** |
| | **C.W Thronthwaite** | **472.04** | **76** |

Nous retiendrons la moyenne arithmétique de ces trois méthodes, qui est de **504 mm [6]**

### 2.7. Bilan hydrologique :

La formule classique du bilan est la suivante :

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

**Avec :**

**P :** précipitation moyenne annuelle (mm) ;

**E :** évapotranspiration réelle moyenne annuelle (mm) ;

**R :** ruissellement moyen annuel (mm) ;

**I :** Infiltration moyenne annuelle (mm).

**Δs :** Variation des réserves qui tend vers zéro pour une période s'étalant sur plusieurs années. **[6].**

2.7.1. Estimation de la lame ruisselée :

La lame ruisselée est estimée à partir de la formule d'approximation de Tixeront-Berkaloff elle est donnée par l'expression suivante : **[6]**.

$$R=P^3/3(ETP)^2$$

**Avec :**

**P :** précipitation moyenne annuelle (mm) ;

**ETP :** évapotranspiration potentielle moyenne annuelle

L'application de cette formule nous donne les résultats suivants **: [6]**.

**Tableau.14.**valeurs de la lame d'eau ruisselée (1980-2008) **[6].**

| P (mm) | ETP (mm) | R (mm) |
|---|---|---|
| **623** | **879.11** | **104** |

Nous obtiendrons **R =104mm.**

2.7.2. Estimation de l'infiltration :

L'infiltration est évaluée à partir de l'équation du bilan ci-dessous : **[6]**.

$$I = P – (ETR + R) - \Delta S$$

**Avec :**

**I:** Lame infiltrée en mm

**P :** Lame précipitée en mm.

**ETR :** Evapotranspiration réelle en mm.

**R :** Lame ruisselée en mm.

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

Nous obtenons **I = 15 mm. [6]**.

**Tableau2.15.**récapitulations des différentes composantes du bilan hydrologique dans La station de Dar El Beida (1980-2008). **[6]**.

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

# CONCLUSION :

### Géomorphologie :

L'analyse des différents paramètres géomorphologiques a permis de dégager plusieurs caractéristiques du bassin versant étudié. L'indice de compacité de Gravelius révèle que ce bassin présente une forme allongée. Par ailleurs, la faible pente globale indique un temps de concentration des eaux de ruissellement relativement long. Enfin, la densité de drainage peu élevée témoigne d'un réseau hydrographique peu développé.

### Hydro-climatologie :

Grâce à sa proximité de la mer, la zone d'étude bénéficie d'un climat méditerranéen, marqué par des étés chauds et secs et des hivers doux et humides. La température moyenne annuelle sur la période 1980-2008 est estimée à 17,8 °C. La pluviométrie annuelle moyenne atteint environ 599,45 mm, avec des mois secs (juin, juillet, août) et des mois plus humides (novembre, décembre, janvier). La moyenne des précipitations, calculée selon trois méthodes (arithmétique, Thiessen et isohyètes), s'élève à 615 mm.

Pour le calcul des paramètres hydro-climatiques, la station de Dar El Beïda de l'ONM a été retenue comme station de référence. L'évapotranspiration potentielle (ETP), estimée à 879,11 mm, a été obtenue grâce à la formule de Thornthwaite. **[6]**.

# *CHAPITRE 3 :*

## *METHODOLOGIE DE TRAVAIL*

## Introduction

Sur le plan méthodologique ce travail est divisé en trois principales parties :

- Première partie : correspond à des missions de terrain sur la Baie d'Alger (Réseau d'observation de la nappe installé par l'ANRH : mesure physico chimique et profils de conductivité) réalisé par **[10, 15, 16, 17,18]**
- Deuxième partie : correspond à un travail analytique au laboratoire (analyses des échantillons d'eau)
- Troisième partie : elle consiste à un travail de bureau (traitement des données avec des logiciels (Arc GIS PRO 2020, SURFER 2016, DIAGRAMME et Photoshop CC 2020) pour divers domaines et traitement des données de résistivité recueilles lors des prospection géophysique par la méthodes électrique [**18]**

## 3.1. Partie Terrain

Des campagnes d'échantillonnages ont été effectuées sur le réseau piézomètres de la Baie d'Alger **(figure.24.)**Depuis 2010, 2016, 2019,2020**[18]**

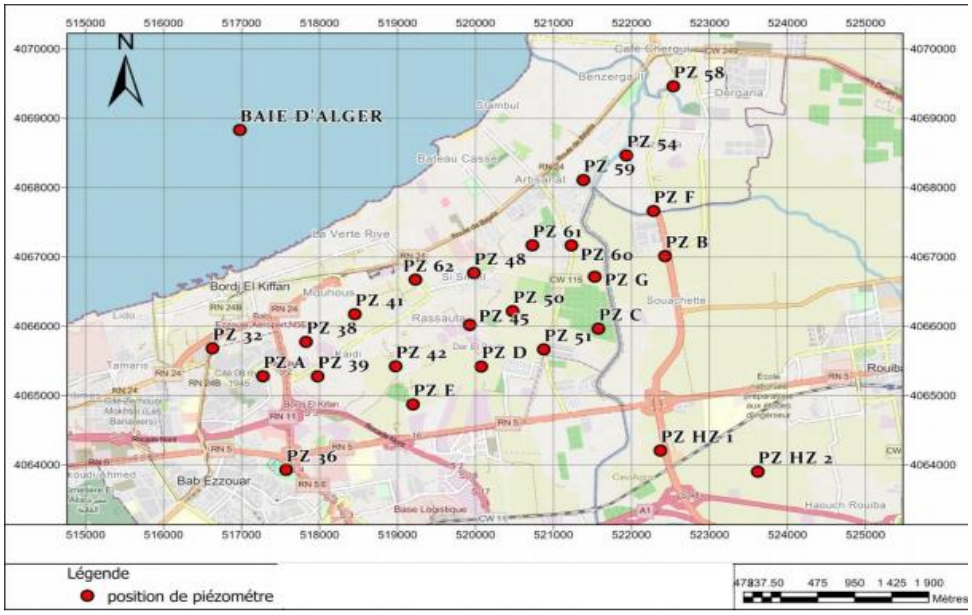



**Figure.18.** Réseau du piézomètre de la Baie d' Alger **[16,17]**

L'équipe de l'ANRH nous a accompagnés dans la réalisation de ces missions de terrain.

Cette équipe était composé de :

- Un Ingénieur hydrogéologue
- Un chauffeur.

### 3.1.1. Matériels utilisés :

Les missions de terrain ont étaient réalisé par le matériel suivant :

a) Véhicule de terrain :

**Figure.19.** Voiture utilisées pour le déplacement sur terrain **[18]**

b) Une sonde multi paramètres à différents profondeurs (CE, TDS et Température) :

**Figure.20.** Sonde multi paramètres utilisée pour la mesure de différents paramètres **[18]**

c) Escabeau :

**Figure.21.** Escabeau utilisé [**18]**

d) Une sonde multi paramètres sans fil :

**Figure.22.**Sonde utilisée pour les mesures sur terrain. [**18]**

e) Des flacons pour l'échantillonnage : (Capacité de 1.5 L)

**Figure.23.** Échantillons prélevés sur terrain avec l'étiquette. **[18]**

### 3.1.2. Mesure du niveau statique :

- À l'aide d'une sonde multi paramètres, nous avons mesurés le niveau statique dans chaque piézomètre dans le but de connaitre le niveau d'eau actuel de la nappe de la région de la Baie d'Alger. **[18]**

**Figure.24.**Mesures du niveau statique sur les piézomètres au niveau de la Baie d'Alger. **[18]**

**Tableau3.16.**Résultats de la compagne piézométrique sur terrain de la Baie d'Alger Février et Aout 2020. **[18]**

| Nom | Date | Profondeur du NS en mètre |
|---|---|---|
| **PZ58** | **17/02/200** | **11 ,75** |
| **PZ60** | **17/02/2020** | **21,5** |
| **PZ51** | **17/02/2020** | **26,55** |
| **PZD** | **18/02/2020** | **24,8** |
| **PZ48** | **18/02/2020** | **19,85** |
| **PZ40** | **18/02/2020** | **32,21** |
| **PZ38** | **18/02/2020** | **17,8** |
| **PZB** | **17/02/2020** | **25,2** |
| **PZF** | **17/02/2020** | **20,8** |
| **PZ36** | **18/02/2020** | **25,7** |
| **PZHAMIZ1** | **13/08/2020** | **34** |
| **PZHAMIZ2** | **16/08/2020** | **38,5** |
| **PZB** | **16/08/2020** | **26** |
| **PZ54** | **16/08/2020** | **13,7** |
| **PZ61** | **16/08/2020** | **18,6** |
| **PZ62** | **17/08/2020** | **21,1** |
| **PZ41** | **17/08/2020** | **24** |
| **PZE** | **17/08/2020** | **27** |

### 3.1.3. Mesure de la conductivité :

- À l'aide de la sonde multi paramètres a différent profondeur, nous avons mesuré la conductivité des piézomètres de baie d'Alger a diffèrent profondeur. **[18]**

### 3.1.4. Prélèvement des échantillons :

À l'aide de préleveur nous avons prélevé des échantillons dans quelque piézomètre et mesuré CE et TDS et pH des échantillons sur terrain :

**Figure.25.**Les échantillons **[18]**

- **Résultats de mesure de la conductivité des échantillons sur terrain**

**Tableau3.17.**Résultats de mesure de conductivité et TDS Février 2020[**18]**

| Nom | Profondeur (m) | CE (ms/cm) | TDS |
|---|---|---|---|
| **PZ 58** | **11.75** | **1.66** | **1098** |
| | **24.65** | **2.7** | **1850** |
| | **25.6** | **4.2** | **2900** |
| | **25.45** | **7.03** | **4640** |
| | **28** | **9.11** | **6010** |
| | **32.65** | **10.85** | **7200** |
| | **39.8** | **14.9** | **9830** |
| | **40.3** | **19.26** | **12650** |
| | **47** | **19.3** | **12710** |
| **PZ 60** | **21.5** | **2.5** | **1665** |
| | **26.5** | **32.4** | **3050** |
| | **32.4** | **7.92** | **5220** |
| | **44.6** | **11.22** | **7400** |
| **PZ51** | **26.55** | **3.84** | **2530** |
| | **40** | **2.46** | **1628** |
| **PZ D** | **24.8** | **2.58** | **1705** |
| | **34.1** | **3.1** | **2050** |
| | **37** | **4.41** | **2900** |
| | **38.5** | **5.44** | **3580** |
| | **40** | **7.08** | **4660** |
| | **44.6** | **8.44** | **5540** |
| | **60** | **8.62** | **5690** |
| **PZ 48** | **19.85** | **1.68** | **1111** |
| | **26.6** | **2.05** | **1362** |
| | **41.5** | **3.2** | **2350** |
| | **57** | **2.99** | **1975** |
| **PZ 41** | **32.21** | **2.58** | **1708** |
| | **68** | **2.58** | **1708** |
| **PZ 38** | **17.8** | **0.607** | **401** |
| | **28.3** | **0.876** | **578** |
| | **31.8** | **0.876** | **578** |
| **PZ B** | **25.2** | **2.98** | **1916** |
| | **39.3** | **3.13** | **2070** |
| | **66.1** | **2.61** | **1724** |
| **PZ F** | **20.8** | **1.794** | **1184** |
| | **24.1** | **5.94** | **4000** |
| | **25** | **7.04** | **4620** |
| | **25.7** | **7.4** | **4870** |
| **PZ 36** | **25.7** | **1.925** | **1271** |
| | **73** | **1932** | **1275** |

**Tableau3.18.**Résultats de mesure de conductivité et TDS Août 2020**[16, 17,18]**

| Nom | Profondeur (m) | CE (ms/cm) | TDS |
|---|---|---|---|
| **PZ HAMIZ1** | **34** | **0.037** | **21** |
| | **38** | **0.041** | **73** |
| | **41.4** | **1.54** | **1021** |
| | **58** | **1.56** | **1033** |
| | **76** | **1.58** | **1044** |
| **PZ HAMIZ2** | **38.5** | **1.73** | **1143** |
| | **48.8** | **1.92** | **1269** |
| | **52** | **1.92** | **1269** |
| **PZ B** | **26** | **3.54** | **2320** |
| | **41** | **3.13** | **2060** |
| | **67** | **3.09** | **2040** |
| | **72** | **3.11** | **2050** |
| **PZ 54** | **13.7** | **1.34** | **886** |
| | **24.1** | **2.38** | **15.73** |
| | **25.7** | **9.65** | **6320** |
| | **27.2** | **10.84** | **7260** |
| | **33.7** | **12.99** | **8570** |
| | **47** | **13.08** | **8700** |
| | **57** | **12.17** | **8030** |
| **PZ 61** | **18.6** | **1.78** | **1176** |
| | **21.2** | **2.51** | **1660** |
| | **22.5** | **4.73** | **3060** |
| | **24** | **5.06** | **3300** |
| | **63** | **5.18** | **3300** |
| **PZ 62** | **21.1** | **1.84** | **1216** |
| | **27.8** | **1.9** | **1256** |
| | **48** | **1.15** | **763** |
| | **50** | **1.15** | **763** |
| **PZ 41** | **24** | **1.66** | **1235** |
| | **24.5** | **2** | **1318** |
| | **38** | **2** | **1318** |
| **PZ E** | **27** | **2.57** | **1701** |
| | **53** | **2.57** | **1701** |

- À l'aide d'une sonde multi paramètres sans fil, nous avons mesuré le pH, conductivité et TDS de chaque échantillon sur terrain.

**Tableau3.19.**Résultats de mesure sur le terrain (Février et Aout 2020) **[18]**

| Piézomètre ou Forage | Date | Conductivité en µS/cm | TDS | pH |
|---|---|---|---|---|
| **PZ 38** | **18/02/2020** | **567** | **291** | **7.78** |
| **PZ 58** | **17/02/2020** | **1290** | **646** | **8.4** |
| **PZ D** | **18/02/2020** | **1985** | **996** | **7.3** |
| **F à100m du PZ D** | **18/02/2020** | **5490** | **2800** | **7.1** |
| **PZ B** | **16/08/2020** | **3210** | **1610** | **6.12** |
| **PZ 54** | **16/08/2020** | **1110** | **1110** | **7.4** |
| **PZ 61** | **16/08/2020** | **2850** | **2850** | **6.83** |
| **PZ 62** | **17/08/2020** | **1500** | **1500** | **6.6** |
| **PZ 41** | **17/08/2020** | **1403** | **1403** | **7.6** |
| **PZ E** | **17/08/2020** | **1530** | **1530** | **6.4** |

## 3.2.Partie géophysique

3.2.1. Introduction :

Plusieurs études géophysique par les méthodes électrique ont été lancés sur la baie d'Alger depuis le début au phénomène en 1983 /1985**[19]**, au milieu des années 1990 l'ANRH a lancé leur projet d'étude géophysique par la méthode de électrique [**20**], d'autres prospections ont été lancées en 2018[21]

L'examen de l'ensemble de ces données nous a permis d'établir des courbes échelonnages avec des forages sur la région ce qui a permis d'établir une échelle des résistivités.

3.2.2. Etude géophysique du phénomène de l'intrusion marine dans la Mitidja Est :

La géophysique est un outil complémentaire indispensable à une étude hydrogéologique, elle complète les données d'un forage quand la zone d'étude est vaste et complexe. Les irrégularités sont généralement détectées de même que pour la puissance, l'allure et la structure de la formation étudiée. **[22]**

3.2.3. Méthodes de prospection électrique :

Afin de cartographier l'avancé de l'intrusion des eaux de mer dans l'aquifère côtier de la Mitidja Est on a fait appel a une méthode géophysique qui est le sondage électrique vertical, La mesure de la Résistivité électrique s'effectue généralement à l'aide du quadripôle de Schlumberger **(Figure.32)**, son principe consiste à envoyer à partir de la surface un courant électrique d'intensité I, crée par un générateur (piles accumulateur) à l'aide de deux électrodes A et B. les électrodes de Réception M et N permettent de mesurer la différence de potentiel ΔV provoquée par le passage courant **(Figure.33)**. On obtient la résistivité apparente grâce à la formule suivante : **[22]**

$$\rho a = K \times \Delta v / I$$

Ou : K = est coefficient qui ne dépend que de la géométrie du dispositif, pour le dispositif de

Schlumberger (K = π AM.AN / MN pour un quadripôle symétrique).

ΔV et I sont mesurés respectivement à l'aide d'un voltmètre et d'un ampèremètre. La

Profondeur d'investigation d'un tel dispositif est fonction de l'écartement des électrodes d'émission A et B, ainsi que des épaisseurs et des résistivités des formations sont approximativement et empiriquement de l'ordre de (1/4 à 1/10)*AB. **[22]**

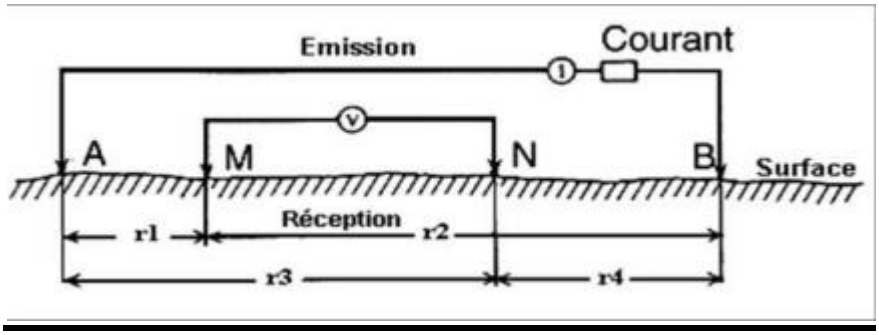



**Figure.26.**Le dispositif quadripôle de Schlumberger **[15]**

**Figure.27.**Les matériel prospection électrique (résistivimétre).

Lorsque les filets de courant circulent entièrement dans un même niveau homogène, la résistivité mesurée correspond à la résistivité vraie de terrain, c'est le cas notamment des mesures test ou paramétriques effectuées sur des formations sub-affleurantes, d'épaisseurs et d'extensions suffisamment importantes par rapport à l'écartement de la ligne d'émission(AB). Généralement les filets de courant traversent plusieurs horizons différents, dans ce cas, la résistivité est fonction des résistivités de différentes couches et de leurs épaisseurs. Les résistivités mesurées sont dites résistivités apparentes, grâce à ces valeurs que nous essayons de déterminer les résistivités vraies ρ i et les épaisseurs hi caractérisant chaque niveau.

La présence d'une structure dans le sol se manifeste par une anomalie de la résistivité apparente ρa dépendant de nombreux paramètres (dimension et profondeur de la structure, dimensions du dispositif, contraste électrique entre la structure et le milieu environnement.

Afin de déduire des informations concernant les causes des anomalies observées sur le terrain, il est nécessaire de connaître la relation qui existe entre une structure et son anomalie.

Pour cela deux techniques sont employées, le traîné et le sondage électrique vertical, en effet ces deux méthodes sont complémentaires.

Si le sous-sol est homogène et isotrope, avec un dispositif de ce type on obtiendra la

Résistivité vraie, Si par contre, le sous-sol est hétérogène, on mesurera la résistivité apparente, qui est fonction de la nature du sous-sol et de la dimension du dispositif utilisé (le Schlumberger: La distance MN est petite par rapport à AB.

En général MN < AB/5). **[22]**

**a. Le traîné électrique.**

Dans la technique du traîné le dispositif AMNB est déplacé à travers champs. Selon des profils plus au moins parallèles, tout en gardant constant l'espacement AB. La mesure ainsi obtenue correspond au centre. Les horizons géologiques explorés par cette méthode correspondent à une profondeur à peu près constante. Les résultats de résistivité apparente sont reportés sur des cartes et permettent de déduire les niveaux de même résistivité électrique et de délimiter leurs extensions. Ces cartes constituent un document qui complète l'interprétation géologique et permettent de faire un choix sur les emplacements éventuels de sondages électriques. **[22]**

**b. Le sondage électrique vertical.**

Dans la méthode du sondage électrique on recueille des informations géologiques à la verticale d'un point donné, en poussant l'investigation toujours plus profondément. Pour cela, on effectue une série de mesures en agrandissement à chaque fois la longueur de la ligne d'émission AB, tout en gardant fixe le centre du dispositif.

En reportant, sur un graphe bi-logarithmique, les valeurs des résistivités apparentes mesurées en fonction de la longueur de ligne AB ; on obtient une courbe du sondage électrique dont l'interprétation va servir à déterminer graphiquement les résistivités ρi et les épaisseurs hi des différents niveaux lithologiques. **[22]**

## 3.3. Partie Laboratoire :

Nous avons participé au laboratoire de l'ANRH avec l'équipe pour faire les analyses physico chimiques.

**Figure.28.** Laboratoire de l'ANRH **[18]**

**Figure.29.** Échantillons au laboratoire **[18]**

### 3.3.1. Dosage quelque élément chimique :

## a) Dosage des chlorures :

- Principe :

Les chlorures, en présence du Thio cyanate mercurique et de l'alun ferrique donnent en milieu nitrique acide un complexe coloré orange susceptible d'un dosage colorimétrique à la longueur d'onde de 470 nm.

- Mode opératoire :

On place les PE (5ml) dans des erlens de 50ml.

Les PE des solutions étalons, le témoin (H2O) et les échantillons sont alors traités de manière identique à savoir:

On ajoute dans l'ordre 15ml de la solution de Thio cyanate mercurique préalablement diluée au 1/3 puis 15ml de la solution nitrique d'alun ferrique également diluée au 1/6.

On agite vigoureusement les erlens pour uniformiser la coloration qui apparaît et on laisse au repos pendant ½ heure.

- On effectue les lectures au colorimètre à la longueur d'onde de 470nm en réglant le zéro avec le témoin. **[18]**

**b) Dosage des sulfates :**

- Principe :

Les sulfates sont précipités sous forme de sulfate de baryum par le chlorure de baryum. Le précipité ainsi obtenu, très fin est stabilisé par la gélatine. On effectue sur le trouble une mesure turbidi-métrique à la longueur d'onde de 495nm.

- Mode opératoire :

On place les PE (5ml) dans des erlens de 50ml

Les PE des solutions étalons, le témoin (H2O) et les échantillons sont alors traités de manière identique à savoir:

On ajoute à chaque PE 20ml de la solution de BaSO4 et de gélatine préalablement diluée au 1/6.

On agite pour uniformiser le trouble et on laisse au repos pendant 20 minutes jusqu'à la mesure. Une nouvelle agitation aurait comme conséquences la formation de bulles d'air et par conséquent une perturbation des mesures.

- On effectue les lectures au colorimètre à la longueur d'onde de 495nm en rélant le zéro avec le témoin. **[18]**

**c) DOSAGE DES NITRATES :**

- Principe :

Les nitrates sont réduits en nitrites par une solution d'hydrazine en milieu alcalin et en présence de sulfate de cuivre comme catalyseur.

Les nitrites obtenus sont alors dosés par colorimétrie: diazotation avec l'acide sulfanilique et capulation avec Naphtylamine. On mesure la densité du colorant ainsi formé à 520nm.

- Mode opératoire :

Dans un erlen de 100ml, ou mieux dans un flacon en verre brun de 100ml, introduire:

→ PE = 1ml

→Solution de Soude 0,05M = 5ml

→Mélange Réducteur = 5ml

Agiter après chaque addition et attendre 1 heure avant d'ajouter:

→ Mélange colorant = 40ml

laisser la coloration se développer dans l'obscurité pendant ¼ heure. Mesurer sa densité à 520nm. Le passage au colorimètre ne doit intervenir que juste avant la mesure optique afin que la solution soit exposée un minimum de temps à la lumière à laquelle elle est très sensible. La réduction des nitrates est partielle et varie avec le temps et la température. Il importe donc que la mesure des échantillons soit toujours accompagnée d'une mesure des solutions étalons, traitées dans les mêmes conditions **[18].**

**Tableau3.20.** Résultats des analyses physico chimique de l'année 2020**[18]**

| Nom | pH | CE 25C | Ca | Mg | Na | K | $HCO_3$ | Cl | $SO_4$ | $NO_3$ | TAC |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **PZ 54** | **8.1** | **1058** | **24** | **30** | **140** | **5** | **106.75** | **183** | **105** | **1** | **8.75** |
| **PZ B** | **8.3** | **4170** | **160** | **240** | **320** | **0** | **231.8** | **1075** | **284** | **120** | **19** |
| **PZ E** | **8.1** | **1894** | **96** | **86.4** | **139** | **2** | **311.1** | **193** | **245** | **66** | **25.5** |
| **PZ 32** | **8** | **1520** | **80** | **96** | **85** | **2** | **237.9** | **162** | **277** | **20** | **19.5** |
| **PZ 61** | **8.2** | **3300** | **304** | **19.2** | **281** | **1.5** | **244** | **700** | **319** | **67** | **20** |
| **PZ 62** | **8.1** | **1600** | **112** | **62.4** | **118** | **6.5** | **274.5** | **159** | **245** | **33** | **22.5** |
| **PZ 41** | **8.2** | **1700** | **104** | **91.2** | **114** | **4** | **323.3** | **223** | **277** | **8** | **26.5** |
| **PZ 38** | **8** | **502** | **40** | **24** | **32** | **14** | **152.5** | **77** | **30** | **0** | **12.5** |
| **PZ 58** | **8.3** | **1322** | **30** | **42** | **151** | **20** | **137.25** | **265** | **87** | **0** | **11.25** |
| **PZ D** | **7.75** | **2050** | **252** | **16.8** | **125** | **2.2** | **198.25** | **430** | **109** | **41** | **16.25** |
| **PZ D/FORAGE** | **7.62** | **6450** | **624** | **105.6** | **525** | **6** | **228.75** | **1755** | **472.5** | **66** | **18.75** |

## 3.4. Partie Logiciel :

Pour traitement des données piézométrique et de relevé des profile de conductivité et les données des analyse chimique on nécessite utilisation d'un certain nombre de logiciel qui sont :

### 3.4.1. Logiciel ARCGIS PRO :

Le système Arc GIS Pro est la plateforme technologique SIG, Ce système est composé de différentes plateformes qui permettent aux utilisateurs SIG, qu'ils soient bureautiques, web, ou mobiles, de collaborer et de partager l'information géographique.

Le système Arc GIS Pro permet de :

**Gérer des données :** Arc GIS peut organiser et gérer n'importe quelle information géographique pour supporter des applications de visualisation et d'analyse.

