

UNIVERSITE SAAD DAHLAB – BLIDA 1

Faculté de Technologie

Département des Sciences de l'Eau et Environnement



MEMOIRE DE MASTER

Filière : **Hydraulique**

Spécialité : **Ressources Hydrauliques**

Thème :

Etude de l'intrusion marine par les profils de conductivité

(Cas la Baie d'Alger)

Réalisé par :

Guebla Lydia

Devant le jury composé de :

Promoteur : M.GUENDOZ. A

Co-promoteur :M.BELAIDI .M

Président : M.BESSENASSE.M

Examineur : Mme. BOUZOUIDJA.S

Promotion 2021 / 2022

Remerciement

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

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

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

Je remercie tout l'équipe de l'Agence Nationale des Ressources Hydrique d'Alger et de Blida et M. BELAIDI Mouloud de m'avoir accordé les données nécessaire pour réaliser ce travail et je tenais vivement à remercier monsieur Belaidi pour tous les conseils dont j'ai pu bénéficier au cours de mon stage que j'ai eu l'opportunité de passer à leur cotés.

Spécial remerciement pour ma Co promotrice une ingénieure compétente qui m'a aidé tout au long de ce mémoire, merci pour votre disponibilité incondionnelle et pour vos conseils et orientations.

Dédicace

Je dédie le fruit de mes 20 ans d'études :

À moi-même et à mes chers parents, aucun hommage ne pourrait être à la hauteur de l'amour qui m'ont offert dont ils ne cessent de me combler. Que Dieu leurs procure beaucoup de santé et une longue vie. Je t'aime
maman je t'aime papa.

À toutes les personnes qui m'ont soutenu tout au long de ce projet et à toute ma famille. À mes sœurs Nesrine ma confidente qui a été toujours présente, et qui a toujours eu les mots qu'il faut, elle a su reconnaître les moments où j'ai simplement eu besoin d'une oreille attentive que dieu la protège. Nassima qui m'a toujours aimé telle que je suis, le plus beau cadeau que nos parents nous aient jamais offert, ma grande sœur Amel et surtout ma jumelle Yusra ma moitié la personne la plus importante dans ma vie. À tata Malika et tonton Khaled que j'aime énormément, que dieu les bénissent. À mes frères, spécialement Malek, Youcef et mon grand frère Redha. À mes neveux Chakib et wassim, Mohamed et Abderrahmane, sans oublier la petite Alae. Aucun langage ne saurait exprimer mon respect et ma considération à ma famille pour leur soutien et encouragements. Je vous dédie ce travail en reconnaissance de l'amour que vous m'offrez quotidiennement. Que dieu vous garde pour moi.

Une spéciale dédicace à ZAHIDA BAKDACHE, à qui je dédie ce travail. Zaza mon amie, ma sœur, ma confidente et au-delà, j'ai eu beaucoup de chance de te connaître et d'être ton amie et ta sœur, si j'ai réussi à atteindre cet objectif, ce succès c'est en grande partie grâce à toi, je voudrais te témoigner toute ma reconnaissance ; non seulement tu m'as donné des conseils prodigieux, mais aussi tu t'es vraiment engagé pour m'épauler durant toute cette période. Je tiens à te faire part de toute ma gratitude

pour l'aide et le soutien morale que tu m'as apporté dans toutes les situations possibles et inimaginables. Tu as toujours répondu présente et pour cela je ne saurais trouver les mots capables d'exprimer ma gratitude et qui soit à la mesure de ma reconnaissance .merci de m'avoir offert ton amitié.

Résumé

Ce travail rentre dans le cadre de la poursuite d'une série de projet fin d'étude intérieurs sur le suivi de l'évolution du biseau salé ,ce phénomène c'est un problème d'actualité, à savoir la pollution des nappes phréatiques côtières par l'invasion des eaux marines qui s'accroît de plus en plus avec les changements climatiques et l'accroissement de la démographie et des besoins. Les causes principales de ce phénomène sont dues principalement aux pompages intensifs associés au déficit pluviométrique et à la nature lithologique des aquifères.

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 entraîné 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 continue de la qualité des eaux souterraines. L'objectif principal de ce mémoire est de faire un constat sur l'état actuel (2021/2022) de l'invasion marine dans la baie d'Alger qui se trouve confronté à ce phénomène depuis les années quatre-vingt-cinq (1985) et ce par l'utilisation de différentes approches notamment hydrodynamiques (chronique des relevés piézométriques) et hydro chimiques (utilisation de la technique des profils de conductivité) 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 salée et son positionnement actuel

Mots clés : invasion marine, profil de conductivité, piézométrie, aquifère côtier.

Abstract

In this research work, we focus on an actuality problem which is the sea water intrusion in coastal aquifers which is increasingly becoming more acute by climate change and population growth. The main causes of this phenomenon are mainly due to the intensive pumping associated with the rainfall deficit and the lithological nature of the aquifers. Algeria, like all countries bordering the Mediterranean, has experienced drought for the past three decades. Water shortages have led to a very increased demand for groundwater for the needs of agriculture, industry and drinking water supply, particularly in coastal areas, leading to overexploitation of the latter, which has resulted in the continual degradation of the quality of underground waters. The main objective of this thesis is to make an observation on the current state (2021/2022) of the marine invasion in the bay of Algiers which has been confronted with this phenomenon since the eighty-five years (1985) and this by the use of various approaches in particular hydrodynamic (chronicle of the piezometric readings) and hydrochemical (use of the technique of the profiles of conductivity) The interpretation of the results of these approaches made it possible to specify the spatio-temporal evolutions of the salinity; piezometry as well as the displacement of the salt front and its current position.

Keywords : marine invasion, conductivity profile, piezometry, coastal aquifer.

المخلص

كرس هذا العمل البحثي لدراسة مشكلة حالية، لمعرفة تلوث المياه الجوفية الساحلية عن طريق غزو المياه البحرية التي أصبحت أكثر وأكثر حدة مع تغير المناخ وزيادة في الديمغرافيا والاحتياجات. ترجع الأسباب الرئيسية لهذه الظاهرة بشكل رئيسي إلى الضخ المكثف المرتبط بنقص هطول الأمطار والطبيعة الصخرية لخزانات المياه الجوفية.

شهدت الجزائر، مثل جميع البلدان المطلة على البحر الأبيض المتوسط ، الجفاف على مدار العقود الثلاثة الماضية. أدى نقص المياه إلى زيادة كبيرة في الطلب على المياه الجوفية لاحتياجات الزراعة والصناعة وإمدادات مياه الشرب، لا سيما في المناطق الساحلية، مما أدى إلى الإفراط في استغلال الأخيرة، مما أدى إلى التدهور المستمر في جودة المياه الجوفية. الهدف الرئيسي من هذه الأطروحة هو رصد الوضع الحالي (2022/2021) للغزو البحري لخليج الجزائر والذي واجه هذه الظاهرة منذ خمسة وثمانين عاما (1985) وهذا من قبل استخدام مناهج مختلفة، ولا سيما الهيدروديناميكية (تأريخ قراءات قياس الضغط) والهيدروكيميائية (استخدام تقنية ملامح الموصلية) من قياس الضغط وكذلك إزاحة جبهة الملح وموضعها الحالي.

الكلمات المفتاحية: الغزو البحري، الموصلية، قياس الضغط، الخزان الجوفي الساحلي

Introduction générale	1
CHAPITRE 01 : Présentation du phénomène de l'intrusion marine	
1.1. Introduction	2
1.2. Généralités sur l'intrusion marine	2
1.2.1. Définition du phénomène.....	2
1.2.2. Méthodes de caractérisation et de localisation du phénomène d'intrusion marine	4
1.2.2.1. Approche piézométrique	4
1.2.2. Approche hydrodynamique	6
1.2.3. Limites d'application des schémas théoriques et limites de validités.....	9
1.2.3.1.Approche géophysique.....	10
1.2.3.2. Méthode de prospection électrique	11
1.2.3.2.1. Sondage électrique	11
1.2.3.2.2. Profils de résistivité	13
1.3. Méthodes magnétotellurique et électromagnétique.....	14
1.3.1. Méthode magnétotellurique.....	14
1.3.2. Méthode électromagnétique.....	14
1.3.3. Méthode de diagraphe géophysique.....	14
1.3.3.1. Diagraphies électriques classiques ou carottages électrique.....	15
1.3.3.2. Diagraphie de résistivité par induction.....	15
1.3.3.3. Diagraphie de conductivité électrique de l'eau.....	15
1.3.3.4. Approche géochimique.....	16
1.3.3.4.1. Localisation par analyses chimiques.....	16
1.3.3.4.2. Les analyses isotopiques.....	17
1.3.3.4.3. Localisation par surveillance de la salinité dans les eaux superficielles...	17
1.3.3.5. Approche numérique par modélisation hydrodynamique.....	18

1.4. Etat des connaissances sur les paramètres influençant les intrusions saline....	18
1.4.1. Géométrie du biseau salé dans les aquifères multicouches.....	18
1.4.2. Aquifères multicouches homogènes.....	19
1.4.2.1. Aquifères multicouches à charges différentes.....	20
1.4.2.2. Aquifères multicouches hétérogènes.....	21
1.4.2.3. Influence de l'exploitation des nappes sur le biseau salé.....	22
1.4.2.4. Influence du régime d'exploitation de la nappe.....	22
1.4.2.5. Influence du type d'ouvrage d'exploitation.....	23
1.4.2.6. Influence de la morphologie du littoral sur le biseau salé.....	23

CHAPITRE 02 : présentation de la zone d'étude

2.1. Introduction.....	25
2.2. Généralités et situation géographique.....	25
2.3. Aperçu climatique.....	27
2.4. Géologie et hydrogéologie.....	28
2.4.1. L'aquifère des alluvions de la Mitidja.....	30
2.5. Présentation de la zone d'étude.....	31
2.5.1. Aperçu géomorphologique et hydro climatologique.....	31
2.6. Géologie de la baie d'Alger.....	34
2.7. Etat du réseau de surveillance des eaux souterraines de la nappe de la Mitidja année 2015.....	35
2.8. Evolution de la profondeur de la nappe de la Mitidja.....	38
2.8.1. Evolution de la profondeur de la nappe en période des hautes eaux dans le bassin harrach.hamiz.....	38
2.8.2. Evolution de la profondeur de la nappe en période des basses eaux dans le bassin harrach.hamiz.....	39
2.8.3. Evolution de la profondeur de la nappe en période des hautes eaux dans le bassin du Mazafran.....	40

2.8.4. Evolution de la profondeur de la nappe en période des basses eaux dans le bassin du Mazafran.....	41
2.8.5. Evolution de la profondeur de la nappe à la région de Tabainet.....	43

CHAPITRE 03 : Méthodologie

3.1. Introduction.....	46
3.2. Partie terrain.....	46
3.2.1. Matériels utilisés.....	47
3.2.2. Mesure de niveau statique.....	51
3.2.3. Prélèvement des échantillons.....	56
3.3. Partie laboratoire.....	58
3.4. Partie logiciels.....	62
3.4.1. Logiciel ARCGIS PRO.....	63
3.4.2. Logiciel SURFER 2016.....	65
3.4.3. Logiciel Diagramme.....	66

CHAPITRE 04 : RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

4.1. Introduction.....	67.
4.2. Evolution de la piézométrie.....	67
4.3. Approche hydrochimique par l'étude des profils de conductivité.....	74
4.3.1. L'apports de profil de conductivité.....	74
4.3.2. L'historique de profil de conductivité et interprétation qualitative.....	74
4.3.3. Profils de conductivité de l'année 2020.....	78
4.3.4. Profils de conductivité de l'année 2021.....	82
4.3.5. Les faciès chimiques.....	92
4.3.6. Etude de couple chimique Na-Cl.....	94
4.3.7. Les cartes iso-teneurs.....	95
4.3.8. Etat approximatif du biseau en 2021/2022.....	105.

Conclusion générale.....	106
Recommandation.....	108

Liste des figures

Chapitre 01:

Fig.01 : le biseau salé (ou intrusion d'eau salée).....	1
Fig2 : <i>Coupe schématique perpendiculaire au littoral selon Ghyben-Herzberg</i>	2
Fig3 : <i>Coupe perpendiculaire dans un aquifère insulaire</i>	3
Fig4 : Coupe perpendiculaire au littoral selon le modèle conceptuel de Glover.....	4
Fig5 : <i>Coupe perpendiculaire au littoral selon le modèle de Cooper</i>	5
Fig6 : <i>les différentes charges hydrauliques du schéma de LUSCZINSKI</i>	6
Fig7 : <i>Géométrie du biseau salé dans un aquifère multicouche homogène</i>	19
Fig8 : <i>Géométrie d'un biseau salé dans un aquifère multicouches à charges différentes</i>	20
Fig9 : <i>Exemple de géométrie d'un biseau salé dans un aquifère multicouches hétérogène</i>	21
Fig10 : <i>Influence d'un pompage sur le biseau salé à partir du schéma théorique de Ghyben- Hertzberg</i>	22

Chapitre 02 :

Fig.11 : Situation de la plaine de la Mitidja.....	26
Fig.12 : Découpage cartographique au 1/50.000è de la plaine de la Mitidja.....	27
Fig.13 : Pluviométrie moyenne interannuelle (Période 1979- 2014).....	28
Fig.14 : Carte géologique simplifiée de la plaine de la Mitidja.....	29
Fig.15 : Coupes géo électriques Nord-Sud à travers la plaine de la Mitidja.....	30
Fig.16 : situation géographique de la zone d'étude.....	31
Fig.17 : Sous bassins versants de la Mitidja Est.....	34
Fig.18 : Carte géologique de la Mitidja.....	34

Fig.19 : Coupe interprétative de la Mitidja dans le bassin du Mazafran (Achie 1971).....	35
Fig.20 : Localisation des points du réseau piézométrique de la plaine de la Mitidja.....	36
Fig.21 : Variations des niveaux de la nappe dans le bassin Harrach-Hamiz en périodes de hautes eaux (2001 à 2015).....	39
Fig.22 : Variations des niveaux de la nappe dans le bassin Harrach-Hamiz en périodes des basses eaux (2001 à 2015).....	40
Fig. 23/24 : Evolution des niveaux de la nappe dans le bassin du Mazafran en périodes des hautes eaux (2002 à 2015).....	41
Fig.25 : Evolution des niveaux de la nappe dans le bassin du Mazafran en périodes des basses eaux (2002 à 2015).....	42
Fig.26 : Evolution des niveaux de la nappe dans le bassin du Mazafran en périodes des basses eaux (2002 à 2015).....	43
Fig.27 : Évolution de la profondeur de la nappe de la Mitidja en aval des bassins de recharge.....	44
 Chapitre 03 :	
Fig.28 : Répartition des piézomètres de la baie d'Alger.....	46
Fig.29 : Voiture utilisées pour le déplacement sur terrain (ANRH ALGER BIR MOURAD RAIS).....	47
Fig.30 : Sonde multi paramètres utilisée pour la mesure de différents paramètres (ANRH ALGER).....	48
Fig.31 : Escabeau utilisé (ANRH ALGER).....	48
Fig.32 : Ph mètre et conductivimètre de l'ANRH utilisée pour les mesures sur terrain.....	49
Fig.33 : mesurer les Échantillons prélevés sur terrain (PH, Conductivité et température).....	49

Fig.34 : fonctionnement de ph mètre.....	50
Fig.35 : échantillons prélevés sur terrain avec l'étiquette.....	50
Fig.36 : préleveur à différentes profondeurs de l'ANRH (prélèvement d'eau souterraine à différents niveaux).....	51
Fig.37 : Mesures du niveau statique au niveau des piézomètres au niveau de la Baie d'Alger 25/10/2021.....	51
Fig.38 : Prélèvement d'échantillon (la baie d'Alger).....	56
Fig.39 : Premier prélèvement au niveau d'un forage la baie d'Alger.....	57
Fig.40 : Mesure de conductivité et TDS et pH sur terrain.....	57
Fig.41 : Laboratoire de l'ANRH.....	58
Fig.42 : Échantillons au laboratoire.....	59
Fig.43 : Interface de Logiciel ARCGIS PRO.....	64
Fig.44 : Interface de commande de logiciel ARCGIS PRO.....	64
Fig.45 : Interface de logiciel Surfer	65
Fig.46 : Interface de commande du logiciel Diagrammes.....	66
Chapitre04:	
Fig.47 : Carte piézométrique de la Baie d'Alger septembre 2003 réalisé à l'aide de logiciel ArcGIS PRO	67
Fig.48 : Carte piézométrique de la Baie d'Alger septembre 2007 réalisé à l'aide de logiciel ArcGIS PRO.....	68
Fig.49 : Carte piézométrique de la Baie d'Alger avril 2010 réalisé à l'aide de logiciel ArcGIS PRO.....	69
Fig.50 : Carte piézométrique de la Baie d'Alger mai 2016 réalisé à l'aide de Logiciel ArcGIS PRO.....	70

Fig.51 : Carte piézométrique de la Baie d'Alger mars 2018 réalisé à l'aide de Logiciel ArcGIS PRO.....	71
Fig.52 : Carte piézométrique de la Baie d'Alger Aout 2020 réalisé à l'aide de Logiciel ArcGIS PRO.....	72
Fig.53 : Carte piézométrique de la Baie d'Alger novembre 2021 réalisé à l'aide de Logiciel ArcGIS PRO.....	73
Fig.54 : Profil vertical de conductivité du PZ 58.....	75
Fig.55 : profil vertical de conductivité du PZ 60.....	76
Fig.56 :profil vertical de conductivité de PZ B.....	77
Fig.57 : profil vertical de conductivité de PZ 58.....	78
Fig.58 : profil vertical de conductivité PZ 60.....	79
Fig.59 : profil vertical de conductivité de PZ B.....	80
Fig.60 : profil vertical de conductivité de PZ D.....	81
Fig.61 : profil vertical de conductivité de PZ 58.....	82
Fig.62 : profil vertical de conductivité de PZ D.....	83
Fig.63 : profil vertical de conductivité de PZ B.....	84
Fig.64 : profil vertical de conductivité de PZ F.....	85
Fig.65 : profil vertical de conductivité de PZ 48.....	86
Fig.66 : profil vertical de conductivité de PZ E.....	87
Fig.67 : profil vertical de conductivité de PZ 60.....	88
Fig.68 : profil vertical de conductivité de PZ HAMIZ 2.....	89
Fig.69 : profil vertical de conductivité de PZ 62.....	90
Fig.70 : profil vertical de conductivité de PZ 36.....	91
Fig.71 : Diagramme de piper relative aux points d'eau prélevés à la Baie d'Alger (2010).....	92

Fig.72 : Diagramme de piper relative aux points d'eau prélevés à la Baie d'Alger (2021).....	93
Fig.73 : Variation de sodium en fonction de chlorures la Baie d'Alger en 2010.....	94
Fig.74 : Variation de sodium en fonction de chlorures la Baie d'Alger en (2021).....	95
Fig.75 : Carte de conductivité à 35 m de Février 2020 réalisé à l'aide de logiciel ArcGIS PRO.....	96
Fig.76 : Carte de conductivité en surface de 2021 réalisé à l'aide de logiciel ArcGIS PRO.....	97
Fig.77 : Carte de conductivité à -15 m de 2021 réalisé à l'aide de logiciel ArcGIS PRO.....	98
Fig.78 : Carte de conductivité à -30 m de 2021 réalisé à l'aide de logiciel ArcGIS PRO.....	98
Fig.79 : Carte iso-teneur en Na ⁺ Février 2006 réalisé à l'aide de logiciel ArcGIS PRO.....	99
Fig.80 : Carte iso-teneur en Cl ⁻ Février 2006 réalisé à l'aide de logiciel ArcGIS PRO.....	100
Fig.81 : Carte iso-teneur en Na ⁺ Février 2020 réalisé à l'aide de logiciel ArcGIS PRO.....	101
Fig.82 : Carte iso-teneur en Cl ⁻ Février 2020 réalisé à l'aide de logiciel ArcGIS PRO.....	101
Fig.83 : Carte iso-teneur en Na ⁺ octobre novembre 2021 réalisé à l'aide de logiciel ArcGIS PRO.....	102
Fig.84 : Carte iso-teneur en Cl ⁻ octobre, novembre 2021 réalisé à l'aide de logiciel ArcGIS PRO.....	103
Fig.85 : État du approximatif du biseau en 2021/2022la baie d'Alger.....	104

Liste des Tableaux

Tableau 1 : résistivité en fonction de la nature lithologique.....	12
Tableau .2 : Comparaison des deux bilans hydriques de 1989 et de 2005.....	32
Tableau.03 : Résultats de la campagne piézométrique sur terrain de la Baie d'Alger (octobre novembre 2021).....	52
Tableau.04 : Résultats de mesure de conductivité et TDS (octobre 2021).....	53
Tableau.05 : Résultats de mesure de conductivité et TDS (novembre 2021).....	54
Tableau.06 : Résultats de mesure sur le terrain (octobre, Novembre 2021).....	58
Tableau.07 : Résultats des analyses physico chimique de l'année 2021.....	62

Introduction Générale

Introduction générale

L'eau est une ressource socio-économique vitale limitée. Elle fait l'objet d'une demande croissante à des besoins domestiques et industriels, ce qui menace la pérennité des eaux souterraines et a des conséquences pour l'agriculture, la foresterie, l'industrie et les réserves d'eau potable. Il est essentiel que les ressources en eau soient gérées de manière stratégique et durable. 70 % de la superficie de terre est occupée par l'eau avec seulement 2.5 % de qualité douce, et dont 22 % provient des eaux souterraines. L'importante disparité de la répartition des ressources en eau, couplée aux nombreux phénomènes climatiques, aux situations démographiques et aussi à la surexploitation des eaux souterraines associés qui affectent une région, font du bassin méditerranéen l'une des zones du monde les plus vulnérables au risque d'intrusion marine.

L'Algérie, à l'instar de tous les pays riverains de la méditerranée, a connu une sécheresse au cours des deux dernières décennies. Ce manque d'eau a entraîné une sollicitation très accrue des nappes. La surexploitation de ces dernières, aussi bien pour l'irrigation que pour l'alimentation en eau potable et industrielle, provoquerait un rabattement important du niveau piézométrique, une inversion du sens de l'écoulement souterrain et par conséquent des problèmes d'intrusion marine vers l'aquifère côtier surtout en saisons sèches. Compte tenu du contexte socio-économique de la région d'Alger, elle est donc très touchée par le phénomène d'intrusion marine. Dans la présente communication, nous allons aborder ce phénomène par différentes approches ; géophysique, hydrodynamique et Hydro chimique.

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

Ce développement a été accompagné par une demande en eau de plus en plus forte. Ce qui a Engendré une surexploitation des nappes côtières et une dégradation de leur qualité. En effet, tout prélèvement intense d'eau douce au niveau d'un champ de captage de l'aquifère Côtier, provoque une diminution du débit des eaux souterraines et un abaissement de la Surface piézométrique. Il existe par conséquent un danger d'avancée vers les terres du biseau D'eau salé, et une salinisation des eaux souterraines qui se chargent progressivement en sels minéraux et peuvent atteindre des teneurs anormalement élevées.

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

Ce mémoire est structuré en quatre chapitres :

1^{er} 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 obtenues (piézométrique, hydro-chimique, Profil de la conductivité) sur la Baie d'Alger.

CHAPITRE 01

PRÉSENTATION DU PHÉNOMÈNE DE L'INTRUSION MARINE

1. Introduction et Généralité sur l'intrusion marine :

1.1. Introduction :

Le phénomène d'invasion marine, qui peut s'étendre sur plusieurs kilomètres à l'intérieur des terres est d'un grand risque pour les régions côtières tributaires des eaux souterraines pour leur approvisionnement en eau. Sous certaines conditions, l'eau salée se propage à l'intérieur des terres et contamine les eaux de la nappe située à proximité de la mer. Par ailleurs, l'invasion des eaux douces par les eaux salées aura pour effet une dégradation des sols et une salinisation par suite des irrigations avec ces eaux.

1.2. Généralités sur l'intrusion marine :

Dans les zones littorales, les nappes souterraines d'eau douce sont en contact avec l'eau salée d'origine marine qui envahit plus en moins les formations géologiques côtières.

L'eau douce « flottant » sur l'eau salée et le niveau piézométrique s'élevant vers l'intérieur des terres. De manière générale et en première approximation donnée par l'équilibre hydrostatique, l'intrusion d'eau salée a la forme d'un biseau plongeant vers l'intérieur des terres, appelé communément le biseau salé. En réalité le contact de ces eaux de densité différente est régi plus précisément par les lois d'équilibre hydrodynamiques et par les phénomènes de diffusion qui s'inscrivent obligatoirement dans le contexte géomorphologique, lithologique et hydrologique propre à chaque région. [1]

L'exploitation des nappes littorales influe considérablement sur la position et la forme de la zone de contact que constitue l'interface eau douce / eau salée, et réciproquement l'évolution de cette interface peut nuire à l'exploitation des eaux souterraines côtières, du fait de la dégradation possible (par augmentation de la salinité) de la qualité de l'eau prélevée.

1.2.1. Définition du phénomène :

Un biseau salé (ou une intrusion salée) est l'intrusion d'eau saumâtre ou salée dans une masse d'eau. L'eau salée étant plus lourde et visqueuse que l'eau douce. S'il y a déséquilibre, l'eau salée (plus dense) peut « repousser » vers l'intérieur des terres la nappe d'eau douce¹. [2]

Théoriquement, en raison d'une différence importante de densité, après un temps d'équilibrage, ces deux masses d'eau peuvent ne pas se mélanger (en l'absence de mouvements des masses d'eau ou de mélanges d'origine géothermique, le mélange peut se faire par dispersion/diffusion, lequel peut être freiné dans certains substrats, dans le calcaire peu faillé par exemple). Près de la côte, des mouvements épisodiques ou saisonniers (par exemple induit par une marée ou par les pompages, ou par un afflux d'eau d'origine pluviale ou de fonte de neige ou glacier) peuvent également mélanger ces eaux et/ou déplacer le biseau salé, en pouvant poser problème quand l'eau salée menace une nappe phréatique (souterraine ou superficielle) ou l'eau d'un réservoir destiné à produire de l'eau potable ou d'irrigation ou remonte vers le sol en atteignant les racines d'arbres ou de plantes cultivées.

Un biseau salé est une partie d'un aquifère côtier envahi par de l'eau salée (marine) comprise entre la base de l'aquifère et une interface eau douce/eau salée, le coin d'eau salée entrant étant sous l'eau douce. L'apparition d'un biseau salé est généralement consécutive à la surexploitation de l'aquifère.

Un biseau salé, ou une intrusion d'eau salée, est un mouvement entrant d'eau de mer dans les aquifères d'eau douce. [3]

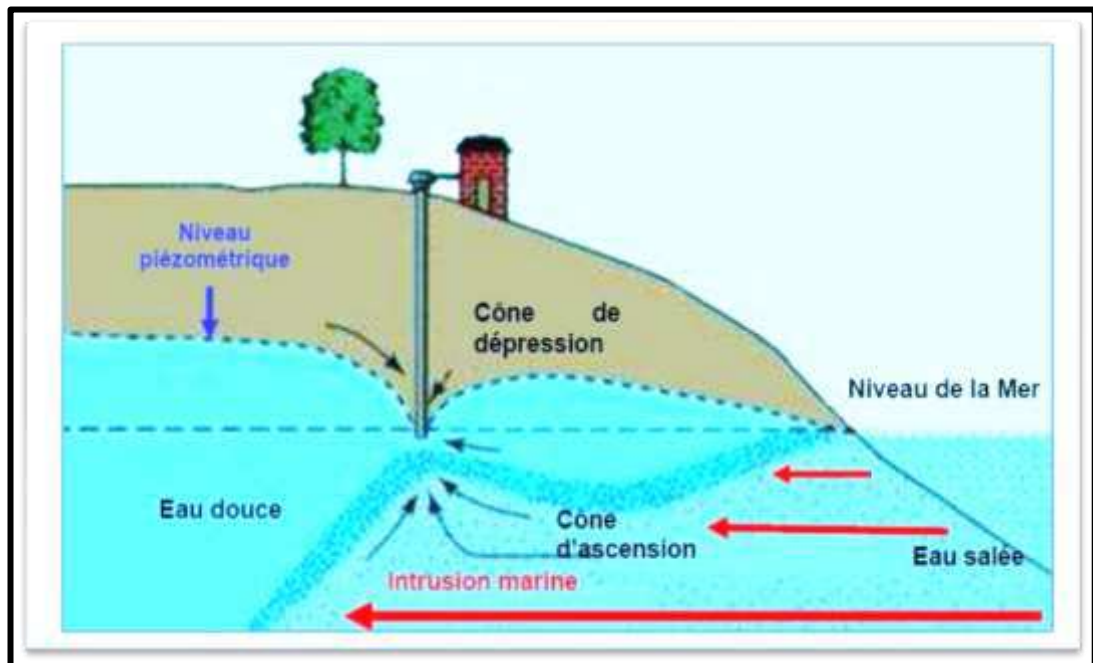


Fig.01 : Ce schéma indique le biseau salé (ou intrusion d'eau salée) [5].

1.2.2. METHODES DE CARACTERISATION ET DE LOCALISATION DU PHENOMENE D'INTRUSION SALINE :

Dans les zones littorales, les nappes souterraines d'eau douce sont en contact avec l'eau salée d'origine marine qui envahit plus ou moins les formations géologiques côtières.

L'exploitation des nappes littorales influe considérablement sur la position et la forme de la zone de contact que constitue l'interface eau douce / eau salée, et réciproquement l'évolution de cette interface peut nuire à l'exploitation des eaux souterraines côtières, du fait de la dégradation possible (par augmentation de la salinité) de la qualité de l'eau prélevée. [4]

Plusieurs approches ont été tentées pour décrire la géométrie de l'interface entre l'eau douce et l'eau salée :

- approche piézométrique ;
- approche géophysique ;
- approche géochimique ;
- approche numérique par modélisation hydrodynamique.

1.2.2.1. Approche piézométrique

L'approche hydrostatique : principe de Ghygen-Herzberg

Ce principe propose une relation simple pour déterminer la forme et la position théorique du biseau salé à partir des densités et des pressions relatives. [5]

Les hypothèses permettant d'appliquer cette formulation sont les suivantes :

- les deux fluides ne sont pas miscibles ;
- les deux fluides sont en équilibre hydrostatique dans un milieu homogène et poreux, dans un aquifère unique ;
- leur contact est supposé être représenté par une interface nette. [3]

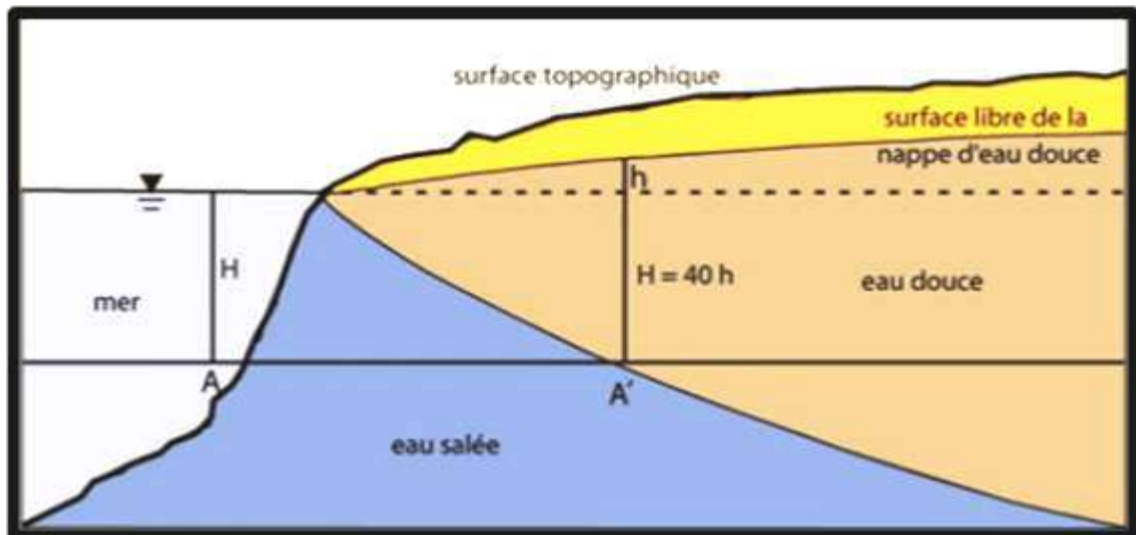


Fig2 : Coupe schématique perpendiculaire au littoral selon Ghyben-Herzberg.

Sur une ligne horizontale AA', l'égalité des pressions de l'eau salée et de l'eau douce s'écrit :

$$H \times d_s = (H + h) \times d \text{ Avec}$$

d_s : la masse volumique de l'eau salée.

d : la masse volumique de l'eau douce.

h : la hauteur d'eau douce au-dessus du niveau de la mer en un point A.

H : la hauteur de l'interface.

Si d est égal à 1,

On a :

$$H \cdot (d_s - 1) = h$$

Et

$$H = \frac{h}{d_s - 1}$$

La masse volumique de l'eau de mer varie en fonction de sa salinité. Pour une concentration équivalente de Na Cl de 36 g/l, elle est égale à 1,025. Cette valeur représente la moyenne de salinité des mers et des océans.

Aussi, si $d_s = 1,025$, on a :

$$H = \frac{h}{0.025} = 40h$$

Cela signifie qu'en un point quelconque de la nappe, l'interface eau douce/eau salée se situe sous le niveau de la mer à une profondeur égale à 40 fois l'élévation du niveau de la nappe au-dessus du niveau de la mer.

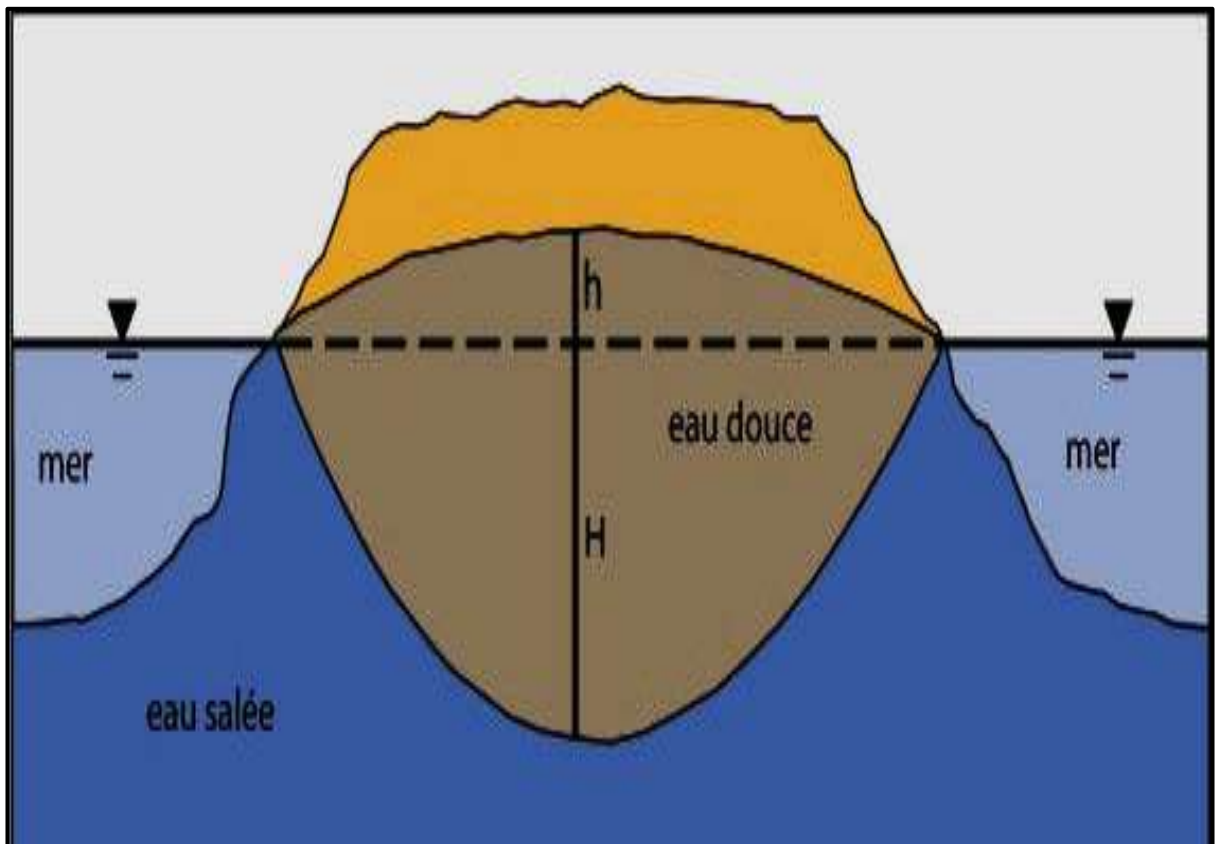


Fig3 : Coupe perpendiculaire dans un aquifère insulaire.

Cependant, si elles donnent une première approximation de la position du biseau salé, les hypothèses du principe de Ghyben-Herzberg ne sont pas réalistes pour les raisons suivantes :

- ❖ les fluides, l'eau douce et l'eau salée, sont miscibles ;
- ❖ ces fluides sont soumis à des mouvements hydrodynamiques ;
- ❖ les écoulements de la nappe ne sont pas pris en compte ;
- ❖ et un aquifère est rarement homogène et unique. [3]

1.2.2.2. Approche hydrodynamique

L'amélioration du principe de Ghyben-Herzberg par les approches hydrodynamiques rend plus réaliste la description géométrique de l'interface eau douce – eau salée en fonction du niveau piézométrique de la nappe.

a) approche hydrodynamique de GLOVER : [6]

Glover (1959) a établi une équation pour déterminer la distance à la côte de l'exutoire en mer de l'eau douce pour une nappe littorale captive limitée par un toit imperméable horizontal et en contact avec un front salé.

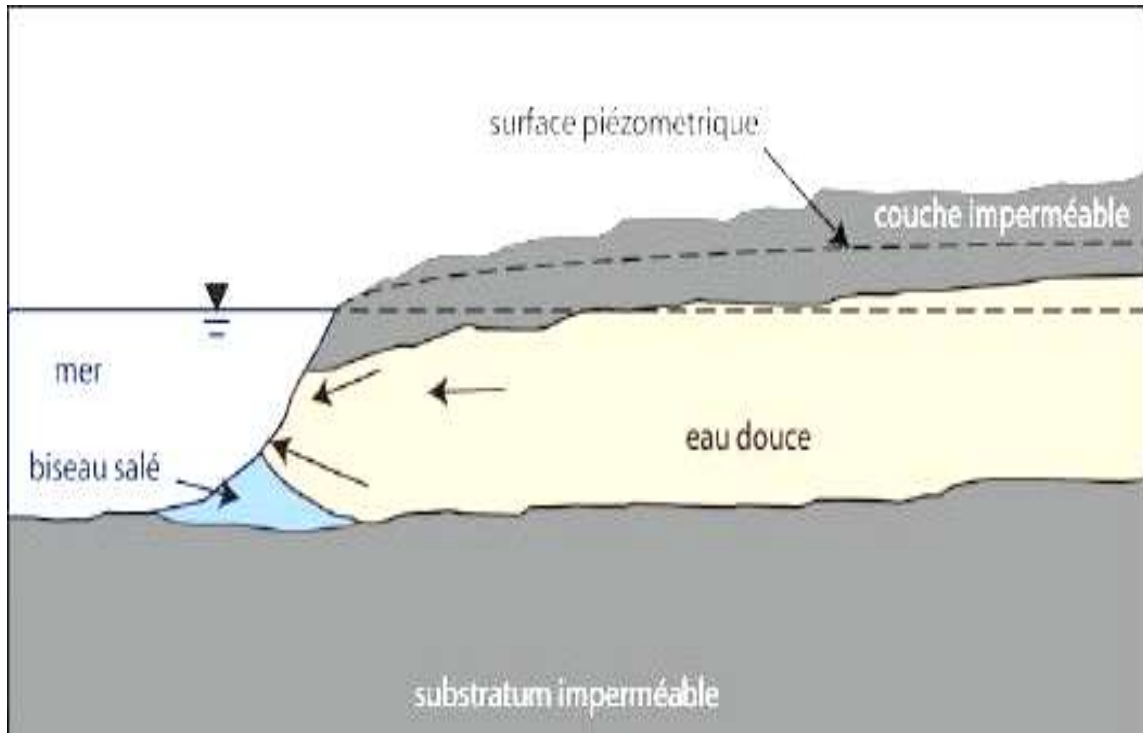


Fig4 : Coupe perpendiculaire au littoral selon le modèle conceptuel de Glover.

A partir de l'expression d'un potentiel de vitesse F :

$$\Phi = \frac{d_s - d_d}{d_d} kh$$

b) hypothèse de COOPER :

Les schémas présentés précédemment considèrent l'immiscibilité de l'eau douce et de l'eau salée et l'état statique de l'eau salée.

Cooper (1959) a pris en compte la miscibilité des deux fluides en introduisant l'existence d'une zone de diffusion dans laquelle l'eau de mer circule et se dilue.

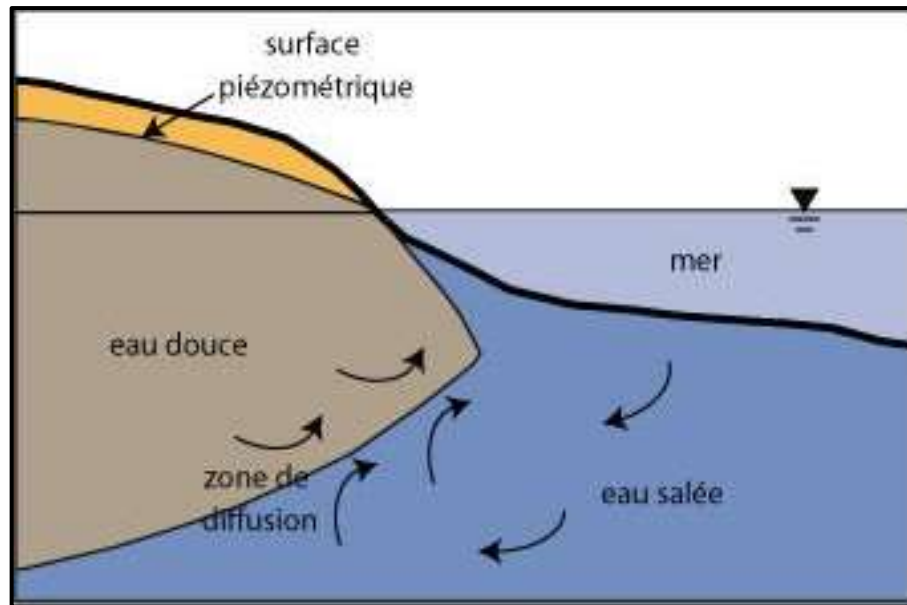


Fig5 : Coupe perpendiculaire au littoral selon le modèle de Cooper.

La présence de cette zone de dispersion ou de diffusion a été vérifiée sur de nombreux sites.

C) approche hydrodynamique de LUSCZYNSKI :

La théorie de Lusczynski tient également compte de la possibilité de mélange de l'eau douce et de l'eau salée et aussi de l'existence d'une zone de transition à salinité progressivement variable entre la salinité de l'eau douce et celle de l'eau de mer.

Dans ce modèle, trois notions différentes de charges d'eau en un point interviennent. Ces trois charges seraient mesurées par rapport au niveau de la mer dans des piézomètres :

- « la charge d'eau ponctuelle » représente le niveau d'une colonne d'eau de densité équivalente à celle de l'eau présente en ce point en équilibrant la pression en ce point ;
- « la charge d'eau douce » représente le niveau d'une colonne d'eau douce équilibrant la pression en ce point ;
- « la charge d'eau réelle environnante » représente le niveau d'une colonne d'eau dans laquelle la répartition verticale de la densité serait identique à celle de l'eau contenue dans le terrain environnant et équilibrant la pression en ce point. La répartition verticale de la densité de l'eau dans la colonne d'eau induit une répartition verticale de la salinité de celle-ci. [6]

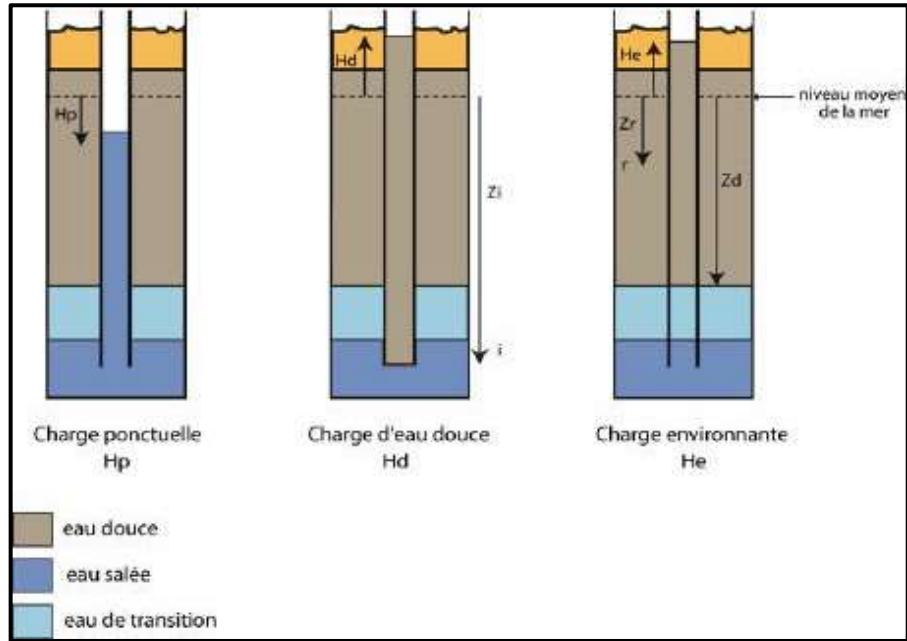


Fig.6 : les différentes charges hydrauliques du schéma de LUSCZINSKI

1.2.3. Limites d'application des schémas théoriques et limites de validités :

Les différentes approches permettent de calculer la profondeur de l'interface en considérant des schémas théoriques plus ou moins simplificateurs.

▪ Approche hydrostatique

Cette approche qui ne prend en compte ni l'écoulement des eaux souterraines, ni l'existence de la zone de mélange eau douce - eau salée est fortement simplificatrice. Cependant, elle offre l'avantage d'apporter des ordres de grandeur sur la profondeur à laquelle se trouve le biseau salé à partir des seules données piézométriques. Son utilisation peut être utile pour localiser rapidement les zones susceptibles d'être très vulnérables aux intrusions salines.

▪ Approches hydrodynamiques

a) L'approche de Glover prend en compte l'écoulement des eaux souterraines mais ignore l'existence de la zone de mélange eau douce - eau salée. Cette approche est plus réaliste que celle de Ghyjben-Herzberg, mais présente l'inconvénient de s'appliquer uniquement aux nappes captives. De plus l'utilisation de ce modèle impose de connaître le débit de la nappe. Hors celui-ci est calculé, entre autre, à partir de l'épaisseur de la nappe, donnée qui dépend elle-même de la profondeur de

l'interface eau douce – eau salée. Le débit peut également être calculé en amont du biseau salé en considérant la profondeur du substratum hydrogéologique ci qui impose de connaître l'extension maximale du biseau salé. L'application de ce modèle pour la localisation du biseau salé ne peut se concevoir que couplé à d'autres approches.

b) Le modèle de Lusczynski donne une représentation plus exacte de la réalité puisqu'il prend en compte la présence de la zone de transition entre l'eau douce et l'eau salée. Cependant, cette méthode se base sur l'utilisation de trois piézomètres, l'un dans l'eau salée, l'un dans l'eau douce et le dernier traversant l'ensemble de la zone de transition avec la particularité d'être rempli d'eau de densité progressivement variable et égale à celle de l'eau de l'aquifère environnant. La connaissance de la répartition de densité, pour déterminer le début de la zone de transition, implique la connaissance de la forme du biseau salé, cette information étant précisément celle qui est recherchée. Lusczynski avait développé ce modèle pour calculer le champ de vitesses dans la zone de dispersion et non pour déterminer le positionnement du biseau salé.

▪ **Conclusions :**

L'utilisation exclusive des schémas théoriques présentés ci-dessus pour localiser l'interface théorique présentent un intérêt pratique limité. La possible existence d'une épaisse zone de transition entre l'eau douce et l'eau salée peut rendre peu pertinente la détermination d'une interface nette théorique et le modèle prenant en compte l'existence de cette interface diffuse implique que l'on connaisse déjà la distribution des salinités ou des densités. Les schémas conceptuels présentés permettent de comprendre le phénomène des intrusions salines et de calculer en première approximation la profondeur du biseau salé mais ne sont pas suffisants pour le cartographier à eux seuls. Il existe des méthodes directes qui permettent de déterminer sa localisation. L'utilisation couplée des approches piézométriques et géophysiques peut donner de meilleurs résultats. [3]

1.2.3.1. Approche géophysique

Différentes méthodes de prospection géophysique permettent de déterminer la résistivité des terrains en fonction de la profondeur à partir de la surface du sol. Les résultats des campagnes de prospection sont généralement visualisés par la construction de coupes verticales montrant des horizons affectés de différentes valeurs de résistivité. Ces valeurs de résistivités sont fonction de la nature

lithologique des terrains et de la résistivité des eaux qui y sont contenues. Aussi, pour un terrain de composition lithologique homogène, les différences de résistivités sont dues aux différences de résistivité des eaux contenues, elle-même dépendant des différences de salinité de ces eaux. La structure du sous-sol étant rarement homogène, il est nécessaire de connaître la géométrie des structures géologiques afin de la prendre en compte pour l'interprétation des résultats. La résistivité de l'eau est fonction de la concentration totale en sels dissous, de la composition chimique et de la température de l'eau. A l'aide des tables de conversion conductivité/salinité, il est possible de transformer les coupes de résistivité en coupes de salinité de l'eau et de localiser les intrusions salines ainsi que la zone de transition à salinité variable dans les aquifères littoraux. [5]

1.2.3.2. Méthode de prospection électrique :

1.2.3.2.1. Sondages électriques :

Un courant électrique est envoyé dans le sol à travers deux électrodes A et B. La différence de potentiel engendrée est mesurée entre deux autres électrodes M et N. La profondeur d'investigation dépendant de la distance entre les électrodes A et B, la longueur AB est progressivement augmentée puis au-delà d'une certaine longueur AB, il convient d'augmenter également la longueur MN. A chaque valeur de l'écartement des électrodes A et B est associée une résistivité apparente. Ces résistés apparentes sont ensuite comparées aux valeurs du Tableau 1 pour les associer à des lithologies. [5]

Nature lithologique	Résistivité W .m
Marnes	0,5 à 100
Argiles (eau douce)	10 à 100
Argiles (eau salée)	1 à 10
Schistes	50 à 1000
Calcaires	100 à 5000
Grès	60 à 10000
Quartzites	20000
Granites	300 à 15000
Roches éruptives compactes	500 à 20000
Roches éruptives altérés	50 à 500
Alluvions, sables, graviers	100 à 1000
Sols argileux	10 à 20
Sables et graviers saturés d'eau douce	50 à 500
Sables et graviers saturés d'eau salée	0,5 à 5

Tableau 1 : résistivité en fonction de la nature lithologique

Les principales difficultés d'interprétation des sondages électriques proviennent des phénomènes d'équivalence ou de disparition de couche marquante. Sur une courbe de sondage électrique, une couche marque le tracé :

- par sa conductance longitudinale si elle est plus conductrice que les couches encaissantes ;
- par sa résistance transversale si elle est plus résistante que les courbes encaissantes.

De ce fait, des couches de résistivité et d'épaisseur différente peuvent marquer le tracé de façon à peu près équivalente si leurs conductances longitudinales ou leurs résistivités transversales sont égales. De même, une couche mince de résistivité intermédiaire entre celles des couches l'entourant n'est pratiquement pas décelable. De ces deux phénomènes, il résulte une certaine imprécision sur l'interprétation d'un sondage électrique. Pour pallier ces difficultés, il convient d'appliquer à la recherche des biseaux salés, les recommandations générales des méthodes géophysiques, en particulier en effectuant :

- un sondage électrique à l'aplomb d'un forage dont la coupe lithologique est connue, de manière à effectuer un calage pour l'interprétation ;
- plusieurs sondages et de privilégier l'interprétation de chaque sondage non pas isolément, mais en tenant compte des sondages voisins. [5]

1.2.3.2.2. Profils de résistivité :

La réalisation d'un profil de résistivité nécessite de déplacer un dispositif quadripôle ABMN de longueur constante suivant un profil rectiligne et d'effectuer des mesures au niveau de stations régulièrement espacées. Cette technique est appelée « méthode du traîné ». La technique dite « du rectangle » qui consiste à déplacer uniquement les stations M et N est utilisée pour avoir une grande profondeur d'investigation.

Un profil de résistivité donne les variations latérales de résistivité apparente pour une certaine profondeur d'investigation. Ces profils mettent en évidence les variations d'épaisseur de couches ou leurs variations de résistivité vraie. Leur interprétation se fait par comparaison avec des profils théoriques, cependant, l'interprétation sera plus fiable si des forages dont la coupe lithologique est connue sont implantés à l'aplomb du profil. [5]

1.2.3.3. Carte de résistivité :

Les cartes de résistivité sont construites à partir de l'interpolation des résultats de profils de résistivité ou de sondages électriques.

1.3. Méthodes magnétotellurique et électromagnétique :

1.3.1. Méthode magnétotellurique :

Cette méthode consiste à mesurer en fonction de différentes fréquences, la composante horizontale du champ tellurique (champ électrique terrestre naturel) et la composante perpendiculaire du champ magnétique associé. La résistivité apparente est fonction de ces trois paramètres, avec une augmentation de la profondeur d'investigation lorsque la fréquence diminue.