- **Faire des analyses spatiales :** Arc GIS Pro fournit un jeu d'outils complet de modélisation d'information géographique pour soutenir des décisions intelligentes et rapides.
- **Cartographier :** Arc GIS Pro offre de puissants outils de visualisation et de cartographie pour une utilisation d'entreprises ou scientifiques. Il est possible d'interagir avec les données, visualiser des changements au cours du temps et dans l'espace. **[18]**

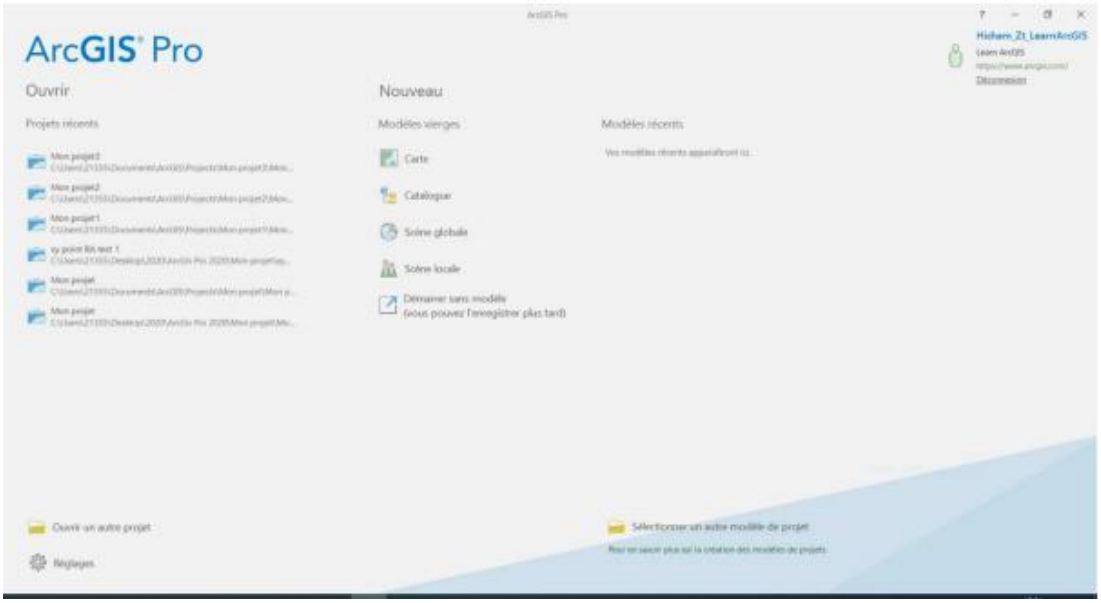



**Figure.30.** Interface de Logiciel ARC GIS PRO **[18]**

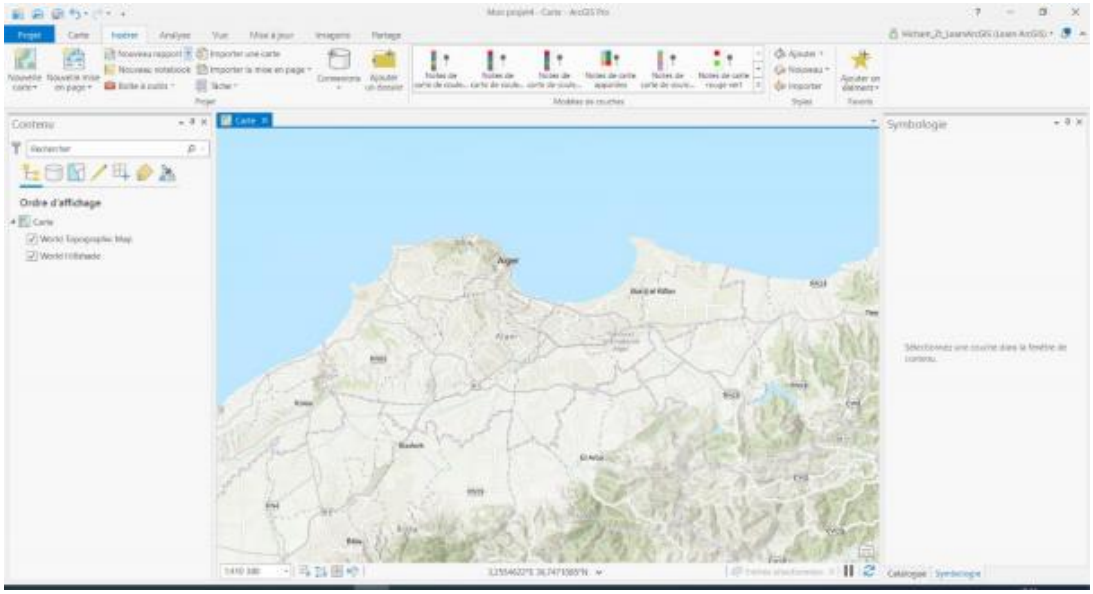


**Figure.31.**Interface de commande de logiciel ARCGIS PRO **[18]**

## 3.4.2. Logiciel SUFER 2016 :

Surfer est un logiciel qui propose un ensemble de fonctions de visualisation 3D, de contournage et de modélisation de surface fonctionnant sous Microsoft Windows. Surfer est largement utilisé pour la modélisation de terrain, la modélisation bathymétrique, la visualisation de paysages, l'analyse de surfaces, la cartographie de courbes de niveau, la cartographie de bassins versants et de surfaces en 3D, le maillage et la volumétrie.

- Le moteur d'interpolation sophistiqué de Surfer transforme vos données XYZ en cartes de qualité publication. Surfer propose davantage de méthodes de maillage et de contrôle sur les paramètres de maillage, y compris les variogrammes (krigeage) personnalisés, que tout autre progiciel disponible sur le marché. **[18]**

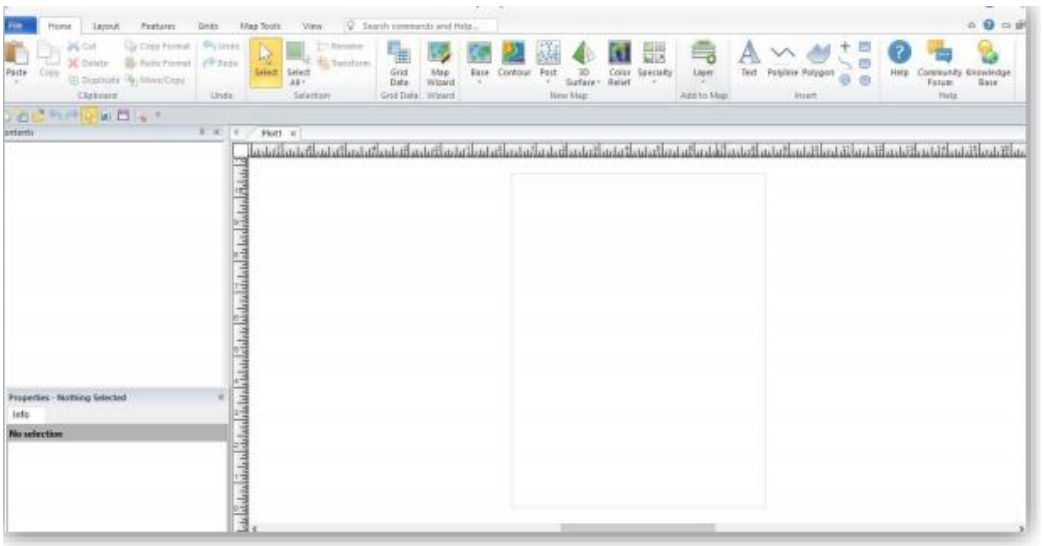


**Figure.32.** Interface de logiciel Surfer **[18]**

### 3.4.3. Logiciel Diagramme :

- Pour pouvoir analyser d'importantes données obtenues et en sortir le plus d'informations en peu de temps, il a fallu utiliser des outils efficaces et rapides, Le principal outil utilisé est le logiciel Diagrammes, crée par Roland Simler (2013) du Laboratoire d'Hydrogéologie d'Avignon. **[18]**

C'est un logiciel d'hydrochimie en distribution libre, facilitant l'exploitation des données d'analyse d'eau et consultable sur le site : www.lha.univ-avignon.fr/LHA-Logiciels.htm.

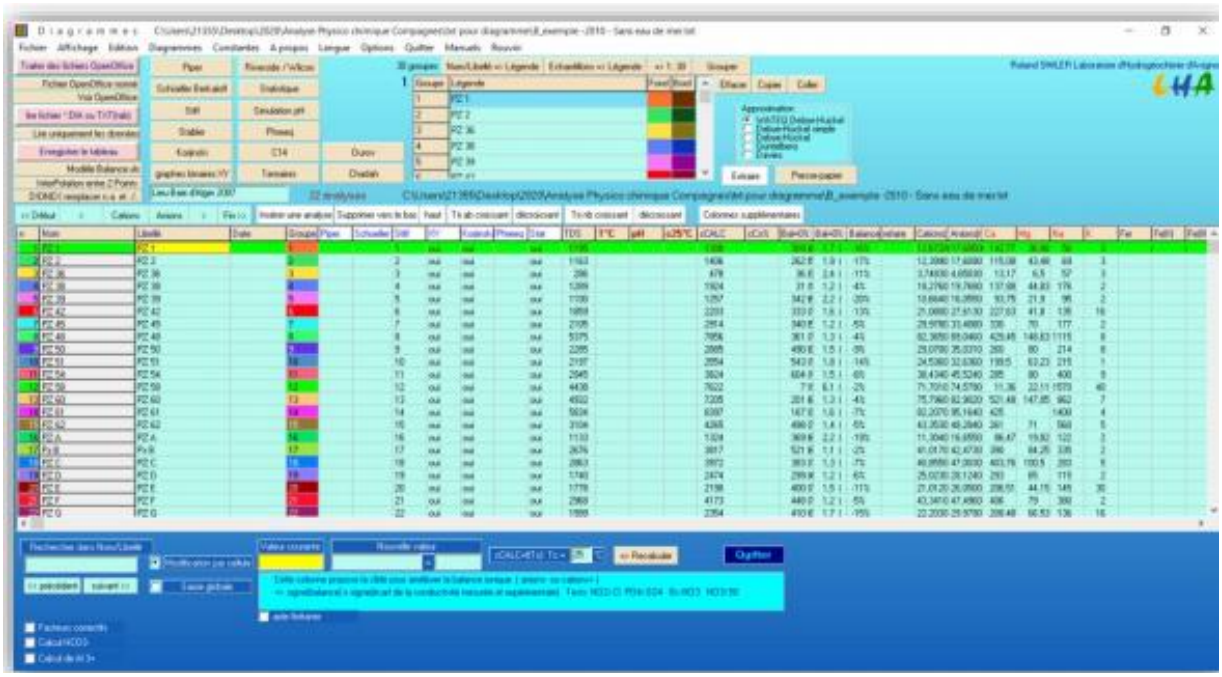


**Figure.33.**Interface de commande du logiciel Diagrammes **[18]**

### 3.4.4. Logiciel Photoshop CC 2020 :

. Le Photoshop est un logiciel professionnel de conception d'imagerie et de design graphique, de la retouche photo à la peinture digitale, en passant par la composition, le graphisme et l'animation.

- Grâce à Photoshop, Ce Logiciel a permis d illustrer le phénomène de l'intrusion marine sous forme des images démonstrative simple montrant le phénomène. **[18]**

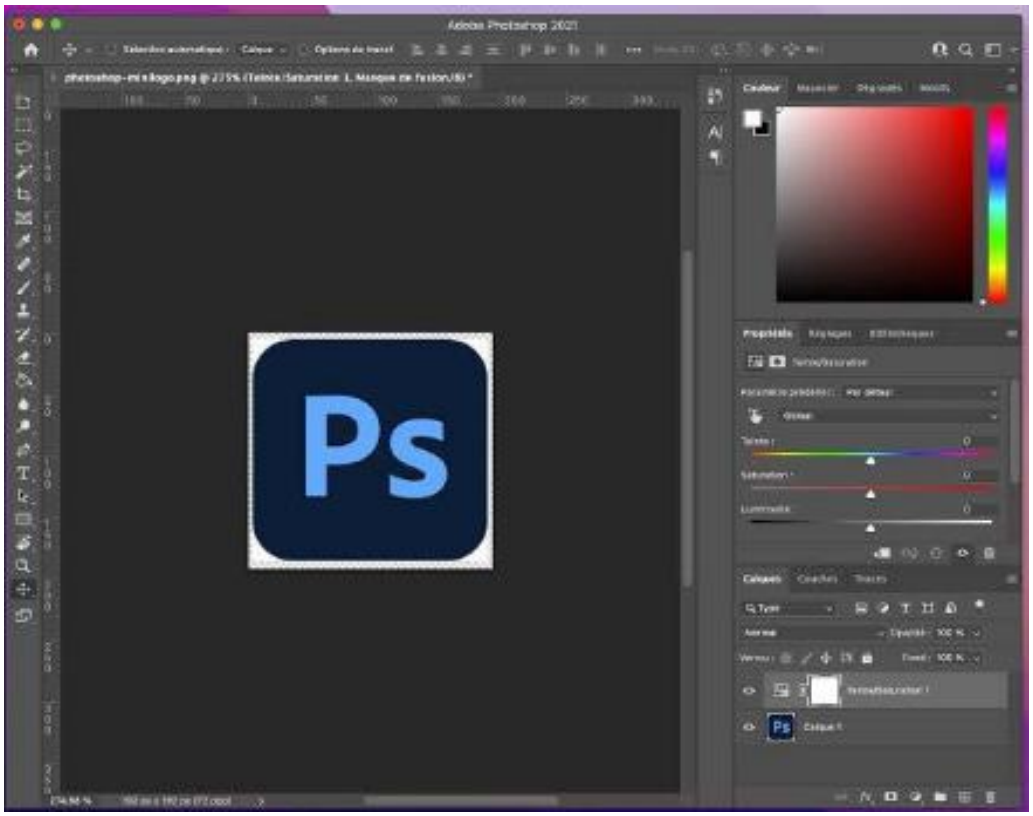


**Figure.34.** Interface de commande du logiciel Photoshop CC 2020**[18]**

# *CHAPITRE 4:*

# RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

## Introduction

Dans ce chapitre nous utiliserons trois approche afin d'appréhender le phénomène, à savoir

- Approche géophysique
- Approche hydrodynamique
- Approche hydrochimique (profils à la conductivité) : **[18]**

## 4.1. Approche géophysique

### 4.1.1. Introduction :

La géophysique appliquée (notamment la méthode électrique) permet d'étudier l'intrusion marine en analysant la répartition des résistivités des formations aquifères le long de la côte.

Dans ce cadre, une campagne de prospection par sondages électriques verticaux (SEV) a été réalisée sur l'ensemble de la baie d'Alger. **[22]**

### 4.1.2. Etalonnage du sondage électrique :

Pour l'établissement d'une échelle des résistivités qui sera utilisée lors de l'interprétation des sondages électriques et en raison de la particularité géologique et hydro chimique (présence d'eau salée) dans les secteurs étudiés, nous nous sommes basés sur les sondages étalons réalisés à proximité des forages et les données des travaux antérieurs réalisés dans la région d'études. [**22]**

## a)Etalonnage du sondage électrique A1 à l'aide de forage E7-7395 :

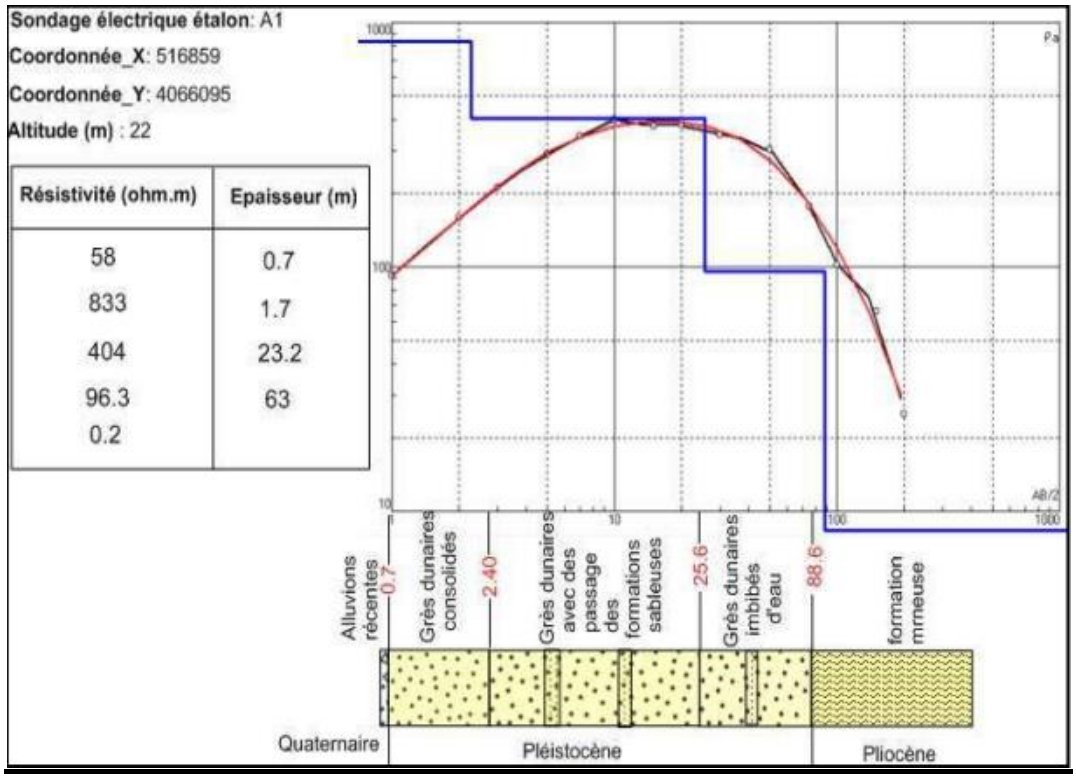



**Figure.35.**Etalonnage du sondage électrique A1 à l'aide de logiciel 1*1D **[22]**

**Tableau4.21.** Description de Sondage étalon A1 **[22]**

| Terrain | Description |
|---|---|
| **1** | **Une formation alluvionnaire constituée d'argiles et de sables présente une résistivité de 58Ω.m et une épaisseur de 0.7m contribuée au quaternaire récent** |
| **2** | **Terrain très résistant constitué de grés dunaires consolidés de Pléistocène d'une épaisseur de 1.7m et une résistivité de 833Ω.m** |
| **3** | **Terrain très résistant constitué de grès dunaires avec une intercalation de formations sableuses ou la résistivité enregistrée est de 404Ω.m avec une épaisseur de 23m représente le pléistocène** |
| **4** | **Terrain constitué de grès dunaires imbibés d'eau douce d'une épaisseur de 63m et une résistivité de 96.3Ω.m** |
| **5** | **Substratum marneux d'une résistivité de 0.2 Ω.m contribué au pliocène** |

## b) Etalonnage du sondag33e électrique A2 à l'aide de Piézomètre PZ 39 :

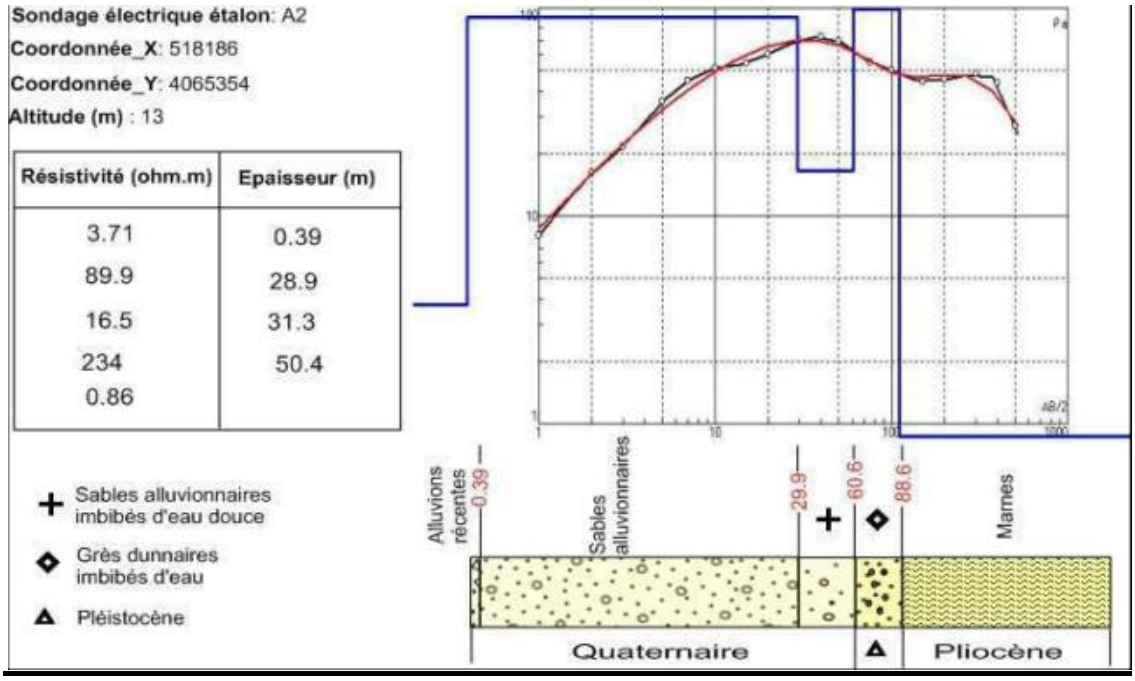



**Figure.36.**.Etalonnage du sondage électrique A2 à l'aide de logiciel 1*1D **[22]**

**Tableau4.22.**Description de sondage étalon A2 **[22]**

| Terrain | Description |
|---|---|
| **1** | **Terrain conducteur d'une résistivité de 3.71 Ω.m et une épaisseur de 0.39m. attribué au quaternaire, constitué d'alluvions récente essentiellement argileux.** |
| **2** | **Terrain résistant constitué de sables alluvionnaires de quaternaire d'une épaisseur de 28.9m et une résistivité de 89.9 Ω.m** |
| **3** | **Terrain conducteur d'une résistivité 16.5 Ω.m avec une épaisseur de 31.3m constitué de sables alluvionnaires imbibés d'eau.** |
| **4** | **Terrain très résistant de Pléistocène d'une résistivité de 234 Ω.m et une épaisseur de 50.4m constitué de grès dunaires imbibés d'eau** |
| **5** | **Substratum marneux très conducteur de pliocène d'une résistivité de 0.86 Ω.m** |

**c)Etalonnage du sondage électrique B4 à l'aide de forage F2 HZ :**

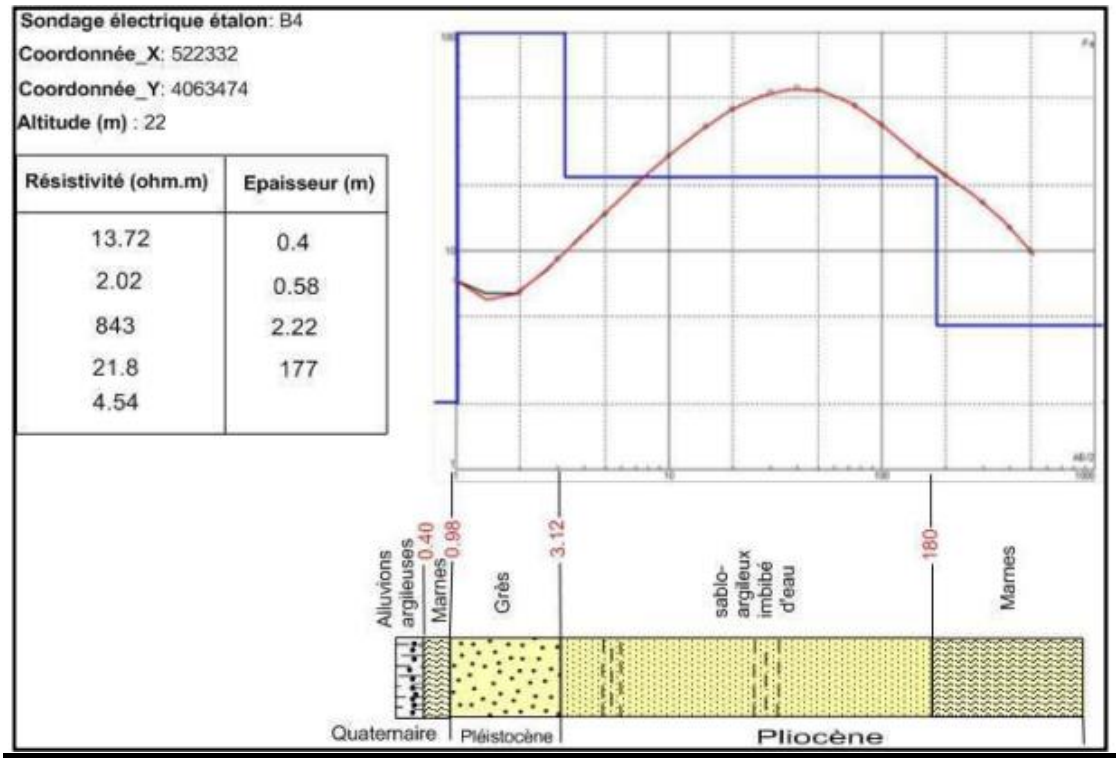



**Figure.37.** Etalonnage du sondage électrique B4 à l'aide de logiciel 1*1D **[22]**

**Tableau4.23.** Description de sondage étalon B4 **[22]**

| Terrain | Description |
|---|---|
| **1** | **Terrain conducteur d'une résistivité de 13.72 Ω.m et une épaisseur de 0.4m. attribué au quaternaire, constitué d'argile alluvionnaire.** |
| **2** | **Niveau très conducteur d'une résistivité de 2.02 Ω.m et une épaisseur de 0.58m ; c'est une formation marneuse.** |
| **3** | **Niveau très résistant d'une résistivité de 843 Ω.m et une épaisseur de 2.22m constitué de grès de Pléistocène.** |
| **4** | **Terrain conducteur constitué par des formations sablo-argileux d'une résistivité de 21.8 Ω.m et une épaisseur de 177m contribué au pliocène.** |
| **5** | **Substratum marneux très conducteur d'une résistivité de 4.54 Ω.m** |

4.1.3. Echelle des résistivités :

Echelle des résistivités adoptée d'après la description des sondages étalons est la suivante :

**Tableau4.24.** Echelle des résistivités **[22]**

| **Age** | **Lithologie** | | **Résistivité (Ω.m)** |
|---|---|---|---|
| **Quaternaire** | **Alluvions** | **Argilo-sableuses** | **10-58** |
| | | **Argileuses** | **3-15** |
| | | **Graviers argileuses** | **10-96** |
| | **Marnes** | **Formations marneuses, argilo-marneuses** | **2-5** |
| **Pléistocène** | **Grès** | **Grès dunaires sains** | **830** |
| | | **Grès dunaires avec de passages des sables** | **200-400** |
| **Pliocène** | **Sablo-argileux** | | **20-40** |
| | **Argilo-marneux** | | **10-20** |
| | **Marnes** | | **<5** |

## 4.1.4. Interprétation des cartes et coupes géoélectriques

- Carte des résistances transversales :

L'examen de la carte de la résistance transversale réalisée par CGG 1969 montre

Que la RT varie de 4 à 22.103 Ohm m2 . Les zones conductrices où RT est comprise entre 16000 et 22000 Ohm. M² apparaissent au niveau de des axes des oueds : El Hamiz, Oued El Harrach, et au Nord-est de l'Arbaa.

-Au niveau du Hamiz, la RT varie de 4 à 22.103 Ohm $m^2$. Ces grandes valeurs se surimposent sur l'axe de l'oued Hamiz, ce qui reflète l'importance de la formation aquifère dans la zone.

-Les mêmes valeurs de RT au niveau de l'axe d'Oued d' El Harrach(Barraki), ce qui traduit par l'existence d'horizons aquifères épais et résistants, la RT est de 22.103 Ohm $m^2$.

-An Nord-est de l'Arbaa, les valeurs de RT varient entre 4 et 16.103 Ohm $m^2$.

D'après la CGG, 1968 ; la cause de cette valeur importante de RT serait due à la remontée du Substratum, vérifiée par (Mac Donald and Partner, 1992) et par les conditions lithologiques Locales qui sont très compliquées. **[23]**

- Examen des coupes géoélectriques

Les coupes géo électriques sont représentées à l'échelle 1/1000 pour les distances et 1/10000 Pour les hauteurs, orientées N-S et S-N **(figure.44.).**

Ces dernières reflètent l'extension verticale et horizontale des faciès précédents, à savoir :

-La première couche correspondant à la couverture superficielle hétérogène, constitué par des Alluvions argileuses dans la partie Sud, et alluvions limono sableuses avec des matériaux Grossiers (galets, graviers, sable) dans la partie Nord. Ce niveau est d'une résistivité de 15 à 100 Ohm m, et il représente le remplissage alluvial de la Mitidja.

-La deuxième couche correspondant à la formation astienne avec une résistivité de 70 à 100 Ohm. $M^2$. Ce niveau est surmonté par le niveau conducteur qui correspond à la formation d'El Harrach d'une résistivité de 10 à 30 Ohm m. **[23]**

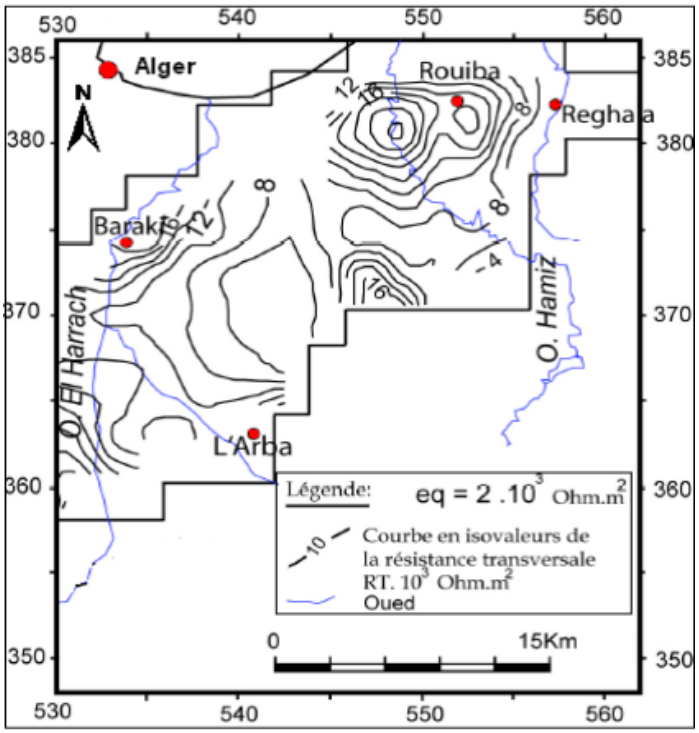



**Figure.38.** Carte de la résistance transversale(RT) correspond aux horizons profonds (Astien et les alluvions du quaternaire) (CGG, 1969). **[23]**

-Le substratum présente un toit subhorizontal, il est relativement conducteur et composé d'argiles plais anciennes, qui devient marneux d'âge Miocène dans la rive Sud de Khmis El Khechna et Meftah **(Figure 45a). [23]**

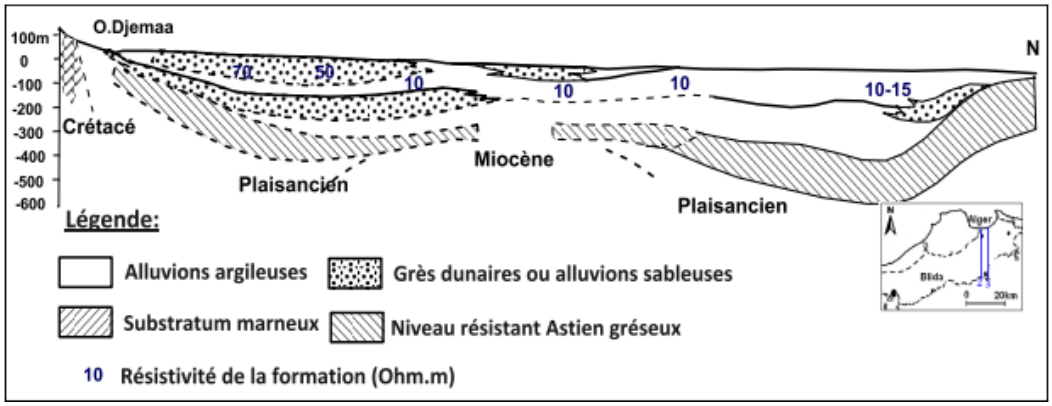



**Figure. 39. a**. Coupe géoélectriques dans la partie Est de la plaine de la Mitidja (CGG, 1969). **[23]**

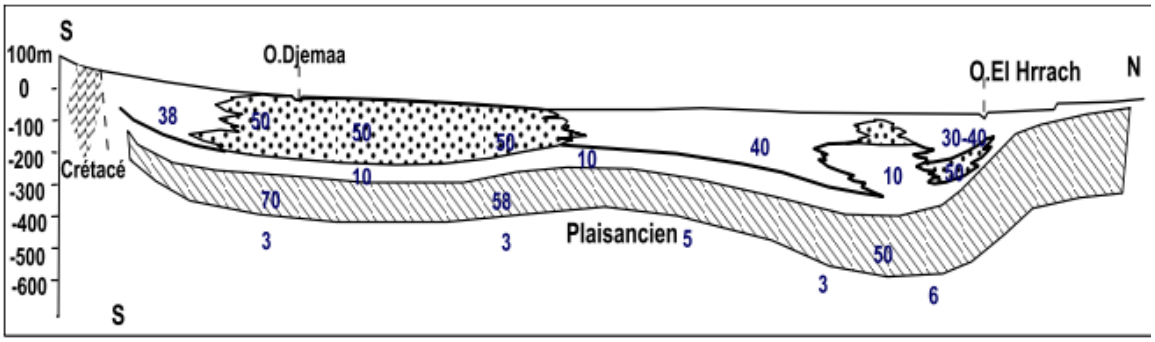



**Figure.39 .b**.Coupe géoélectriques dans la partie Est de la plaine de la Mitidja (CGG, 1969). **[23]**

- Carte du mur des alluvions de la Mitidja :

Cette carte nous donne l'allure générale du remplissage quaternaire, qui est dominé par les alluvions argileuses dans l'ensemble de la plaine de la Mitidja, sauf dans certaines parties où les dépôts grossiers anciens, cônes de déjections, viennent s'intercaler parfois sur de grandes épaisseurs **(Figure.46.)**.

D'après cette carte, on peut distinguer une zone de dépression sous forme de lentille d'extension régionale de Rouïba à Sidi Moussa d'une cote moyenne de -100 m. Au niveau des bordures Sud-est, on remarque un amincissement de cette formation, ce qui reflète l'allure générale en forme de cuvette allongée de direction WSW – ENE. **[23]**

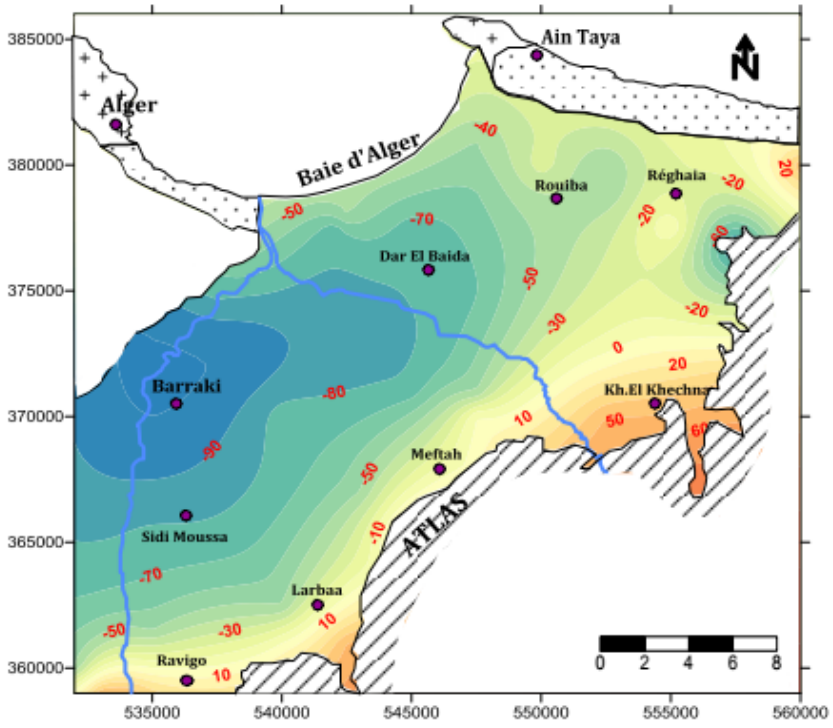



**Figure.40.**Carte du Mur de l'aquifère alluvial, l'allure du substratum (Macdonald & Partner, 1992)**. [23]**

### 4.1.5. Conclusion

Les résultats obtenus à partir de cette étude géophysique par sondage électrique présente un grand intérêt en hydrogéologie. L'interprétation des données géophysiques a permis de donner une image globale sur la géométrie des réservoirs aquifères présentés dans la zone d'étude. En effet, cette étude a mis en évidence l'existence de deux formations résistantes constituant des aquifères, il s'agit : • Les formations superficielles du Plio-Quaternaire, qui sont étendus sur toute la plaine. Cet aquifère occupe toute la superficie du bassin de la Mitidja, sauf sur la partie Ouest au-delà de Ameur el Ain et dans quelques zones localisées en bordure du bassin, entre Baraki et El Harrach. L'épaisseur moyenne de l'aquifère est de l'ordre de 100 à 130 m elle diminue au Sud en direction de l'Atlas Blidéen et atteint 40 m au Nord au niveau de la Baie d'Alger. • La formation du l'Astien constituée de complexe gréso–argileux d'épaisseur variable 100 à 180 m. Le substratum de cet aquifères est constitué des marnes bleues du Plaisancien. La carte des résistances transversales (RT) montre les zones favorables à l'implantation de forage (El Harrach, Barraki, Mazafran,…), avec des valeurs de RT assez élevées (22.103 Ohm. M²). Les coupes géoélectriques reflètent l'extension verticale et horizontale des formations. Un banc résistant profond (Astien), outre cela un niveau résistant qui correspond aux alluvions de la Mitidja ayant une résistivité qui varie entre 50 à 100 Ohm m, ces deux niveaux ci-dessus, sont séparés par un banc conducteur (formation d'El Harrach) d'une résistivité de 15 à 30 Ohm m. Enfin, l'ensemble des formations repose sur un niveau conducteur qui correspond au Plaisancien au Nord et au Miocène et roches plus anciennes au Sud. **[23]**

## 4.2. Approche hydrodynamique

### 4.2.1. Introduction :

Le suivi de l'hydrodynamique de la nappe du Quaternaire de la Mitidja est représenté par la piézométrie de la nappe. Des campagnes de mesures au niveau statique ont été réalisées depuis l'année 1985 par le réseau piézométrique de l'ARNH. Les évolutions depuis 1983 sont présentées et commentées dans cette partie.

### 4.2.2. Mise en évidence de l'intrusion marine par la cartographie piézométrique :

Afin de caractériser les fonctions hydrogéologiques des aquifères côtiers, nous étudierons la piézométrie et ses variations à court et long terme. Pour les aquifères côtiers, l'étude des charges entre l'aquifère et la mer est essentielle pour comprendre et prévoir l'évolution de l'invasion marine.

Pour le suivi de la piézométrie dans la baie d'Alger, l'**ANRH** a mis en place un réseau de surveillance de **20 piézomètres**. **[18]**

4.2.3. Évolution de la piézométrie de la période 1983 - 2020 :

Afin de voir les évolution de la piézomètre de la nappe quaternaire sur la baie d'Alger Nous allons revoir historiques depuis le débit le phénomène l'intrusion marine ,les cartes piézométriques sur logiciel **ARCGIC PRO 2020** et **SURFER 2016** pour les différentes campagnes basse d'eau et haute d'eau : **[18]**

**a)Cartes piézométriques 1983 :**

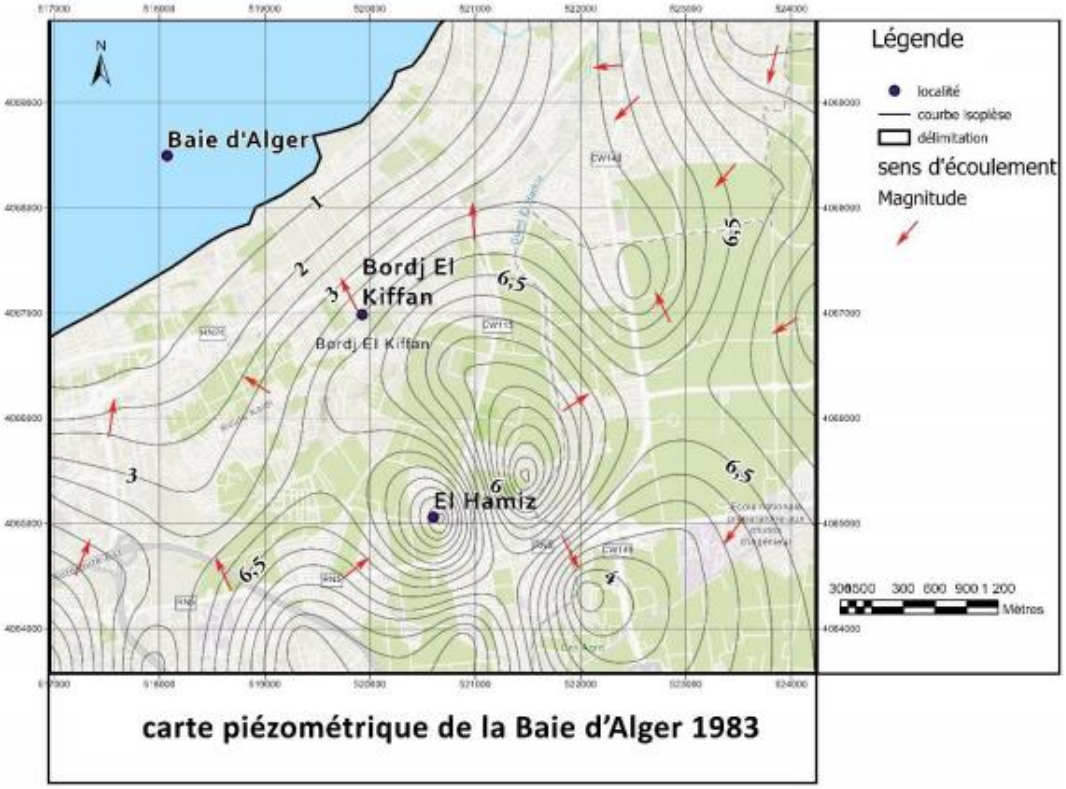



**Figure.41.** Carte piézométrique de la Baie d'Alger 1983 réalisé à l'aide de logiciel surfer

- Interprétation :

Une zone où les iso-pièzes sont espacées qui correspond à l'aval de la nappe et qui est caractérisé par un gradient hydraulique faible de l'aquifère remarquant ça dans la région de Stamboul et Bordj El Kiffan où la côte piézométrique est presque égale ou légèrement supérieur à celle de la mer à certains endroits

**(1 m)**, l'écoulement de la nappe se fait vers la mer, donc à cette époque l'intrusion ne se faisait pas sentir **(figure.47.) [18]**

### b) Cartes piézométriques 1996 :

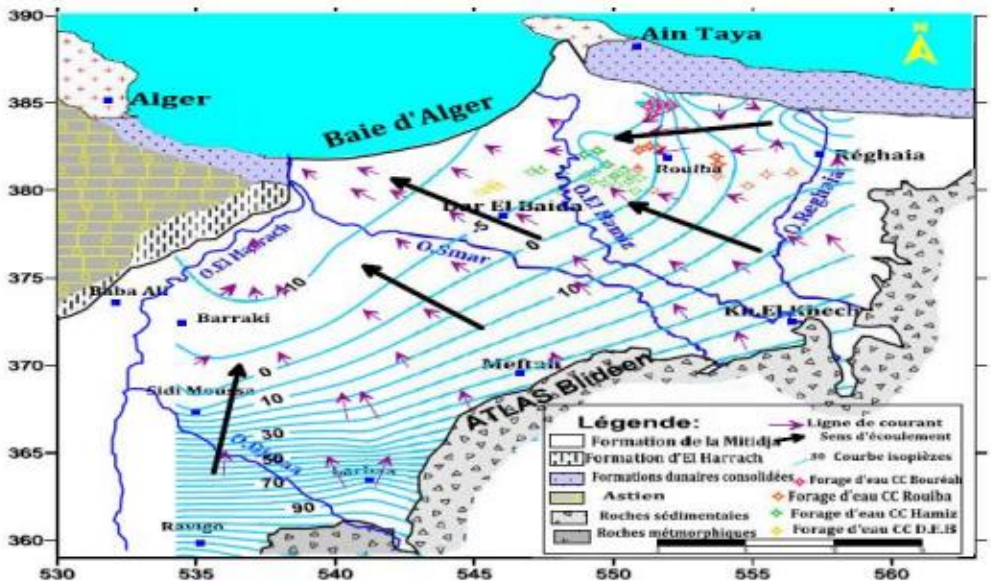



**Figure.42.** Carte piézométrique de la Baie d'Alger mai 1996 réalisée à l'aide du logiciel surfer.10 **[24]**

- Interprétation :

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** prés 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. **[24]**

### c)Cartes piézométrique 2003 (Basse d'eau):

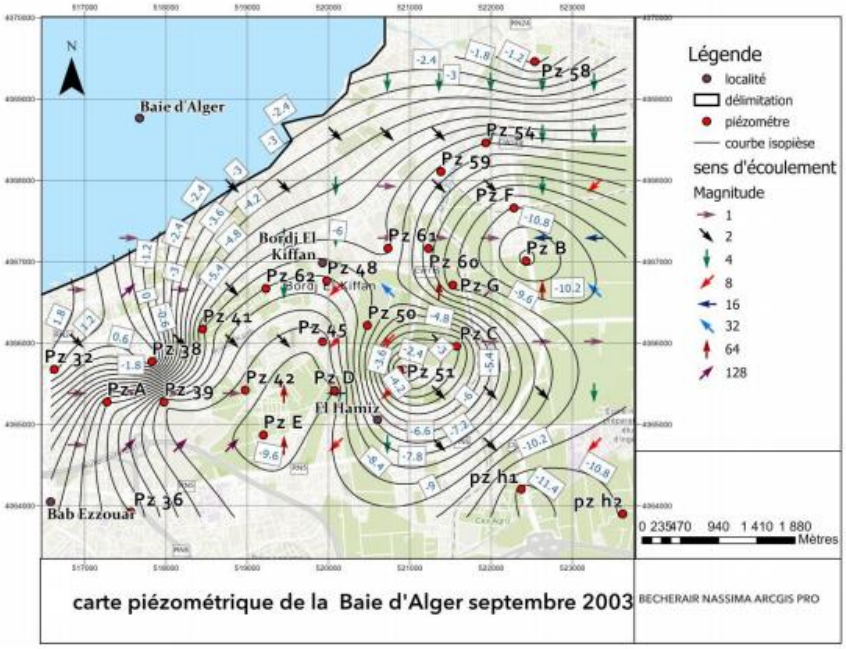



**Figure.43.** Carte piézométrique de la Baie d'Alger septembre 2003 réalisé à l'aide de logiciel surfer

- Interprétation :

La carte piézométrique de l'année 2003 montre que le phénomène de l'intrusion marine a déjà été entame depuis les années 1985/1990 de plus en plus. Les cotes piézométriques sont déjà à **-10.2 m** jusqu'à

**-11.4 m** au niveau du **PZ Hamiz 1** et **2** Près du champ de captage d'El Hamiz. Non loin de littoral, le front salé progresse de plus en plus du nord vers le sud. Les principaux axes d'écoulement sont nord-ouest sud-est les cotes piézométrique atteignent **-11 m** et confirme l'exploitation excessive au niveau de champ de captage d'El Hamiz **(Figure.49.). [18]**

**d) Cartes piézométrique 2007 (Basse d'eau):**

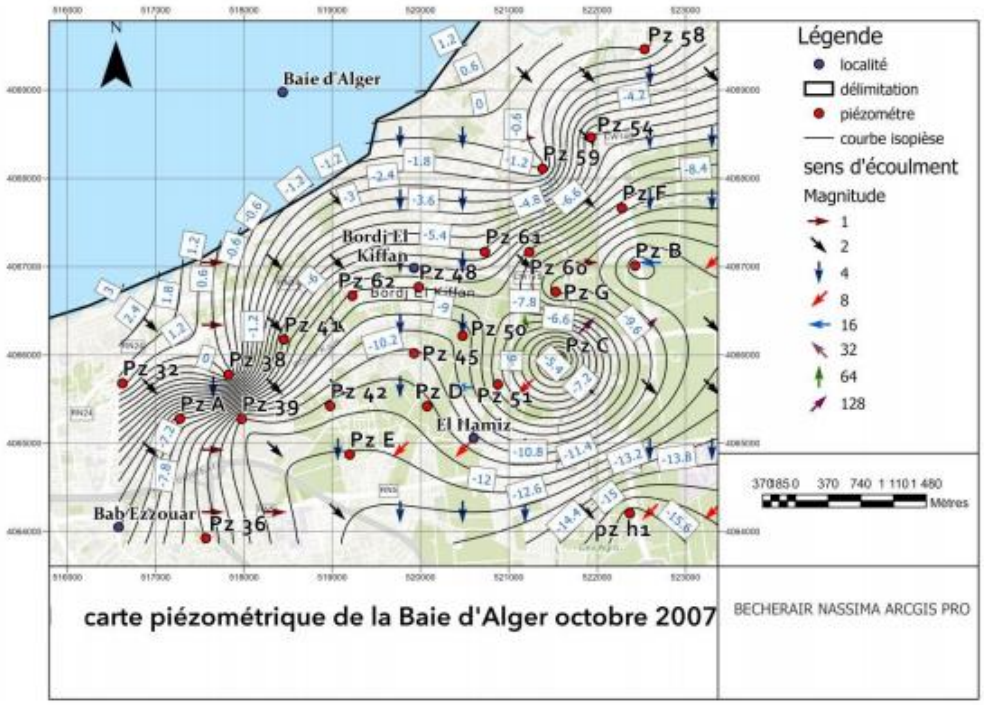



**Figure.44.**Carte piézométrique de la Baie d'Alger septembre 2007 réalisé à l'aide de logiciel surfer

- Interprétation :

En remarque que durant l'année **2007** (Cartes des basses eaux) les cotes piézométriques au niveau du champ de captage El Hamiz montre une évolution négative jusqu'à **-15.6 m** sur le **PZ 1 Hamiz** qui était **-11.4 m** en **2003 (Figure.50.)**. Il sera pris comme remarque après l'examen de cette carte les faits suivants :

Un écoulement se faisant de la mer vers la plaine du fait que les cotes piézométriques sont inférieurs au niveau de la mer décroissant en allant de lamer vers la l'intérieurs de la baie d'Alger. Pratiquement toute la zone étudiée est envahie par les eaux salées.

Au sud-est il y a une zone de dépression ceci est dû à l'influence de champs de captage de El Hamiz et la surexploitation dans cette zone. **[18]**

**e)Carte piézométrique 2010 (haut d'eau) :**

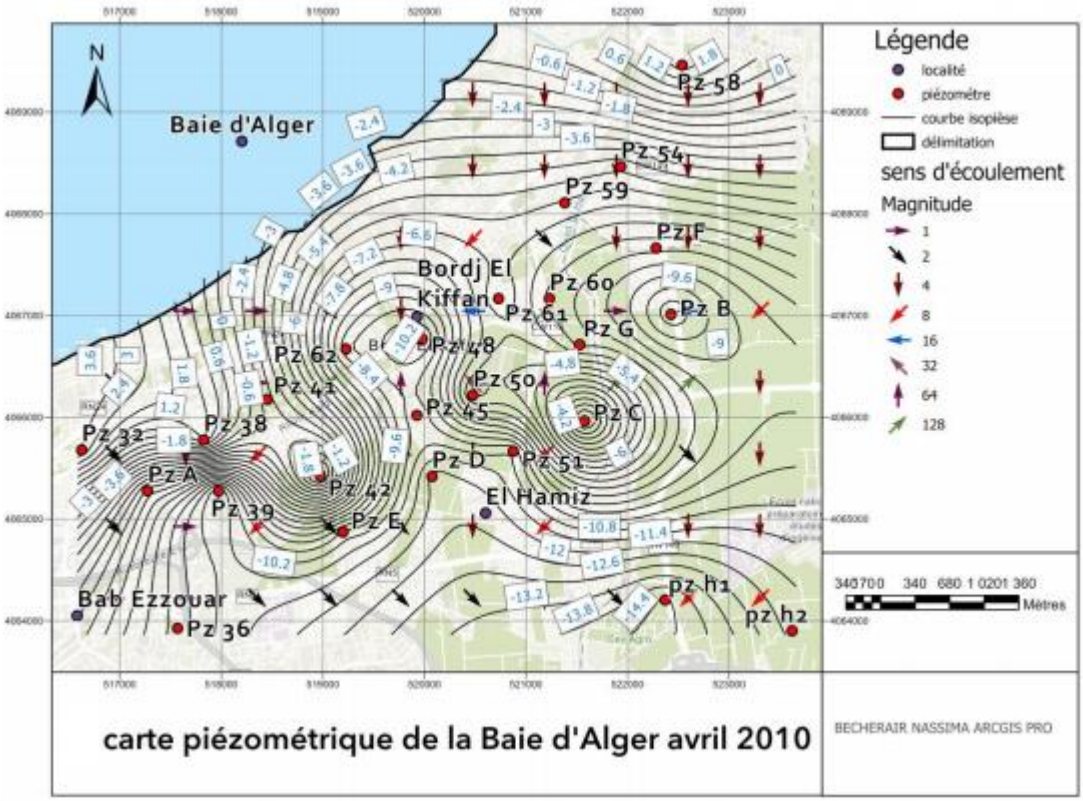



**Figure.45.**Carte piézométrique de la Baie d'Alger avril 2010 réalisé à l'aide de logiciel surfer

- Interprétation :

La carte piézométrique de l'année **2010** montre une baisse du niveau statique au niveau de champ de captage de Baraki à l'ouest et au champ du captage du Hamiz, Dar el Beida, Bouréah et Rouïba favorisant ainsi le phénomène d'intrusion marine **(Figure.51.). [18]**

**f) Carte piézométrique 2016 (haut d'eau) :**

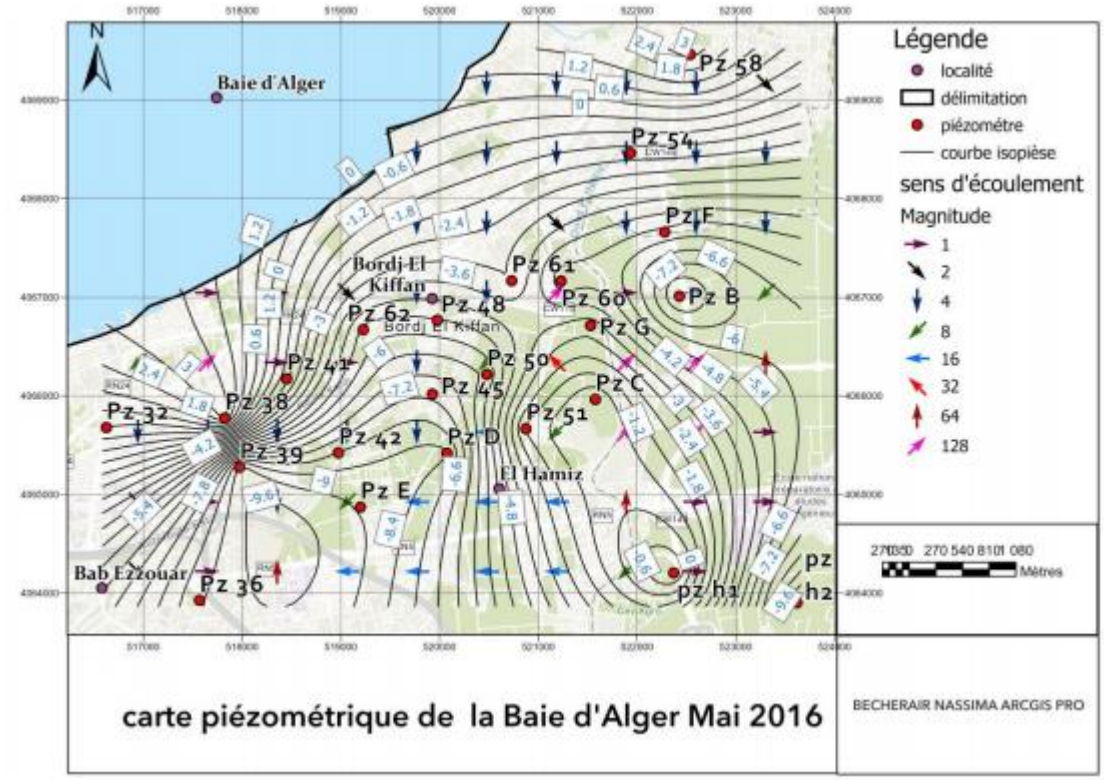



**Figure.46.** Carte piézométrique de la Baie d'Alger mai 2016 réalisé à l'aide de logiciel surfer

- Interprétation

En remarque que durant l'année **2016** (hauts eau) les cotes piézométriques au niveau du champ de captage El Hamiz montre une évolution positive jusqu'à **-0.6 m** sur le **PZ 1 Hamiz** qui était **-14 m** en 2010 **(Figure.52.),** cette remontée de niveau statique de la nappe peut s'expliqué par **2** hypothèses :