Les courbes de la résistivité apparente en fonction de la fréquence sont ensuite interprétées à l'aide d'abaques ou de logiciels afin de déterminer les résistivités vraies des différentes couches.

Cette méthode permet d'éviter de trop grandes longueurs de ligne pour des investigations profondes.

1.3.2. Méthode électromagnétique :

Son principe est le suivant : un émetteur est parcouru par un courant électrique alternatif produit par un champ magnétique et engendre par les courants induits dans les couches du sous-sol, un champ magnétique secondaire. Le champ total est détecté par le courant qu'il induit dans un récepteur.

La profondeur d'investigation est à la fois fonction de la distance entre l'émetteur et le récepteur, ainsi que de la fréquence du courant inducteur. Elle est en général de l'ordre de 0,5 à 1,5 fois la distance émetteur/récepteur. [5]

1.3.3. Méthode de diagraphies géophysiques :

Les diagraphies géophysiques sont des mesures de paramètres physiques effectuées dans des forages. La sonde de mesure est descendue à une vitesse constante et faible dans le forage. Elle enregistre de manière continue un ou simultanément plusieurs paramètres physiques, qui permettront de caractériser les différentes couches du sous-sol.

Les diagraphies électriques classiques, soniques et thermiques doivent obligatoirement s'effectuer dans des ouvrages non tubés ou non crépinés, c'est à dire :

- soit dans la boue de forage, juste après la formation, pour des ouvrages

nouveaux devant être tubés et crépines par la suite,

- soit dans l'eau pour des forages en trou nu, les parois étant suffisamment consolidées pour ne pas nécessiter de tubage ou de crépine.

Les diagraphies radioactives, de résistivité par induction, de conductivité de l'eau peuvent être effectuées sur un forage tubé ou crépiné. Les diagraphies de résistivité par induction nécessitent que l'ouvrage soit équipé de tubage ou de crépine PVC. [5]

1.3.3.1. Diagraphies électriques classiques ou carottages

électriques :

Les diagraphies électriques permettent de déterminer les variations de résistivités des formations géologiques traversées par le forage. Tout comme les sondages électriques, elles peuvent renseigner sur la salinité de l'eau de l'aquifère. Dans les formations meubles, ces diagraphies présentent un intérêt limité pour l'étude du biseau salé car l'exécution de ces diagraphies n'est possible qu'à la suite de la foration. Cette méthode ne permet donc pas de suivre l'évolution du biseau salé dans le temps.

La diagraphie de polarisation spontanée (PS) peut être pratiquée en même temps que les diagraphies de résistivité dans les forages en boue. Elle permet de mesurer la différence de salinité entre la boue du forage et l'eau de l'aquifère. [2]

1.3.3.2. Diagraphie de résistivité par induction :

La diagraphie de résistivité par induction consiste à injecter un courant électrique alternatif constant dans une sonde équipée d'une bobine. Celle-ci crée un champ magnétique dans les terrains environnants. Les courants induits par ce champ, créent un champ magnétique alternatif qui produit un signal dans une bobine réceptrice. La valeur du signal est Proportionnelle à la résistivité des terrains. Cette diagraphie peut être effectuée sur des forages équipés d'un tubage ou d'une crépine électriquement résistante (en PVC, par exemple). Cette technique présente un intérêt certain pour l'étude des biseaux salés puisqu'elle permet des mesures périodiques dans les piézomètres existants tubés et crépinés. [2]

1.3.3.3. Diagraphie de conductivité électrique de l'eau :

Cette technique consiste à mesurer directement la conductivité électrique de l'eau contenue dans le forage ou le piézomètre. Ce type de diagraphie, aussi appelée log de conductivité électrique, est couramment utilisé pour l'étude de la salinité des

nappes et en particulier pour le contrôle des biseaux salés. La mesure de résistivité doit être couplée à une mesure de température de l'eau pour corriger l'influence de cette dernière sur les valeurs de résistivité.

Pour que le profil vertical de conductivité enregistrée dans l'eau de l'ouvrage représente celui de la conductivité de l'eau contenue dans les formations encaissantes, les quatre principales conditions suivantes doivent être remplies :

- l'ouvrage doit être crépiné sur toute sa hauteur, ou sur la totalité de la formation aquifère ;
- les mesures ne peuvent être faites qu'après une longue période de repos suite à la réalisation de l'ouvrage, de manière à ce que la salinité de l'eau de l'ouvrage se mette en équilibre avec celle du terrain ;
- la sonde de mesure doit être descendue très lentement dans l'eau du forage de manière à ne pas brasser et mélanger les eaux ;
- la formation aquifère doit être homogène, c'est à dire qu'elle doit avoir une variation de pression hydrostatique normale en fonction de la profondeur. Sinon, la présence du forage crépiné modifiera la répartition originale des charges hydrauliques et le profil de résistivité de l'eau du forage ne correspondra plus à celui de l'eau du terrain à l'origine. [4]

1.3.3.4. Approche géochimiques :

1.3.3.4.1. Localisation par analyses chimiques :

L'analyse chimique complète d'un échantillon en laboratoire est la méthode la plus précise pour connaître la salinité exacte d'une eau. La concentration totale en sels dissous est obtenue par le dosage séparé de chaque élément (ion) et également par la pesée du résidu sec de l'échantillon chauffé à 118°C.

Les analyses chimiques sont le plus souvent effectuées sur des échantillons d'eau provenant de puits ou de forages d'exploitation, afin de contrôler périodiquement la qualité de l'eau et le maintien de son aptitude à l'utilisation en cours.

Dans les aquifères littoraux, la salinité mesurée résulte du mélange d'eaux de toutes les zones sollicitées par le pompage. Cette mesure ne peut pas être attribuée à une position et à une profondeur. Cependant, sans donner la position précise du biseau salé, ces résultats Permettront de déceler un début d'invasion des eaux marines, en particulier avec un suivi dans le temps.

La localisation du biseau salé à l'aide d'analyses chimiques est envisageable si l'on dispose d'un réseau de puits d'observations ou de piézomètres, donc sans pompage, dans lesquels on peut prélever des échantillons d'eau à différentes profondeurs, à condition que la répartition de l'eau dans le piézomètre soit représentative de l'eau de l'aquifère pour toutes les profondeurs.

La précision de la localisation du biseau salé et de la configuration de la zone de transition sera fonction du nombre de puits d'observation et du nombre d'échantillons.

De façon analogue à la méthode des profils verticaux de conductivité électrique, la méthode des analyses chimiques implique que la répartition en profondeur de la salinité de l'eau dans le forage soit la même que celle de l'eau contenue dans le terrain environnant. Pour cela, il faut que le forage soit crépiné sur toute l'épaisseur de l'aquifère et que celui-ci soit homogène et non constitué de plusieurs couches à charges hydrauliques différentes.

Comparativement aux diagraphies de conductivité ou de résistivité par induction, cette méthode est d'une mise en œuvre plus lourde (échantillonnage + analyses). L'intérêt réside, non pas dans la localisation du biseau salé mais dans l'identification de l'origine de la salinité qui n'est pas forcément unique. Ainsi la nappe saumâtre de la Plaine des Galets a peut-être une signature chimique différente de celle du biseau salé. [3]

1.3.3.4.2. Les analyses isotopiques :

Ce type d'analyse peut permettre d'identifier les mécanismes d'acquisition de la salinité des nappes littorales. Si l'intrusion d'eaux salines est l'une des causes de la salinité des aquifères côtiers, d'autres mécanismes peuvent aussi en être à l'origine ; le lessivage des sols par les eaux d'infiltration ou la concentration des sels dissous par évaporation.

1.3.3.4.3. Localisation par surveillance de la salinité dans les eaux superficielles :

La pénétration des eaux marines dans les eaux superficielles des embouchures des fleuves et des rivières peut induire également une augmentation de la salinité des eaux souterraines associées.

Cette répercussion est d'autant plus forte que le degré de liaison hydraulique, entre les eaux superficielles et les eaux souterraines, est fort. Cela arrive notamment

lorsque le fond et les berges des cours d'eau ne sont pas colmatées par des formations limoneuses ou argileuses.

La localisation de la pénétration d'eau salée dans les eaux superficielles peut être obtenue par l'installation de sondes de conductivité. Cette méthode est réservée à la mise en place d'un dispositif d'alerte légèrement au-delà de la zone déjà connue de pénétration maximale de l'eau salée. [7]

1.3.3.5. Approche numérique par modélisation hydrodynamique :

Les outils de modélisation hydrodynamique permettent de concevoir des modèles de localisation du biseau salé et de simuler sa réaction à différents scénarii d'exploitation, de protection ou d'évolution climatique.

Les logiciels de modélisation hydrodynamique capable de prendre en compte l'interface entre l'eau douce et l'eau salée sont de deux types :

- ceux calculant la position d'une interface théorique nette entre l'eau douce et l'eau salée, sans prendre en compte l'existence d'une zone de transition ;
- ceux prenant en compte l'existence d'une zone de transition à salinité et densité variable.

Avec ses options « diphasique » et « densité variable », le logiciel MARTHE du BRGM peut prendre en compte ou pas, l'existence de cette zone de mélange.

La modélisation numérique des phénomènes hydrodynamiques des intrusions saline est l'approche qui demande le plus grand nombre de données initiales. Par conséquent cette méthode est d'autant plus pertinente qu'elle est couplée avec les autres types d'investigation qui permettent de caractériser :

- la géométrie de l'aquifère (géophysique, coupe lithologique de forage, conditions aux limites) ;
- les paramètres hydrodynamiques de l'aquifère (pompage d'essais, mesure des variations du niveau piézométrique, bilan hydrologique sur bassin versant) ;
- la localisation ponctuelle du biseau salé (piézomètre recoupant l'interface entre l'eau douce et l'eau salée, géophysique). [6]

1.4. Etat des connaissances sur les paramètres influençant les intrusions salines :

1.4.1. Géométrie du biseau salé dans les aquifères multicouches :

Les approches basées sur les schémas théoriques présentés dans le premier chapitre du présent rapport s'appliquent à des aquifères monocouches homogènes, cas peu fréquent en milieu volcanique insulaire où les systèmes aquifères sont généralement multicouches hétérogènes. Les schémas théoriques sont fortement

modifiés par :

- la complexité des structures aquifères : variations d'épaisseur, paléo relief, disparition latérale, etc. ;
- l'hétérogénéité lithologique et celle des champs de perméabilité associée ;
- l'influence des marées favorisant le développement de la zone de mélange entre l'eau douce et l'eau salée par « effet piston » ;
- les brutales fluctuations d'alimentation des aquifères côtiers (fortes pluies et variations du débit des fleuves) favorisant le développement de la zone de mélange entre l'eau douce et l'eau salée par « effet piston ».

La description non quantitative du comportement des intrusions salines dans les aquifères multicouches est complexe. Trois cas sont traités dans ce chapitre :

- les aquifères multicouches homogènes ;
- les aquifères multicouches à charges différentes ;
- les aquifères multicouches hétérogènes. [2]

1.4.2. Aquifères multicouche homogène :

L'interface entre l'eau douce et l'eau salée peut se prolonger de façon régulière d'un aquifère à l'autre si les conditions suivantes sont remplies.

- tous les aquifères sont en communication hydraulique directe avec l'eau de mer ;
- les paramètres hydrodynamiques des aquifères sont relativement homogènes ;
- la variation verticale du potentiel hydraulique reste faible d'un aquifère à l'autre.

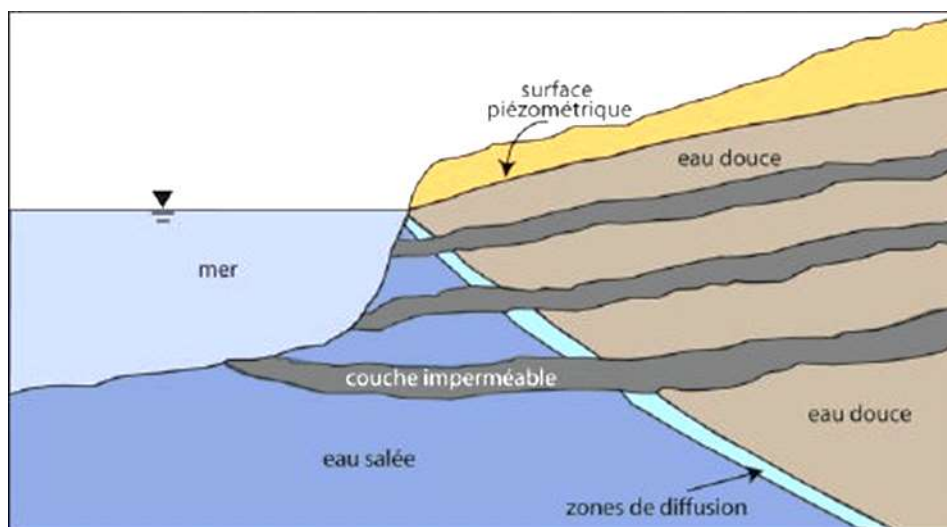


Fig7 : Géométrie du biseau salé dans un aquifère multicouche homogène.

Ce cas reste rare dans la réalité, les potentiels hydrauliques, ou niveaux piézométriques des différents aquifères étant la plupart du temps notablement différents, à cause notamment de la mise en charge des aquifères situés sous les formations imperméables. [2]

1.4.4.1. Aquifères multicouches à charges différentes :

L'interface entre l'eau douce et l'eau salée peut se prolonger de façon irrégulière d'un aquifère à l'autre et l'épaisseur de la zone de mélange entre l'eau douce et l'eau salée peut être variable d'un aquifère à l'autre si les conditions suivantes sont remplies :

- tous les aquifères sont en communication hydraulique directe avec l'eau de mer ;
- les potentiels hydrauliques des différents aquifères sont croissants avec la profondeur des aquifères, ce qui a pour effet de repousser les interfaces entre l'eau douce et l'eau salée vers la mer ;
- les paramètres hydrodynamiques sont homogènes au sein de chaque aquifère. La géométrie des zones de mélange est alors régulière ;

les paramètres hydrodynamiques sont différents d'un aquifère à l'autre. Les zones de mélange ont des épaisseurs différentes d'un aquifère à l'autre.

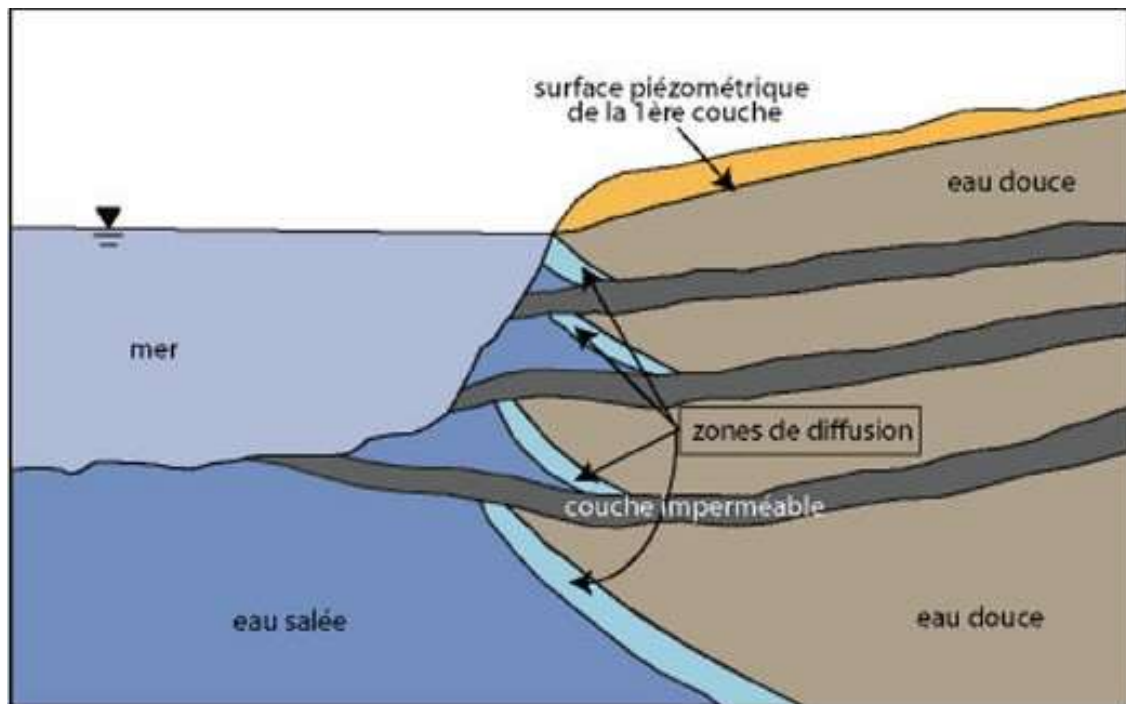


Fig8 : Géométrie d'un biseau salé dans un aquifère multicouches à charges différentes

Ces hypothèses sont simplificatrices puisqu'en réalité, il peut exister une forte hétérogénéité des paramètres hydrodynamiques à l'intérieur d'une même couche. [3]

1.4.4.2. Aquifères multicouches hétérogènes :

L'interface entre l'eau douce et l'eau salée peut se prolonger de façon irrégulière d'un aquifère à l'autre et l'épaisseur de la zone de mélange entre l'eau douce et l'eau salée peut être variable d'un aquifère à l'autre et au sein d'un même aquifère si les conditions suivantes sont remplies (Illustration 12) :

- tous les aquifères sont en communication hydraulique directe avec l'eau de mer ;
- les potentiels hydrauliques des différents aquifères sont croissants avec la profondeur des aquifères, ce qui a pour effet de repousser les interfaces entre l'eau douce et l'eau salée vers la mer ;
- les paramètres hydrodynamiques sont hétérogènes au sein de chaque aquifère. La géométrie des zones de mélange est alors irrégulière ;
- les paramètres hydrodynamiques sont différents d'un aquifère à l'autre. Les zones de mélange ont des épaisseurs différentes d'un aquifère à l'autre. [2]

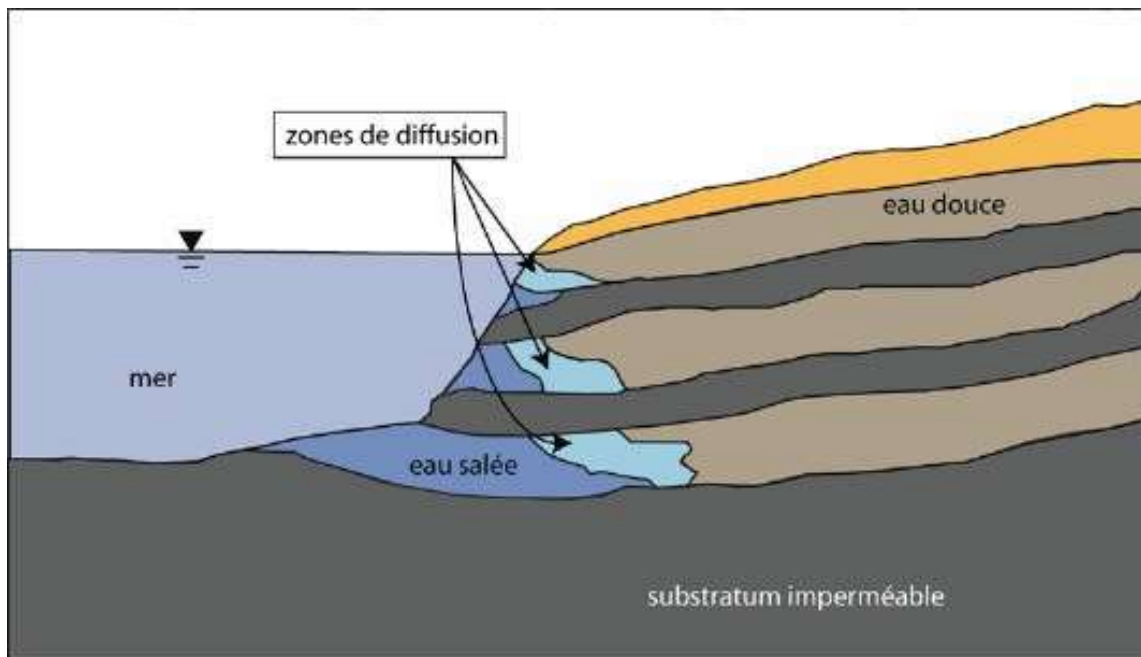


Fig9 : Exemple de géométrie d'un biseau salé dans un aquifère multicouches hétérogène.

1.4.4.3. Influence de l'exploitation des nappes sur le biseau salé

Le biseau salé désigne la zone envahie par l'eau marine, quel que soit sa forme et en y incluant la zone de transition à salinité variable (zone de mélange entre l'eau douce et l'eau salée).

1.4.4.4. Influence du régime d'exploitation de la nappe :

Par leurs modifications des niveaux piézométriques, l'exploitation des forages modifie la profondeur et la forme initiale du biseau salé. Le schéma théorique de Ghyben-Herzberg permet de représenter en première approximation l'effet d'un pompage sur le biseau salé dans un milieu homogène (Illustration 13). Un rabattement du niveau piézométrique de 1 m entraîne, selon ce modèle simplificateur, une remontée de 40 m de l'interface entre l'eau douce et l'eau salée (voir chapitre 2.2.1.1). L'impact d'un pompage dans un aquifère multicouche est plus complexe à représenter et à comprendre car il dépend également de la position des crépines dans le forage, de la qualité de l'isolation (cimentation) entre les nappes et des phénomènes de drainance au travers des horizons moins perméables. [4]

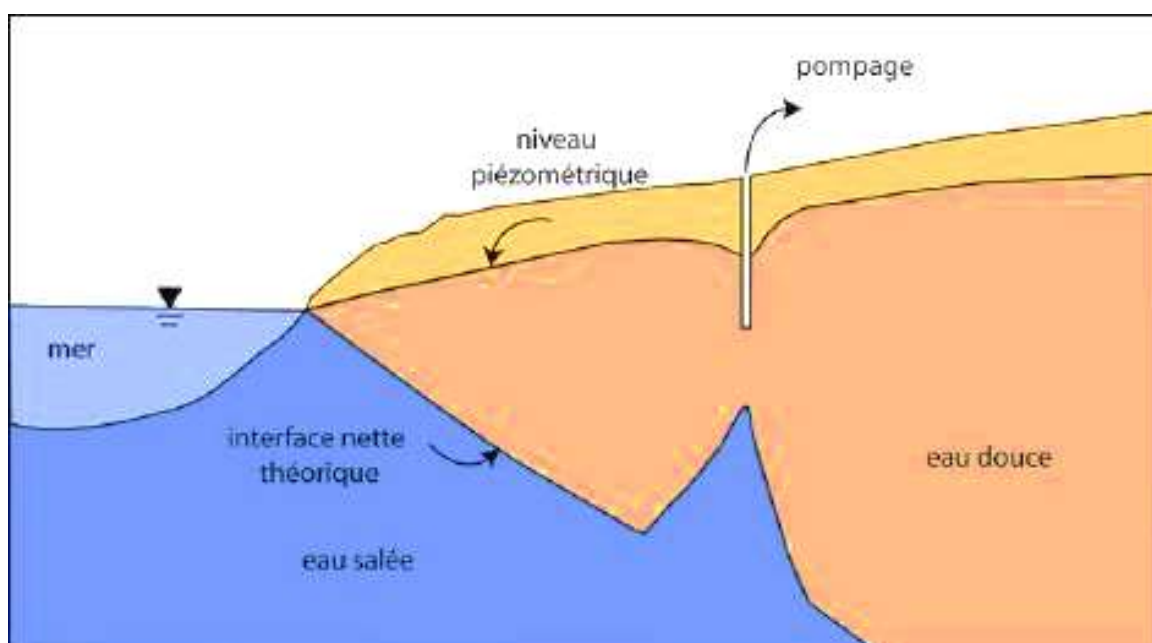


Fig10 : Influence d'un pompage sur le biseau salé à partir du schéma théorique de Ghyben- Hertzberg

Le régime d'exploitation appliqué est susceptible d'accélérer ou de ralentir le processus de contamination de la nappe par l'eau salée. Ainsi, la multiplication des arrêts et reprises de pompage sont des facteurs qui peuvent favoriser la contamination marine par un mécanisme similaire à l'effet piston sur la nappe (Daesslé et Join, 1987).

La réduction du débit de pompage d'un forage surexploité et contaminé par une intrusion saline n'est pas accompagnée d'une décroissance immédiate et totale de la salinité. Bien que réversible, le phénomène d'invasion marine au sein des aquifères côtiers est plus rapide dans le sens de la contamination que dans celui de la décontamination du milieu.

1.4.4.5. Influence du type d'ouvrage d'exploitation :

La nature de l'ouvrage de captage des eaux souterraines a un impact sur la survenance des intrusions salines. A débit d'exhaure égal, l'exploitation d'un aquifère par forage engendre un rabattement du niveau piézométrique supérieur à celui créé par le pompage dans un puits rayonnant grâce à l'action d'écroulement de la nappe de ce dernier. Ainsi, en milieu côtier, l'exploitation par puits rayonnant limite les risques liés aux remontées du biseau salé. [7]

1.4.4.6. Influence de la morphologie du littoral sur le biseau salé :

La morphologie du littoral a un impact sur la vulnérabilité des aquifères côtiers aux intrusions salines.

La perméabilité des matériaux constituant la bordure littorale est également un facteur déterminant.

La mise en captivité des aquifères littoraux qui émergent au-delà de la ligne de rivage rehausse le niveau piézométrique et rend l'aquifère moins vulnérable aux intrusions salines.

Conclusion :

L'exploitation des aquifères côtiers par pompage a un impact sur l'occurrence des intrusions salines. Les variations de débits d'exploitation des forages doivent être minimisées pour éviter d'occasionner de brutales fluctuations du niveau piézométrique qui favorisent le développement de la zone de mélange entre l'eau douce et l'eau salée par « effet piston ». La réalisation de puits rayonnant ou de

champ captant doit être privilégiée par rapport à celle de forage pour l'exploitation des aquifères littoraux vulnérables aux intrusions salines. L'augmentation de la salinité des eaux souterraines est réversible mais est plus rapide dans le sens de la contamination que dans celui de décontamination du milieu, aussi, il convient de surveiller les évolutions de salinité (conductivité électrique de l'eau et teneur en chlorure) dans les eaux des ouvrages exploités pour optimiser leur gestion.

Le recul du biseau salé est également favorisé par la recharge de la nappe par les précipitations ou les pertes des rivières mais avec plus ou moins de retard entre l'épisode pluvieux et la remontée du niveau de la surface piézométrique.

CHAPITRE 02

PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE

2.1. Introduction :

Les eaux souterraines de la nappe de la Mitidja, alimentent en eau potable de nombreuses localités de la capitale, et plusieurs villes des quatre wilayas situées en grandes parties dans la plaine (Alger, Blida, Boumerdes, et Tipaza). Elles assurent aussi l'irrigation des dizaines de milliers d'hectares de terres agricoles et l'alimentation de presque toutes les unités industrielles. C'est pourquoi, un intérêt particulier en matière de suivi qualitatif et quantitatif est accordé à cette nappe qui a fait l'objet de nombreuses études hydrogéologiques.