Une bonne recharge de nappe,

Un arrêt de pompage au niveau de certains forages, en effet **F1, F7, F14, F17 et F20** ont étaient arrêtés par la SEAAL afin de peut ralentir l'intrusion venant du nord. **[18]**

### g) Carte piézométrique 2018 (Haut d'eau) :

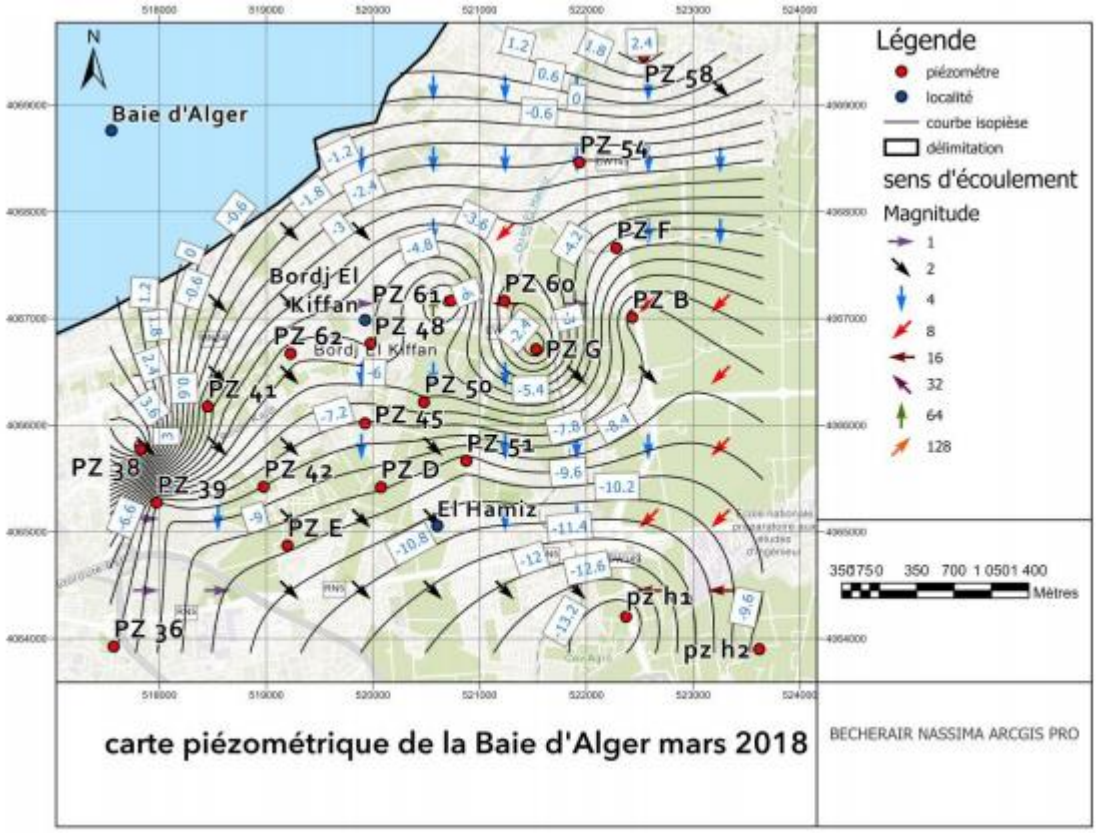



**Figure.47.**Carte piézométrique de la Baie d'Alger mars 2018 réalisé à l'aide de logiciel surfer

- Interprétation :

L'analyse de la carte piézométrique de **2018**(**Figure.53.)**Permet de confirmer que le front salé progresse encore plus et montre que cette progression se fait selon des directions préférentielles dans une direction préférentielle, notamment les axes des oueds (Oued El Hamiz et Oued El Harrach).

Le biseau salé est actuellement situé à environ **4.5 km** par rapport à la côte, et à moins de **500 mètres** de la limite nord-ouest de ce champ de captage. **[18]**

**h) Carte piézométrique 2020 (Basse d'eau) :**

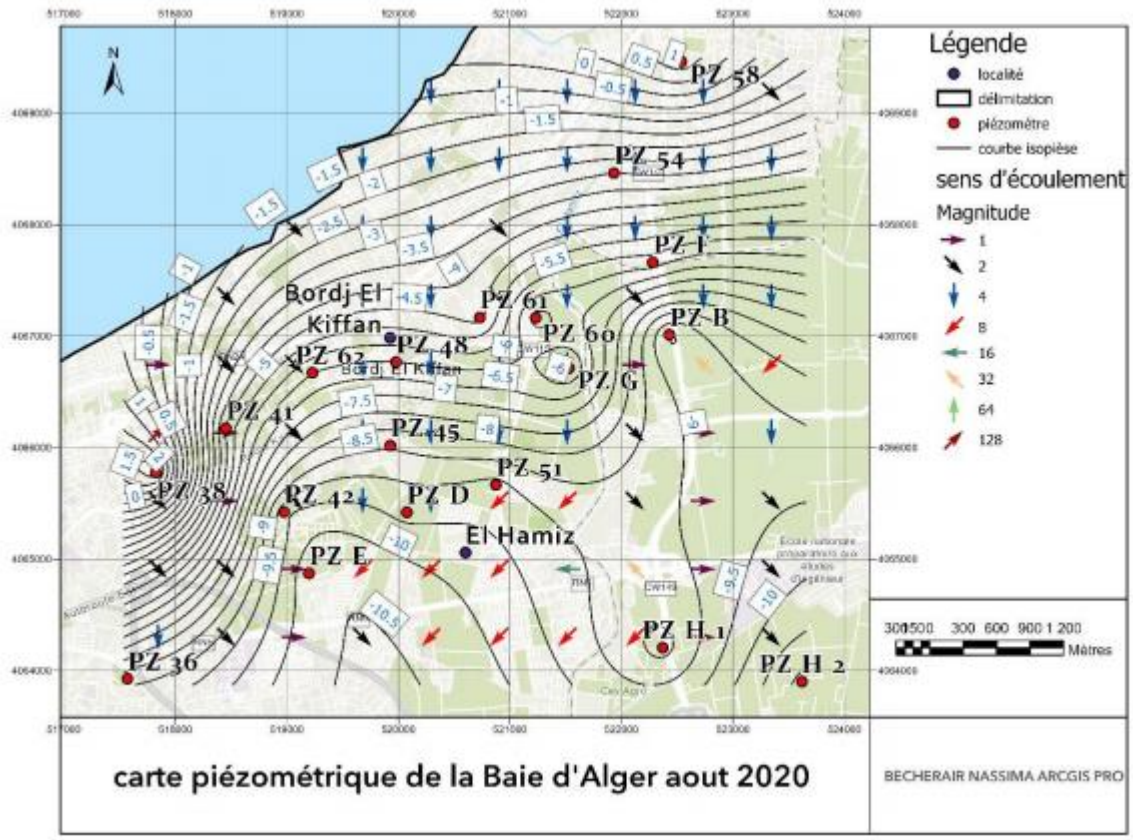



**Figure.48.**Carte piézométrique de la Baie d'Alger Aout 2020 réalisé à l'aide de logiciel surfer

- Interprétation :

La carte piézométrique de l'année **2020** montre que niveau statique au niveau de **PZ Hamiz 1** augmente de **-10 m** jusqu'à **-9 m** Près de champ de captage d'El Hamiz **(Figure.54.).**

Près de littoral, le front salé progresse de plus en plus du nord vers le sud. En effet, les cotes piézométriques sont varient de **-1 m** jusqu'à **-1.5** m par rapport niveau de la mer **NGM. [18]**

## 4.3. Approche hydrochimique par l'étude des profils de conductivité :

### 4.3.1. Introduction :

Afin d'observer l'évolution et l'intensité du biseau salé dans la baie d'Alger, des campagnes de mesure de la conductivité verticale ont été réalisées en été durant les années 2005, 2010, 2016 et 2020.

Nous allons présenter l'évolution du biseau salé à partir des profils de conductivité. **[10,18]**

### 4.3.2. Historique de profil de conductivité :

Afin de localiser avec précision l'interface eau douce - eau salée et de contrôler et mesurer la variation verticale de la conductivité, on dispose un certain nombre de piézomètre qu'ont été retenues. **[18]**

Profils de conductivité et interprétation qualitative :

**a)Profil du PZ 58 :**

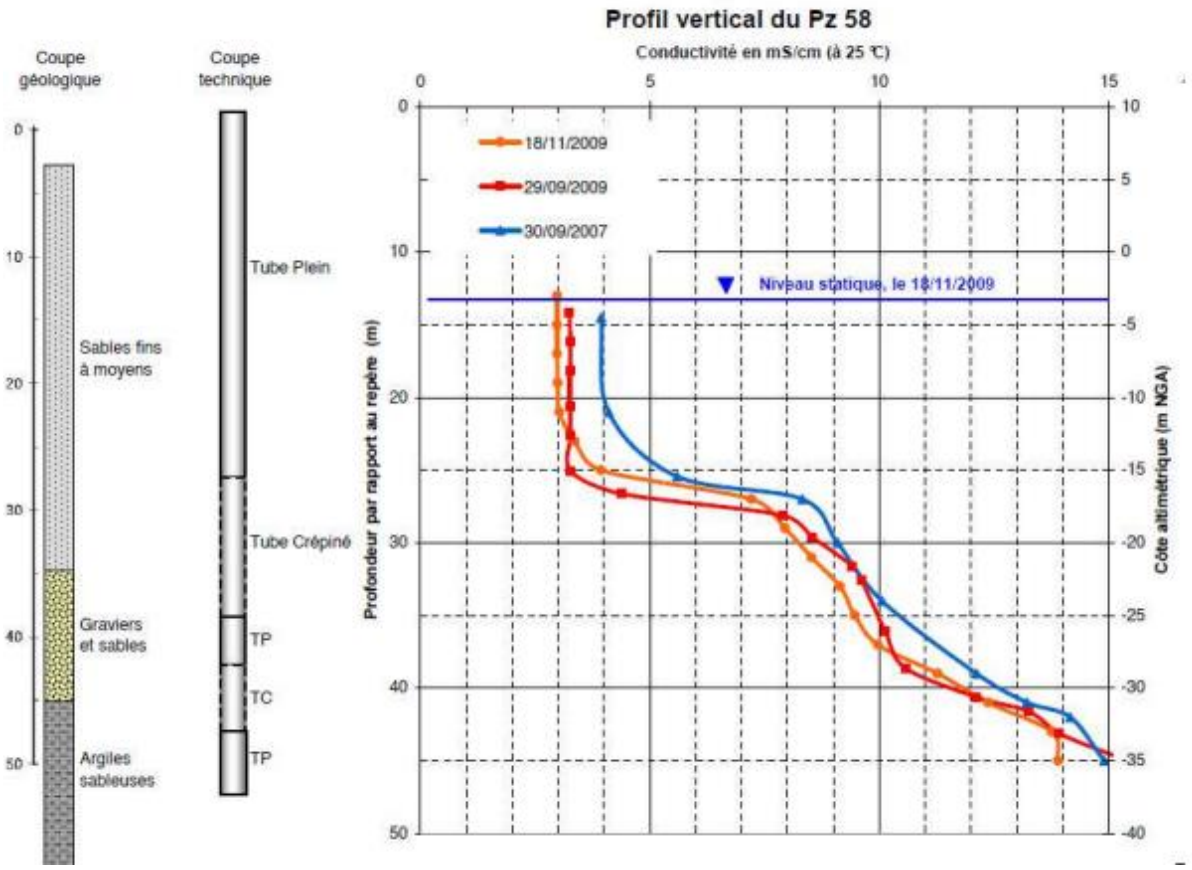



**Figure.49.** Profil vertical de conductivité du PZ 58**[18]**

- Interprétation :

Pour l'année **2007,** la conductivité est de **4000 µS/Cm** de **14 m (NS)** à **21 m** par contre en **2009** pour les deux mois Novembre et Septembre nous avons une valeur inférieure par rapport à celle de **2007,** elle est de

**3000 µS/Cm** de **14 m à 25 m.** Cette diminution est causée par les précipitations considérables durant cette année qui permettent la dilution des sels dans des eaux souterraines douces **(Figure.55.).**

La progression des valeurs de conductivités continuent jusqu'à

**45 m** pour atteindre **15000 µS/Cm** pour les trois profils. Cette valeur de conductivité est une valeur identique à celle de l'eau de mer. Ce piézomètre est donc complètement envahi par les eaux salées. **[18]**

**b) Profil du PZ 54 :**

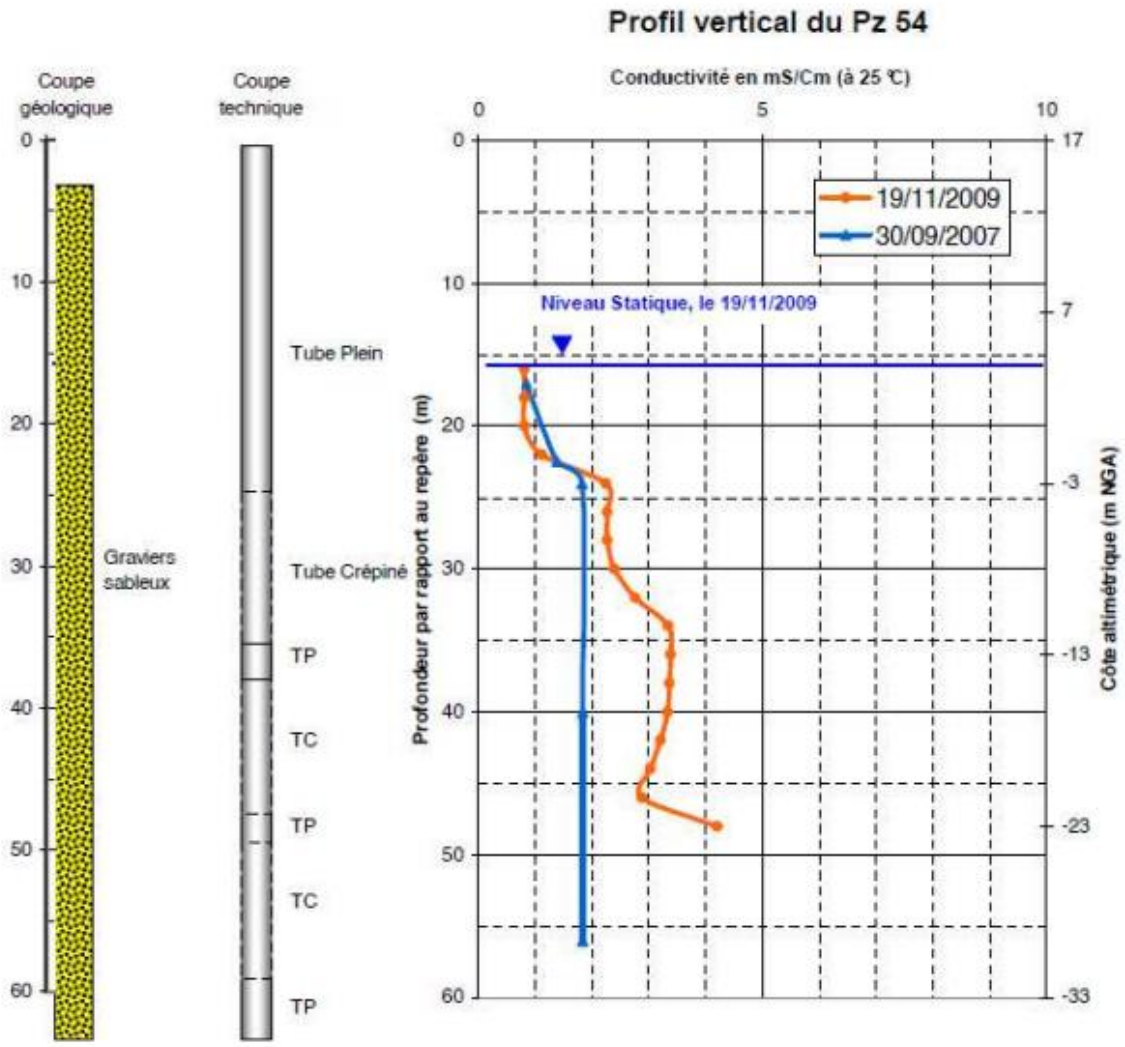



**Figure.50.**Profil vertical de conductivité du PZ 54**[18]**

- Interprétation :

Le profil de conductivité démarre à une conductivité de **1000 µS/Cm** de **16 m** (NS) jusqu'à **25 m**, la conductivité fluctue pour donner une valeur de **2000 µS/Cm** jusqu'au fond **(60 m).** Par ailleurs la coupe géologique de ce piézomètre montre sur toute sa longueur une formation très perméable et vénérable formée de graviers sableux **(Figure.56.)**

La conductivité varie de **1000 µS/Cm** de **16 m à 25 m** jusqu'à **45 m** là où elle donne une dernière valeur de **4000 µS/Cm.**

On conclue que ce piézomètre est contaminé par les eaux salées. **[18]**

**c)Profil du PZ 48 :**

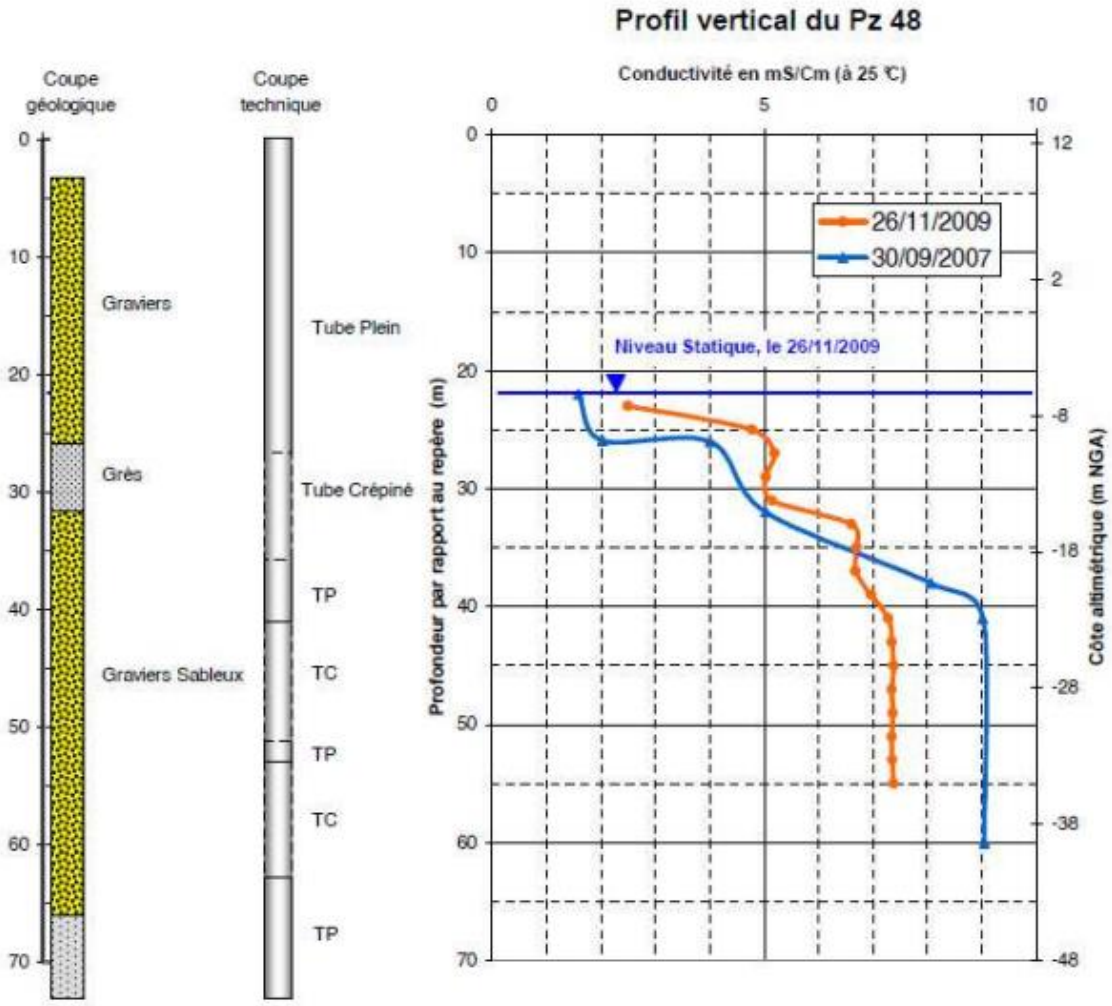



**Figure.51.**Profil vertical de conductivité du PZ 48**[18]**

- Interprétation :

On voit dans ce piézomètre des formations à grande perméabilité composées de graviers, grès et de gravier sableux. On note très bien l'évolution graduelle de la conductivité pour les deux années **2007 et 2009.**

**En 2007,** on note **9000 µS/Cm** mais en **2009** cette valeur diminue à

**7200 µS/Cm,** cette réduction est le produit des précipitations importantes enregistrées durant l'année **2009**, qui ont permis la dilution des sels d'eau de mer. Ces valeurs sont importantes témoignant la contamination de ce piézomètre par l'invasion marine **(Figure.57.). [18]**

**d) Profil du PZ 60 :**

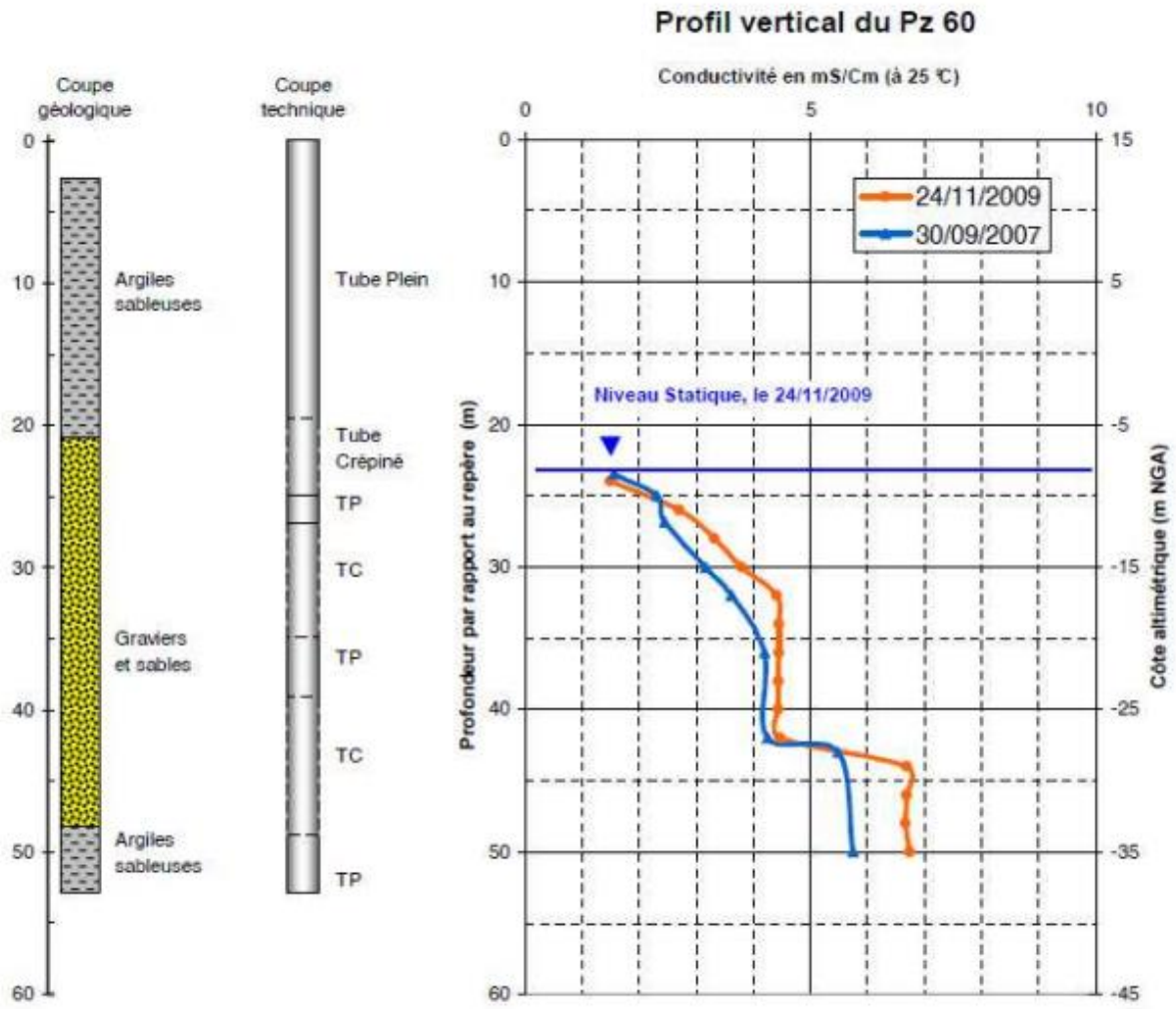



**Figure.52.** Profil vertical de conductivité du PZ 60**[18]**

- Interprétation :

Deux profils conductivité ont été effectués pour ce piézomètre en **2007 et 2009** présentent la même forme mais avec des concentrations différentes. Les deux débutent à **1500µS/Cm** à **26 m** et fluctues graduellement pour atteindre **4200 µS/Cm** de **32 m** à environ **43m** pour les deux années. À **50 m** on remarque une valeur de **6900 µS/Cm** en **2009** et de **5900 µS/Cm** en **2007.**

Ces grandes valeurs de conductivité est un indice de contamination de ce piézomètre par les eaux de mer **(Figure.58.). [18]**

**e)Profil du PZ 61 :**

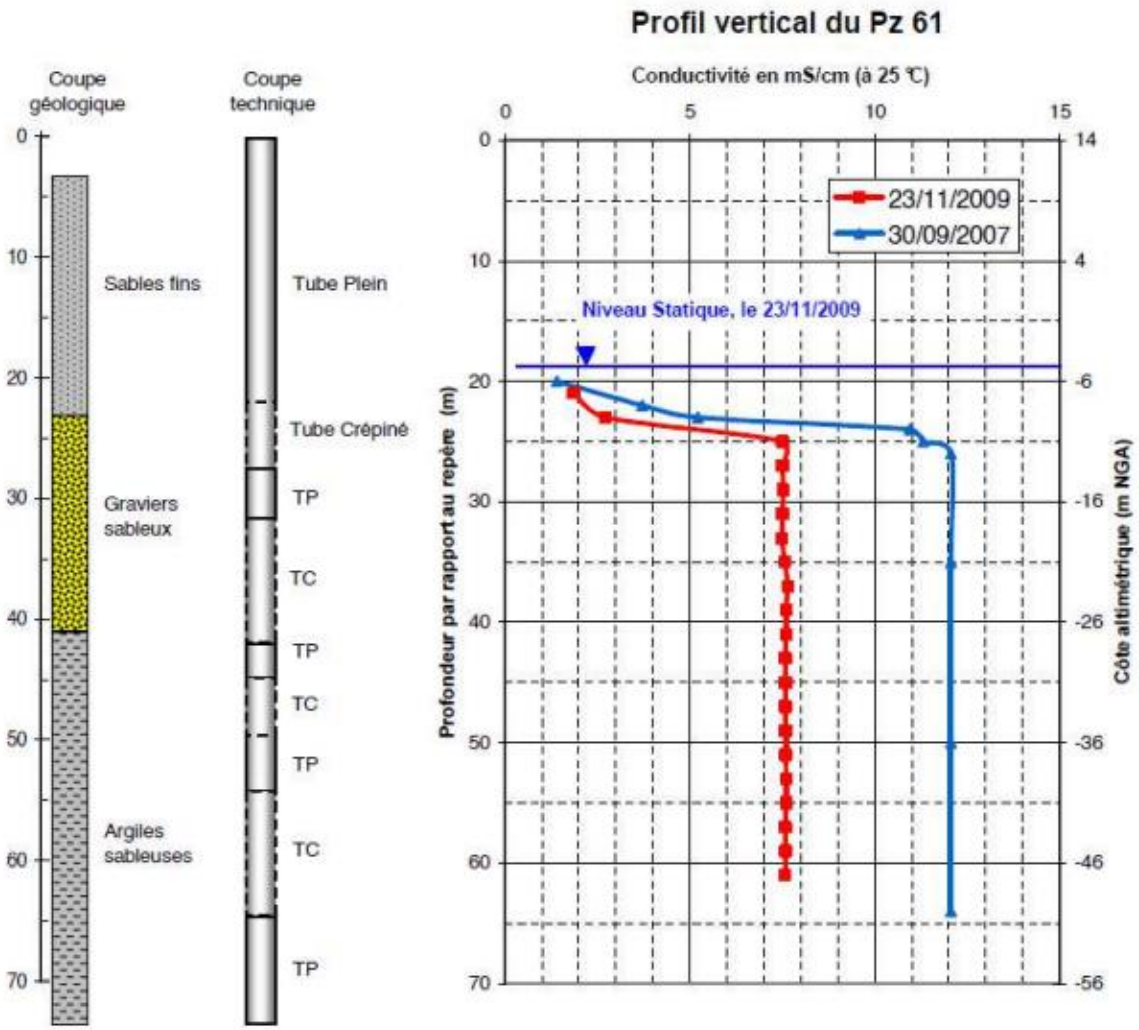



**Figure.53.** Profil vertical de conductivité du PZ 61**[18]**

- Interprétation :

Deux profils de conductivité ont été effectués pour ce piézomètre en **2007** et en **2009** présentent la même forme mais avec des concentrations différentes.