Parallèlement à la surexploitation de la nappe, cette dernière est exposée à des risques de pollution dont certains ont provoqué la dégradation de la qualité des eaux souterraines. [8]

2.2. Généralités et situation géographique :

La plaine de la Mitidja est située au Sud d'Alger. Elle s'étend sur les territoires d'Alger, Boumerdes, Tipaza et Blida. D'une orientation **WSW – ENE** et d'une altitude moyenne de **100 m**, elle s'étend sur une superficie de **1300 km²** depuis l'oued Boudouaou à l'Est jusqu'au bassin de Menacer à l'Ouest, sur une longueur de **100 km** et une largeur qui varie de **8 à 18 km**, elle est limitée :

- Au Sud par les piémonts de l'Atlas.
- Au Nord par la ride du Sahel.

Elle est formée de la juxtaposition de sous bassins versants, se regroupant en quatre ensembles, drainés du Sud au Nord par le réseau hydrographique. Ces principaux bassins sont :

- Bassin occidental (O. Nador).
- Bassin du Mazafran.
- Bassin d'El Harrach.
- Bassin oriental (O. Hamiz et O. Réghaia). [8]

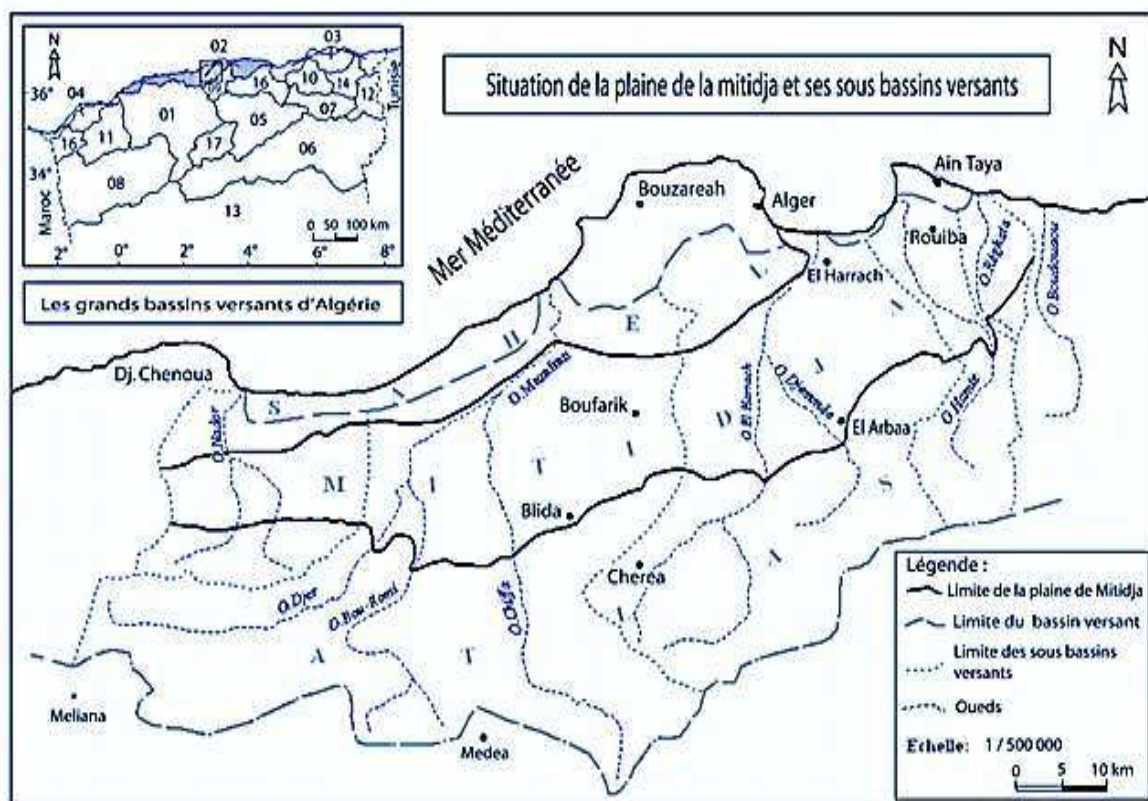


Fig.11 : Situation de la plaine de la Mitidja.

La nappe alluviale de la Mitidja est répartie sur cinq cartes topographiques au **1/50.000^e** :

- Carte d'Alger n° 21
- Carte de Koléa n°41
- Carte de l'Arbaa n° 42
- Carte de Hadjout n° 62
- Carte de Blida n° 63

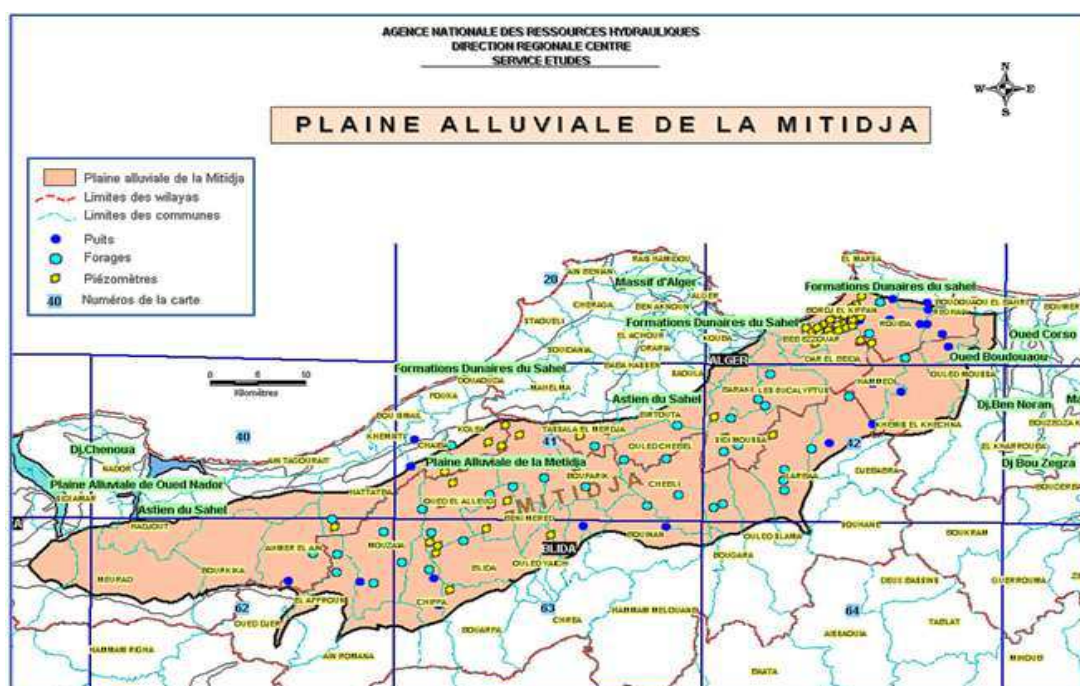


Fig.12 : Découpage cartographique au **1/50.000ème** de la plaine de la Mitidja.

Sur chacune des cartes, l'**ANRH** a retenu des points de mesures constitués de puits, de piézomètres et de forages. Ces points d'observation forment le réseau piézométrique de la nappe alluviale de la Mitidja.

Ce réseau fait l'objet de deux campagnes de mesures par an (une campagne en période des basses eaux et une autre en période des hautes eaux). [8]

2.3. Aperçu climatique :

La plaine de la Mitidja se situe au Nord de l'Atlas Blidéen (**1620m pic de Chréa**), qui la protège de l'influence saharienne, elle se trouve par sa position géographique soumise à l'influence du régime climatique méditerranéen.

La plaine de la Mitidja est soumise à un climat régional subhumide littoral caractérisant l'ensemble des plaines côtières. Au fur et à mesure que l'on s'éloigne du littoral, le climat devient de plus en plus continental et l'on enregistre une baisse sensible des températures. Les valeurs des précipitations de la région varient de **201,1 mm** à **968 mm**, concentrées sur une période pluvieuse d'Octobre à Mars. Les précipitations moyennes interannuelles dans la plaine de la Mitidja sont irrégulièrement réparties. [8].

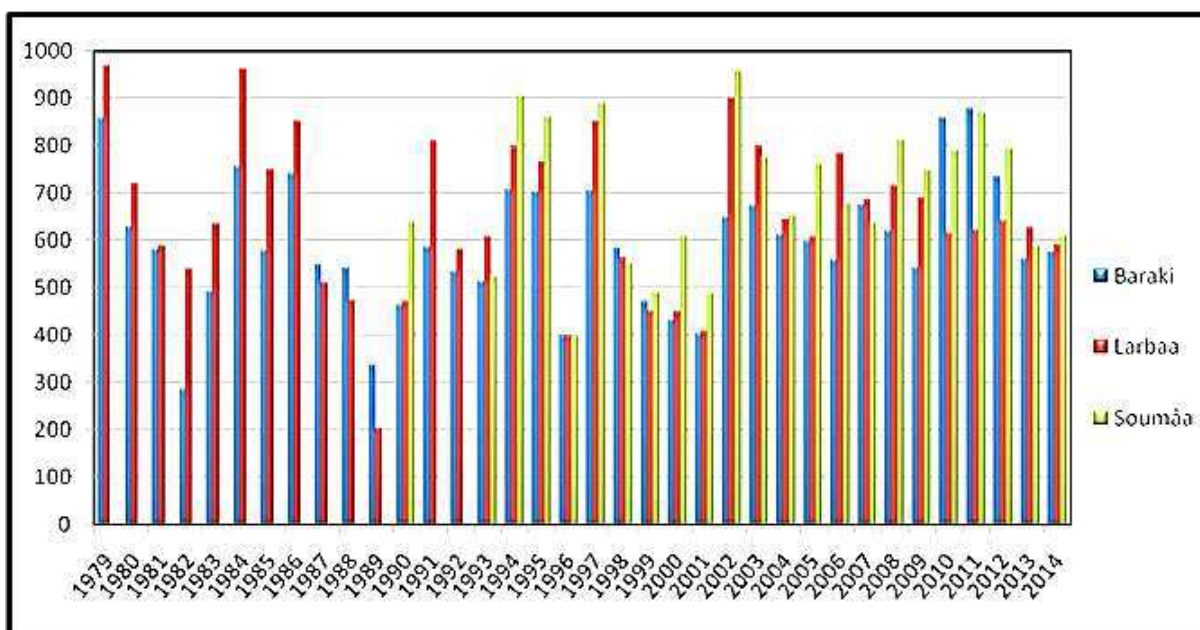


Fig.13 : Pluviométrie moyenne interannuelle

(Période **1979- 2014**)

L'évolution interannuelle des pluies enregistrées sur **35 années** d'observation, entre **1979** jusqu'à **2014**, a mis en évidence une phase de stabilité des précipitations qui avoisinent les **600 mm** depuis l'année **2002**, avec une tendance à la hausse de l'année **2008** à l'année **2012**, où un épisode pluvieux exceptionnel a été enregistré durant le mois de février **2012**. Néanmoins, une baisse des précipitations interannuelles est enregistrée à partir de l'année **2013** (Voir graphe ci-dessus). [8]

2.4. Géologie et Hydrogéologie :

La plaine de la Mitidja s'étend au sud d'Alger entre Hadjout et Réghaia, selon une direction **WSW- ENE**. Elle est bordée au Nord par les collines du Sahel et au Sud par l'Atlas Blidéen.

La nappe de la Mitidja s'étend au Nord, jusqu'à la limite d'affleurement des alluvions quaternaires, et au Sud jusqu'au contact entre les alluvions quaternaires et les formations plus anciennes de l'Atlas Blidéen. D'un point de vue administratif, elle concerne quatre wilayas (Alger, Blida, Boumerdes et Tipaza).

La plaine de la Mitidja est constituée de deux aquifères : la formation quaternaire de la Mitidja qui représente la principale ressource en eau souterraine, et la formation de l'Astien qui est l'aquifère le plus profond.

La formation de la Mitidja est hétérogène, constituée de graviers et sables avec des intercalations de niveaux argileux. Les alluvions affleurent sur la majeure partie du

bassin avec une épaisseur qui peut atteindre plus de **200 m** au centre de la plaine. Localement, les alluvions peuvent être recouvertes par les formations limono-argileuses du Mazafran qui mettent en charge l'aquifère des alluvions de la Mitidja.

[8]

La formation de l'Astien est constituée principalement de sables et de grès plus ou moins calcaires qui reposent sur le substratum marneux du Plaisancien. Son épaisseur moyenne est de l'ordre de **100 m**

L'Astien est séparé de l'aquifère des alluvions par la formation argileuse d'El Harrach, hormis au Nord-Est de la plaine où les deux formations perméables sont en contact direct.

Le cadre géologique local est caractérisé par la série lithostratigraphique représentée dans la figure suivante :

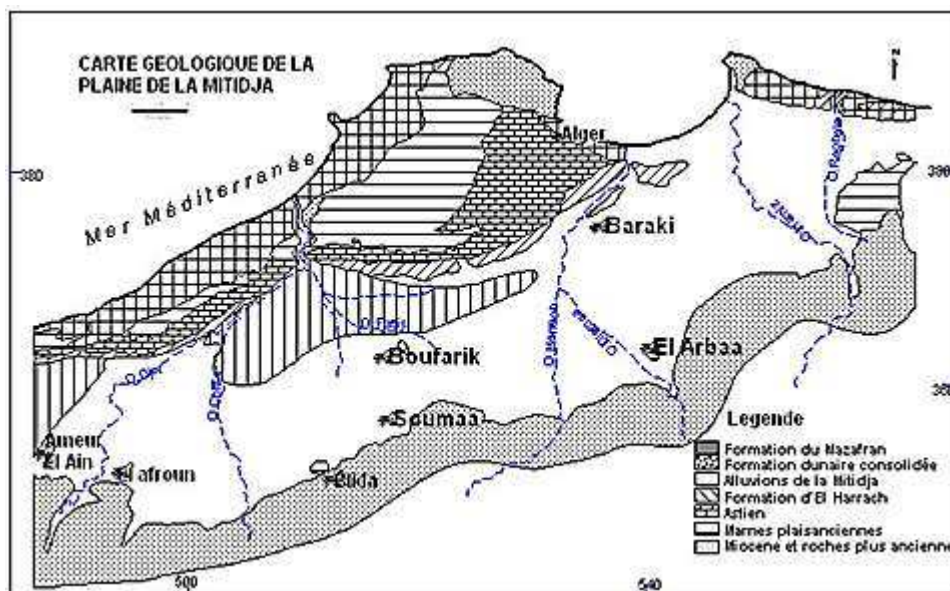


Fig.14 : Carte géologique simplifiée de la plaine de la Mitidja

L'alimentation de cet aquifère se fait essentiellement par les infiltrations des eaux de pluie sur le Sahel où il affleure. Il est également alimenté par la nappe alluviale sus-jacente par drainance à travers les marnes jaunes peu épaisses, et dont la perméabilité varie de 10^{-7} à 10^{-8} m/s.

Les caractéristiques hydrodynamiques de l'Astien sont mal connues. Les estimations de la perméabilité donnent des valeurs qui varient dans de larges fourchettes avec une moyenne de l'ordre de **4,3 m/j**, et le coefficient d'emmagasinement entre 5×10^{-6} et 5×10^{-3} .

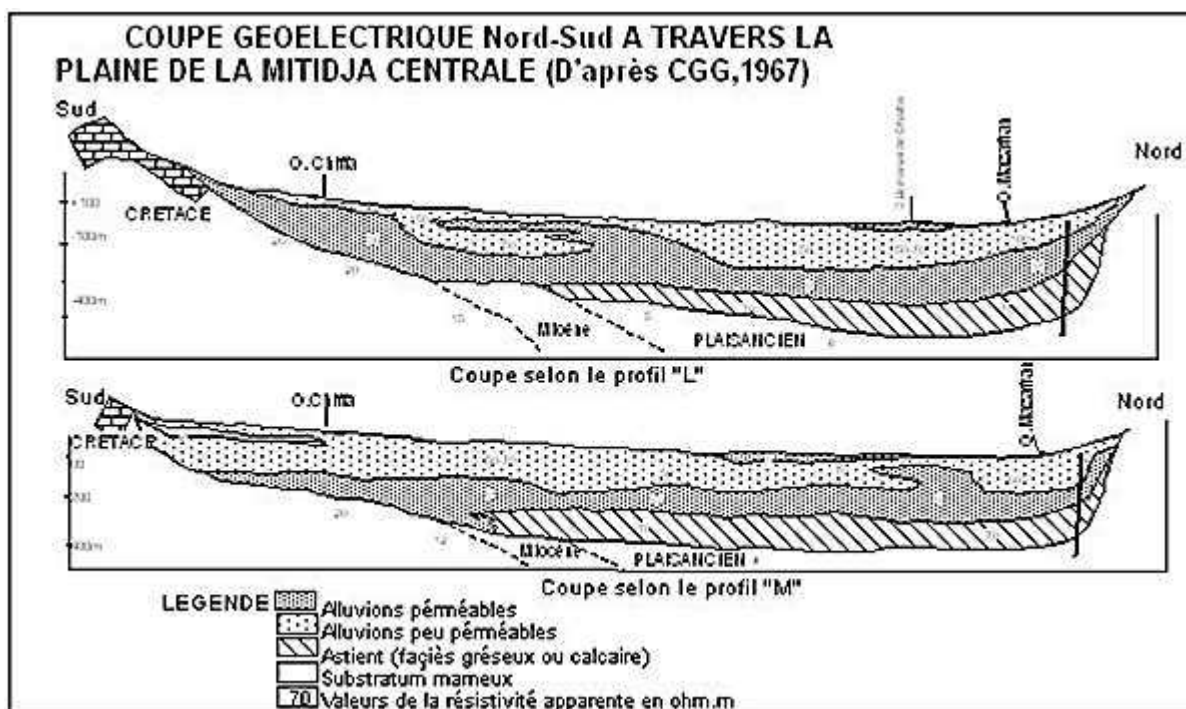


Fig.15 : Coupes géo électriques Nord-Sud à travers la plaine de la Mitidja

2.4.1. L'aquifère des alluvions de la Mitidja :

Les sédiments clastiques de la formation de la Mitidja et les sédiments fluviaux récents constituent l'aquifère le plus important de la plaine de la Mitidja.

Cet aquifère, composé de graviers et de galets alternant avec des limons et argiles, occupe toute l'étendue la plaine. Sa limite inférieure est constituée par les marnes de la formation d'El-Harrach, et sa limite supérieure est libre sauf dans la zone du Mazafran où la nappe est captive sous les limons du Rharbien. Les coupes géoélectriques (**Fig.15**), montrent que l'aquifère se développe sur une épaisseur de **100 à 200m** en moyenne et va en s'amincissant vers le Sud pour atteindre l'Atlas. **[8]**

La nappe alluviale de la Mitidja est alimentée par :

- Infiltration des précipitations sur la plaine,
- Infiltration à partir des cours d'eau et du ruissellement sur les piémonts de l'Atlas,
- Ecoulement souterrain de l'Atlas,
- Fuites des réseaux de distribution en eau,
- Infiltrations des eaux d'irrigation excédentaires.

Les exhaures sont assurées par :

- Pompage dans les points et forages de la plaine,
- Drainage des Oueds dans leur cours aval,
- Fuites souterraines vers la mer,
- Écoulement vers les limons de la formation du Mazafran par drainance.

2.5. Présentation de la zone d'étude :

2.5.1. Aperçu géomorphologique et hydro climatologique :

La région d'étude occupe la partie septentrionale de la Mitidja Orientale, d'une superficie d'environ 1140Km². Elle est limitée par la mer méditerranée au nord, la limite géologique étanche au Nord-est, l'Oued El Harrach à l'Ouest et l'Oued El Hamiz à l'Est. Elle s'étend au Sud à quelques 15km de la côte. (Figure n°16)

L'indice de compacité de Gravellius Kc est de 1,24, il s'agit d'un bassin versant de forme allongée, indiquant un temps de concentration des eaux à l'exutoire assez lent. [9]

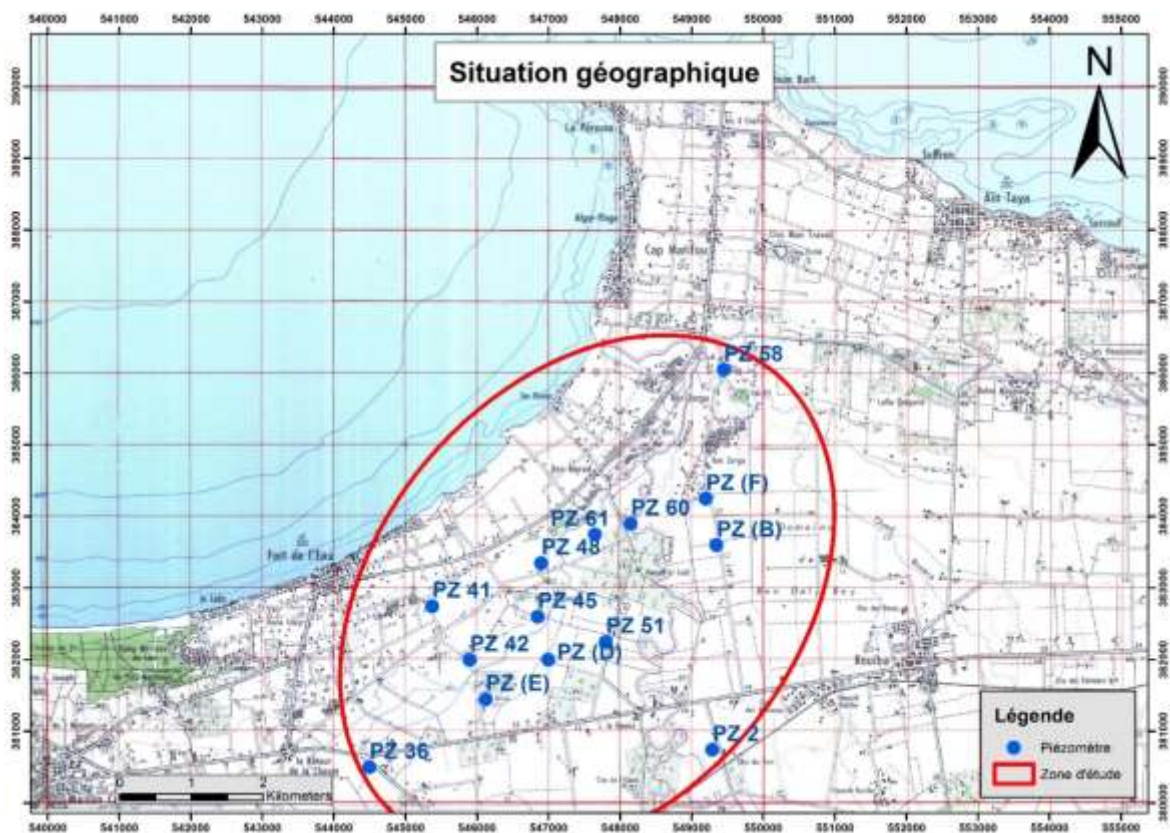


Fig.16 : situation géographique de la zone d'étude.

Le bassin étudié présente une pente relativement faible avec un indice de pente globale $I_g = 17,79 \text{ m/Km}$, de l'ordre de 1,8%, favorisant l'infiltration au dépens du ruissellement.

Du fait de sa proximité de la mer, la zone d'étude jouit d'un climat méditerranéen, caractérisé par un été sec et chaud et un hiver doux et humide la température moyenne annuelle durant la période (1980-2005) a été estimée à $17,9^\circ\text{C}$.

La précipitation moyenne annuelle est de l'ordre de 596,5mm L'évapotranspiration potentielle de 882,43mm est obtenue par la formule de C.W. Thornthwaite.

Pour le calcul de l'évapotranspiration réelle, nous avons pris la moyenne arithmétique des valeurs obtenues par les méthodes de Turc, Coutagne et C.W. Thornthwaite, elle est égale à 490mm.

Le bilan hydrique de C.W Thornthwaite montre un déficit de 431mm, une lame d'eau ruisselée, donnée par la formule de Tixeront-BerKaloff. Égale à 90,85mm et une lame d'eau infiltrée de l'ordre de 15,65mm.

Les résultats du bilan de la période (1980-2005) comparés aux résultats du bilan de la période (1971-1989) [9]

Montre une baisse de précipitations de l'ordre de 67,5mm (Tableau N°2).

Période du bilan	Precipitations (mm)	ETR (mm)	R lame d'eau ruisselée (mm)	I lame d'eau infiltrée (mm)
1971 - 1989 Djoudar Hallal	664	501	109	54
1980 – 2005 Yahiaoui	596.5	490	90.85	15.65
Difference	67.5	11	18,15	38,35

Tableau :2 : Comparaison des deux bilans hydriques de 1989 et de 2005

La plaine de la Mitidja est une région agricole très intensive de l'Algérie, en raison de sa topographie plane et de sa fertilité. Les activités agricoles les plus répandues sont l'arboriculture et les cultures maraîchères. La Mitidja couvre seulement 3% de la surface totale de l'Algérie du Nord, mais, il est estimé qu'elle représente 10% environ de ses ressources en eau de surface et près de 20% de ses ressources en eaux

souterraines (Sir Mac Donald, Partners limited, 1992). Elle représente le cœur de l'agriculture régionale.

Cependant, le développement agricole de la Mitidja décrit ci-dessus est préjudicié par deux facteurs spécifiques à la région :

- L'urbanisation des terres agricoles. La Mitidja-Est est la plus urbanisée des trois secteurs de la plaine.
- L'insuffisance des ressources en eau. L'irrigation de la Mitidja a été basée principalement sur l'exploitation des eaux souterraines, complétée dans le périmètre du Hamiz par l'eau superficielle provenant du barrage du Hamiz et le marais de Réghaia. Cependant, l'utilisation des eaux souterraines est de plus en plus concurrencée par l'AEP, jusqu'au point où l'exploitation de la nappe de la Mitidja a effectivement atteint, sinon dépassé, la limite de son potentiel à long terme.

Les principaux oueds traversant la région d'étude sont :

- à l'Ouest, l'Oued El Harrach,
- à l'Est, l'Oued El Hamiz.

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

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

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

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

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

Les principaux exutoires de la plaine de Mitidja Est sont représentés par l'oued El Harrach, Hamiz, Reghaia. Les oueds alimentent la nappe dans la zone libre du piémont et la drainent vers l'aval au niveau de la zone de recharge. **[10]**

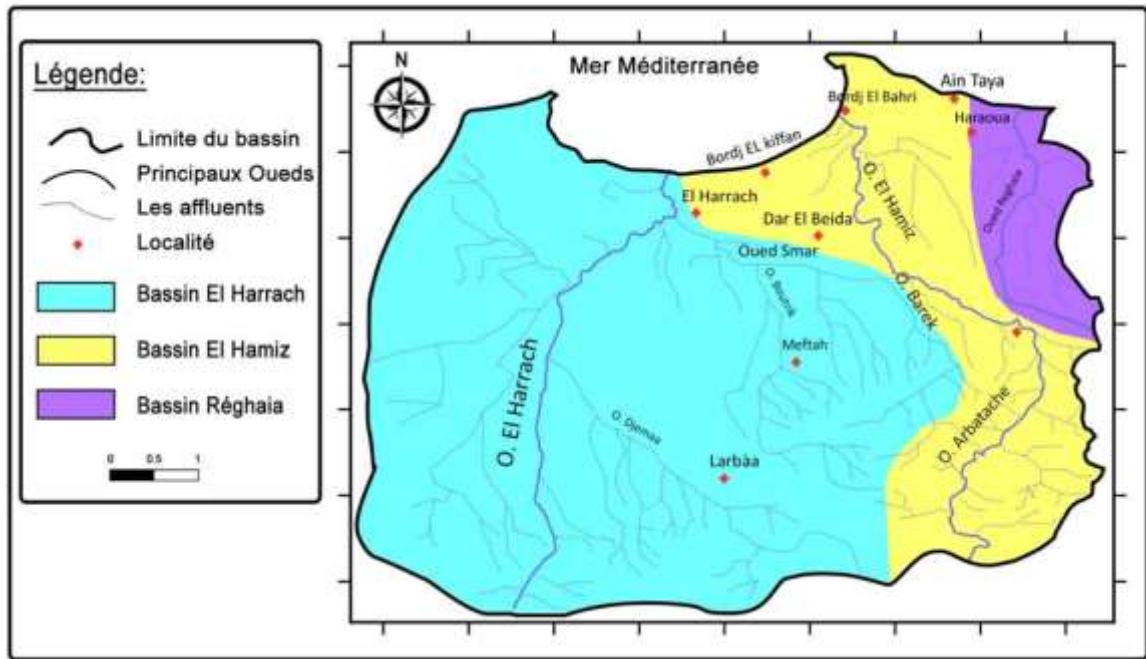


Fig.17 : Sous bassins versants de la Mitidja Est.

2.6. Géologie de la baie d’Alger :

Du point de vue géologique, le secteur d’étude constitue l’extrémité orientale de la plaine de la Mitidja qui est une zone de subsidence continue (Figure n°18) [9]

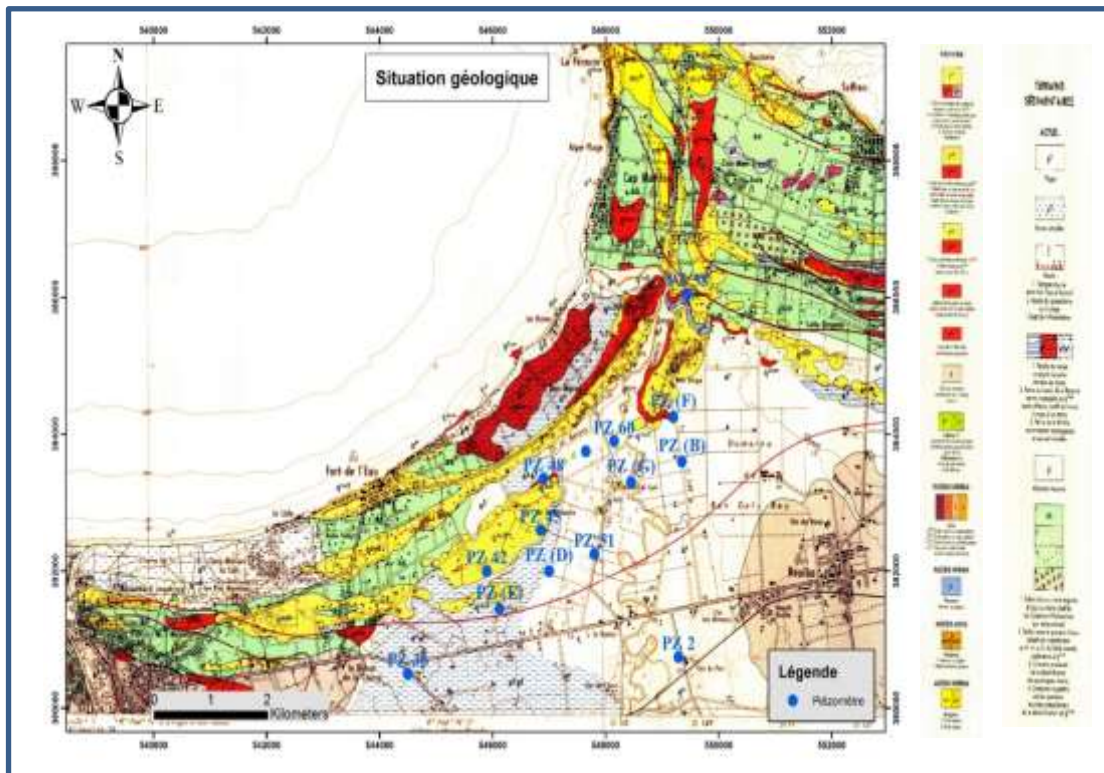


Fig.18 : Carte géologique de la Mitidja.

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

A la fin du pliocène et au quaternaire, deux réservoirs aquifères se sont individualisés. Il s'agit de l'Astien formé par des calcaires et des grès d'origine continentale. Le quaternaire alluvial constitué essentiellement de galets et de graviers.

Ces deux réservoirs sont séparés dans toute la plaine par des marnes jaunes semi-perméables de la formation d'El Harrach (Villafranchien) sauf au niveau de la poche de Rouïba où les deux aquifères sont en contact (Figure n°4). Ces deux aquifères reposent sur un substratum imperméable, généralement constitué par les marnes grises et bleues du Plaisancien. [9]

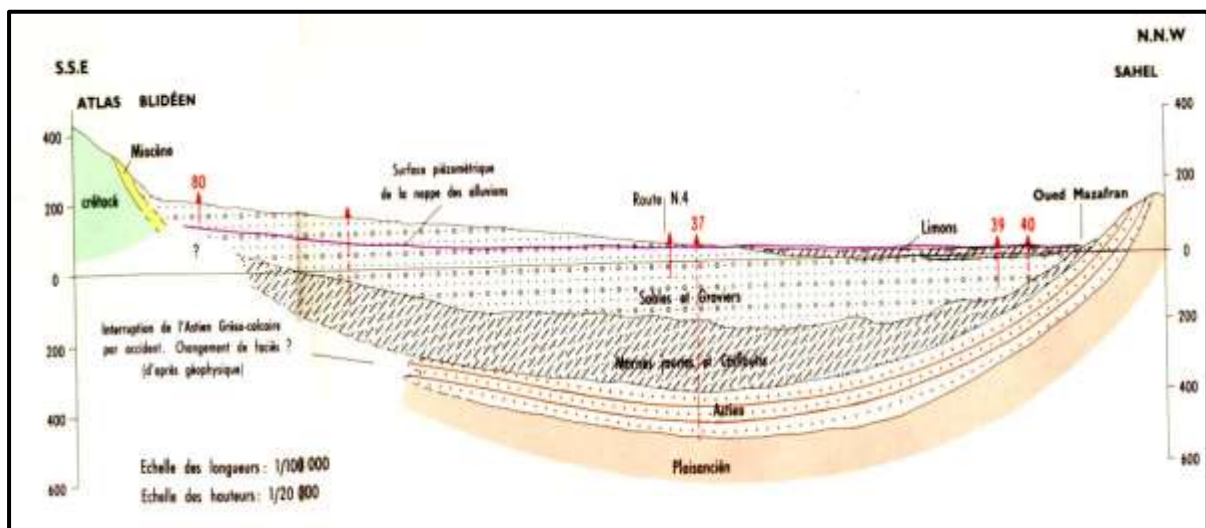


Fig.19: Coupe interprétative de la Mitidja dans le bassin du Mazafran (Achie 1971)

2.7. Etat du réseau de surveillance des eaux souterraines de la nappe de la Mitidja année 2015 :

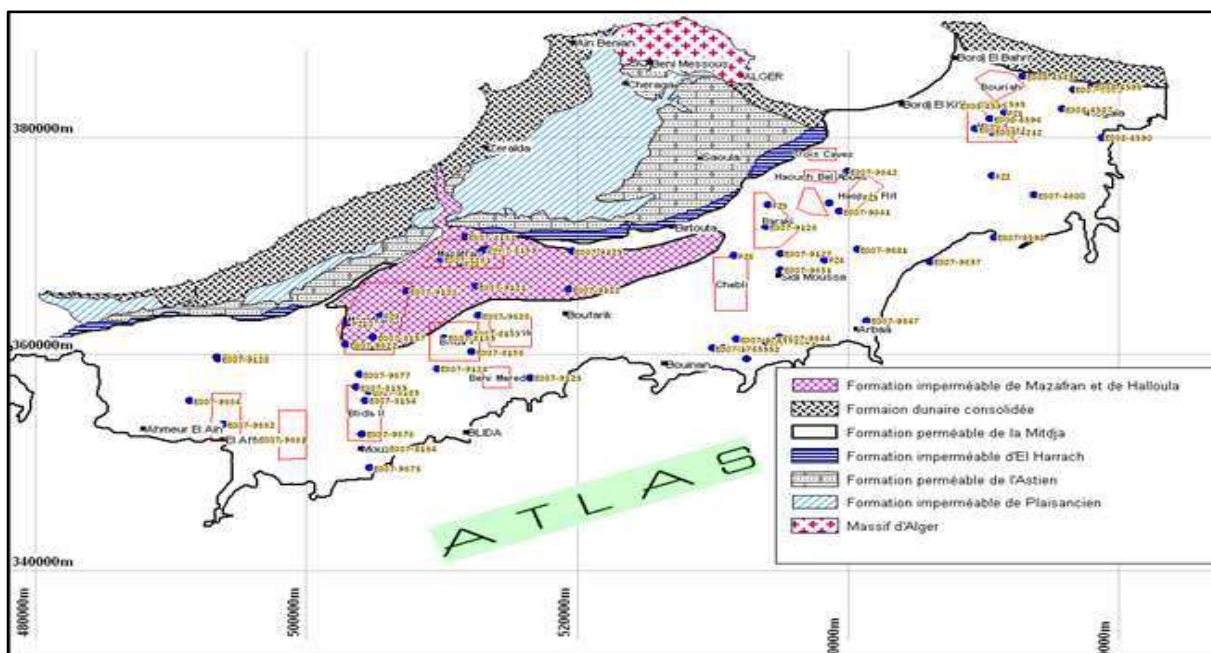


Fig.20: Localisation des points du réseau piézométrique de la plaine de la Mitidja

Le réseau actuel de la mitidja est composé de 89 points de mesures: 11 puits, 19 forages et 37 piézomètres, dont 22 piézomètres spécifiques au suivi de l'intrusion marine au niveau de la Baie d'Alger.

Dans l'optique de combler les lacunes de prise de mesures d'une part, et l'étoffement du réseau de surveillance des eaux souterraines de la nappe de la Mitidja d'autre part, on tient à rappeler ce qui suit :

- Les **10** (dix) piézomètres récemment réalisés par la **SEAAL** ont été intégrés dans ce réseau depuis la « campagne des hautes eaux **2010** ».
- Suite à l'assèchement de plusieurs puits et de certains forages qui composaient le réseau de surveillance, une fiche technique a été proposée en **2009** pour la réalisation de **16** piézomètres : **02** piézomètres ont été retenus, il s'agit du piézomètre **PZ15** et **PZ16** situés dans la wilaya de Boumerdes (la matérialisation sur terrain a été effectué).

Toutefois, il demeurera aussi important et urgent d'entreprendre d'autres actions pour le contrôle et la surveillance de la nappe dans toute son extension.

Par ailleurs, il est à rappeler que, lors de la réunion effectuée au niveau de la direction de la **SEAAL**, et qui avait pour ordre du jour l'autorisation d'installation des **TD** au droit de leurs piézomètres, les représentants de la **SEAAL** ont exprimés leur

accord de principe pour la réalisation des **14** piézomètres restants de la fiche technique proposée par nos soins. **[8]**

Nous signalons que deux piézomètres vont être réalisés prochainement par les services de l'environnement de la Wilaya d'Alger au niveau de la décharge publique d'Oued Smar qui seront intégrés au réseau actuel de l'ANRH.

Néanmoins, les **10** piézomètres récemment réalisés par la **SEAAL**, doivent impérativement faire l'objet d'une opération de nivellement topographique. Ce qui permettra de faire un suivi plus rigoureux et d'établir des cartes piézométriques plus représentatives et plus précises.

Dans le cadre du programme **GIRE** (Gestion Intégrée des Ressources en Eau) dans le bassin hydrographique côtier Algérois **02A**, **34** sondes autonomes pour le suivi quantitatif et qualitatif des eaux souterraines de la nappe de la Mitidja ont été acquises.

Ces sondes sont dotées de baromètres qui permettent de compenser la pression atmosphérique. Le matériel acquis est composé des dispositifs suivants :

✚ **30** appareils de mesure des niveaux d'eau et température en continue dont :

- **15** installés et fonctionnels, au niveau des piézomètres ;
- **15 non installés** (attente confection des supports au niveau de la Direction Générale, une mission s'impose pour le dimensionnement de ces supports pour chaque piézomètres).

✚ **04** appareils de mesure des niveaux d'eau, température et conductivité électrique ;

- Un **CTD détérioré**, au niveau du piézomètre **PZG** (acte de vandalisme)
- **03** au niveau des piézomètres de la baie d'Alger, fonctionnel.

✚ **03** baro-Diver installés qui mesurent les variations de pression atmosphérique et qui sont fonctionnels.

Ces appareils offrent une gestion optimale des nappes souterraines. Ils permettent de mesurer les niveaux de la nappe (pression) avec des fréquences allant d'une seconde jusqu'à **99** heures, et une programmation du pas de mesures en fonction des objectifs des études futures. **[8]**

2.8. Évolution de la profondeur de la nappe de la Mitidja :

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

- Le bassin du Mazafran : la nappe est captive sur une grande partie (sous les limons du Mazafran).
- Le bassin Harrach-Hamiz : la nappe est entièrement libre favorisant une infiltration directe des pluies. [8]

2.8.1.Évolution de la profondeur de la nappe en période des hautes eaux dans le Bassin Harrach-Hamiz :

Secteur du Hamiz :

Les points de mesures sélectionnés correspondent à deux piézomètres situés dans le champ de captage du Hamiz (**E008-4211 PZ1 Hamiz** et **E008-4212 PZ2 Hamiz**).

Dans le Hamiz, les profondeurs de la nappe marquent une amélioration métrique (**Fig.21**).

Secteur de Baraki-Eucalyptus :

Entre Baraki et Sidi Moussa, les niveaux de la nappe ont été suivis dans deux piézomètres (**E007-9126 PZ9 Baraki** et **E007-9127 PZ10 Sidi Moussa**). Les mesures ont montré une amélioration d'une dizaine de mètres par rapport aux années précédentes.

Au niveau de la région des Eucalyptus, le forage **E007-9641 F997/42** a montré une remontée moyenne de **7m** entre **2010** et **2015**, suite à l'arrêt de plusieurs forages AEP des champs de captage de Baraki et Hamiz. Le niveau statique actuel est de l'ordre de **33m** (voir graphe du **PZ 2 Hamiz E008-4212**)

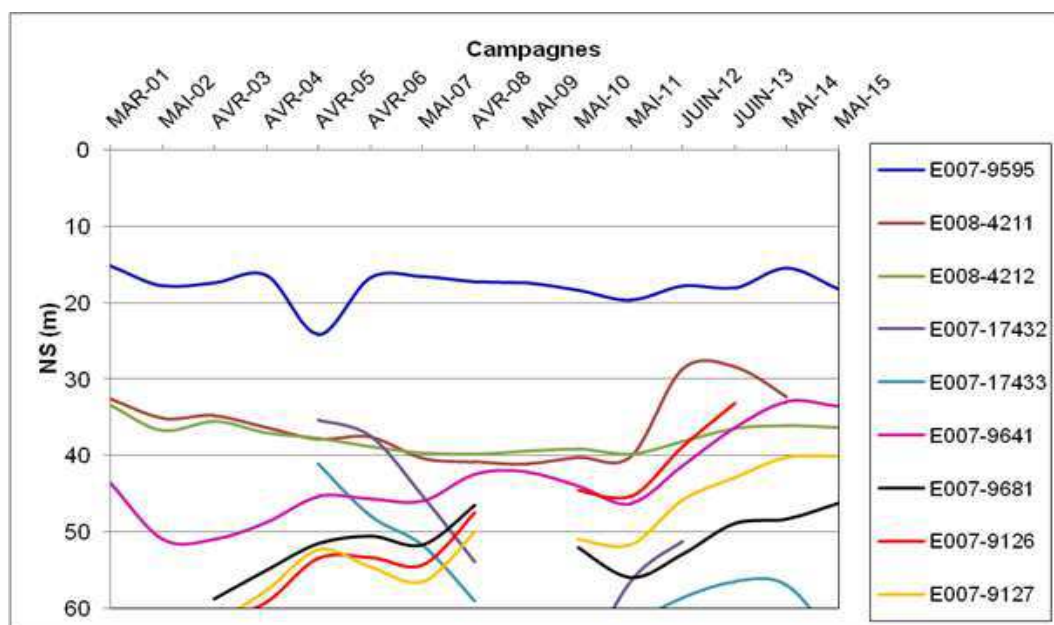


Fig.21 : Variations des niveaux de la nappe dans le bassin Harrach-Hamiz en périodes de hautes eaux (2001 à 2015)

Les graphes de la figure N°21 montre une amélioration des niveaux sur pratiquement tous les points de mesure des différentes campagnes piézométriques des hautes eaux. Néanmoins, une baisse de niveau est enregistré à partir de l'année 2014 aux environs des bassins d'infiltration non fonctionnels.

2.8.2.Évolution de la profondeur de la nappe en période des basses eaux dans le Bassin Harrach-Hamiz,

Secteur du Hamiz :

L'évolution des niveaux de la nappe pendant la période des basses eaux semble être plus au moins stable en comparaison avec les années précédentes. Les niveaux variants dénotent une amélioration métrique (fig 12).

Secteur de Baraki-Eucalyptus :

Une remontée de l'ordre de quatre mètres a été constatée au niveau du piézomètre **E007-9126** situé dans le champ captant de Baraki, comparativement à l'année 2012. Le niveau actuel mesuré est de **38,75m** par rapport au sol, Cette remontée progressive dans la région de Baraki et de Bougara est le résultat de l'influence conjuguée, de l'arrêt de plusieurs forages **AEP**, ainsi que l'épisode pluvieux exceptionnel du mois de Février 2012 qui ont permis à la nappe de se reconstituer.

[8]

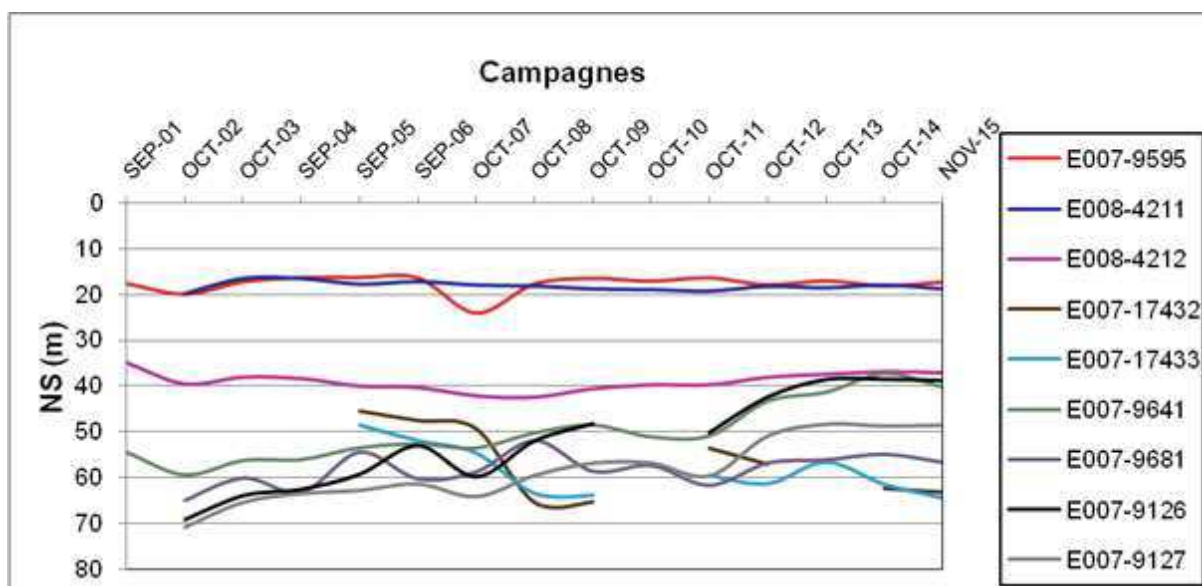


Fig.21 : Variations des niveaux de la nappe dans le bassin Harrach-Hamiz en périodes des basses eaux (**2001 à 2015**).

Nous tenons à signaler, cette remontée en période des basses eaux au Nord de l'Atlas Blidéen est l'impact réel de l'infiltration efficace des précipitations du mois de Février **2012**, en plus des apports de la fonte des neiges.

2.8.3.Évolution de la profondeur de la nappe en période des hautes eaux dans le Bassin du Mazafran :

La comparaison des niveaux statiques, en période des hautes eaux dans le bassin du Mazafran, montrent une remontée de l'ordre de **1 à 5 m** dans le bas Mazafran (**E007-8161, E007-9121, E007-9122, E007-9123**), comparativement à l'année **2010**.

Nous avons enregistré néanmoins une remontée du niveau de l'ordre de **21 m** du côté de Bou Roumi à **7 Km** au Nord d'El Affroun par rapport à l'année **2010** au niveau du piézomètre **E007-9128**. La profondeur de la nappe à cet endroit est de **29.20 m**, alors qu'en **2010** était à **51m**.

Nous signalons, une nette amélioration du niveau piézométrique sur pratiquement tous les points mesurés dans le bassin du Mazafran jusqu'au Mai **2014**, poursuivie d'une baisse au courant du mois de Mai **2015** (voir graphes ci-dessous). **[8]**

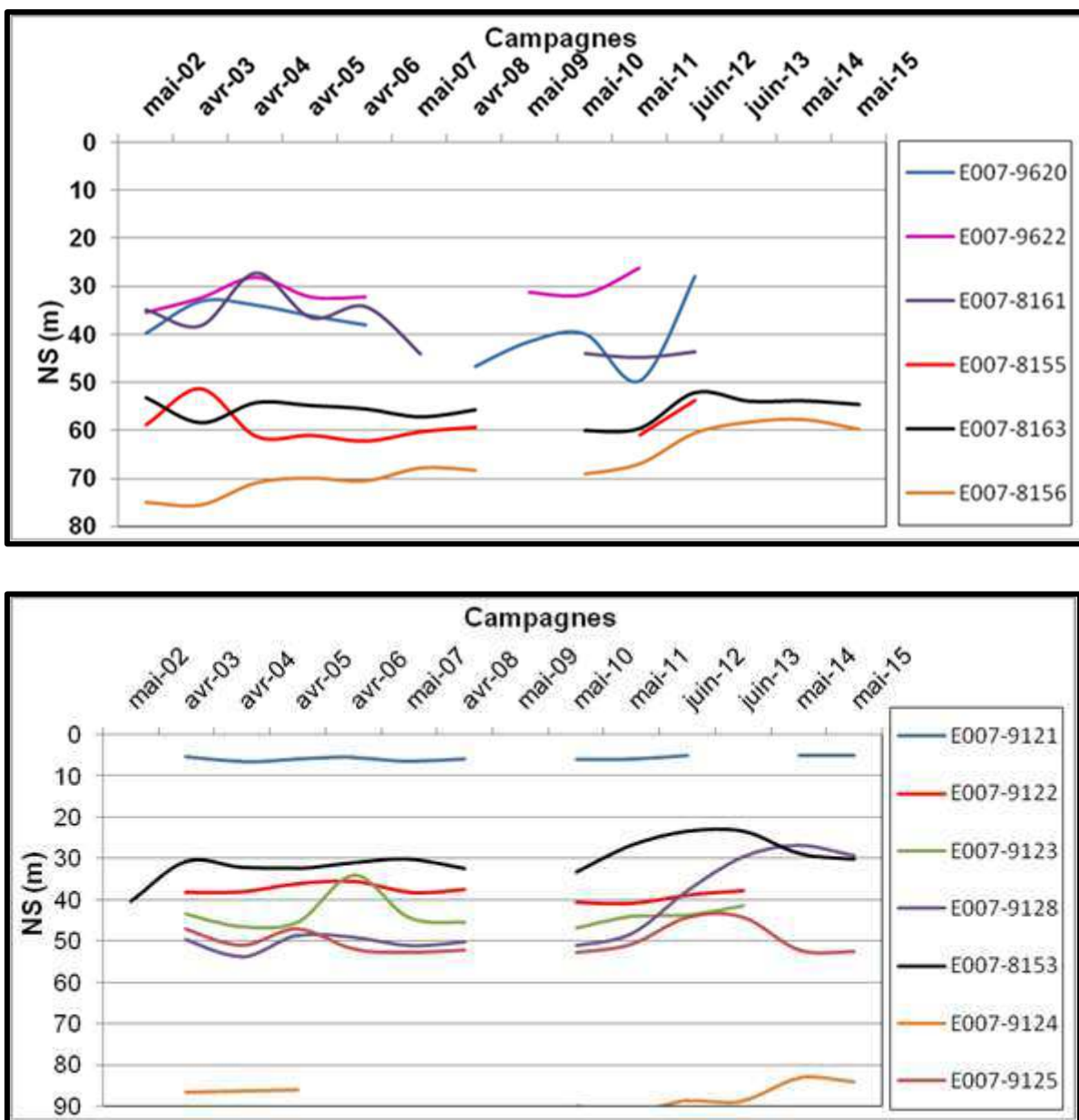


Fig. 23/24 : Evolution des niveaux de la nappe dans le bassin du Mazafran en périodes des hautes eaux (2002 à 2015).