Les deux débutent à environ **1800 µS/Cm** à **20 m** et fluctuent graduellement pour atteindre **7500 µS/Cm** de **25m** à environ **62 m** pour l'année **2009** et

**12000 µS/Cm** de **25 m** à environ **69 m** en **2007**. Ces grandes valeurs de conductivité présentent une contamination de ce piézomètre par les eaux de mer **(Figure.59.). [18]**

**f) Profil du PZ 36 :**

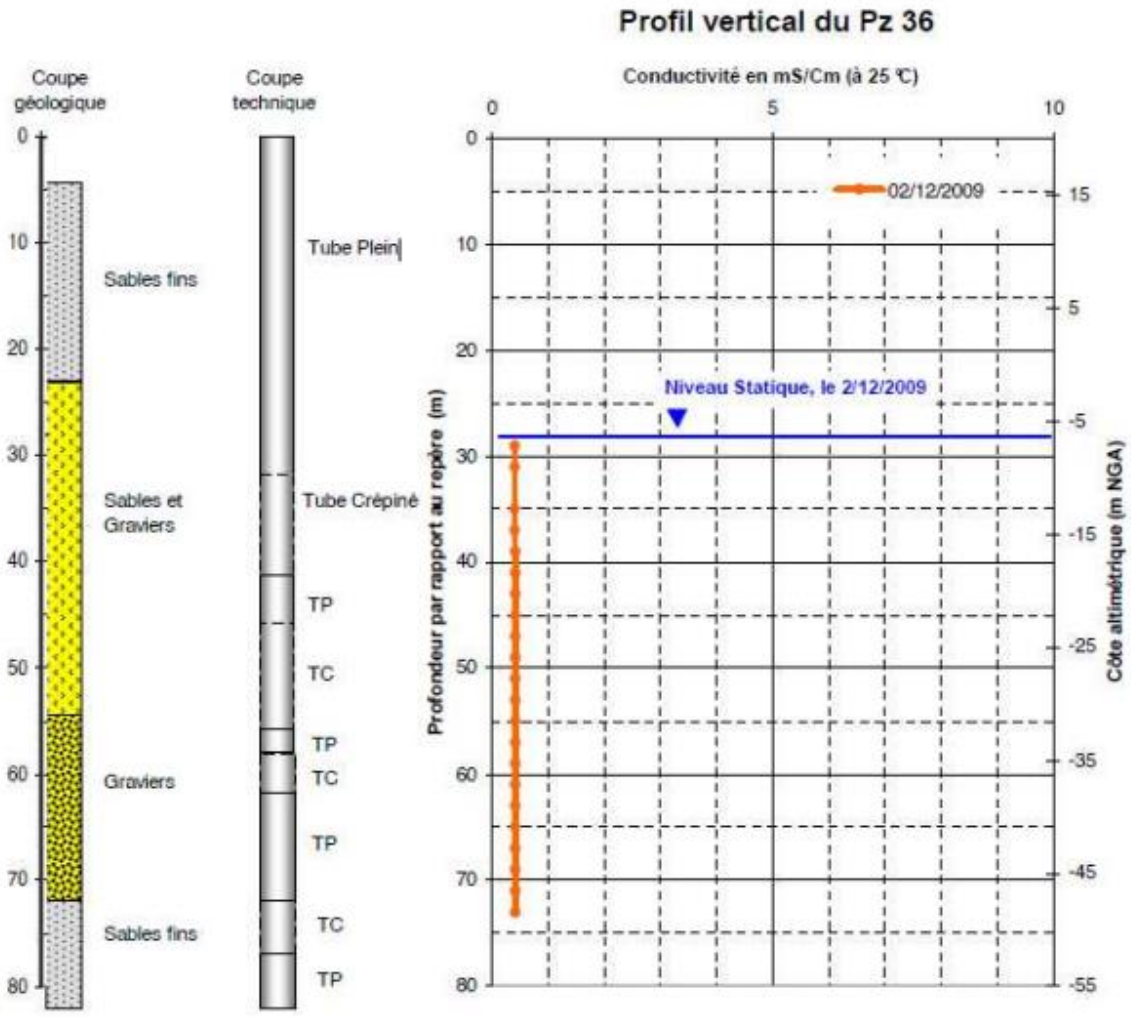



**Figure.54.** Profil vertical de conductivité du PZ 36**[18]**

- Interprétation :

Pour ce piézomètre le profil est fixé sur une valeur d'environ **400 µS/Cm** de

**29 m** jusqu'à **70 m.**

Cette valeur traduit la présence d'une eau potable dans ce piézomètre, il n'est pas donc du tout contaminé par les eaux de la mer **(Figure.60.). [18]**

**i) Profil du PZ B :**

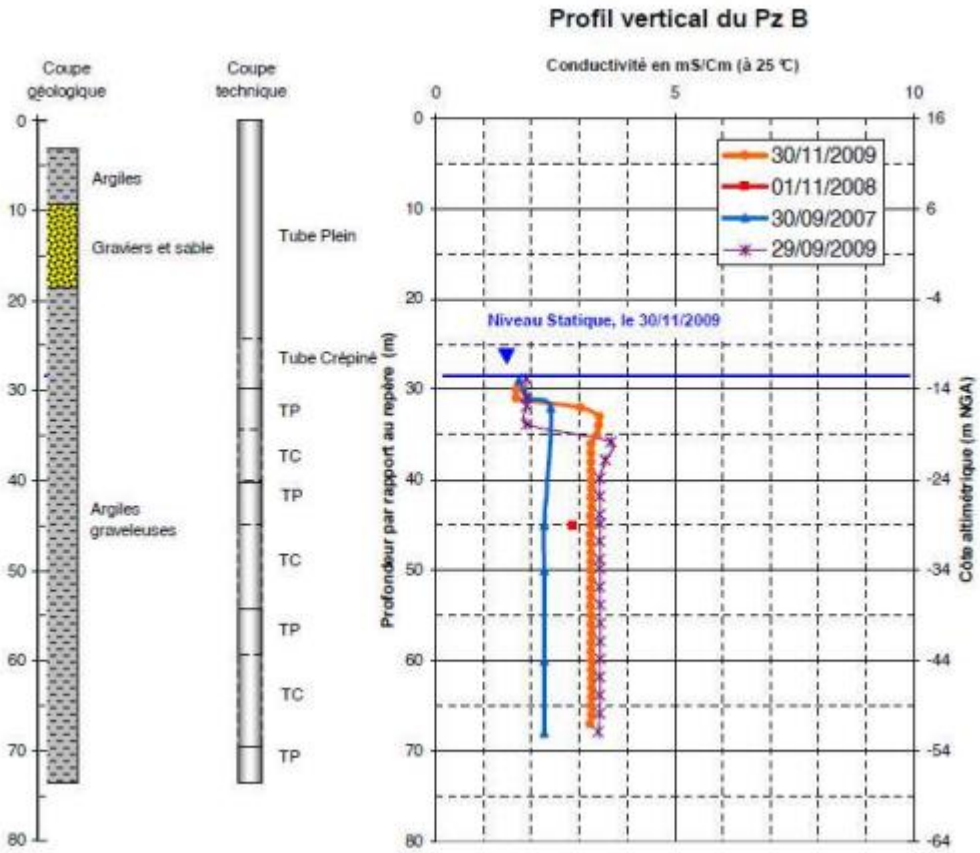



**Figure.55.**Profil vertical de conductivité du PZ B **[18]**

- Interprétation :

Dans ce piézomètre situé à environ **1Km** du champ de captage du Hamiz on voie quatre profils de conductivité: un profil en **2007** et en **2008** et deux profils en **2009.**

Les quatre profils présentent une conductivité de **1900 µS/Cm** à partir du niveau statique situé à la côte **29m**, pour donner par la suite une valeur constante de **2200 µS/Cm** en **2007** jusqu'au top du profil, **3500 µS/Cm** en **2009** et une valeur intermédiaire de **2900 µS/Cm** en **2008**. 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 implanté, il s'agit d'une formation argileuse semi-perméable, une faible proportion de graviers et sables et une grande proportion d'argiles graveleuse semi-perméable de **15m à 70m** (fond du piézomètre).

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 les eaux de mers **(Figure.61.). [18]**

**g) Profil du PZ D :**

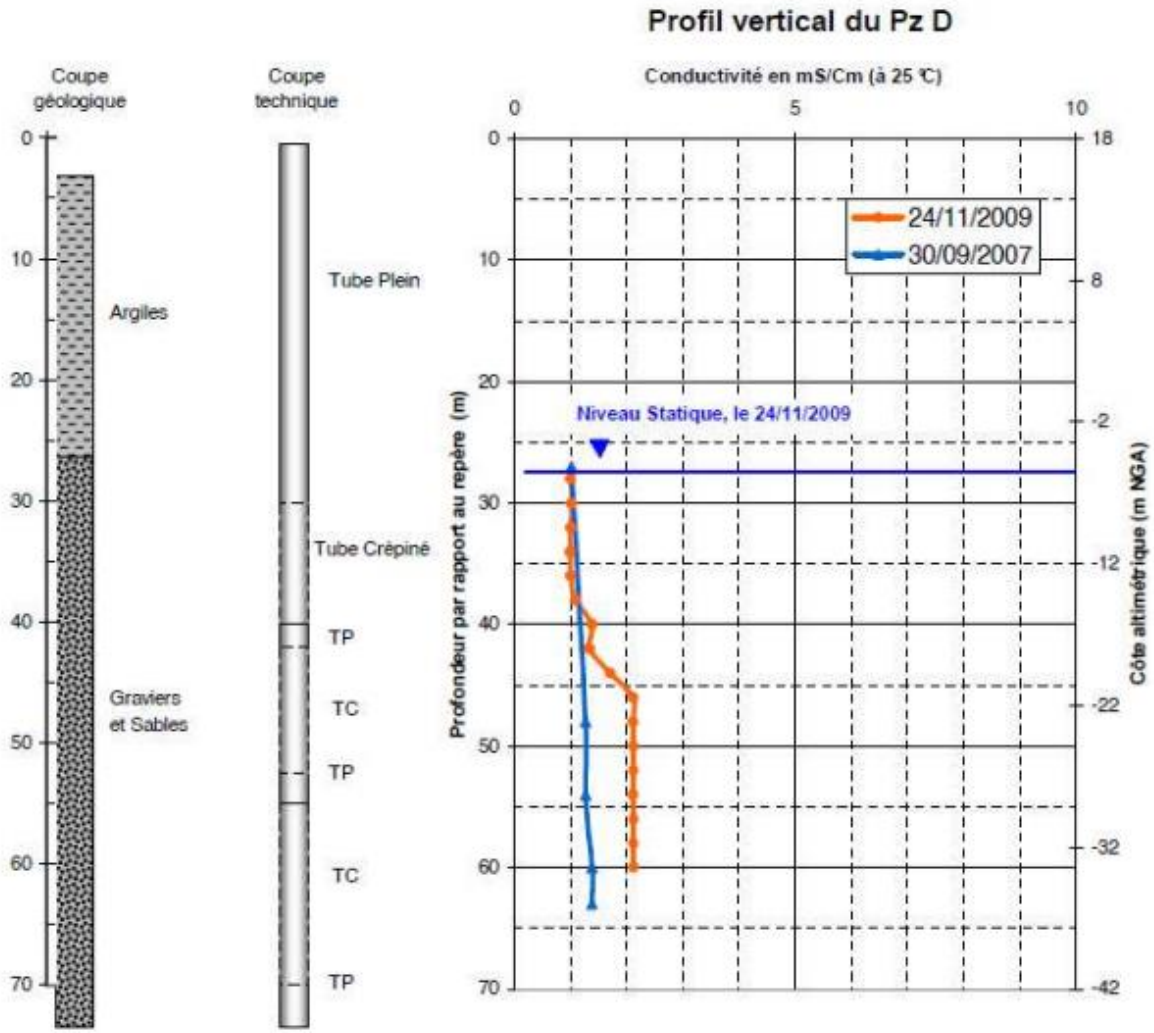



**Figure.56.** Profil vertical de conductivité du PZ D **[18]**

- Interprétation :

Les deux profils conductivité en **2007** et en **2009** se coïncident à **1000 µS/Cm** de **28m (NS)** jusqu'à **42 m** et à partir de cette côte le profil établie en 2007 reste stable autour de **1000 µS/Cm** par contre en **2009** il évolue progressivement pour atteindre la valeur

**2000 µS/Cm (Figure.62.).**

On constate que ce piézomètre est en voie de contamination. **[18]**

**k) Profil du PZ F :**

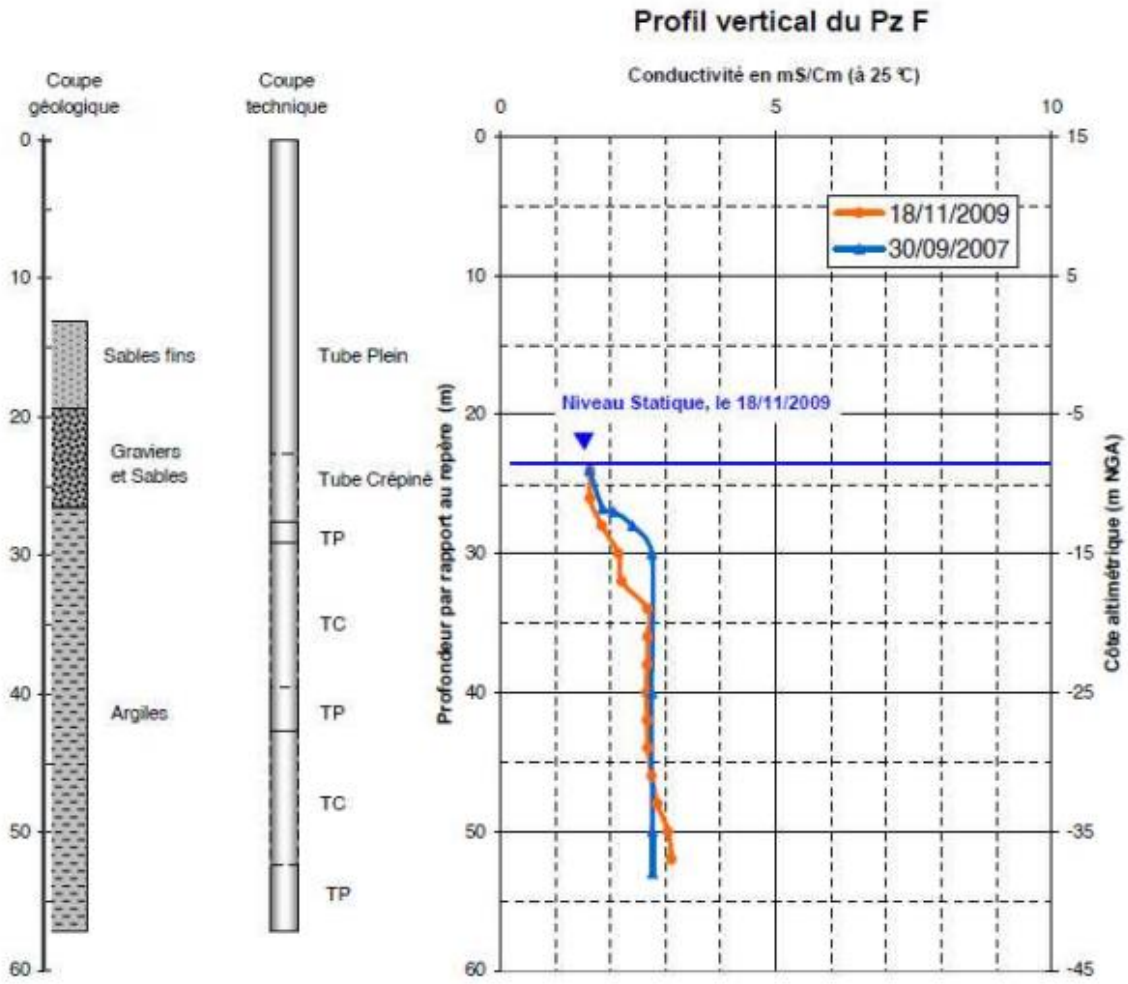



**Figure.57.**Profil vertical de conductivité du PZ F **[18]**

- Interprétation :

Sur ce piézomètre deux profils ont été effectués en **2007** et en **2009.** Il capte une seule formation perméable formée de gravier et de sables. En **2007**, le profil démarre à **28 m** avec une conductivité de **1600 µS/Cm** jusqu'à **30 m** on signale une valeur de **2900 µS/Cm**. En **2009**, le profil n'a pas enregistré une grande différence par rapport à celui de **2007**. Ce piézomètre est contaminé par les eaux salées **(Figure.63.). [18]**

## l) Profil du PZ Hamiz 1 et 2 :

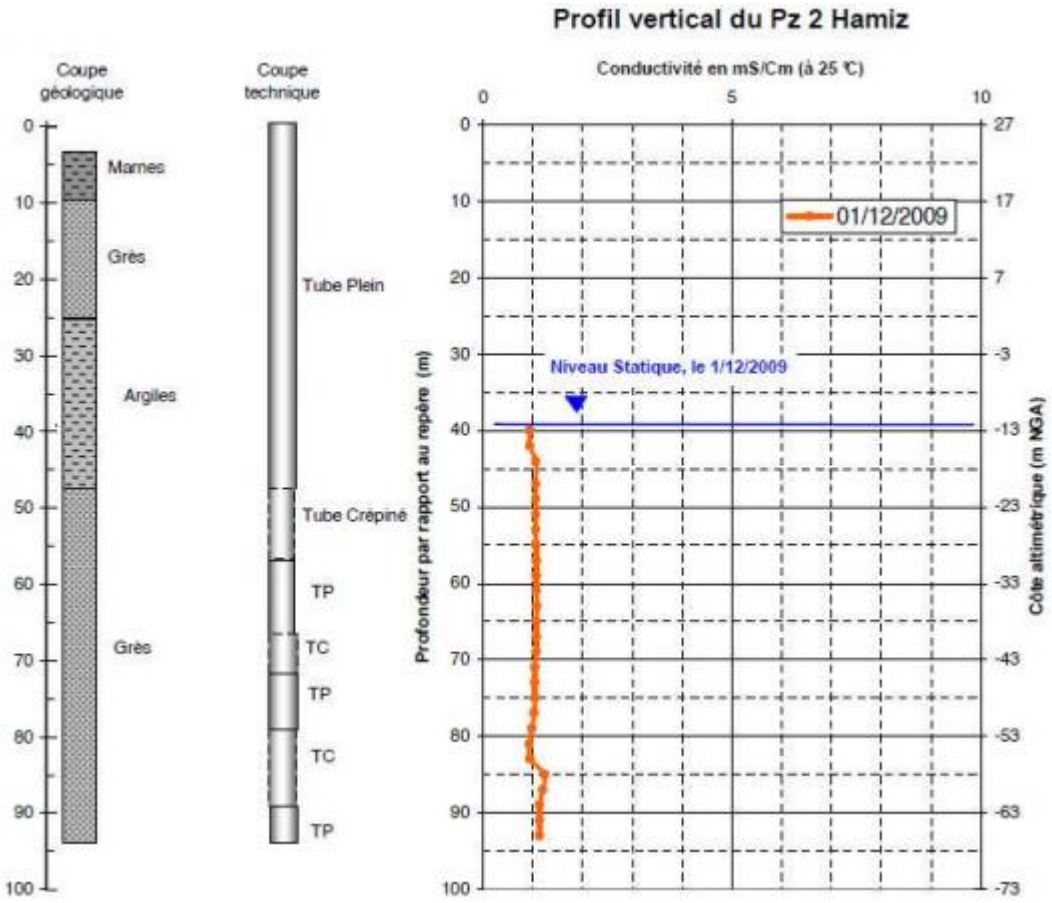



**Figure.58.** Profil vertical de conductivité du PZ 2 Hamiz **[18]**

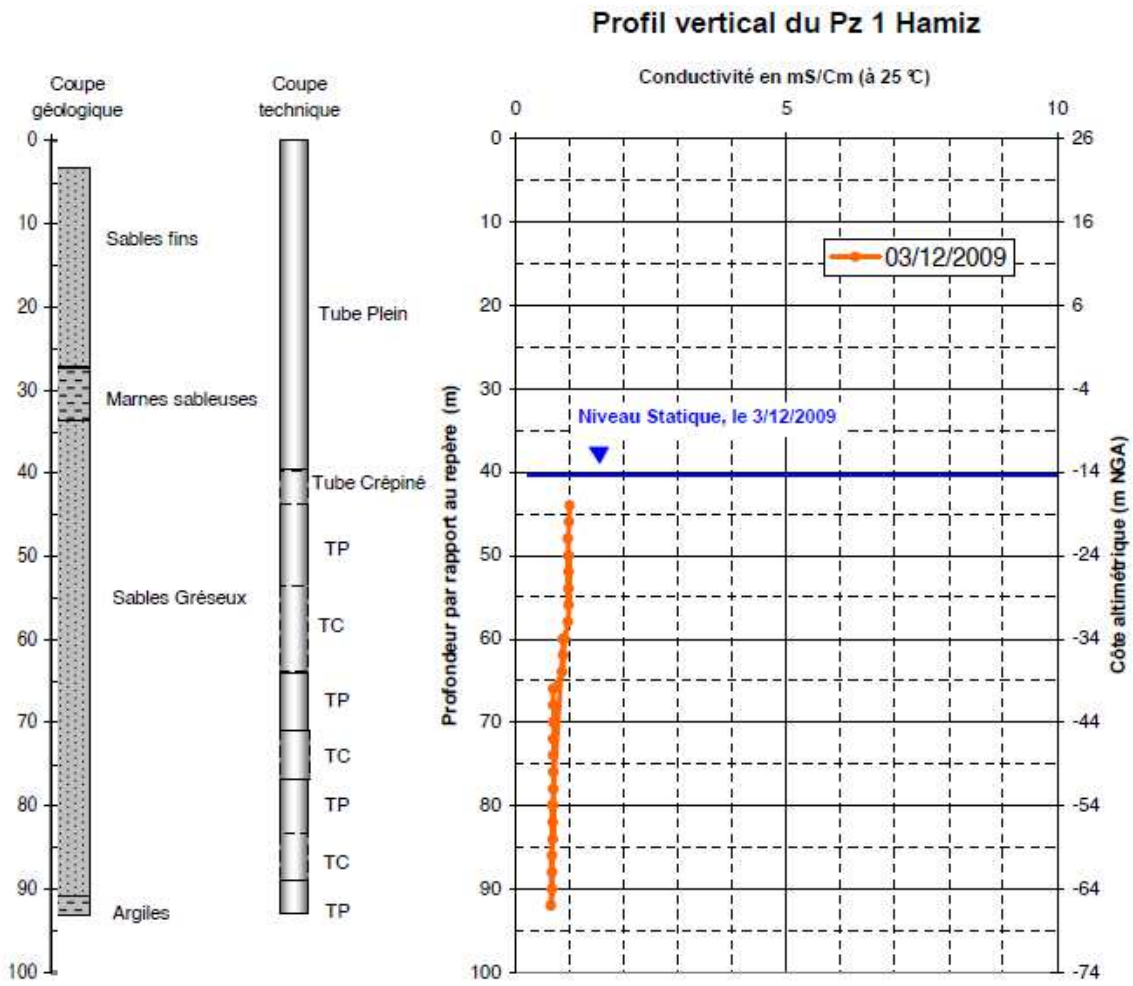



**Figure.59.**Profil vertical de conductivité du PZ 1 Hamiz **[18]**

- Interprétation :

Un seul profil de conductivité a été enregistré en **2009** pour les deux piézomètres **PZ1 et PZ 2 Hamiz.** On remarque un tracé constant de profil de conductivité au tour de **1000 µS/Cm** de **40 m à 90 m**. Ces deux piézomètres captent des formations à grande perméabilité formée de sables gréseux pour le **PZ 1** et de grès pour le **PZ 2**.Ces deux piézomètres **PZ 1 et PZ 2 Hamiz** ne sont pas contaminés par les eaux salées de la mer **(Figure.64.)** et **(Figure.65.). [18]**