Il est à noter, que suite a l'équipement des piézomètres par des sondes autonomes, qui permettent d'enregistrer les fluctuations du niveau d'eau de la nappe en continue; ces derniers n'ont pas fait l'objet de mesures manuelles par une sonde électrique au courant de l'année 2009 . [8]

2.8.4. Évolution de la profondeur de la nappe en période des basses eaux dans le bassin du Mazafran :

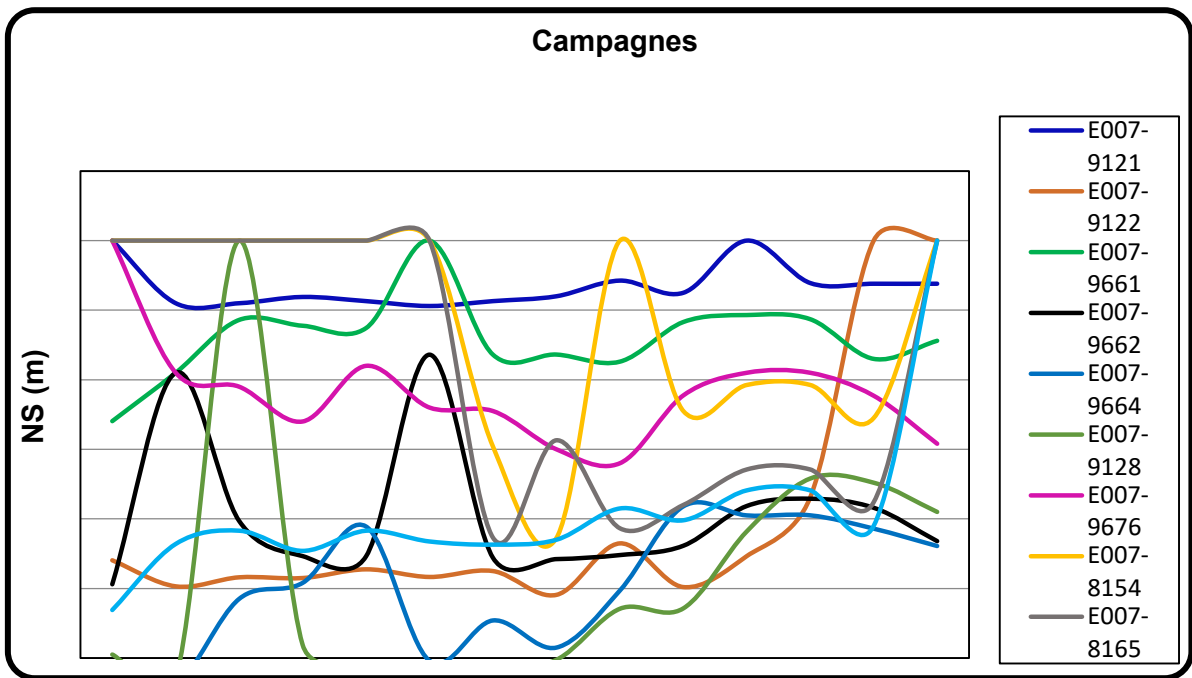


Fig.25 : Evolution des niveaux de la nappe dans le bassin du Mazafran en périodes des basses eaux (**2002 à 2015**).

Dans la région de Boufarik, le niveau de la nappe a remonté en Octobre **2013** de **12 m** par rapport à Octobre **2011**.

Au niveau du champ captant de Blida I, nous avons enregistré une remontée de l'ordre de **8 m** entre Octobre **2011** et Novembre **2015**.

Dans le champ captant de Blida II, nous avons noté également une légère amélioration du niveau de la nappe de la Mitidja, avec des remontées de l'ordre de **0,4 à 1 m** par rapport à **2011**. Le niveau de la nappe varie entre **25,50** et **41m** en Octobre **2014**, alors qu'en Octobre **2011** il était entre **24,50** et **40,2m**.

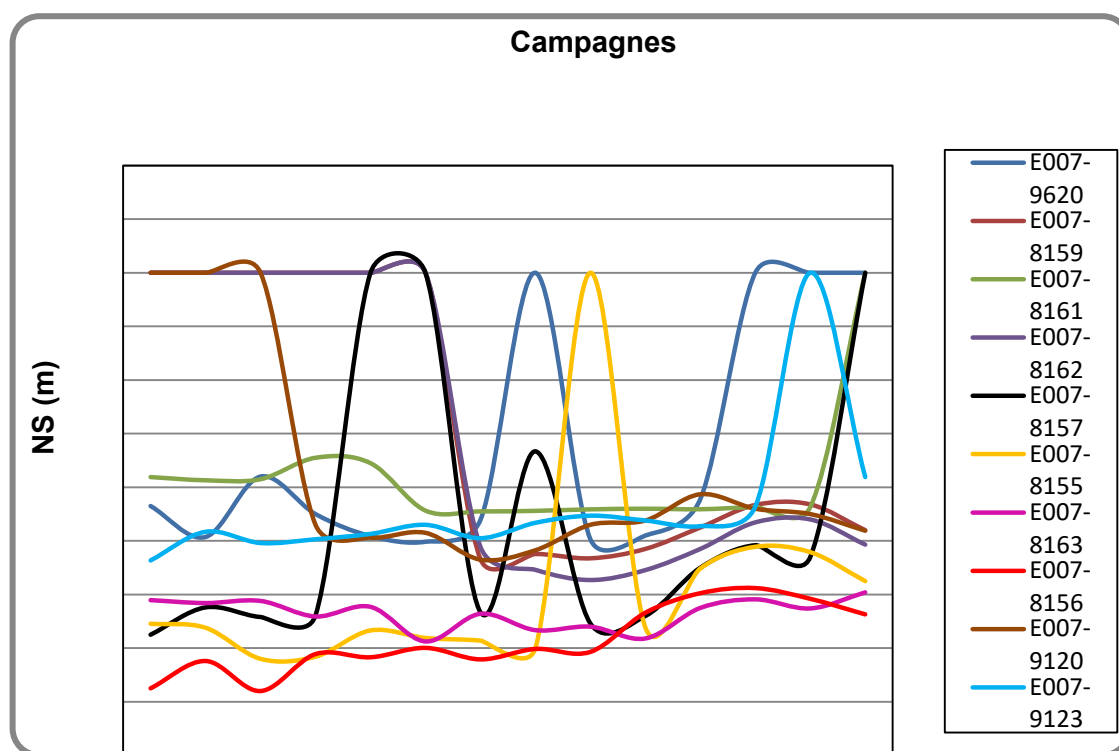


Fig.26 : Evolution des niveaux de la nappe dans le bassin du Mazafran en périodes des basses eaux (**2002 à 2015**)

Dans le secteur du Mazafran, la nappe des alluvions est captive dans le bas Mazafran, où nous avons enregistré des niveaux plus au moins stables depuis l'année **2007** qui varient en moyenne de **50 à 60 m**. Un abaissement métrique est à signaler depuis l'année **2013**. [8]

2.8.5. Évolution de la profondeur de la nappe a l'aval des bassins de recharge artificielle dans la région de Tabainet :

- Il est à rappeler que suite à la déviation du canal qui assurait l'alimentation des bassins d'infiltration réalisé par la **DRE** de Blida en **2004**, des rabattements importants de l'ordre de **38 m** ont été enregistrés dans les environs de la région de Tabainet, entre la période d'Avril **2005** et la période d'Avril **2010**, ce qui montre que l'alimentation de ces bassins a **un impact directe** sur la recharge de la nappe dans la région.
- Après la remise en eau du grand bassin, en **2013** une amélioration du niveau des eaux souterraines, avec une fluctuation saisonnière de l'ordre métrique.
- Un abaissement du niveau est enregistré depuis l'année **2014** suite à la rupture de l'alimentation de ces bassins, qui est dû au remblaiement du canal.

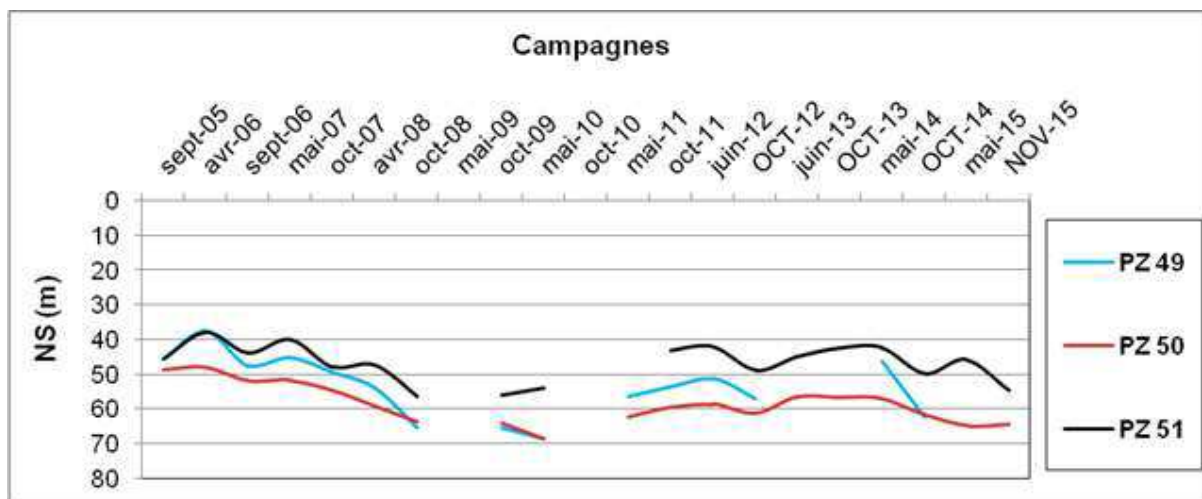


Fig.27 : Évolution de la profondeur de la nappe de la Mitidja en aval des bassins de recharge.

Conclusion :

Géomorphologie :

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

Hydro-climatologie :

On constate que la région de la baie d'Alger se caractérise par un été chaud et un hiver doux et humide.

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

Hydrogéologie :

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

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

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

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

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

CHAPITRE 03

MÉTHODOLOGIE

3.1. Introduction :

Méthodologiquement, ce travail est divisé en trois grandes 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).
- Deuxième partie : correspond à un travail analytique au laboratoire.
- Troisième partie : elle consiste à un travail de bureau (traitement des données avec des logiciels (ArcGIS PRO 2020, SURFER 2016, DIAGRAMME) pour divers domaines.

3.2. Partie terrain :

Afin d'examiner l'évolution de mesure sur terrain et prélèvement, nous avons effectué plusieurs missions de terrain avec l'équipe de L'ANRH (25, 26,28 octobre et 02, 08, 10,11 novembre 2021).

Les points échantillonnés lors de ces missions de terrain sur la carte suivant :

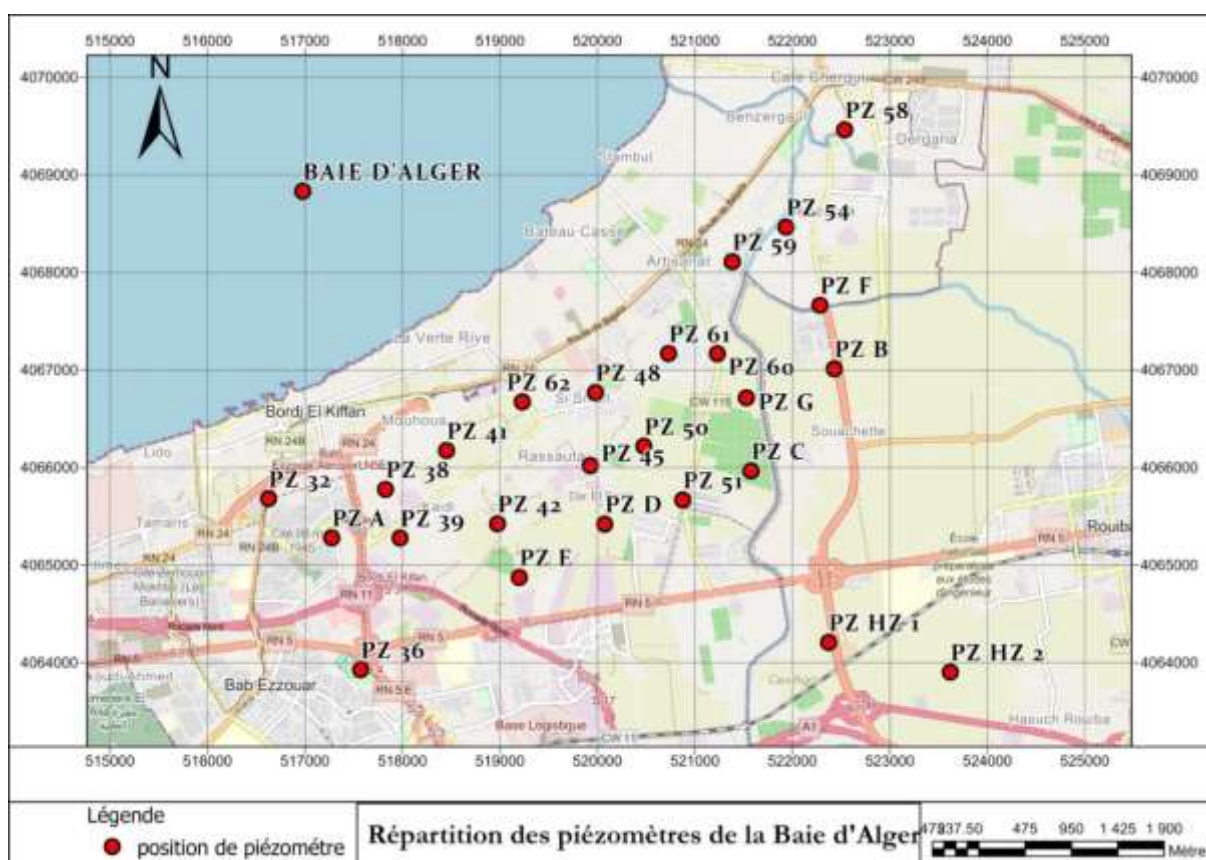


Fig.28 : Répartition des piézomètres de la baie d'Alger [11].

Cette équipe était composé de :

- ✓ Un Ingénieur hydrogéologue de l'ANRH
- ✓ Une étudiante de Master 2.
- ✓ Un chauffeur de l'ANRH

3.2.1. Matériels utilisés :

Les missions de terrain ont été réalisées par le matériel suivant :

a. Véhicule de terrain :



Fig.29 : Voiture utilisées pour le déplacement sur terrain (ANRH ALGER BIR MOURAD RAIS)

b. une sonde multi paramètres à différents profondeurs (CE, TDS et température) :



Fig.30: Sonde multi paramètres utilisée pour la mesure de différents paramètres (ANRH ALGER)

c. Escabeau :



Fig.31 : Escabeau utilisé (ANRH ALGER)

d.ph mètre :



Fig.32 : Ph mètre et conductivimètre de l'ANRH utilisée pour les mesures sur terrain



Fig.33 : mesurer les Échantillons prélevés sur terrain (PH, Conductivité et température)



Fig.34 : fonctionnement de ph mètre

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



Fig.35 : échantillons prélevés sur terrain avec l'étiquette

f. la sonde de prélèvement de piézomètre :



Fig.36 : préleveur à différentes profondeurs de l'ANRH (prélèvement d'eau souterraine à différents niveaux)

3.2.2. Mesure du niveau statique :

À l'aide d'une sonde multi paramètres, nous avons mesurés le niveau statique dans chaque piézomètre afin de connaître le niveau d'eau actuel de la nappe de la région de la Baie d'Alger.



Fig.37: Mesures du niveau statique au niveau des piézomètres au niveau de la Baie d'Alger 25/10/2021.

Tableau.03 : Résultats de la campagne piézométrique sur terrain de la Baie d'Alger
(octobre novembre 2021 :

NOM	Date	Profondeur du NS en mètre
PZ B	25/10/2021	26.9
PZ F	25/10/2021	22.5
PZ 58	26/10/2021	16
PZ 61	26/10/2021	20.1
PZ 36	28/10/2021	28.7
PZ 45	4/11/2021	28.15
PZ D	4/11/2021	27
PZ 51	4/11/2021	27
PZ 60	4/11/2021	23
PZ G	2/11/2021	19.5
PZ 48	8/11/2021	22
PZ 38	21/11/2021	19.5
PZ 2 HAMIZ	21/11/2021	40.65
PZ E	18/11/2021	29.4
PZ 41	18/11/2021	25.1
PZ 62	8/11/2021	23
PZ 42	11/11/2021	30.9

Tableau.04 : Résultats de mesure de conductivité et TDS (octobre 2021)

Points	Profondeur (m)	CE (mS/cm)	TDS
PZ 58 26/10/ 2021	16	2.7	1788
	21.2	2.81	1859
	0		
	23	3.00	1991
	24	3.24	2130
	25	4.00	2660
	26	8.8	5780
	27	10.9	7220
	30	11.8	7800
	40	17.4	11510
PZ61 26/10/ 2021		1.7	1129
	20.1		
	21	2.5	1649
	22	4.5	2990
	30	4.9	3240
	40	5	3290
	50	5	3290
	66	4	2630
PZ B 25/10/ 2021	28	3.09	2040
	40	2.89	1910
	60	2.89	1910
PZ F 25/10/2021	25	1.928	1274
	30	1.924	1271
	35	1.918	1271
	45	2.03	2300
PZ 36 28/10/ 2021	28.7	2.5	1700
	80	2.450	1620

Tableau.05 : Résultats de mesure de conductivité et TDS (novembre 2021) :

Points	Profondeur (m)	CE (mS/cm)	TDS
PZ D 04/11/ 2021	27	3.1	2050
	29.5	3.2	2250
	30	3.360	2490
	35	4.1	2710
	40	6.800	4600
	45	7.96	5250
	50	8.94	5300
PZ 48 08/11/ 2021	22	1.586	1000
	25.8 5	1.913	1261
	50	3.5	2400
	60	3.8	2500
PZ 51 04/11/ 2021	27	4.8	3160
	30	4.8	3160
PZ 62 08/11/ 2021	23	0.7	480
	25	1.16	736
	30	1.964	1296
	35	1.962	1295
	40	1.11	1266
	45	1.566	1231
	50	1.674	1105
	51	1.672	1204
PZ G 02/11/ 2021	19.5	2.6	1700
	30	2.6	1700
	40	2.6	1700

	50	2.6	1700
	60	2.6	1700
	61	2.6	1700
PZ 45 4/11/ 2021	28.1 5	4	/
	30	4.17	/
	40	4.17	/
	20	4.17	/
PZ 60 4/11/ 2021	33	2.58	/
	24	2.6	/
	25	4.45	/
	28	5.3	/
	30	5.6	/
	35	8	/
	45	11.270	/
PZ 38 21/11/ 2021	19.5	0.709	/
	30	0.907	/
PZ 2 HAMIZ 21/11/ 2021	40.6 5	1.949	/
	50	2.010	/
	60	2.010	/
	70	2.010	/
PZ E 18/11/ 2021	29.4	2.57	/
	40	2.57	/
PZ 41 18/11/ 2021	25.1	1.994	/
	30	2	/
	40	1.957	/
PZ 42	30.9	2.63	/

11/11/ 2021	40	2.6	/
	50	2.6	/
	55	2.6	/
	60	2.6	/
	70	2.6	/

3.2.3. Prélèvement des échantillons :

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



Fig.38 : Prélèvement d'échantillon (la baie d'Alger)



Fig.39 : Premier prélèvement au niveau d'un forage la baie d'Alger.



Fig.40 : Mesure de conductivité et TDS et pH sur terrain

Tableau.06 : Résultats de mesure sur le terrain (octobre, Novembre 2021)

Piézomètre	Date	Conductivité en $\mu\text{S}/\text{cm}$	T(c°)	pH
PZ 58	26/10/2021	5500	27°	6.7
PZ 61	26/10/2021	3900	24.7°	6.74
PZ G	02/11/2021	1800	26.3°	6.95
PZ 36	28/10/2021	1680	26.8°	6.70

3.3. Partie laboratoire :

Nous avons participé au laboratoire ANRH avec l'équipe pour travailler Analyses physiques et chimiques.

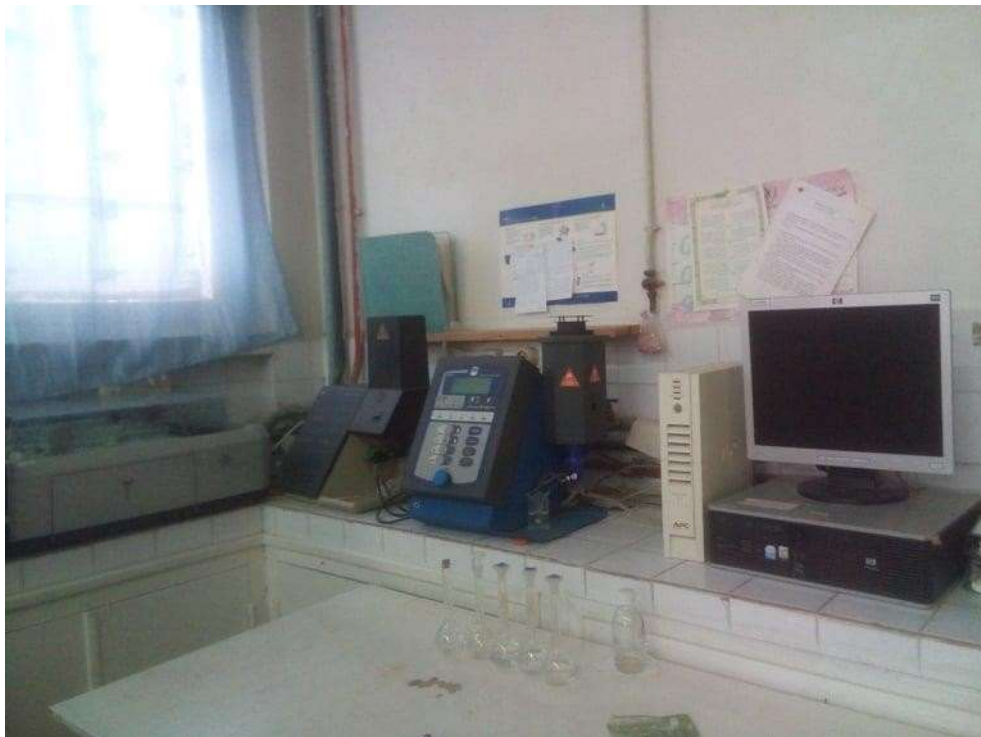
**Fig.41:** Laboratoire de l'ANRH [11].



Fig.42: Échantillons au laboratoire [11].

1.1.1. 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 (H_2O) 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 $\frac{1}{2}$ heure.

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

b) Dosage des sulfates :**o 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 turbidimétrique à la longueur d'onde de 495nm.

o 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 réglant le zéro avec le témoin.

c) DOSAGE DES NITRATES :**o 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.

o 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 $\frac{1}{4}$ 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. **[11]**

Tableau.07: Résultats des analyses physico chimique de l'année 2021 :

NOM	pH	Résidu sec à 100°	Conductivité (ms/cm)	Ca	Mg	Na	K	HCO ₃	Cl	SO ₄	NO ₃
PZ B: 40m	6.92	1171	2.45	220	26	320	2	363	446	301	110.39
PZ F: 30m	7.04	1246	1.60	156	26	165	2	360	159	273	117.1
PZ 58	8.48	2922	5.37	64	22	1030	30	143	1601	35	5.53
PZ 61	7.12	2485	3.70	210	43	630	20	381	823	540	77.93
PZ 36	6.41	850	1.70	281	7	20	2	6	533	6	3.58
PZ 60: 30m	6.99	3015	4.32	259	81	650	10	421	1021	417	161.7
PZ 60: 45m	6.89	3675	5.62	281	73	850	10	439	1407	467	165.25
PZ Z: 30m	6.95	1616	2.20	210	53	165	10	430	243	303	201.90
PZ D: 30m	6.89	1671	2.77	180	49	350	5	143	723	206	34.89
PZ D: 50m	6.78	2586	4.36	373	75	405	5	198	1198	268	74.65
PZ 45: 30m	6.96	2364	3.31	305	46	370	15	342	621	524	150.7
PZ 51: 30m	6.91	2701	3.99	325	56	455	15	375	852	535	106.8
PZ 48: 30m	7.08	1235	1.99	168	49	150	10	275	257	288	45.82
PZ 62: 30m	7.09	1212	1.42	148	24	165	10	390	155	292	22.67
PZ 42: 40m	7.04	1433	1.99	244	10	166	6	418	182	325	97.59
PZ E: 30m	7.10	1271	1.70	180	27	152	12	366	169	268	120.4
PZ 41: 30m	7.17	1244	1.42	160	49	127	3	398	138	369	4.61
PZ 2 HAMIZ: 42m	6.87	1200	1.66	176	44	108	2	403	155	246	84.97
PZ 38: 20m	7.73	420	0.58	28	19	74	8	160	91	46	5.75

3.4. Partie Logiciels :

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 :

ArcGIS PRO est un système complet qui permet de collecter, organiser, gérer, analyser, communiquer et diffuser des informations géographiques. En tant que principale plateforme de développement et d'utilisation des systèmes d'informations géographiques (SIG) au monde, ArcGIS PRO est utilisé par des personnes du monde entier pour mettre les connaissances géographiques au service du gouvernement, des entreprises, de la science, de l'éducation et des médias. ArcGIS PRO permet la publication des informations géographiques afin qu'elles puissent être accessibles et utilisables par quiconque. Le système est disponible partout au moyen de navigateurs Web, d'appareils mobiles tels que des smartphones et d'ordinateurs de bureau.

Le système ArcGIS PRO c'est comme une infrastructure rendant les cartes et les informations géographiques disponibles dans une division, dans toute l'entreprise, entre les plusieurs organisations et communautés d'utilisateurs et sur le web pour que tout le monde y accède. Par exemple, les travailleurs utilisant des dispositifs portables peuvent mettre à jour des mesures en temps réel sur le terrain tandis que des spécialistes analysent ces informations au même moment sur des ordinateurs de bureau, et les planificateurs font des études d'impact sur les résultats de cette analyse au moyen des applications Web. Enfin, les cartes et les données résultant du projet peuvent être publiées sur le Web afin que tout le monde puisse y accéder via les navigateurs Web et les applications sur les smartphones et les tablettes. Cela permet aux gens de non seulement voir les résultats du projet, mais également de combiner ces données à d'autres données disponibles pour créer des cartes supplémentaires qui permettent d'utiliser vos informations géographiques de nouvelles façons.

Le système ArcGIS Pro permet de :

Créer, partager et utiliser des cartes intelligentes :

Les cartes fournissent un moyen efficace d'organiser, de comprendre et de transmettre de grandes quantités d'informations d'une manière universellement entendue. ArcGIS vous permet de créer une grande variété de cartes, y compris des cartes Web accessibles dans des navigateurs et sur des appareils mobiles, des cartes imprimées en grand format, des cartes incluses dans des rapports et des présentations, des recueils de cartes, des atlas, des cartes incrustées dans des applications et ainsi de suite. Indépendamment de la façon dont elle est publiée, une

carte ArcGIS est une carte intelligente qui affiche, intègre et synthétise les couches riches d'informations géographiques et descriptives provenant de sources diverses.