4.4.2. Profile de conductivité de l'année 2020 :

**a)Profil du PZ 58 :**

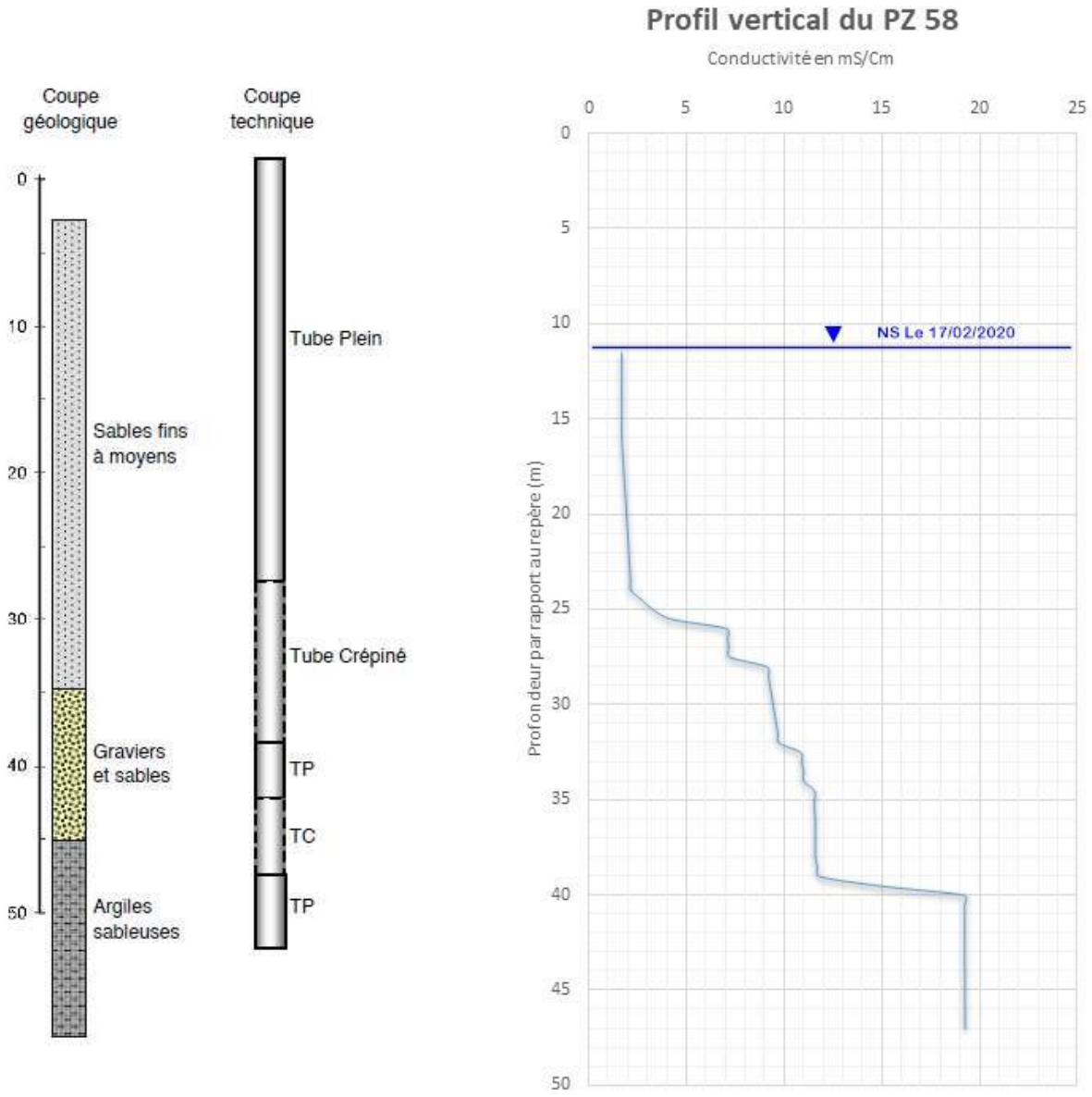



**Figure.60.**Profil vertical de conductivité du PZ 58**[18]**

- Interprétation :

On remarque qu'il y a **3 parties**, La **1ère** partie de **11.75m** jusqu'à **25 m** la conductivité diminue par rapport à l'année **2009** qui était **3660 uS/cm** cette diminution peut-être à cause de la précipitation qui permettent la dilution des sels dans l'eau douce (hauts eau) **(Figure.66).**

La **2ème** partie : de **26 m** jusqu'à **39.5 m,** le front salée est claire dans cette partie la conductivité atteigne **11800 uS/cm.**

La **3ème** partie : de **40 m** jusqu'à le font du piézomètre la conductivité augmente brusquement de **11800uS/cm** à **19300 uS/cm** cette valeurs est identique à celle de l'eau de mer. Ce piézomètre est complètement contaminé par l'eau de mer depuis l'année **2007** qui était **15000 uS/cm. [18]**

## b) Profil du PZ 54 :

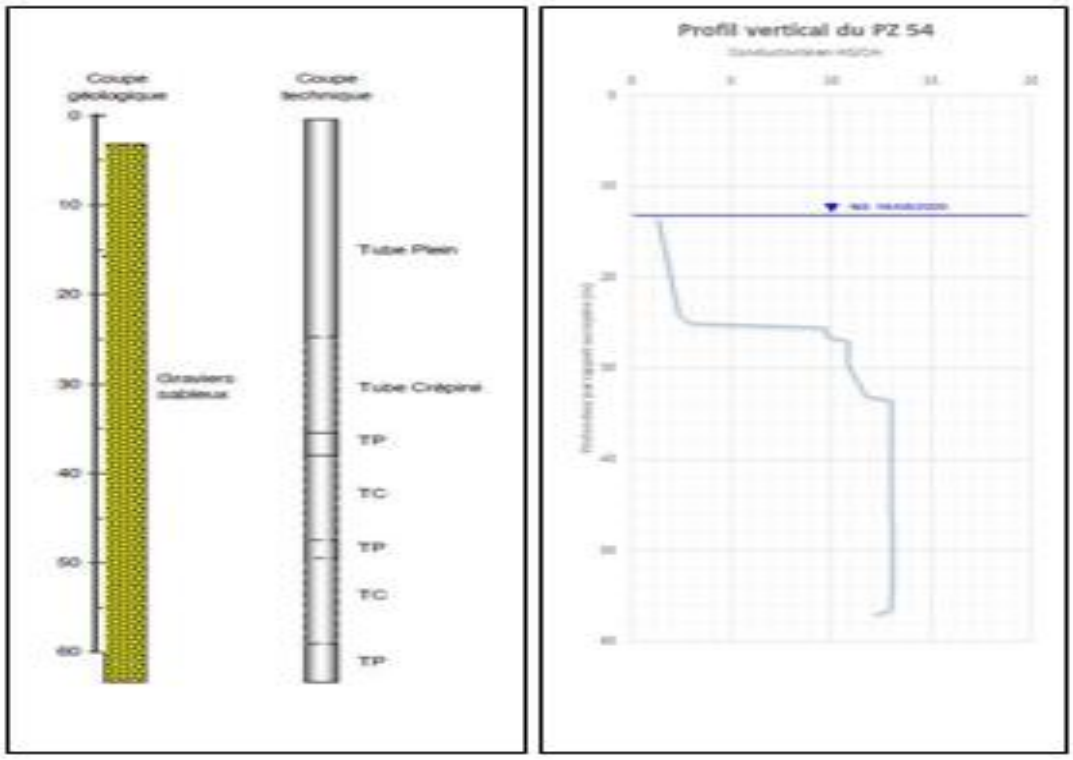



**Figure.61.**Profil vertical de conductivité du PZ 54**[18]**

- Interprétation :

Dans ce piézomètre on remarque que la valeur de la conductivité à la surface est de **1340 uS/cm** et atteigne **13000 uS/cm** à partir de la profondeur de **34 m** jusqu'à le fond ce qui montre que l'intrusion de l'eau salée est en état avancé **(Figure.67.).**

De plus, la coupe lithologique de ce piézomètre montre une formation très perméable et vulnérable formée de graviers sableux sur toute sa longueur. **[18]**

### c) Profil du PZ 48 :

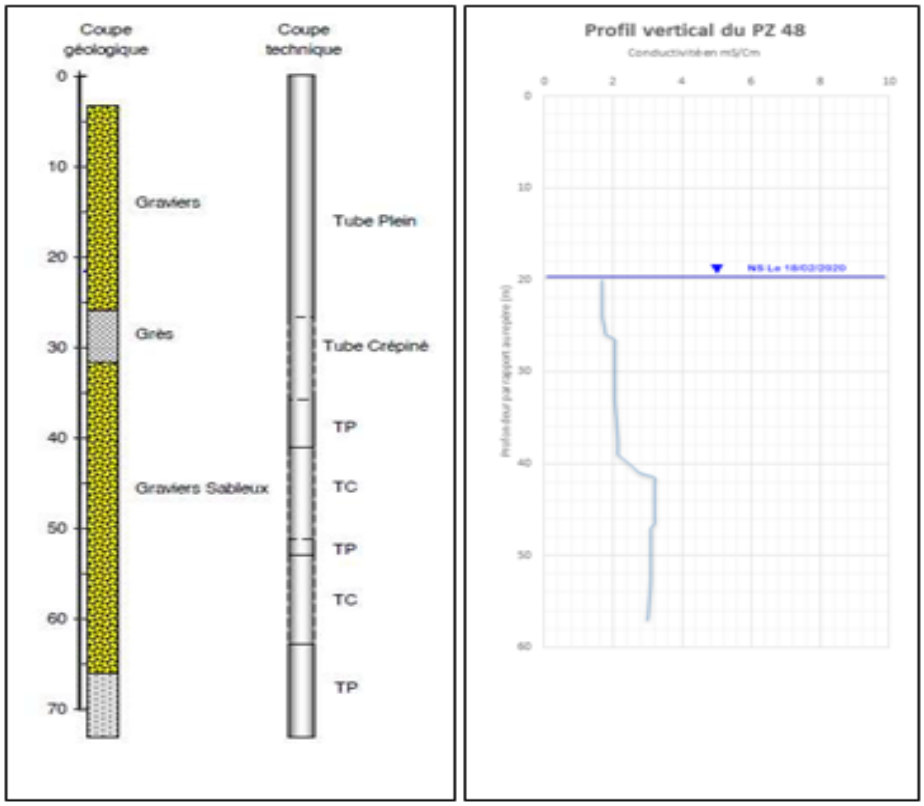



**Figure.62.** Profil vertical de conductivité du PZ 48**[18]**

- Interprétation :

Dans ce piézomètre **(Figure.68.)** on note que la conductivité de l'année **2007** était **9000 uS/cm** à **40 m** et on **2009** sur même profondeur était **7200 uS/cm** et **on 2020** la conductivité que nous avons mesuré est de **2400uS/cm** à **42 m** de profondeur cette diminution depuis l'année **2007** peut-être expliqué par **2** hypothèses :

Les précipitations importantes enregistrées qui ont permettent une bonne recharge de la nappe dès lors la dilution des sels d'eau de mer.

Probablement un arrêt de pompage ce fait quelque part dans cette zone pour cette raison le niveau statique augmente et le front salé recul. **[18]**

**d) Profil du PZ 60** :

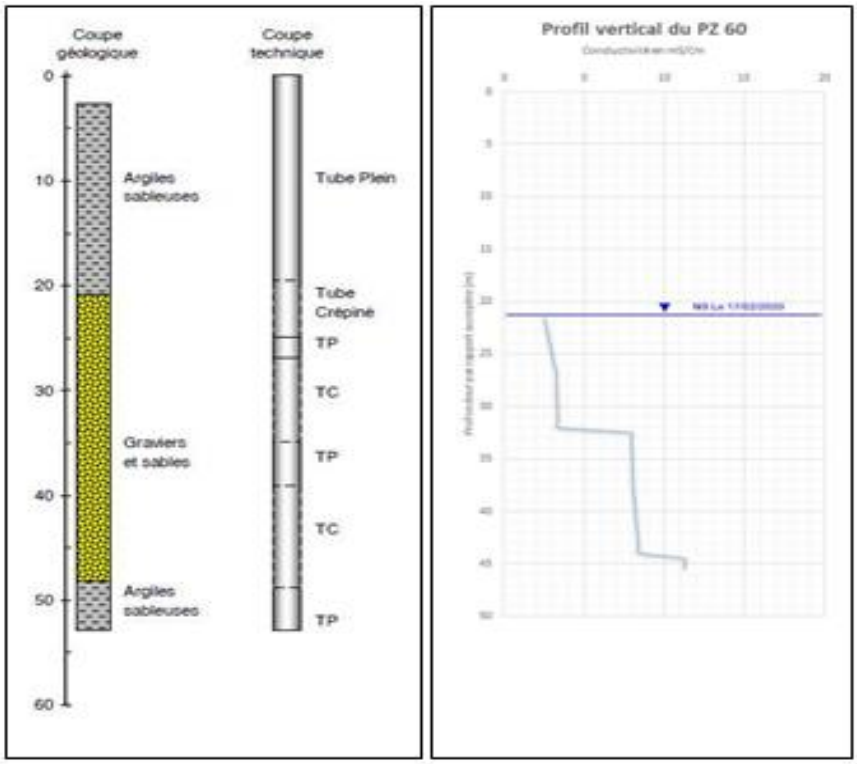



**Figure.63.** Profil vertical de conductivité du PZ 60**[18]**

- Interprétation :

Dans ce piézomètre on peut voir clairement que la conductivité se doubler à **32 m** de **3350 uS/cm** à **8000uS/cm** et continue a augmenté de plus en plus jusqu'au fond.

Par rapport les années précédentes la conductivité est en progression positive ce qui confirme l'évolution de l'intrusion marine **(Figure.69). [18]**

**e)Profil du PZ 61 :**

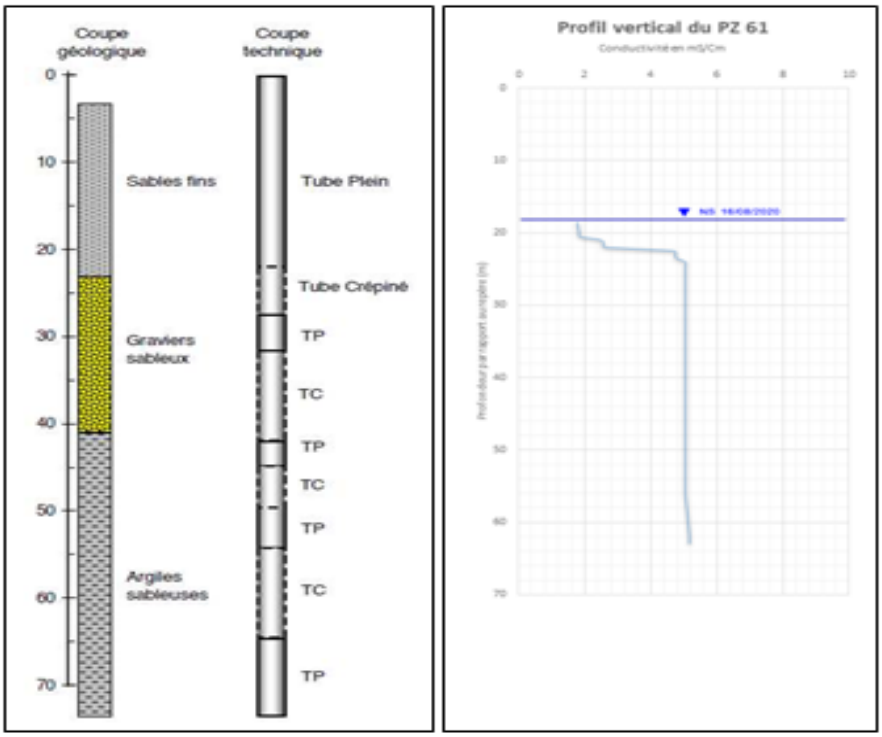



**Figure.64.** Profil vertical de conductivité du PZ 61**[18]**

- Interprétation :

Dans ce piézomètre **(Figure.70.)** on note que la conductivité de l'année **2007** était **12000 uS/cm** à partir de **25 m** jusqu'au fond et on **2009** sur même profondeur la conductivité diminue de **35%** par rapport à l'année **2007** et on **2020** la conductivité que nous avons mesuré est de **5000uS/cm** cette diminution depuis l'année **2007** peut-être expliqué par **2** hypothèses :

Les précipitations importantes enregistrées qui ont permettent une bonne recharge de la nappe dès lors la dilution des sels d'eau de mer.

Probablement un arrêt de pompage ce fait quelque part dans cette zone pour cette raison le niveau statique augmente et le front salé recul. **[18]**

## f) Profil du PZ 36 :

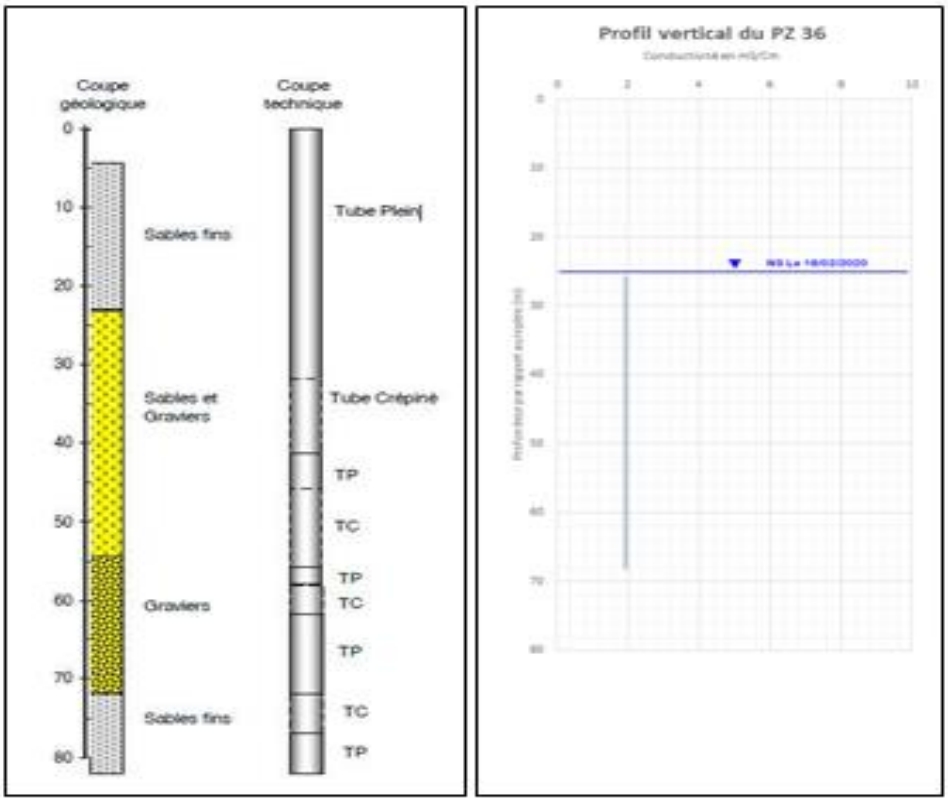



**Figure.65.**Profil vertical de conductivité du PZ 36**[18]**

- Interprétation :

Dans ce piézomètre **(Figure.71.),** la conductivité est d'environ **1900 uS/Cm** à la surface à profondeur de **25 m** ça reste stable le long du piézomètre jusqu'au fond, ce piézomètre et légèrement contaminé par l'eau de mer par rapport l'année **2009. [18]**

**g) Profil du PZ B :**

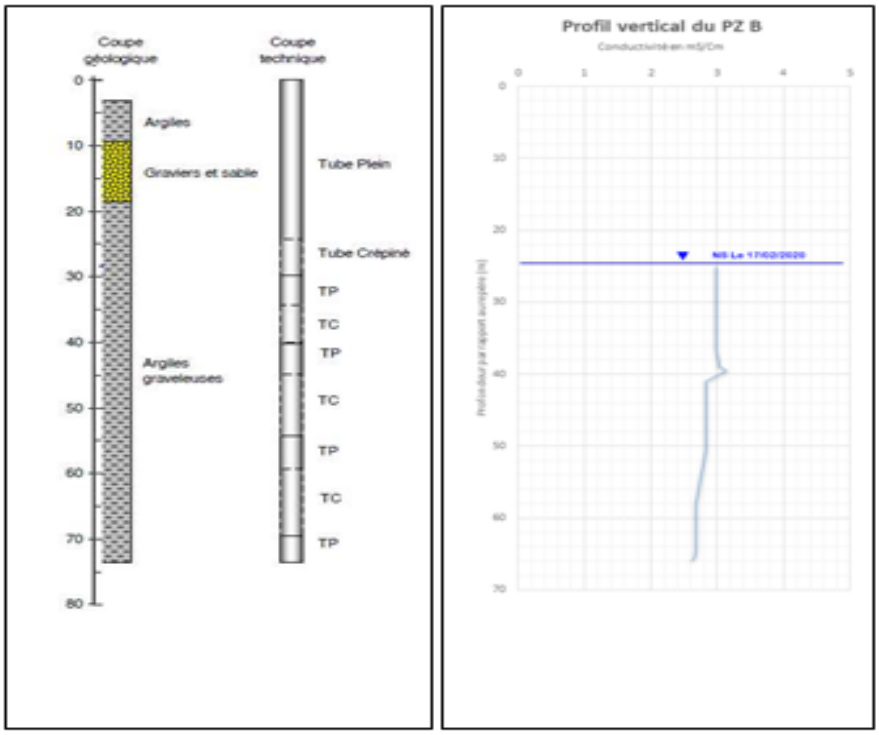



**Figure.66.** Profil vertical de conductivité du PZ B **[18]**

- Interprétation :

Dans ce piézomètre **(Figure.72.),** le profil de conductivité présente une valeur de **3000 uS/Cm** à la surface ensuite cette conductivité diminue de petit à petit à partir de **40 m** de profondeur et stabilise à la valeur de **2600 uS/Cm** à partir de **55 m** de profondeur jusqu'au fond de ce dernier.

Depuis l'année **2007** jusqu'aujourd'hui on remarque une augmentation légère a la surface qui était de **1900 uS/Cm** et devient **3000 uS/Cm** à cause de la surexploitation au niveau du champ de captage d'El Hamiz qui situe à **1 Km** du ce piézomètre ou il y a une baisse de niveau statique qui provoque la formation d'un cône de dépression favorisant l'avancement du biseau salé. **[18]**

**h) Profil du PZ D :**

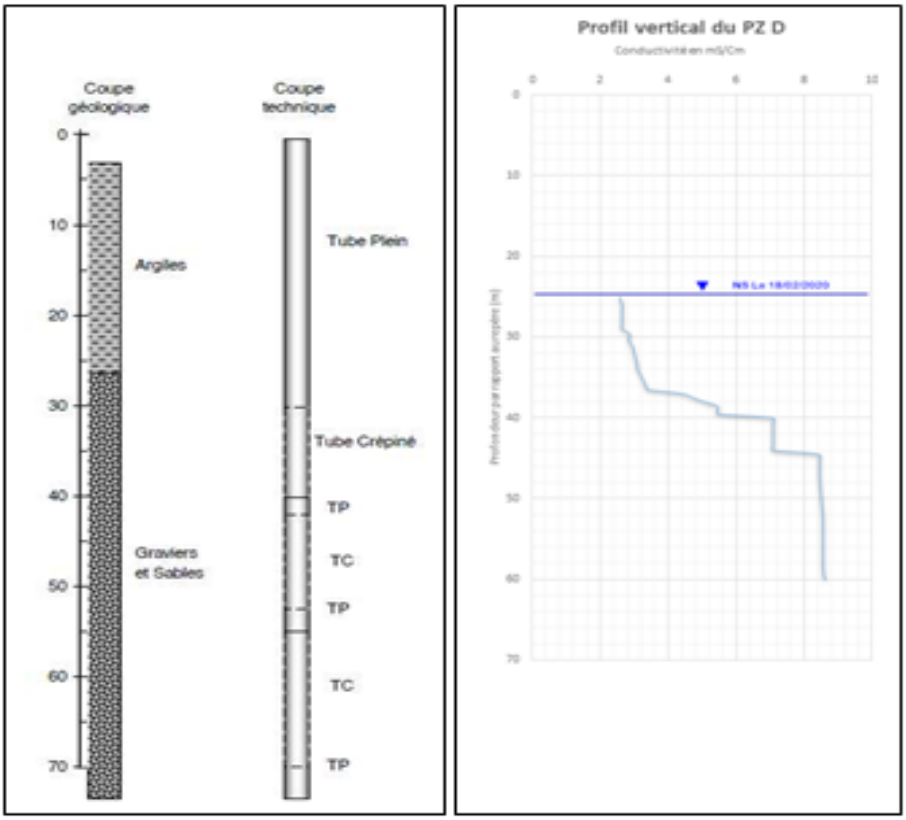



**Figure.67.** Profil vertical de conductivité du PZ D **[18]**

- Interprétation :

Dans ce piézomètre **(Figure.73.),** on remarque que la conductivité à la surface est de **2300 uS/Cm** et augmente progressivement de **25 m** jusqu'à **44 m** de profondeur et se coïncide à **8200 uS/Cm** jusqu'au fond. En **2007** la conductivité était stable autour de **1000 uS/Cm** et en **2009**, elle augmente pour atteindre une valeur maximum de **2000 uS/Cm.**

On constate que ce piézomètre est contaminé. **[18]**

**i) Profil du PZ F :**

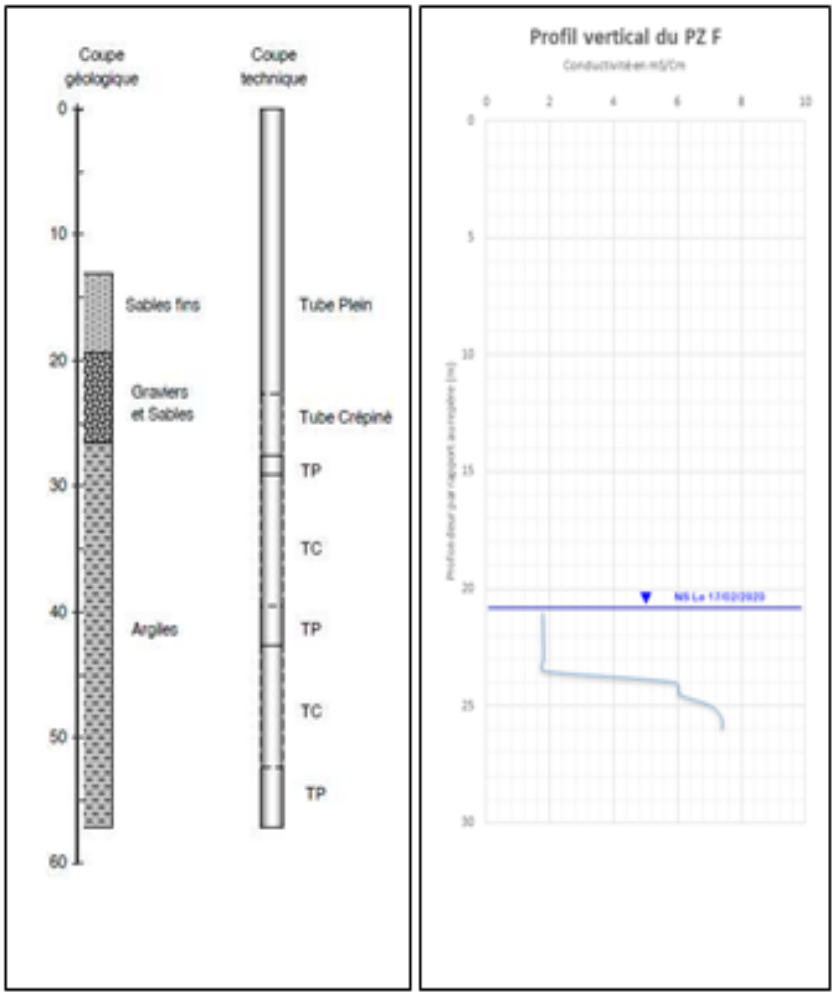



**Figure.68.** Profil vertical de conductivité du PZ F **[18]**

- Interprétation :