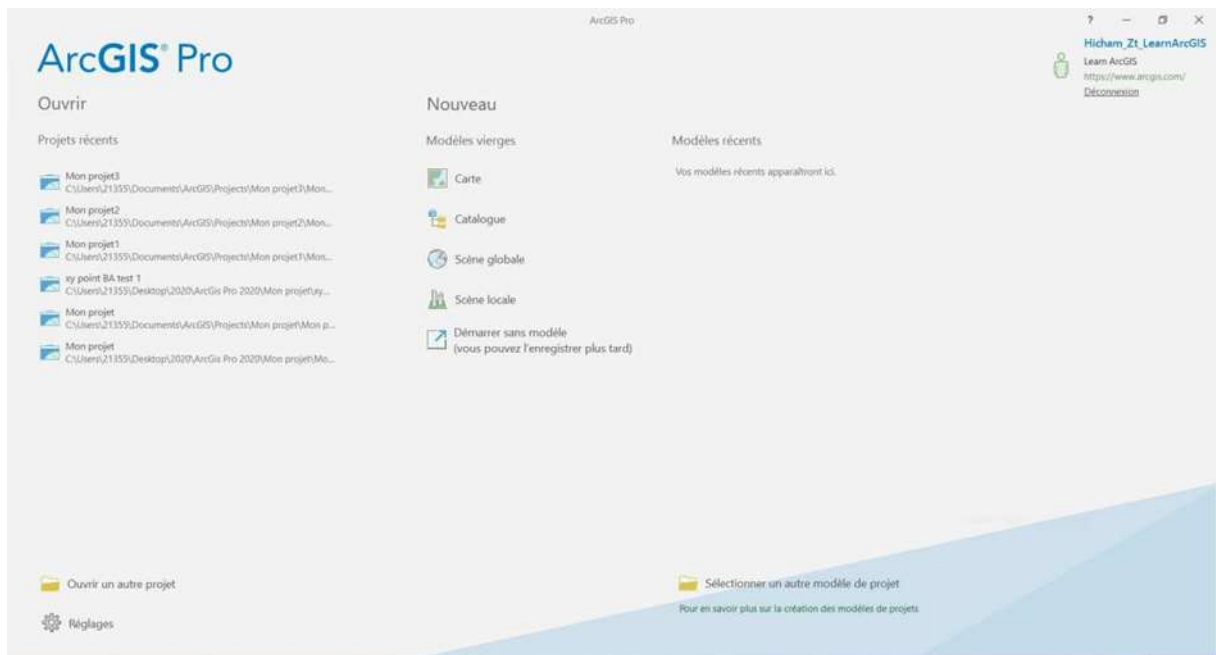


Fig.43: Interface de Logiciel ARCGIS PRO [11].

Créer et gérer des bases de données géographiques :

Les bases de données géographiques sont au cœur du travail SIG professionnel. Une base de données géographique permet de stocker les informations géographiques sous une forme structurée qui permet de gérer, d'actualiser, de réutiliser et de partager facilement.



Fig.44: Interface de commande de logiciel ARCGIS PRO [11].

Résoudre des problèmes avec l'analyse spatiale :

L'analyse spatiale est l'un des aspects les plus intéressants et remarquables du SIG. L'objectif de l'analyse spatiale est de tirer de nouvelles informations à partir de vos données afin de prendre de meilleures décisions. Bien que le fait de symboliser et d'afficher vos données sur une carte est en soi une forme d'analyse, les cartes invitent intrinsèquement à l'interprétation des modèles et des relations qu'elles représentent.

3.4.2. Logiciel SURFER 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.

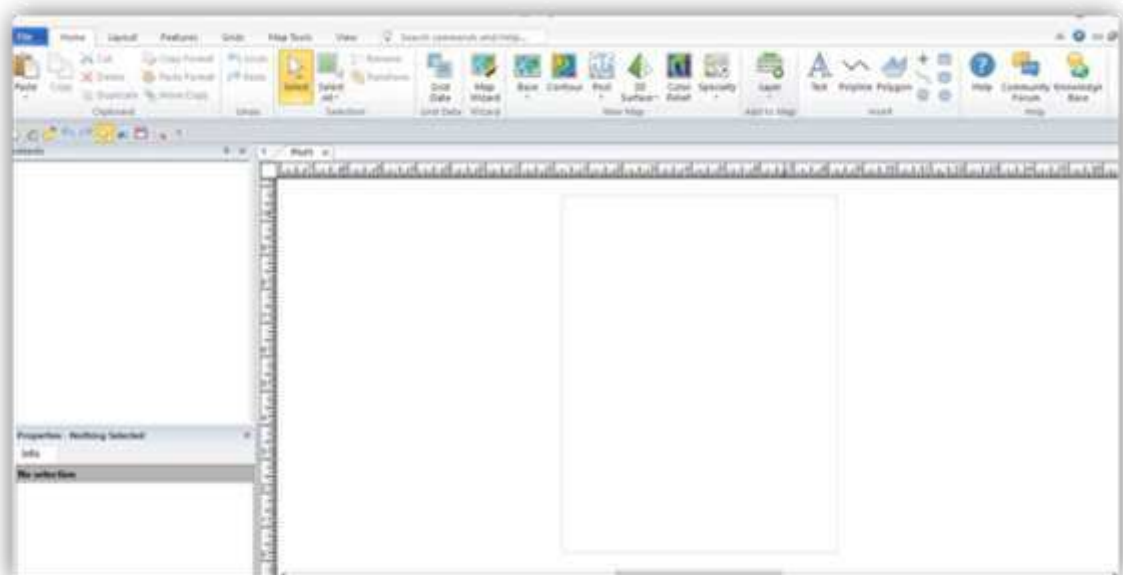


Fig.45: Interface de logiciel Surfer .

CHAPITRE 04

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

4.1. Introduction :

Dans ce chapitre nous avons discuté et analysé les résultats obtenues ,on a caractérisé la situation actuelle de l'intrusion marine au niveau de la baie d'Alger, pour cela nous avons adopté différentes approches, Ces approches consistent à examiner l'évolution spatio-temporelle du phénomène étudié (extension su biseau salée) par l'utilisation des outils hydrodynamiques, hydro-chimique, : l'approche hydrodynamique (évolution de la piézométrie), approche hydrochimique (faciès chimique, quelque couple), approche isotopique.

4.2. Evolution de la piézométrie :

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

a)Cartes piézométrique 2003 (Basse d'eau):

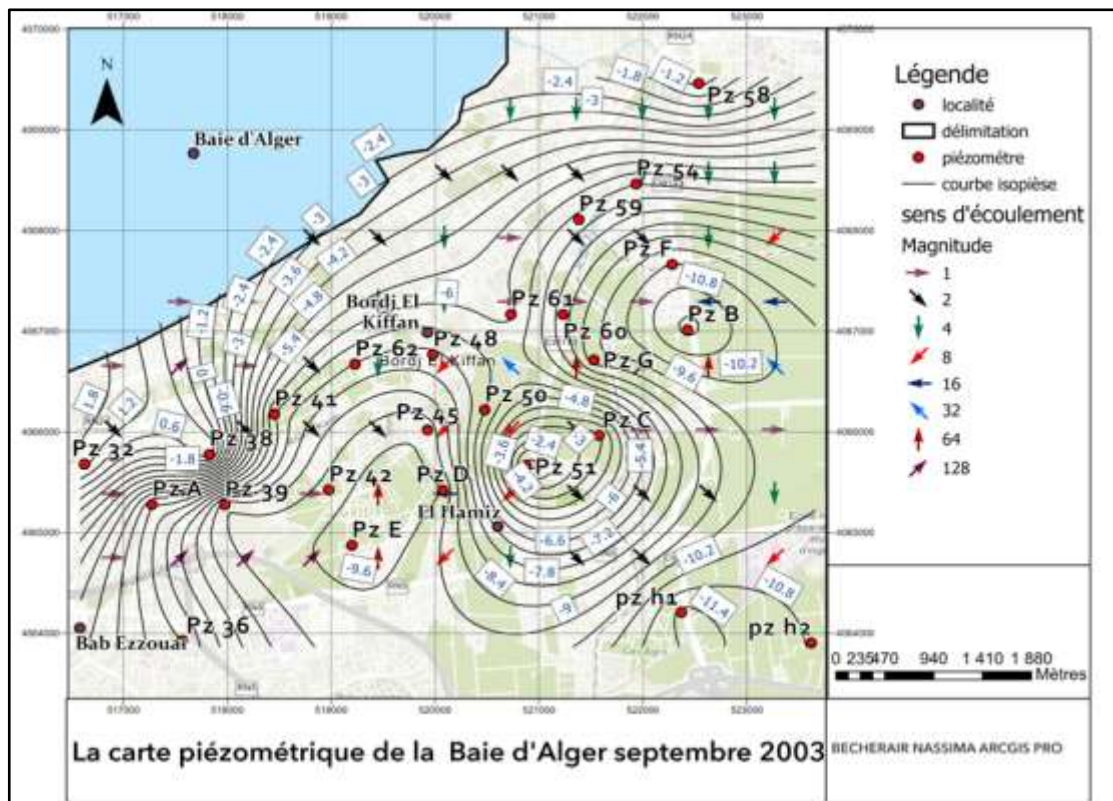


Fig.47: Carte piézométrique de la Baie d'Alger septembre 2003 réalisé à l'aide de logiciel ArcGIS PRO [11]

Interprétation :

La carte piézométrique de 2003 montre que le phénomène d'intrusion marine est déjà de plus en plus amorcé depuis 1985/90. Les niveaux de pression sont déjà mesurés à -10,2 m jusqu'à -11,4 m aux PZ Hamiz 1 et 2 près du champ de captage d'El Hamiz. Non loin de la côte, le front salé avance de plus en plus du nord au sud. Les principaux axes d'écoulement sont nord-ouest et sud-est et les niveaux piézométriques atteignent -11 m et confirment une surexploitation au niveau du champ captant d'Al Hamiz.[11]

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

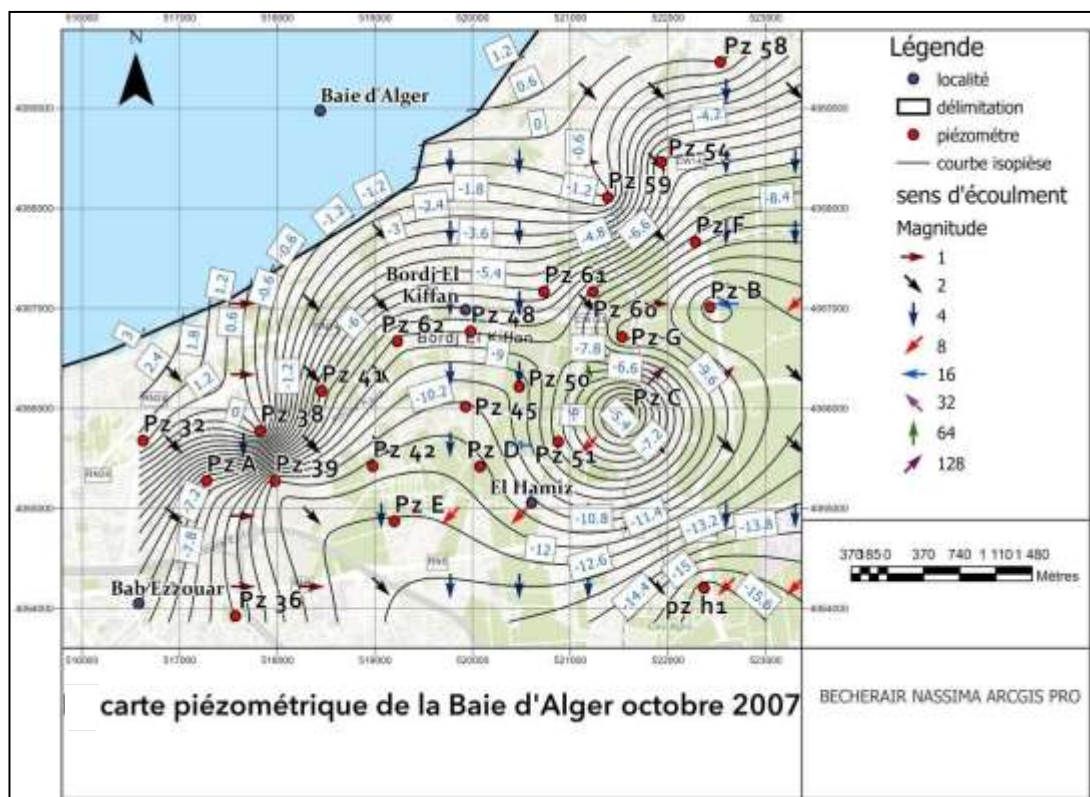


Fig.48 : Carte piézométrique de la Baie d'Alger septembre 2007 réalisé à l'aide de logiciel ArcGIS PRO [11]

Interprétation :

A noter qu'au cours de l'année 2007 (cartes des basses eaux), les niveaux piézométriques au niveau du champ d'El Hamiz montrent une évolution négative de -15,6 m sur la PZ 1 Hamiz qui était de -11,4 m en 2003 (**Fig. 48**).

Les faits suivants seront pris en note après examen de cette carte :

→Écoulement de la mer vers la plaine dû au fait que les hauteurs piézométriques sont inférieures au niveau bas de la mer s'écoulant de la mer

vers l'intérieur de la baie d'Alger. Pratiquement, l'eau salée a envahi toute la zone d'étude.

→ 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.[11]

c) Carte piézométrique 2010 (haut d'eau) :

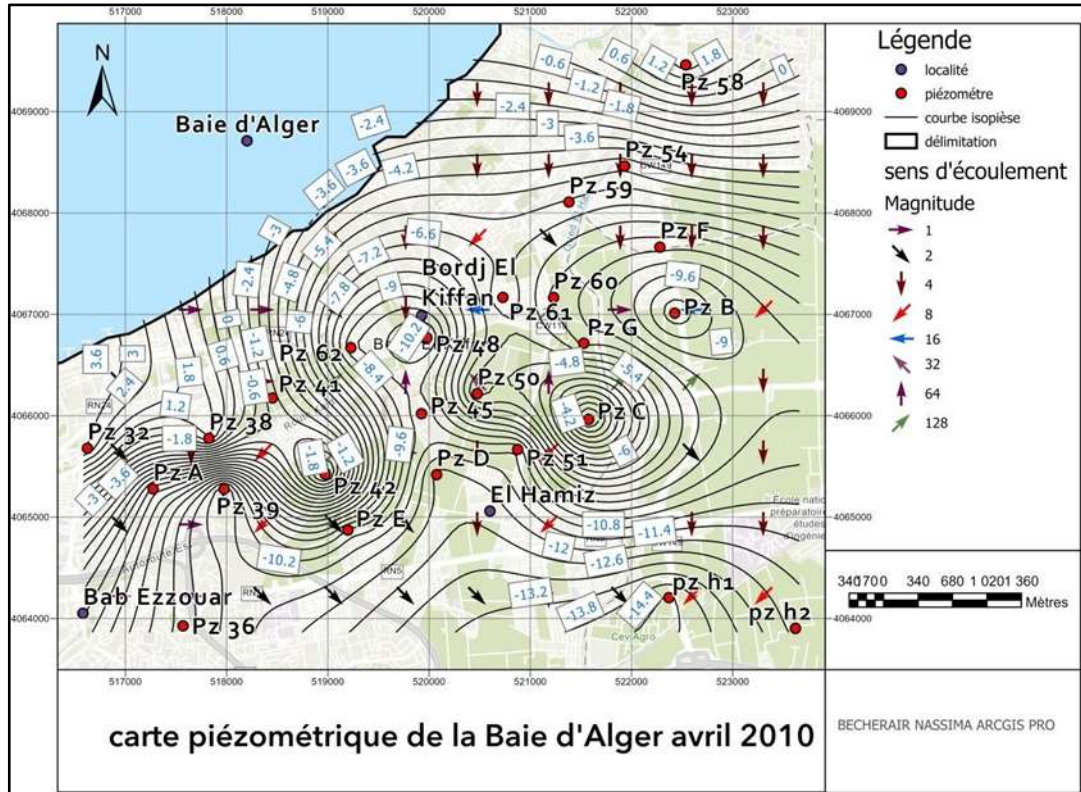


Fig.49: Carte piézométrique de la Baie d'Alger avril 2010 réalisé à l'aide de logiciel ArcGIS PRO [11]

Interprétation :

La carte piézométrique de 2010 montre une diminution du niveau statique au niveau du champ de captage de Baraki à l'ouest et dans le champ de captage du Hamiz, Dar El Bayda, Boureih et Rouiba, favorisant le phénomène d'intrusion marine.[11]

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

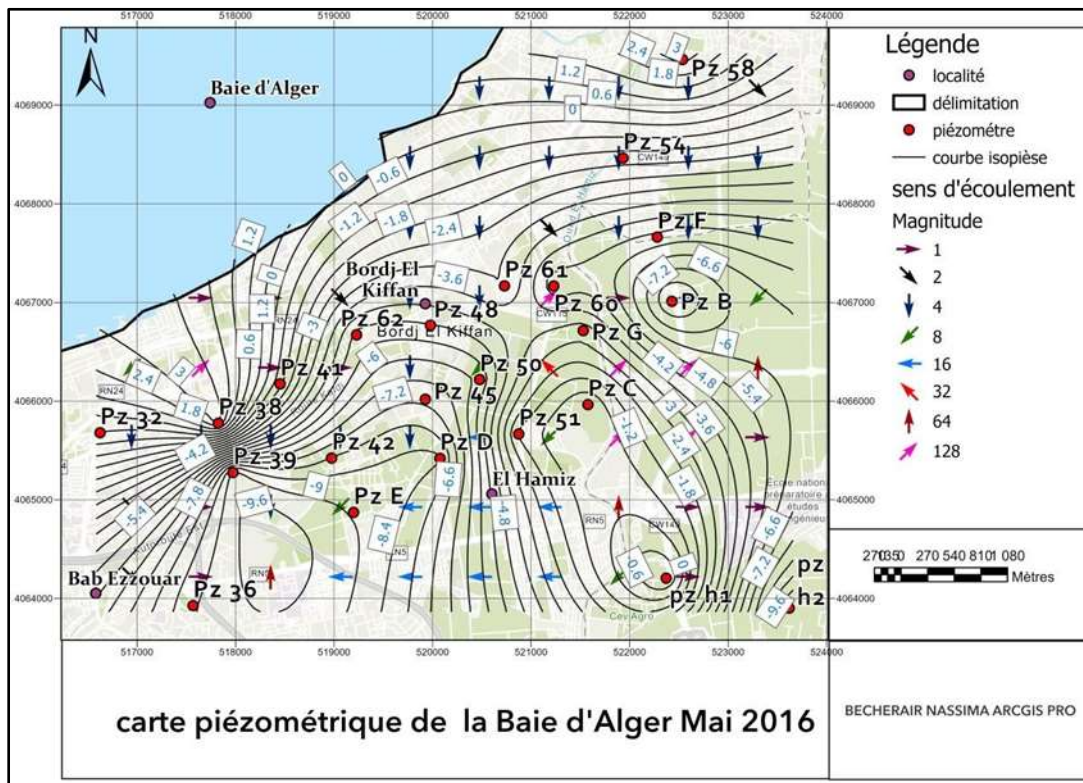


Fig.50 : Carte piézométrique de la Baie d'Alger mai 2016 réalisé à l'aide de logiciel ArcGIS PRO [11]

Interprétation :

on 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** (**Fig.50**), cette remontée de niveau statique de la nappe peut s'expliquer 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 été arrêtés par la SEAAL afin de peut ralentir l'intrusion venant du nord.[11]

e) Carte piézométrique 2018 (Haut d'eau) :

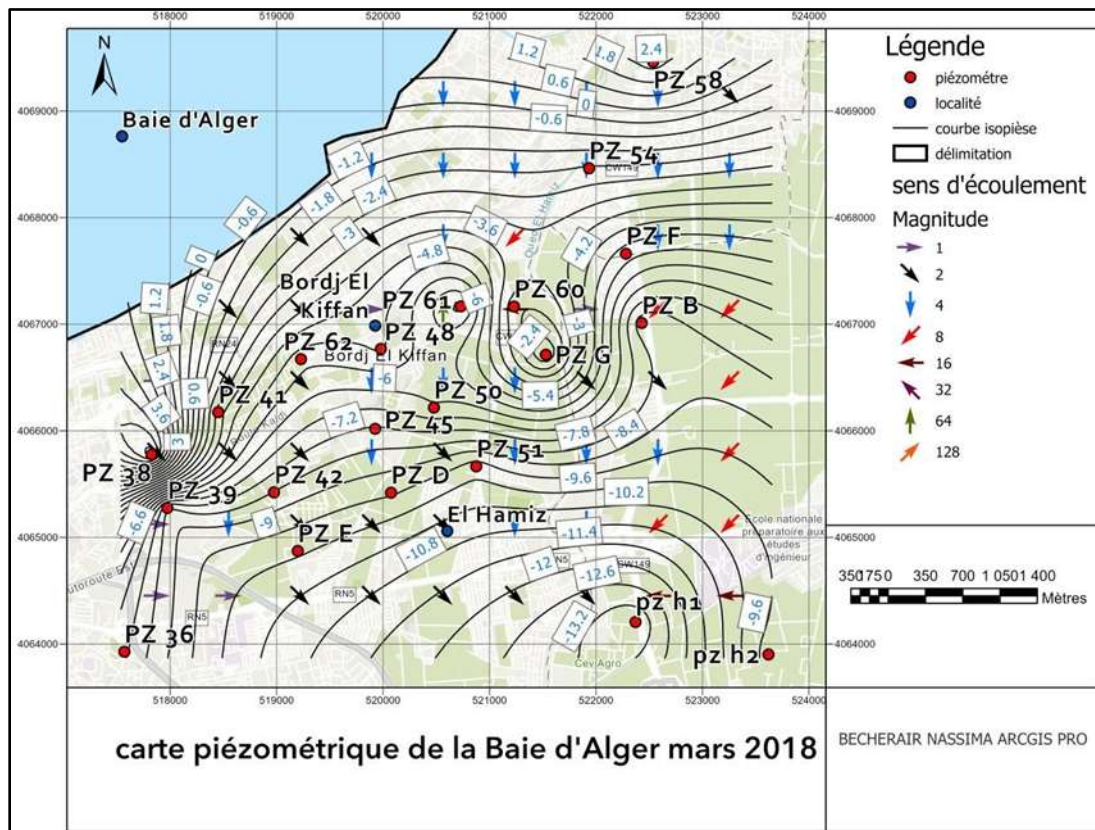


Fig.51 : Carte piézométrique de la Baie d'Alger mars 2018 réalisé à l'aide de logiciel ArcGIS PRO [11]

Interprétation :

L'analyse de la carte piézométrique de 2010 (**Fig.51**) 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. [11]

f) Carte piézométrique 2020 (Basse d'eau) :

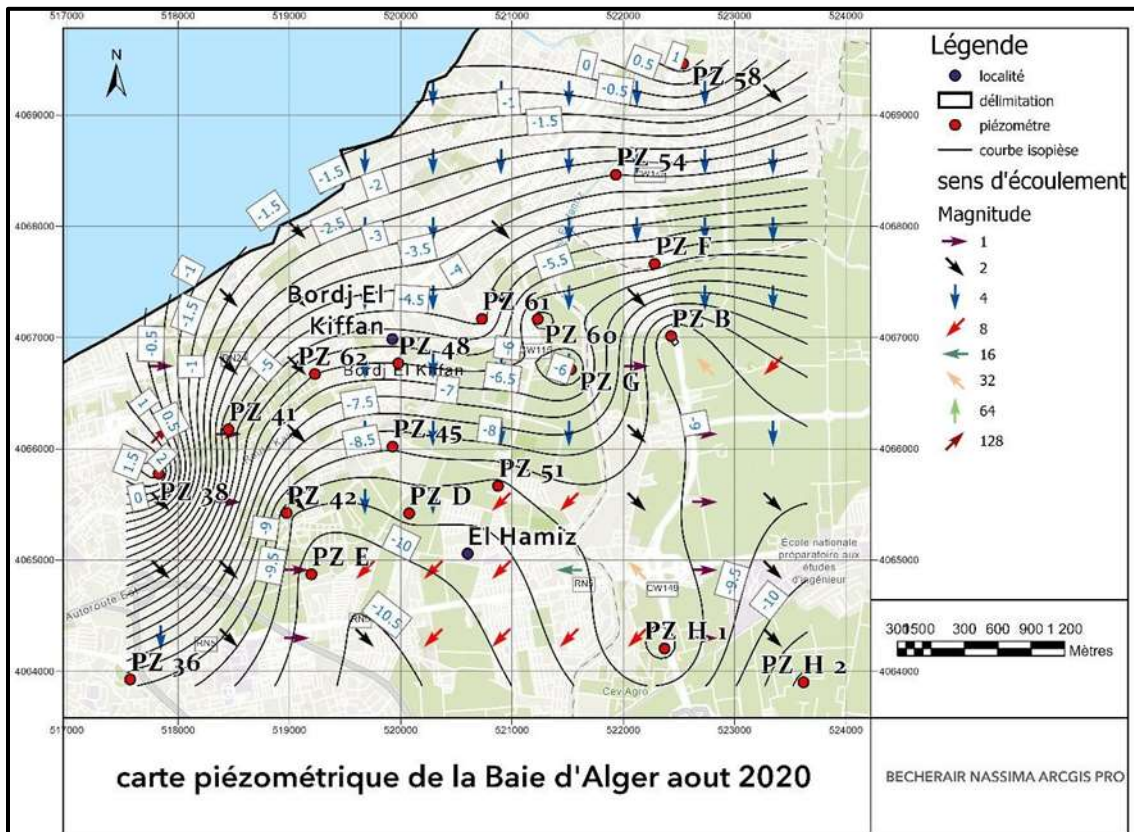


Fig.52 : Carte piézométrique de la Baie d'Alger Aout 2020 réalisé à l'aide de logiciel ArcGIS PRO [11]

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 (**Fig.52**).

Près de littoral, le front salé progresse de plus en plus du nord vers le sud. En effet, les cotes piézométriques sont variées de **-1 m** jusqu'à **-1.5 m** par rapport niveau de la mer **NGM** [3]

g) Carte piézométrique 2021 (Basse d'eau) :

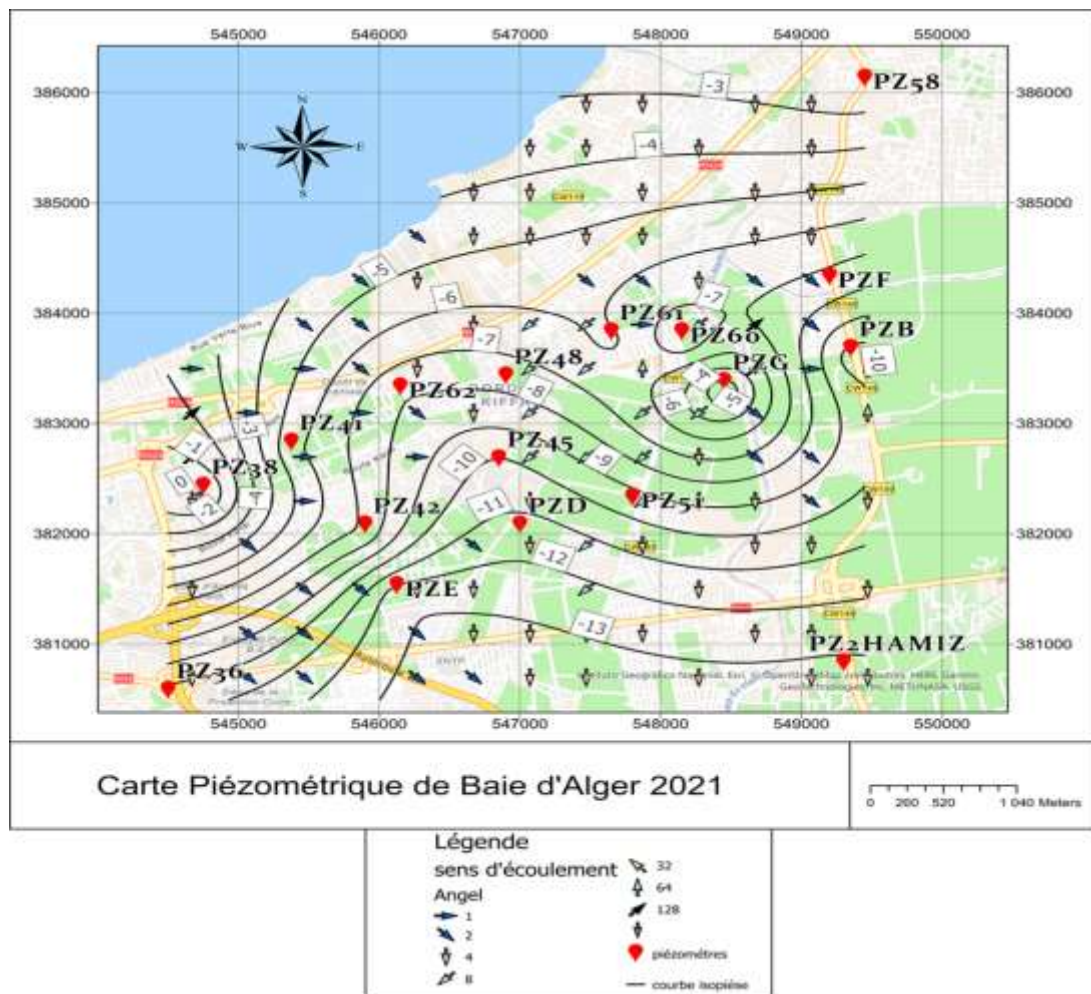


Fig.53 : Carte piézométrique de la Baie d'Alger novembre 2021 réalisé à l'aide de logiciel ArcGIS PRO [Guebla Lydia]

Interprétation :

La mise à jour de la carte piézométrique 2021 (**fig.53**) montre que le niveau statique au niveau de la cote est entre (-3m à -5m).par rapport à l'année 2020 le niveau statique était entre (1m et -1.5m) (**fig.52**).qui permet de confirmer l'augmentation du phénomène de l'intrusion marine.