Dans ce piézomètre **(Figure.74.),** le niveau statique est à **21 m** et la conductivité est **1900 uS/Cm**, et à partir du premier tube crépine on remarque une augmentation agressive de conductivité sur une courte distance de **3 m** pour atteindre **7400 uS/Cm** comme une valeur maximale. **[18]**

**j) Profil du PZ E :**

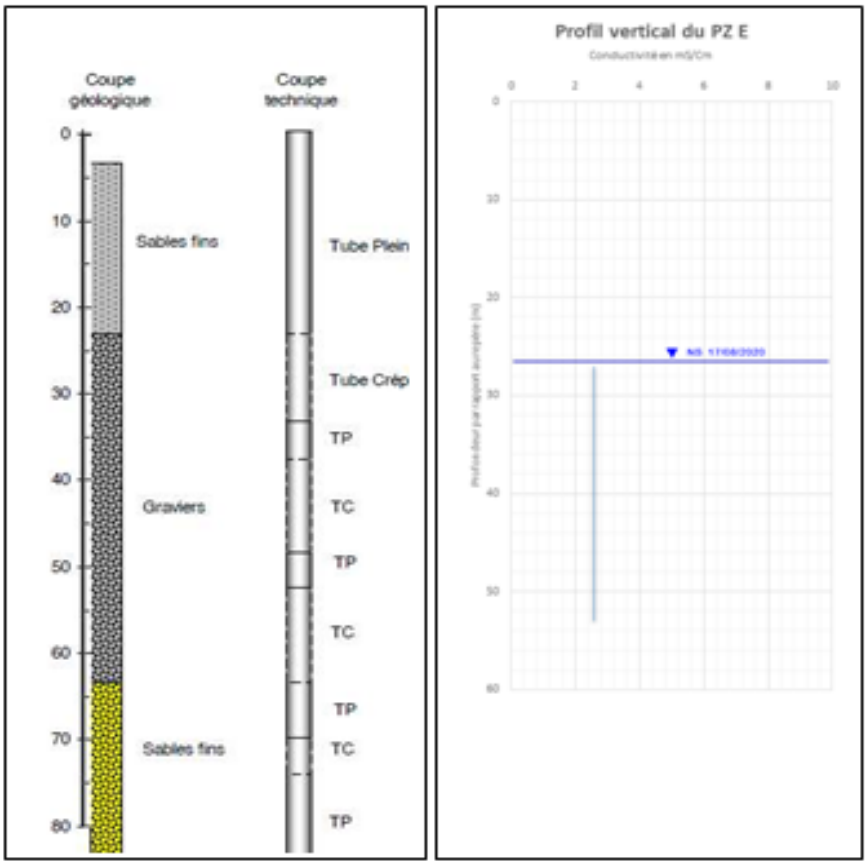



**Figure.69.**Profil vertical de conductivité du PZ E **[18]**

- Interprétation :

Dans ce piézomètre **(Figure.75.),** on remarque que la conductivité est stable dès le début de mesure à une valeur de **2570 uS/Cm**. En **2007** et **2009,** la conductivité était stable autour de **2000 uS/Cm.** On observe une augmentation légère durant la période **2009 – 2020,** alors on peut dire qu'il est en voie de contamination. **[18]**

**k) Profil du PZ Hamiz 1:**

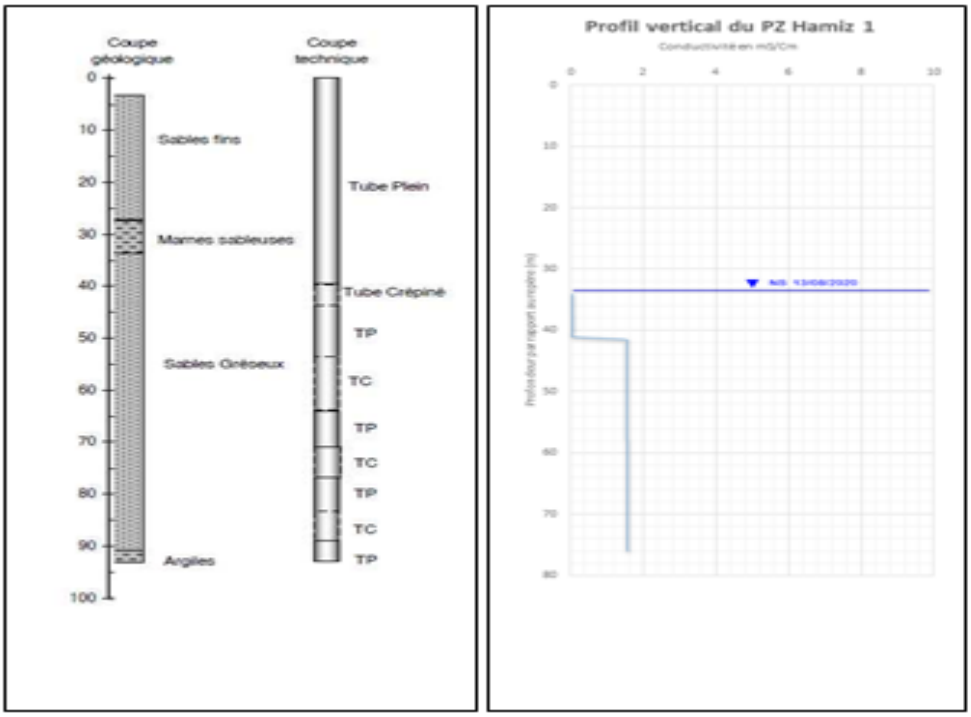



**Figure.70.**Profil vertical de conductivité du PZ 1 Hamiz **[18]**

- Interprétation :

Dans le **Pz 1 Hamiz,** on remarque que la conductivité est de **340 uS/Cm** à partir de **34 m** à **41 m** de profondeur et s'augmente brusquement pour atteindre **1500 uS/Cm** et se stabilise jusqu'au fond **76 m (Figure76.) [18]**

**l) Profil du PZ Hamiz 2:**

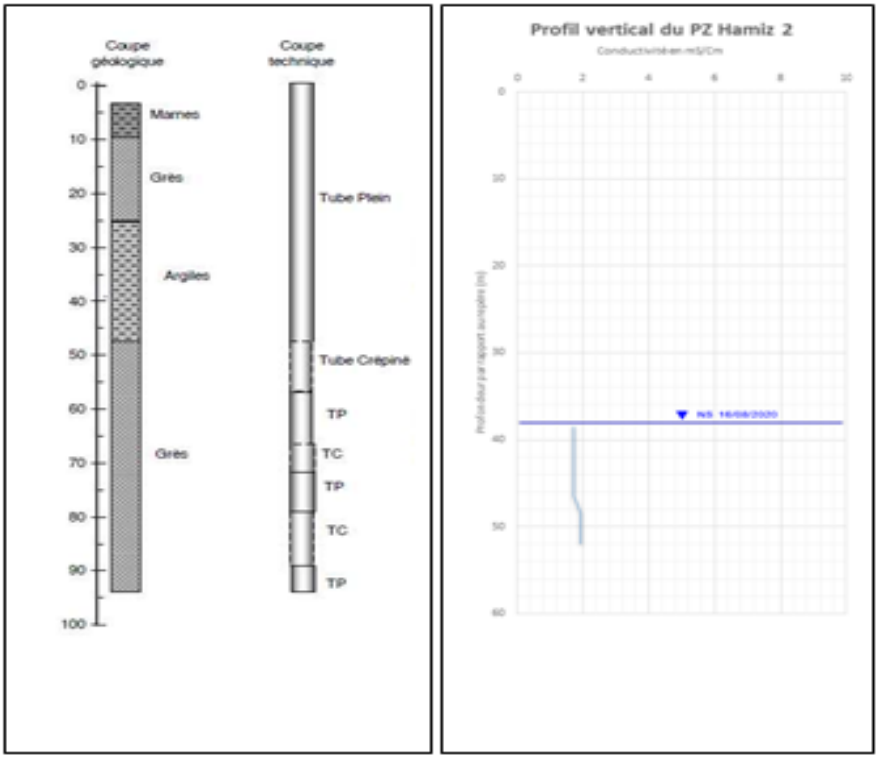



**Figure.71.** Profil vertical de conductivité du PZ 2 Hamiz **[18]**

- Interprétation :

Dans le **PZ 2 Hamiz**, on observe que la conductivité varie entre **1800 uS/Cm** et **2000 uS/Cm.** En **2009**, la conductivité était autour de **1000 uS/Cm,** alors on peut dire que la salinité a augmenté ce qui peut être explique par un effet de l'intrusion sous le pompage excessif des forages du champ captant d'el Hamiz **(Figure.77.). [18]**

**m) Profil du PZ 41 :**

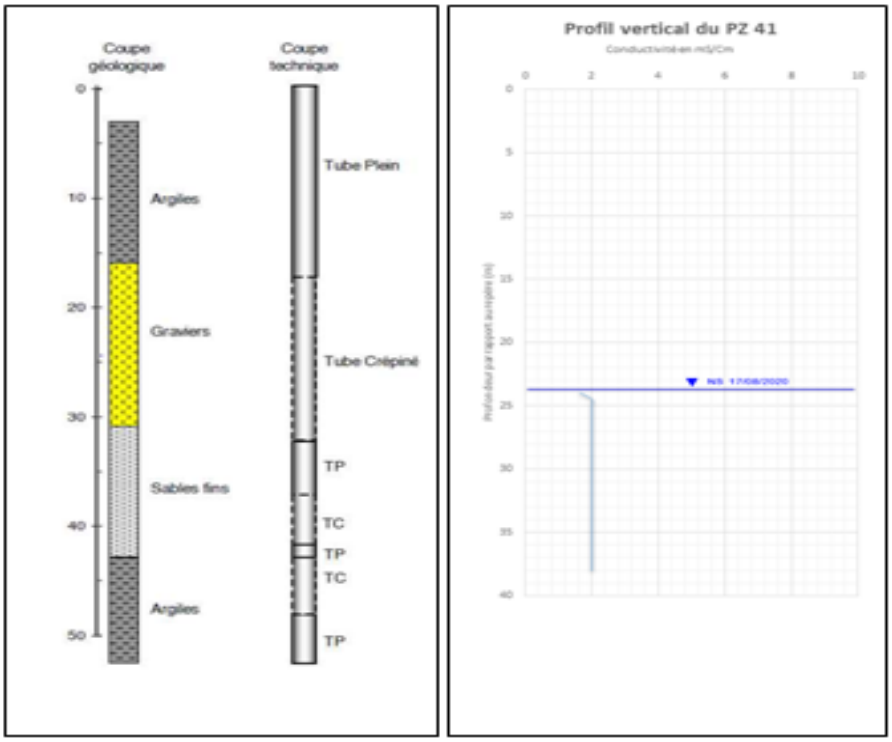



**Figure.72.** Profil vertical de conductivité du PZ 41**[18]**

- Interprétation :

Ce profil enregistre une valeur de conductivité **2500 uS/Cm.** A la profondeur de **32 m** la conductivité reste stable le long du piézomètre jusqu'au fond. En 2009 la conductivité était **2000 uS/Cm** donc on peut dire que ce piézomètre est en voie de contamination **(Figure.78.) [18]**

## 4.3.3. Les facies chimique :

### 4.3.3.1. Introduction :

Le faciès chimique est déterminé en analysant la concentration des ions majeurs présents dans l'eau : calcium, magnésium, sodium et potassium pour les cations, ainsi que bicarbonate, chlorure et sulfate pour les anions.

La composition ionique ainsi obtenue permet de classer l'eau selon un faciès spécifique.

Cette classification, basée sur les ions majeurs, permet d'identifier et de comparer les différents types de faciès présents dans une région ou au sein d'un aquifère, qu'il s'agisse d'eaux souterraines ou de surface. **[18]**

### 4.3.3.2. La Méthode de classification :

Le diagramme de Piper nous permet de voir la répartition et la variation dans le temps et dans l'espace. **[18]**

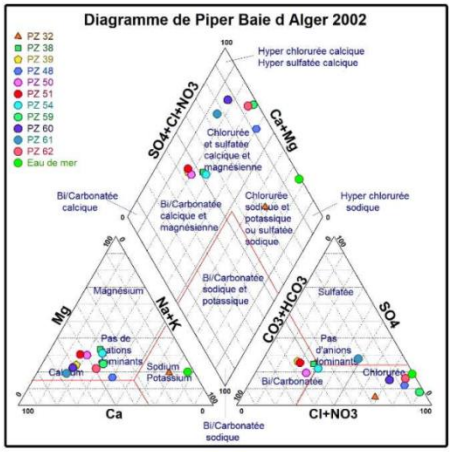



Fig.70 : Diagramme de Piper relatif aux points d'eau prélevés à la baie d'Alger 2002

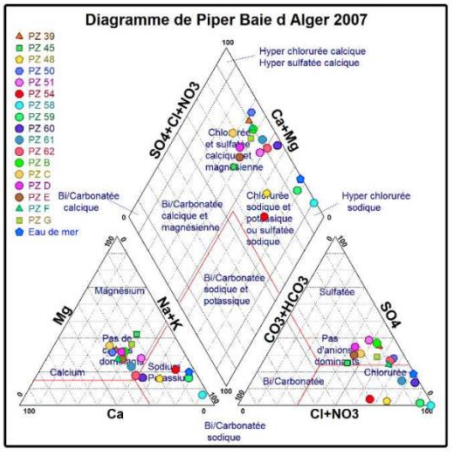



Fig.71 : Diagramme de Piper relatif aux points d'eau prélevés à la baie d'Alger 2007

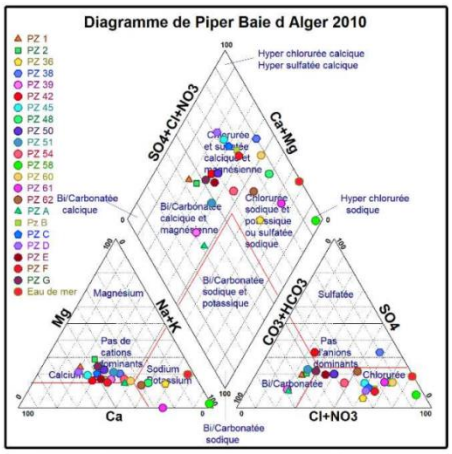



Fig.72 : Diagramme de Piper relatif aux points d'eau prélevés à la baie d'Alger 2010

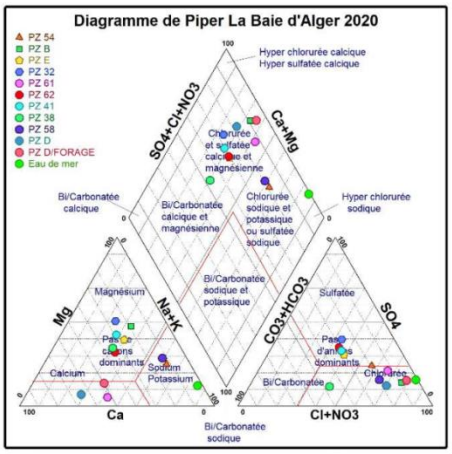



Fig.73 : Diagramme de Piper relatif aux points d'eau prélevés à la baie d'Alger 2020

**Figure.73.** Le diagramme de Piper **[18]**

- **Baie d'Alger 2002 :**

La représentation des données d'analyses chimiques des points d'eau de la baie d'Alger en 2002 sur le diagramme de Piper **(Figure.79)** permet de distinguer trois groupes :

**1er groupe** (PZ 38, PZ 48, PZ 54, PZ 59, PZ 60, PZ 61, PZ 62) ont un facies du type chlorurée et sulfatée calcique et magnésienne avec une augmentation de concentration de calcium.

**2ème** groupe (PZ 38, PZ 39, PZ 50, PZ 51 et PZ 54) ont un facies du type bicarbonatée calcique et magnésienne avec une augmentation de concentration de sulfate pour PZ 38 et PZ 54.

**3ème groupe** (PZ 32 et Eau de mer) ont un facies du type chlorurée sodique et potassique ou sulfatée sodique dont le point de l'eau de mer est hyper chlorurée sodique.

Ce facies témoigne une intrusion marine à la baie d'Alger en 2002. **[18]**

- **Baie d'Alger 2007**

La représentation des données d'analyses chimiques des points d'eau de la baie d'Alger en 2007 sur le diagramme de Piper **(Figure.79)** permet de distinguer deux groupes :

**1er groupe** (PZ 39, PZ 45, PZ 50, PZ 51, PZ 59, PZ 60, PZ 61, PZ 62, PZ C, PZ D, PZ E, PZ F et PZ G) ont un facies du type chlorurée et sulfatée calcique et magnésienne avec une augmentation de concentration de calcium.

**2ème groupe** (PZ 48, PZ 54, PZ 58, PZ B et Eau de mer) ont un facies du type chlorurée sodique et potassique ou sulfatée sodique dont les points PZ B PZ 58 et Eau de mer sont hyper chlorurées sodiques.

Ce facies témoigne de l'avancée de l'eau de mer de plus en plus en 2007. **[18]**

- **Baie d'Alger 2010**

En 2010 sur le diagramme de Piper **(Figure.79)** permet de distinguer trois groupes :

**1er groupe** (PZ 2, PZ 38, PZ 42, PZ 45, PZ 50, PZ 54, PZ 60, PZ C, PZ D, PZ

E, PZ F et PZ G) ont un facies du type chlorurée et sulfatée calcique et magnésienne.

**2ème groupe** (PZ A, PZ B, PZ 1, PZ 39 et PZ 51) ont un facies du type bicarbonatée calcique et magnésienne.

**3ème groupe** (PZ 36, PZ 48, PZ58, PZ 61, PZ 62 et Eau de mer) ont un facies du type chlorurée sodique et potassique ou sulfatée sodique dont PZ 58 et le point de l'eau de mer sont hyper chlorurée sodique.

Ce facies témoigne une intrusion marine à la baie d'Alger en 2010**. [18]**

- **Baie d'Alger 2020**

En 2020 sur le diagramme de Piper **(Figure.79)** permet de distinguer deux groupes 1er groupe (PZ B, PZ E, PZ 32, PZ 61, PZ 62, PZ 41, PZ D D/FORGAE et PZ 38) ont un facies du type chlorurée et sulfatée calcique et magnésienne.

2ème groupe (PZ 54, PZ 58, et l'eau de mer) ont un facies du type chlorurée sodique et potassique ou sulfatée sodique.

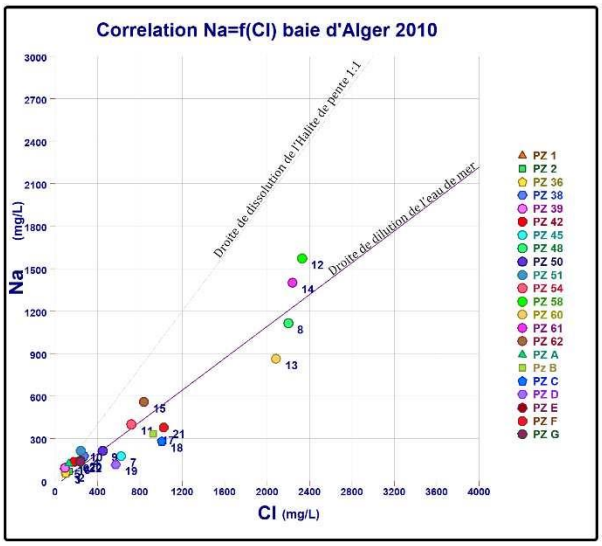
Les piézomètres ou l'intrusion été déjà atteintes ont vu leur facies tendre beaucoup plus vers les pôles chlorures sodique ce qui indique que le phénomène est toujours en évolution en 2020. **[18]**

4.4.4. Étude de couple chimique Na-Cl :

La corrélation de **Na-Cl** montre que les points qui s'alignent sur la droite de dissolution de la Halite de pente 1. On remarque 3 groupes :

- ✓ **1er** Groupe : les points **(1, 2, 3, 4, 5, 8, 10, 16, 20 et 22)** se répartissent sur la droite de la dissolution de l'Halite.
- ✓ **2ème** Groupe : les points **(7, 9, 11, 15, 17, 18, 19 et 21)** sont éloignés de la droite de dissolution de l'Halite.
- ✓ **3ème** Groupe : les points **(8, 12, 13 et 14)** sont repartissent sur la droite de dilution de l'eau de mer.

**2 ème et 3ème** groupe s'alignent sur la droite de dilution de l'eau de mer, et donc subit un apport d'eau salée, on peut dire qu'il y a un mélange entre les eaux de mer et les eaux de la nappe **(Figure.80.). [18]**



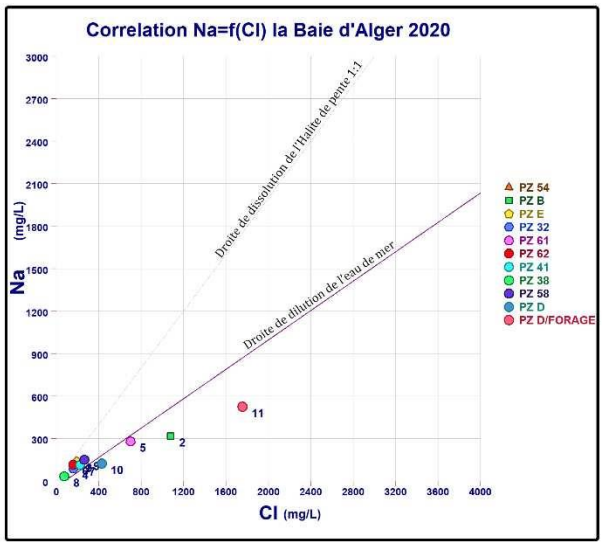




**Figure.74.**Variation de sodium en fonction de chlorures la Baie d'Alger en 2010**[18]** **Figure.75**. Variation de sodium chlorures la Baie d'Alger en 2020**[18]**

## 4.4. Cartes iso-teneurs :

Les cartes iso-teneurs permettent l'analyse de la variabilité spatiale de concentration des éléments chimiques dans la zone d'étude et prévoir de l'évolution de l'intrusion marine. **[18]**

**a)Interprétation des cartes d'iso-teneurs en conductivité :**

- **En 2007 :**

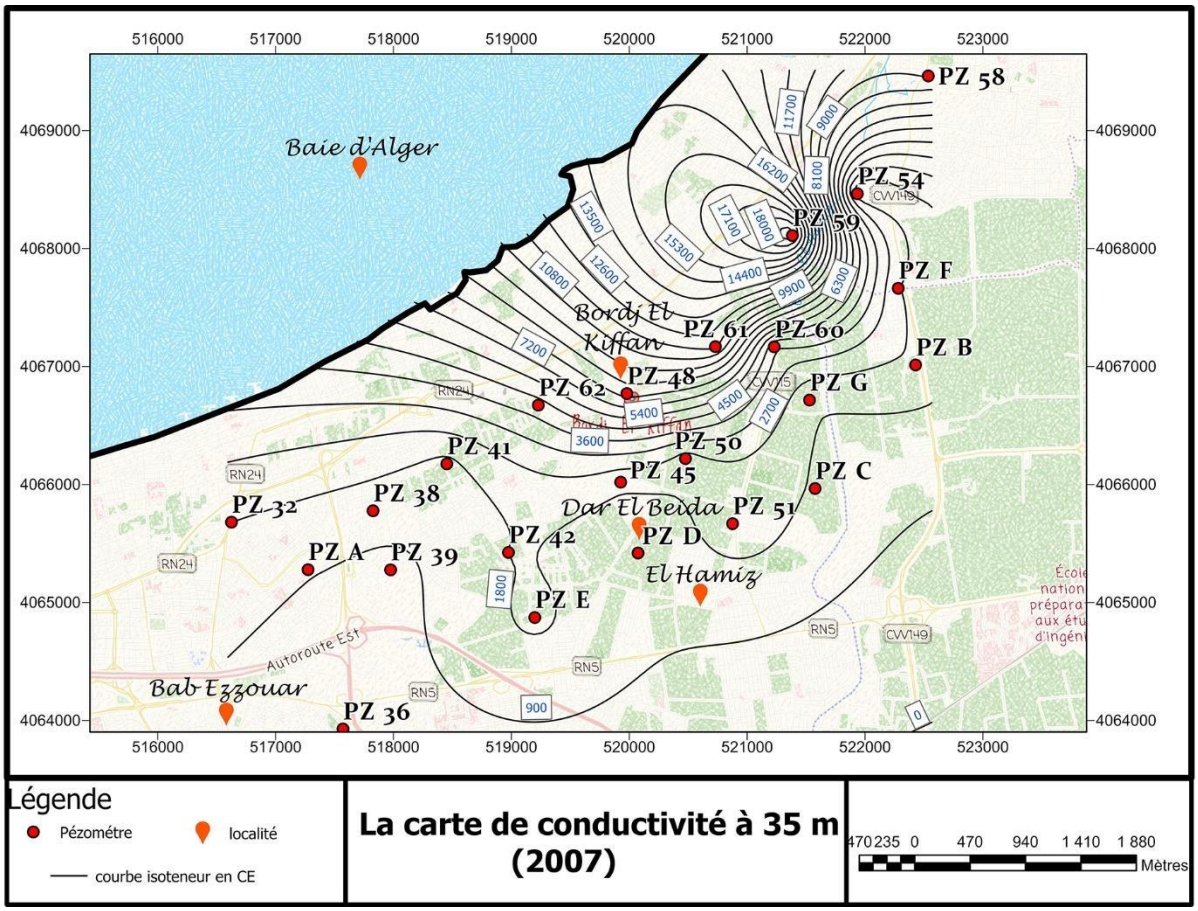



**Figure.76.**Carte de conductivité à 35 m de Juillet 2007 réalisé à l'aide de logiciel surfer

**[18]**

- Interprétation :

Après l'examen de la carte iso-teneurs en conductivité que nous avons établi on remarque qu'on a une conductivité très élevé à l'ordre de **18000 uS/Cm** au niveau du **PZ 59** qui s'étends pour toucher le **PZ 58, PZ 48, et PZ 61** qui ont une conductivité varie entre **8550 uS/Cm** et **12050 uS/Cm**. La courbe iso valeur de **5400 uS/Cm** atteint le **PZ 62** ce qui n'était pas le cas à les années précédents mettant en évidence l'envahissement de toute la bordure côtière est par les eaux salées **(Figure.82.). [18]**

- **En 2020 :**

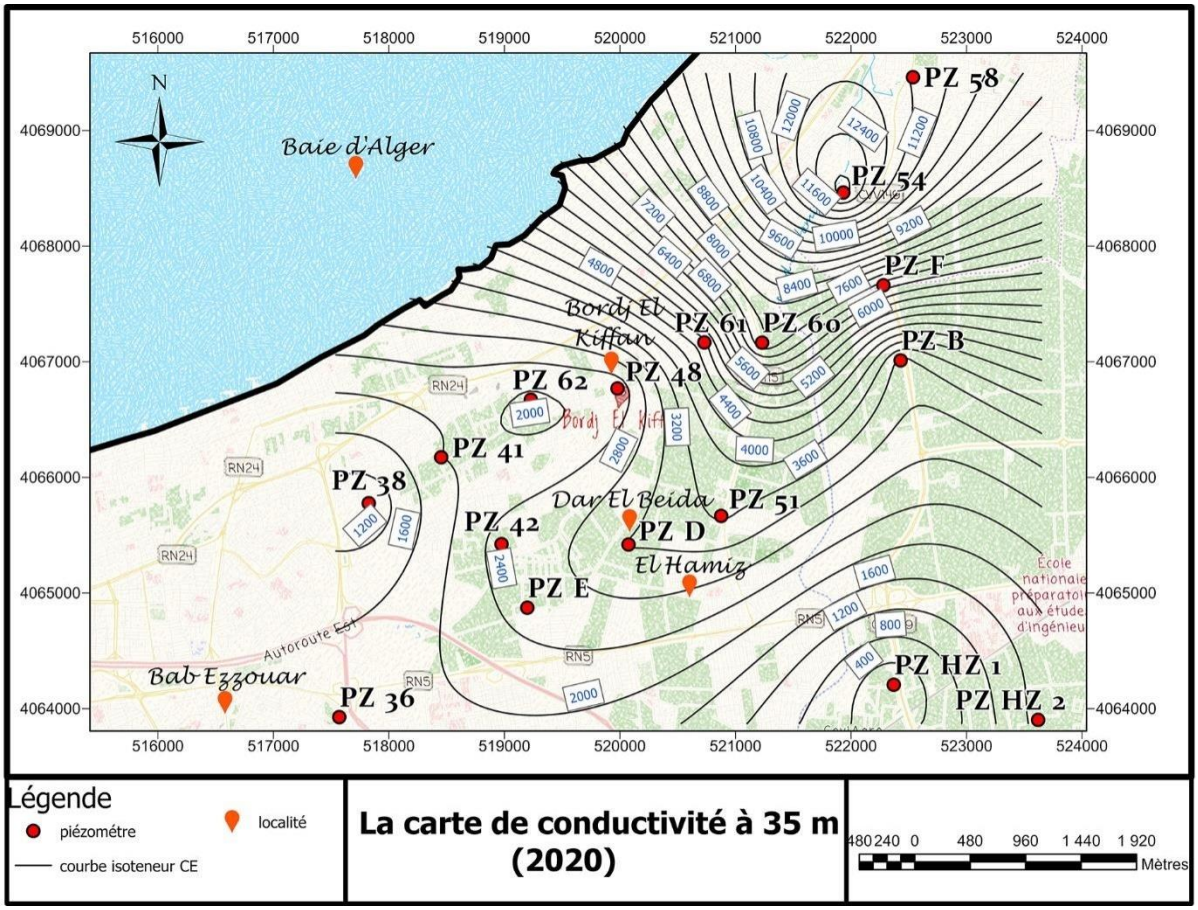



**Figure.77.** Carte de conductivité à 35 m de Février 2020 réalisé à l'aide de logiciel surfer

**[18]**

- Interprétation :

En **2020** on constate qu'on a une augmentation de la conductivité par rapport aux années précédentes au **PZ E, PZ 48 et PZ 42** qui augmente de **1500 uS/Cm** à **2400 uS/Cm** c'est-à-dire le front salé avance de plus en plus vers le sud suivant le sens d'écoulement. Près de la cote, on à des conductivités très élevés qui dépasse **12000 uS/Cm.** on a également constaté qu'on a une salinité d'origine marine **(Figure.83.) [14]**

## b) Interprétation des cartes d'iso-teneurs en Chlorures et Sodium :

- **En 2006 :**

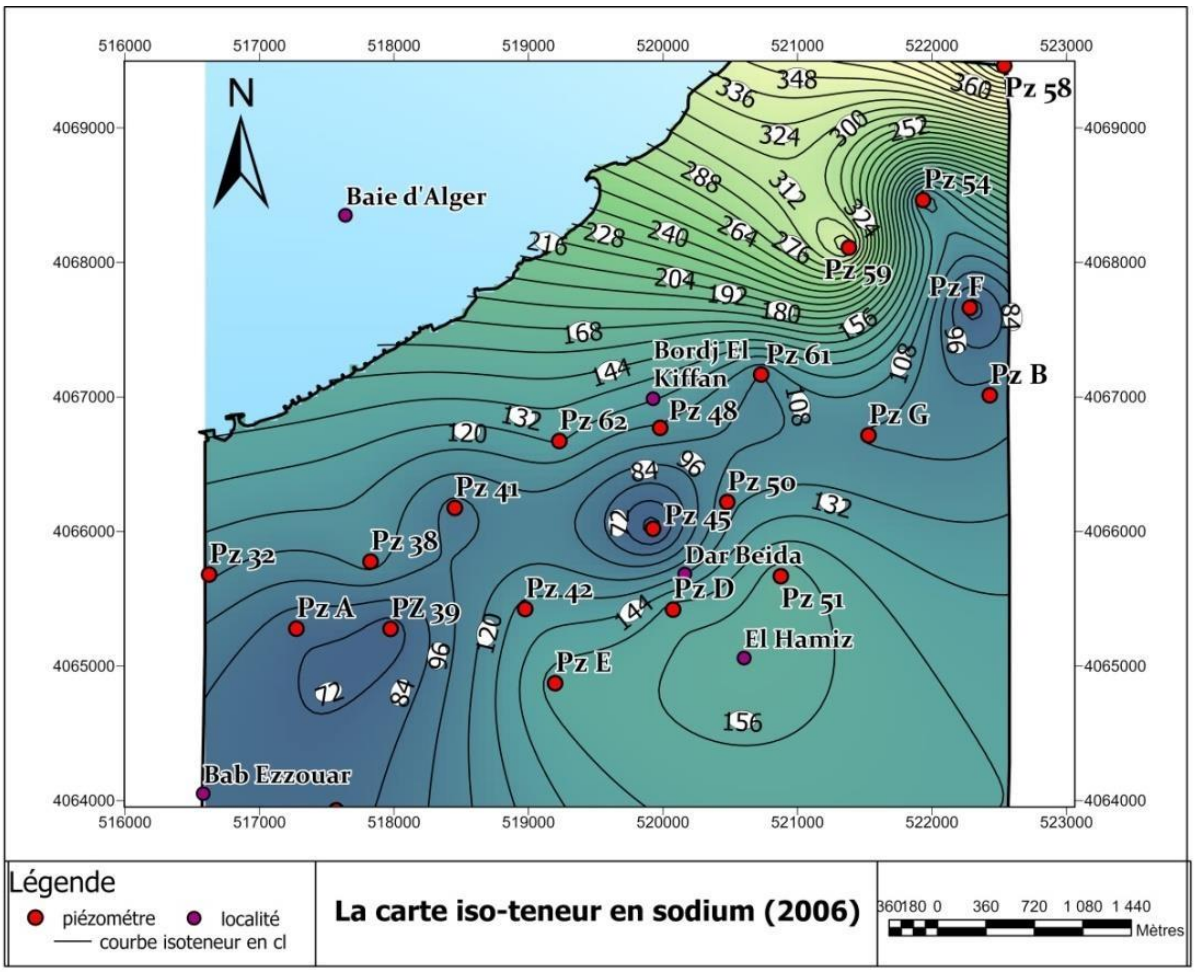



**Figure.78.** Carte iso-teneur en Na+ Février 2006 réalisé à l'aide de logiciel surfer

**[18]**

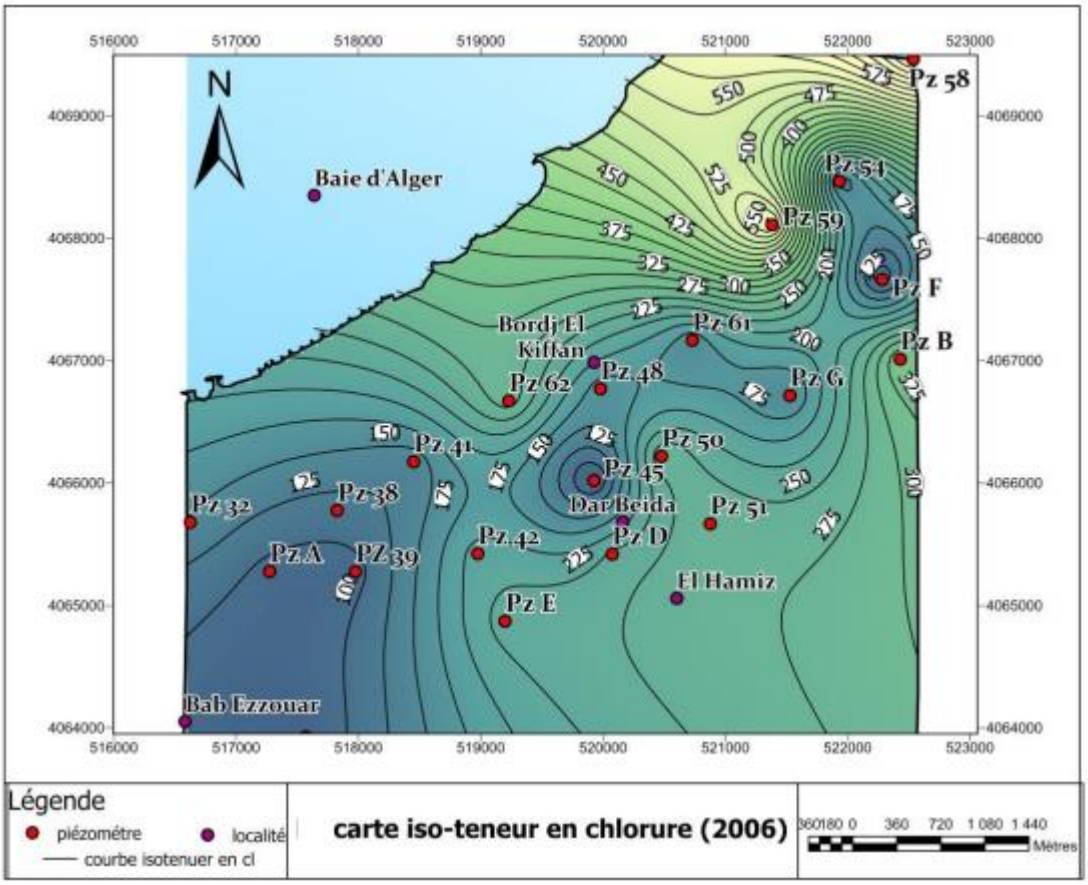



**Figure.79.**Carte iso-teneur en cl- Février 2006 réalisé à l'aide de logiciel surfer

**[18]**

- Interprétation :

L'examen des cartes iso-teneur en sodium et chlore **(Figure.84.) et (Figure.85.)** montre une augmentation de la concentration du sodium au nord et une diminution au sud. Les valeurs maximales de teneur en sodium enregistrée aux alentours du piézomètre **PZ 58 et PZ 59** qui sont située le long de la côte Est. Ce qui montre la présence d'une intrusion marine assez importante. **[18]**

- **En 2020 :**

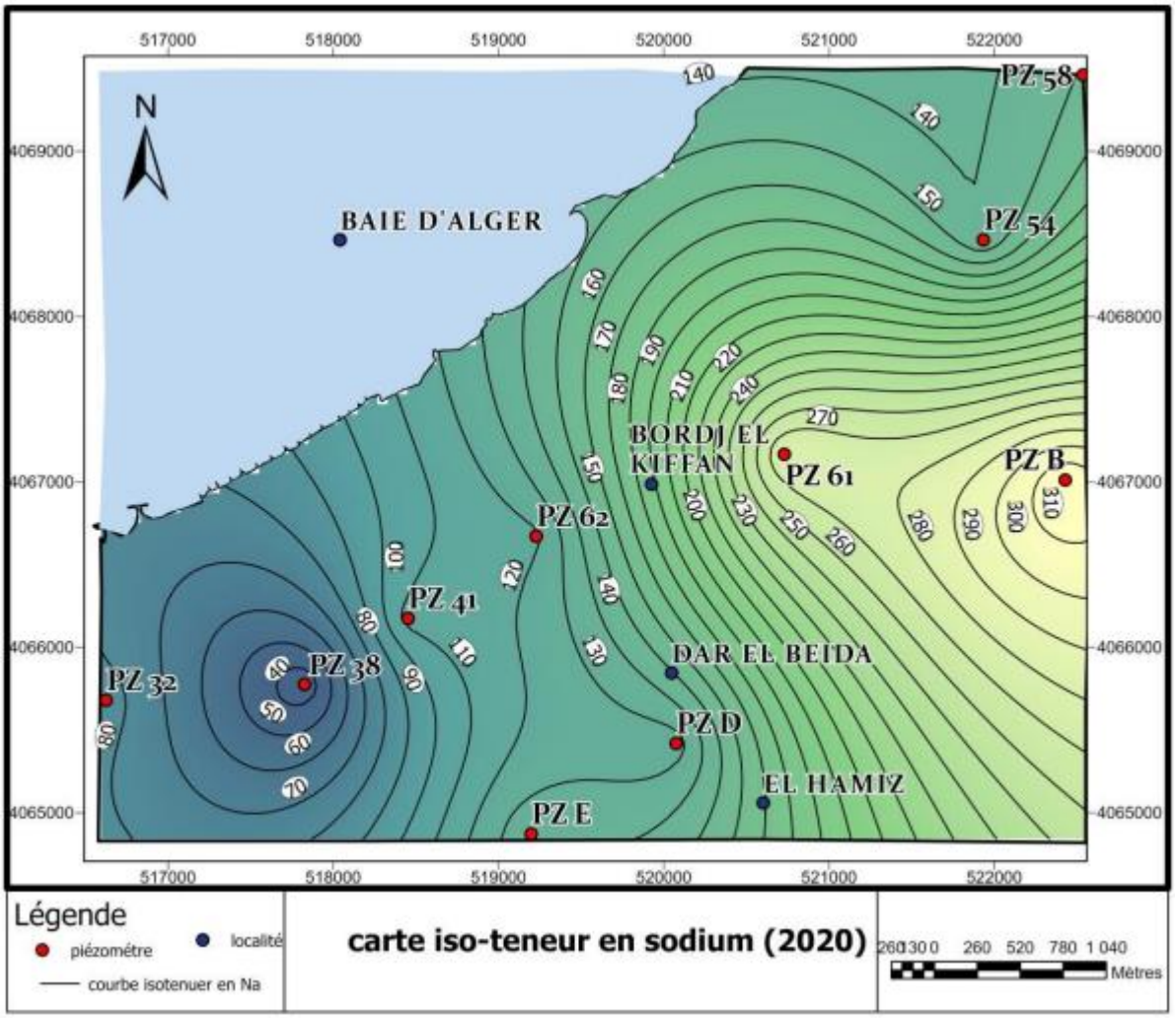



**Figure.80.**Carte iso-teneur en Na+ Février 2020 réalisé à l'aide de logiciel surfer

**[18]**

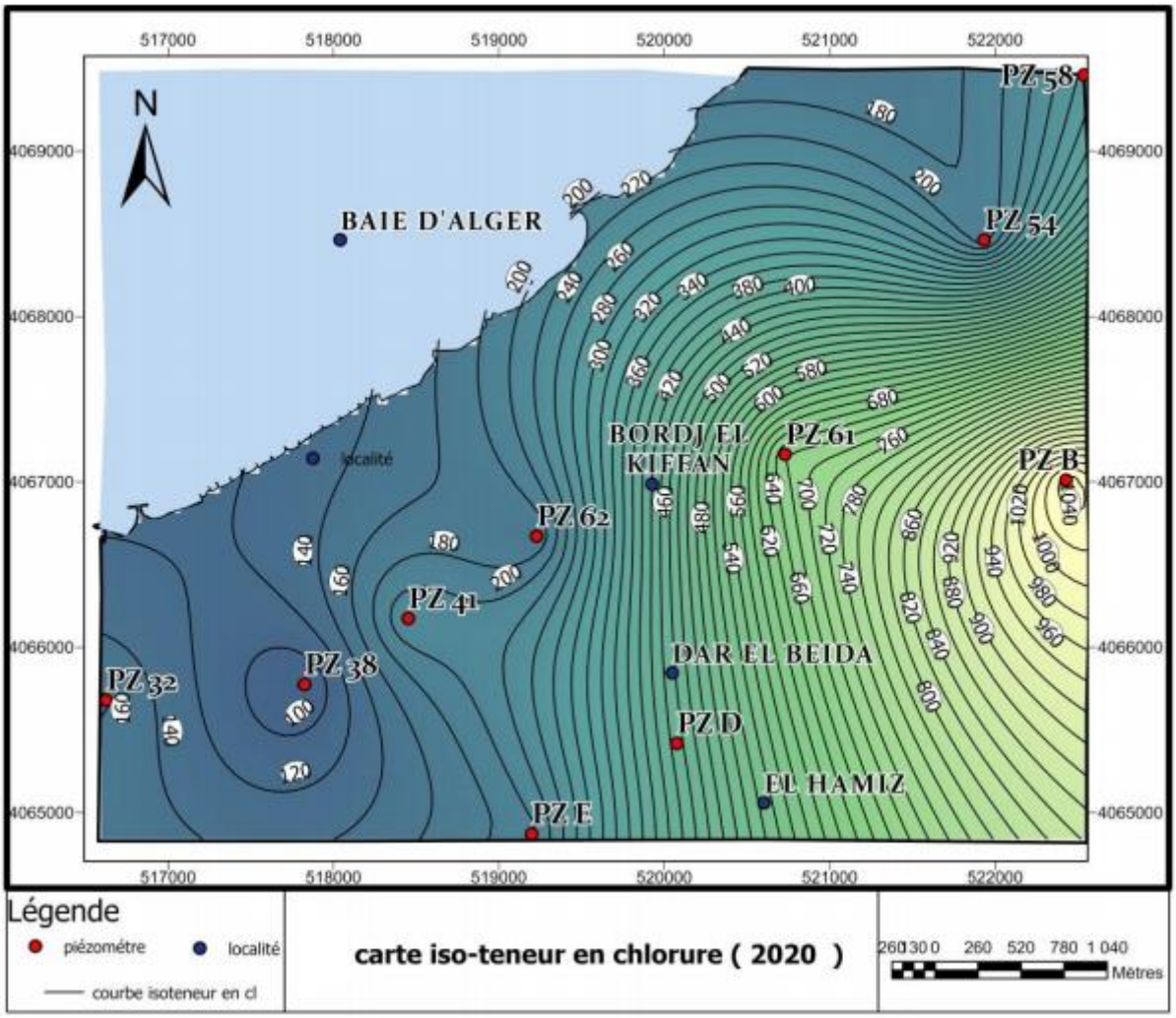



**Figure.81.**Carte iso-teneur en Cl- Février 2020 réalisé à l'aide de logiciel surfer

**[18]**

- Interprétation :

L'examen des cartes iso-teneur en sodium et chlorures **(Figure.86.) et (Figure.87.)** montre que la concentration de sodium et chlorures augmente au PZ B cette progression en concentration est dû à l'avancement du front salée qui est provoqué par le cône de dépression créé au niveau du champ de captage d'El Hamiz qui situe à **1 Km du PZ B**. **[18]**

## 4.5.État approximatif du biseau en2019/2020 :

La carte des conductivités actuelle **(2020)** 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, PZ 61, PZ 60 et PZ 62.** Ce qui n'était pas le cas au cours des années précédentes. **[18]**

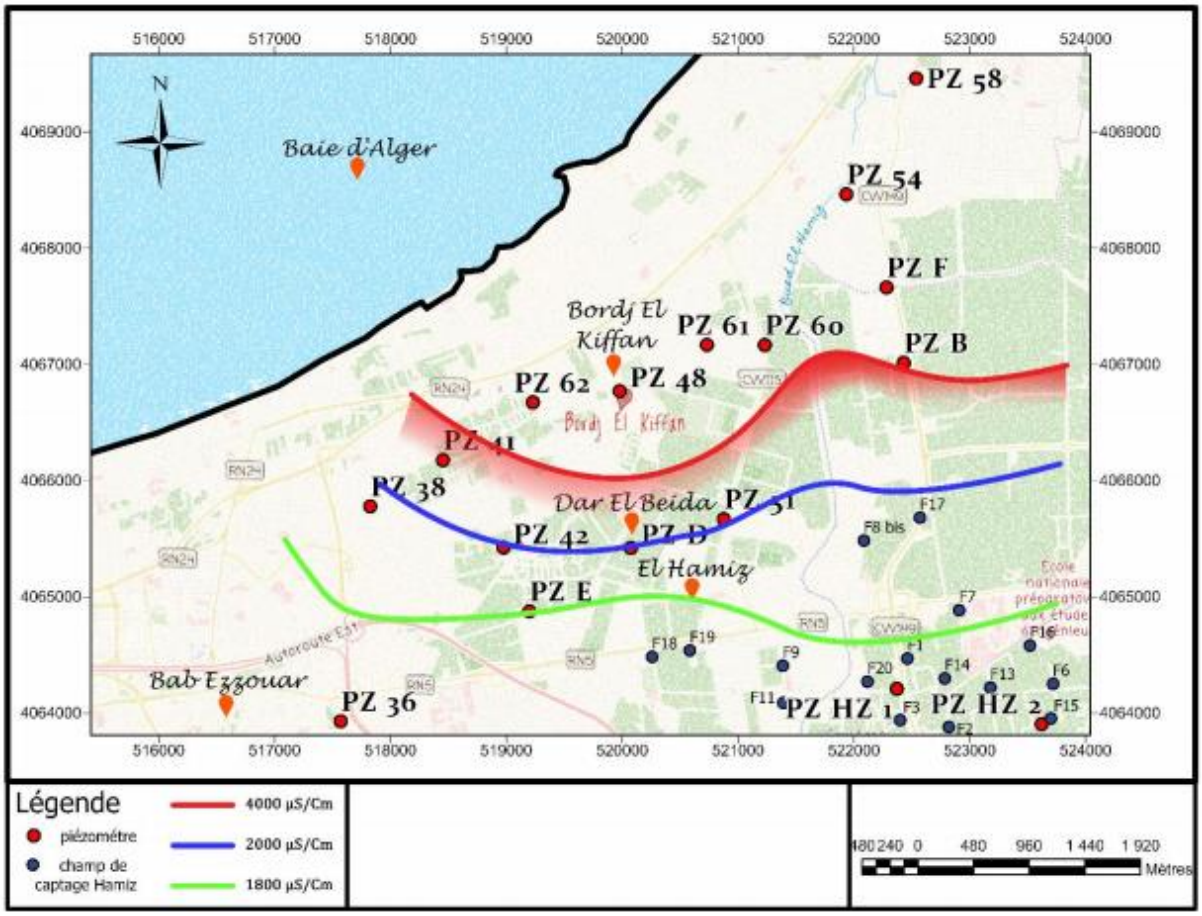



**Figure.82.**État du approximatif du biseau en 2019/2020 la baie d'Alger **[18]**

## Conclusion :

L'évolution spatio-temporelle de tous les paramètres chimiques suggèrent que le phénomène de l'expansion de l'intrusion marine est toujours en évolution continu. **[18]**

## Conclusion *générale*

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

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

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

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

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

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

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

L'étude piézométrique a montré une inversion du sens d'écoulement de la mer vers la nappe, due essentiellement à la surexploitation de la ressource souterraine à partir des années 1985/1990.

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

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

L'extension maximale de l'intrusion marine s'étend sur près de 6 km vers le champ captant du Hamiz en 2009 et en 2021/2025.

## ***Recommandations***

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

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

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

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

# *REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE*


**[1] http:/www.lenntech.fr**

**[2] http:/www.solinst.com/Res/papers.101C4Salt.html**

**[3] Berdja, F, 2001 : Note préliminaire sur l'invasion marine au niveau de la baie**

**D'Alger, ANRH (Alger).**

**[4] Sidi Moussa Mohamed Fouzi, Avril2006 : Le phénomène d'intrusion marine**

**De la nappe de la Mitidja dans la baie d'Alger (ANRH)**

**[5] Younsi A, 2001 : Méthodologie de mise en évidence de mécanismes de salure des eaux souterraines côtières en zone semi-aride irriguée (Chaouia côtière, Maroc). Thèse d'Etat. Univ Doukali El Jadida.**

**[6] BENAICHE Billal(2011). ETAT DE L'INTRUSION MARINE DANS LA BAIE D'ALGER cas des champs de captage de Boureah et Hamiz : MEMOIRE DE MASTER, Université Saad Dahleb - Blida.**

**[7] Calvache, M.L. et Polido-Bosch, A, 1996 : Processus d'intrusion-extrusion marine dans les aquifères côtiers du sud de l'Espagne.R.Acad. Sci. Paris.323, série 2a, 673-679.**

**[8] Olive l. 1996 : Introduction à la géochimie des eaux continentales. Tempus S-JEP 09781/95, Gestion et protection des ressources en eau.**

**[9] Simmers I.1997. Recharge of phreatic Aquifers in (semi-) Arid. Areas. Intern.**

**Ass- hydrogeol, 19, F 7918.**

**[10] ZOUGHBI Zineb (2016).Contribution des méthodes hydrodynamique hydrochimique et isotopiques à la connaissance de l'extension du biseau salé sur la Baie d'Alger : Mémoire de fin d'études Master, Université Saad Dahleb - Blida.**

**[11] Rouaida Trabelsi, Moncef Zaïri, Habib Smida, Hamed Ben Dhia2005 : Salinisation des nappes côtières : cas de la nappe nord du Sahel de Sfax, Tunisie**

**[12] Touaibia, B., Mars 2004 : Manuel pratique d'hydrologie**

**[13] Yahiaoui A, 2006 : Etude de l'impact de l'intrusion marine par cartographie assistée par le SIG, de la baie d'Alger. Mémoire d'ingénieur, ENSH.**

**[14] http:/www.solinst.com/Res/papers.101C4Salt.html**

***[15] Sogreah: 2010. Combating Marine intrusion in the Bay of Algiers. Blida, Final Report:* ANRH 2010.**

***[16] Guendouz A and, Moulla A. 2015.Interpretation of vertical conductivity and isotopic data from the Bay of Algiers (Campaign 2005/2007). Internal technical Report CRNA.***

*[17]Guendouz, A. Moulla, A.S.2017 Assessment of seawater intrusion in the bay of Algiers (Algeria) by means of a combined isotope hydrology and hydro geochemistry approach.Seminaire international sur les ressources en eau Hammamet 2017.*

*[18] Zinet Hicham, Becherair Nassima(2020): Étude de l'intrusion marine par les profils de conductivité (Cas de la Baie d'Alger)* **: MEMOIRE DE MASTER, Université Saad Dahleb - Blida.**

*[19] Toubal A. C., D. Djoudar, 2008, Etat actuel de l'invasion marine dans la Baie d'Alger. Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene. Poster présenté au World Water Congress 2008. http://www.iwra.org/congress/2008*

*[20] BEREGH, Juin 2002, geophysics study by the electrical sounding and sismic refration on sure the Bay of Algiers. Internal technical report.ANRH (2002).*

*[21] Roza 2020: Étude par les méthodes électrique de l.anisotropie cas de la Baie d Alger. Thèse de Doctorat université Haouari Boumediene Alger*

*[22] KHOUALED Radja, REMILI(2016). SafaaMise en évidence de l'intrusion marine vers les Aquifères côtiers : cas de la plaine de Mitidja Orientale : MEMOIRE DE MASTER ACADEMIQUE, UNIVERSITE KASDI MERBAH - OUARGLA –*

*[23] Mme. BOUGUECHTOULI née TAKORABT Mebarka(2010). AQUIFERE COTIER EN ZONE FORTEMENT URBANISEE.EVOLUTION DU COMPORTEMENT HYDRODYNAMIQUE ET HYDROCHIMIQUE : CAS DE LA MITIDJA ORIENTALE : MEMOIRE Présenté pour l'obtention du diplôme de MAGISTER, Université Houari Boumediene.*

*[24]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 Rouïba*