Au niveau de pz el hamiz2 on remarque une diminution du niveau statique jusqu'à -13m (**fig.53**) c'est par rapport à sa situation géographique, qui est situé près du champ de captage EL HAMIZ.cette diminution du niveau statique confirme une surexploitation au niveau du champ captant d'el hamiz.

Cette carte montre :

→Écoulement de la mer vers la plaine dû au fait que les hauteurs piézométriques sont inférieures au niveau bas de la mer s'écoulant de la mer vers l'intérieur de la baie d'Alger. Pratiquement, l'eau salée a envahi toute la zone d'étude.

→ 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.

L'analyse de ces cartes, confirme clairement que le front salé progresse dans une direction préférentielle et rejoint la trajectoire allant directement vers le champ de captage du Hamiz .

Cette carte indique que L'abaissement du niveau continuera à évoluer, ainsi que l'avancé de cette intrusion marine, tant que le pompage des eaux souterraines reste tel qu'il est actuellement.

Le champ captant du Hamiz est le moteur principal de cette intrusion marine mis en évidence par les deux approches : piézométrique et hydrochimique.

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

4.3.1. L'apports de profil de conductivité :

Suite à la réalisation des profils de conductivité au niveau des piézomètres nous avons constaté qu'il y a une évolution significative de conductivité de la surface jusqu'au fond .De l'ordre d'une centaine à des milliers $\mu\text{S}/\text{Cm}$. de ce fait et pour une approche pragmatique pour la délimitation de l'interface « eau douce, eau salée » La généralisation des profils de conductivité au niveau de tous les piézomètres s'avère indispensable.

4.3.2. L'historique de profil de conductivité et interprétation qualitative :

a) Profil du PZ 58 :

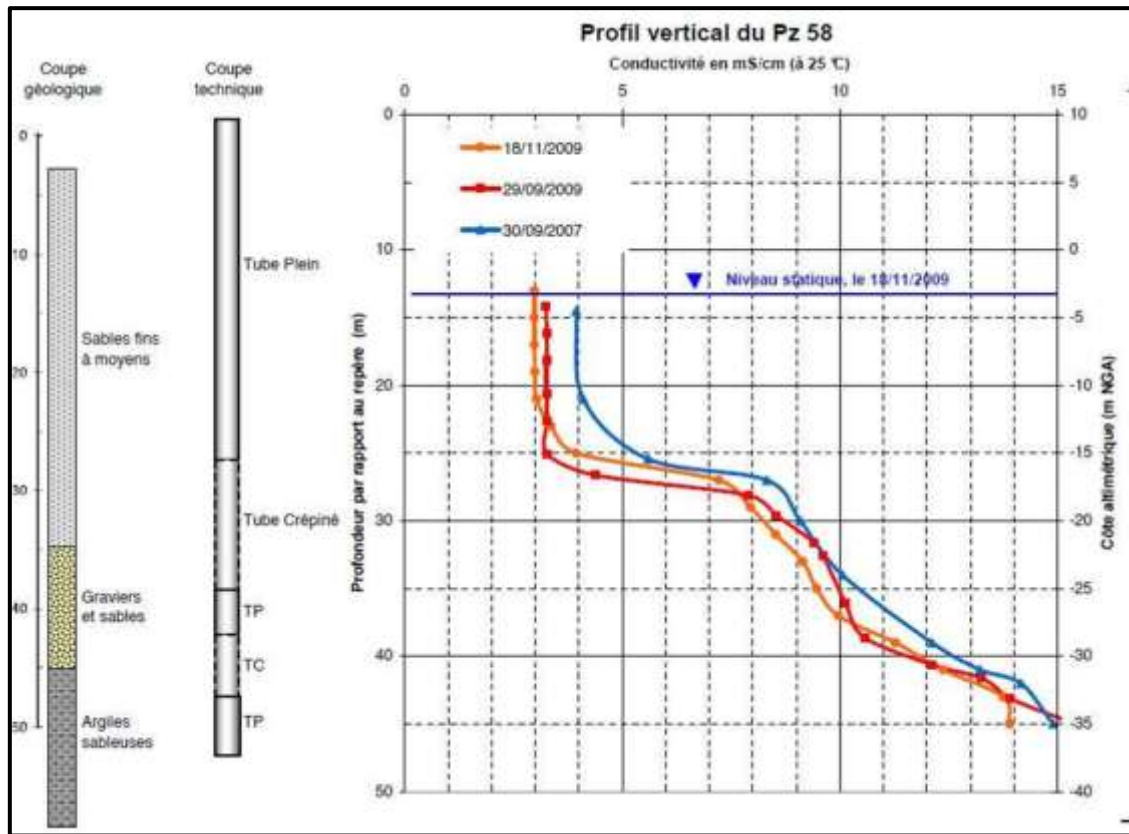


Fig.54 : Profil vertical de conductivité du PZ 58 [11]

Interprétation :

Pour **2007** la conductivité était de **4000 $\mu\text{S}/\text{cm}$** de **14 m (NS)** à **21 m** par contre en **2009** pour novembre et septembre on a une valeur inférieure par rapport à **2007** qui est de **3000 $\mu\text{S}/\text{cm}$** de **14 m** à **25 m**. Cette diminution est due aux fortes précipitations de cette année permettant la dilution des sels dans les eaux douces souterraines (**Fig.54**).

Les valeurs de conductivité continuent de progresser jusqu'à **45 μm** , atteignant **15 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$** pour les trois formes. Cette valeur de conductivité est identique à la valeur de conductivité de l'eau de mer, et donc ce piézomètre c'est confirmé qu'il est envahi complètement par l'intrusion marine. [11]

b) profil du PZ 60 :

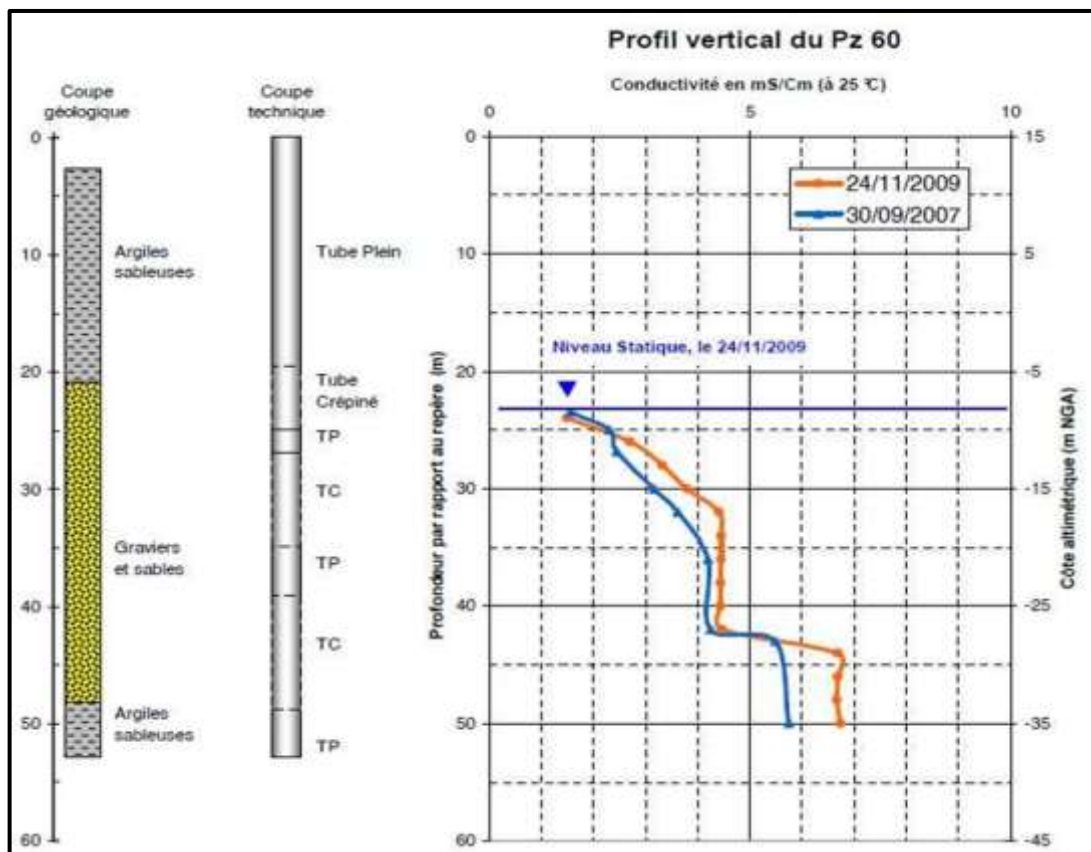


Fig.55: profil vertical de conductivité du PZ 60 [11]

Interprétation :

Les deux profils sont parallèles avec différentes conductivités « le profil de l'année **2007** et **2009** », les deux commencent avec une valeur de **1500 µS/Cm** à **26 m**. et elles continuent d'augmenter jusqu'à ce qu'elles atteignent **4200 µS/Cm** à **32 m** jusqu'à **42 m** pour les deux années. On remarque à partir de **43 m** une augmentation des conductivités par rapport à l'année **2007** de **4200 µS/Cm** jusqu'à **5900 µS/Cm**, et en **2009** jusqu'à **6900 µS/Cm**.

Cette augmentation des valeurs de conductivités présente la contamination de ce piézomètre. [11]

c) profil du PZ B :

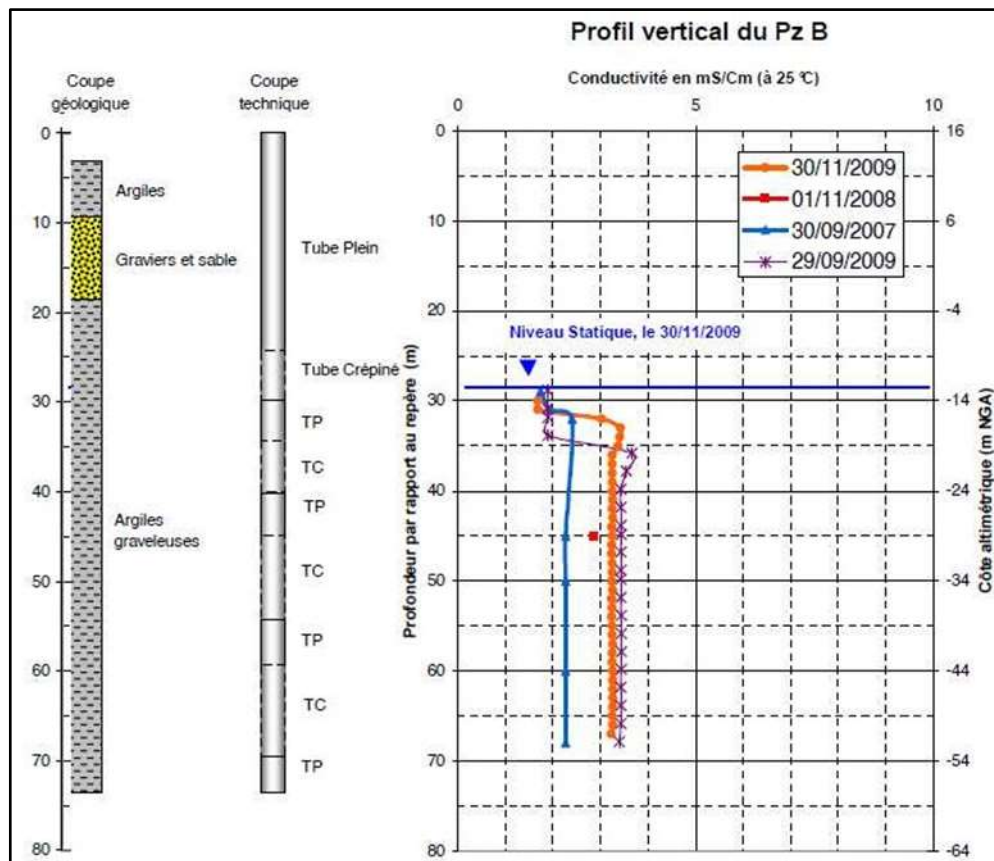


Fig.56: profil vertical de conductivité de PZ B [11]

Interprétation :

Au niveau de ce piézomètre situé à environ **1 km** du champ captant EL HAMIZ ,on distingue quatre profils de conductivité à différentes années ,un profil de **2007** et **2008** , et deux profils en **2009**.

Les quatre profils ont une conductivité de **1900 $\mu\text{S}/\text{Cm}$** à partir du niveau statique qui est à **29 m** et qui est situé au niveau de la cote .donnant une valeur constante de **2200 $\mu\text{S}/\text{Cm}$** en **2007** jusqu'à le top du profil. **3500 $\mu\text{S}/\text{Cm}$** en **2009** et une valeur moyenne de **2900 $\mu\text{S}/\text{Cm}$** en **2008**. Il est très claire que par rapport aux profils précédents , les valeurs de conductivités n'ont pas diminué en **2009** malgré les fortes précipitations de cette année, cela peut s'expliquer par la formation géologique dans le quel le piézomètre a été implanté , qui est une formation argileuse semi perméable , une faible proportion de gravier et de sable et une grande proportion d'argile graveleuse semi perméable de **15 m** de long à **70 m** (bas partie de piézomètre)

Tant que ce piézomètre est situé près du champ captant el hamiz ,la contamination de ce piézomètre est toujours lié par rapport à la surexploitation de la nappe au niveau de le champ captant el hamiz . [11]

4.3.3. Profils de conductivité de l'année 2020 :

a) profil du PZ 58 :

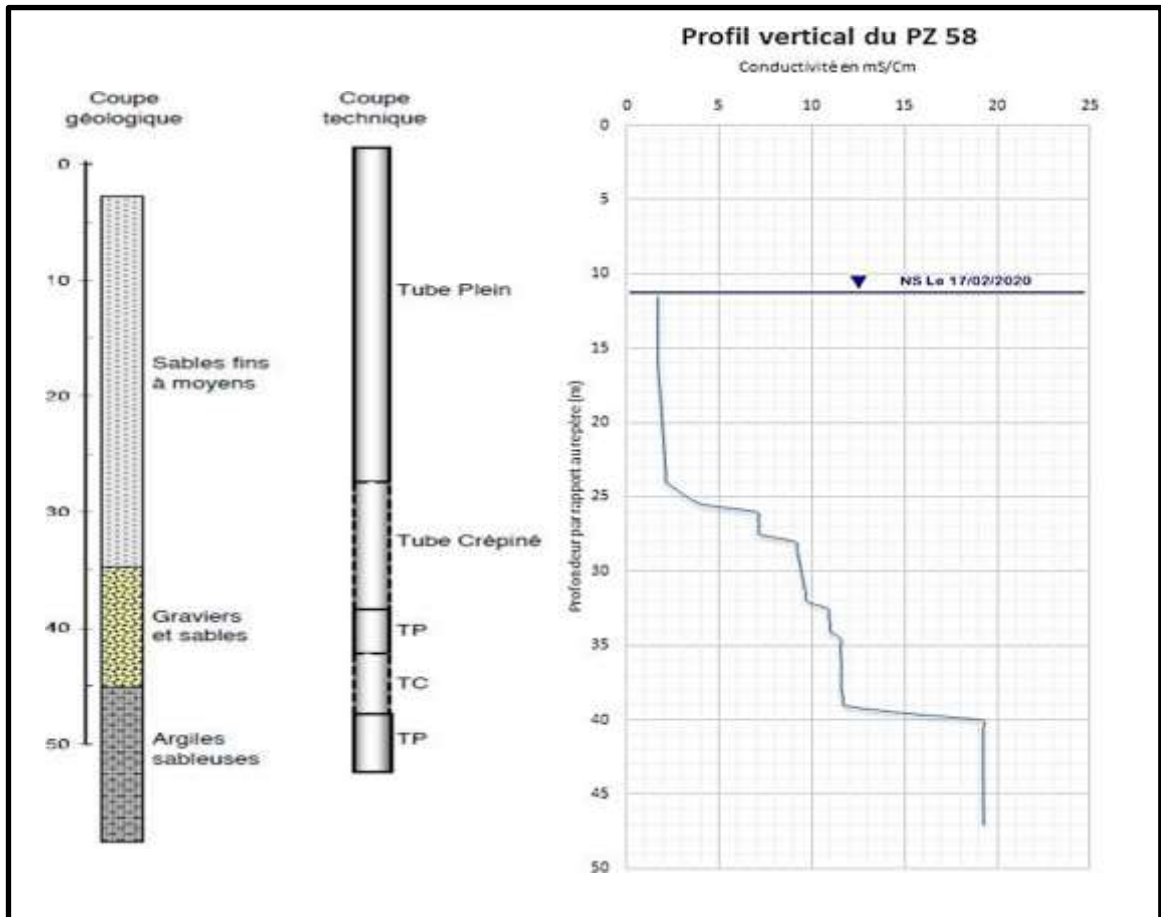


Fig.57: profil vertical de conductivité de PZ 58 [11]

Interprétation :

Dans ce profil on a 3 phases, la 1^{ère} partie commence de 11.75 m jusqu'à 25 m la conductivité diminue par rapport à 2009 qui été de 3660 uS/cm.

Et cette baisse est probablement due à la sédimentation qui permet la dilution des sels en eau douce (hautes eaux) (fig.57).

La 2^{ème} partie : de 26 m à 39.5 m, le front salé est évident dans cette partie la conductivité jusqu'à 11800 uS/cm .

La 3^{ème} partie :de 40m jusqu'à le fond de piézomètre la conductivité augmente brusquement de 11800 uS/cm à 19300 uS/cm . et cette valeur est similaire à celle

de l'eau de mer .ce piézomètre est complètement contaminé par l'intrusion marine depuis **2007** qui été de **15000 uS/cm** [11].

b) profil du PZ 60 :

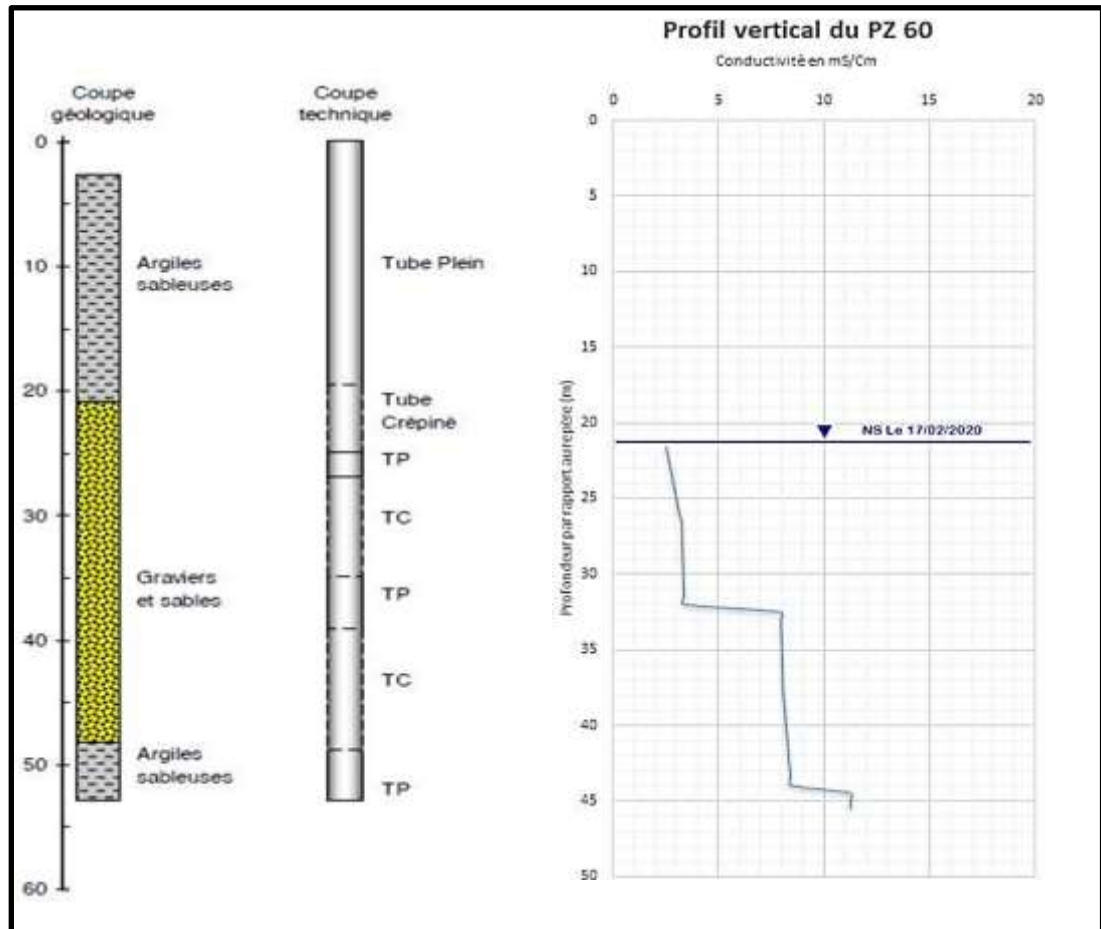


Fig.58 : profil vertical de conductivité PZ 60 [11]

Interprétation :

Au niveau de ce piézomètre on voit clairement que la conductivité double à **32 m** de **3350 uS/cm** à **8000 uS/cm** et en croissance constante de plus en plus jusqu'au fond. Par rapport aux années précédentes, la conductivité augmente positivement, ce qui confirme l'évolution de l'intrusion marine.(fig.58) [11]

c) profil du PZ B :

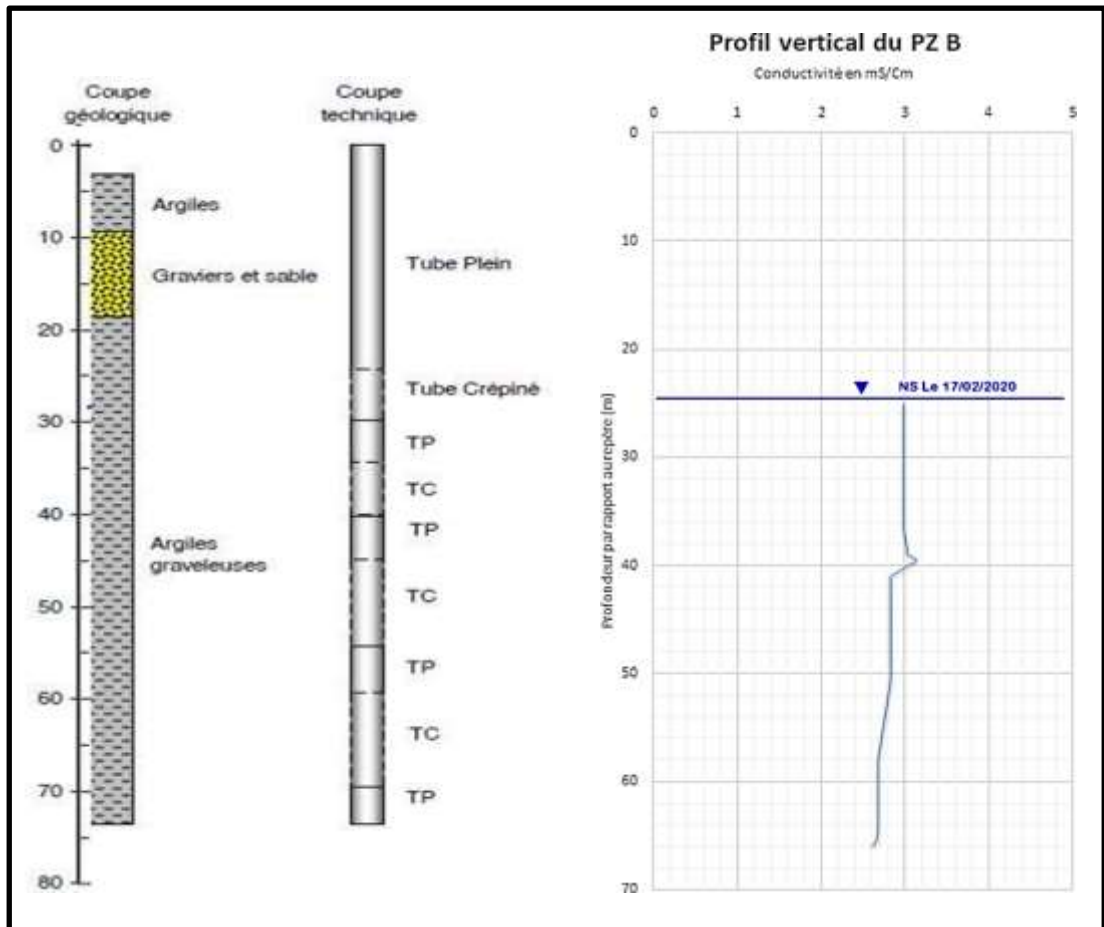


Fig.59: profil vertical de conductivité de PZ B [11]

Interprétation :

Au niveau de ce piézomètre on remarque que la conductivité est stable dans la valeur **3000 uS/cm** à la surface jusqu'à **38 m** de profondeur, à partir de **40 m** on voit clairement fluctue en valeur jusqu'à ce qu'elle diminue progressivement jusqu'à une valeur de **2600 uS/cm**, et elle stabilise à cette valeur jusqu'au profond.[11]

d) profil du PZ D :

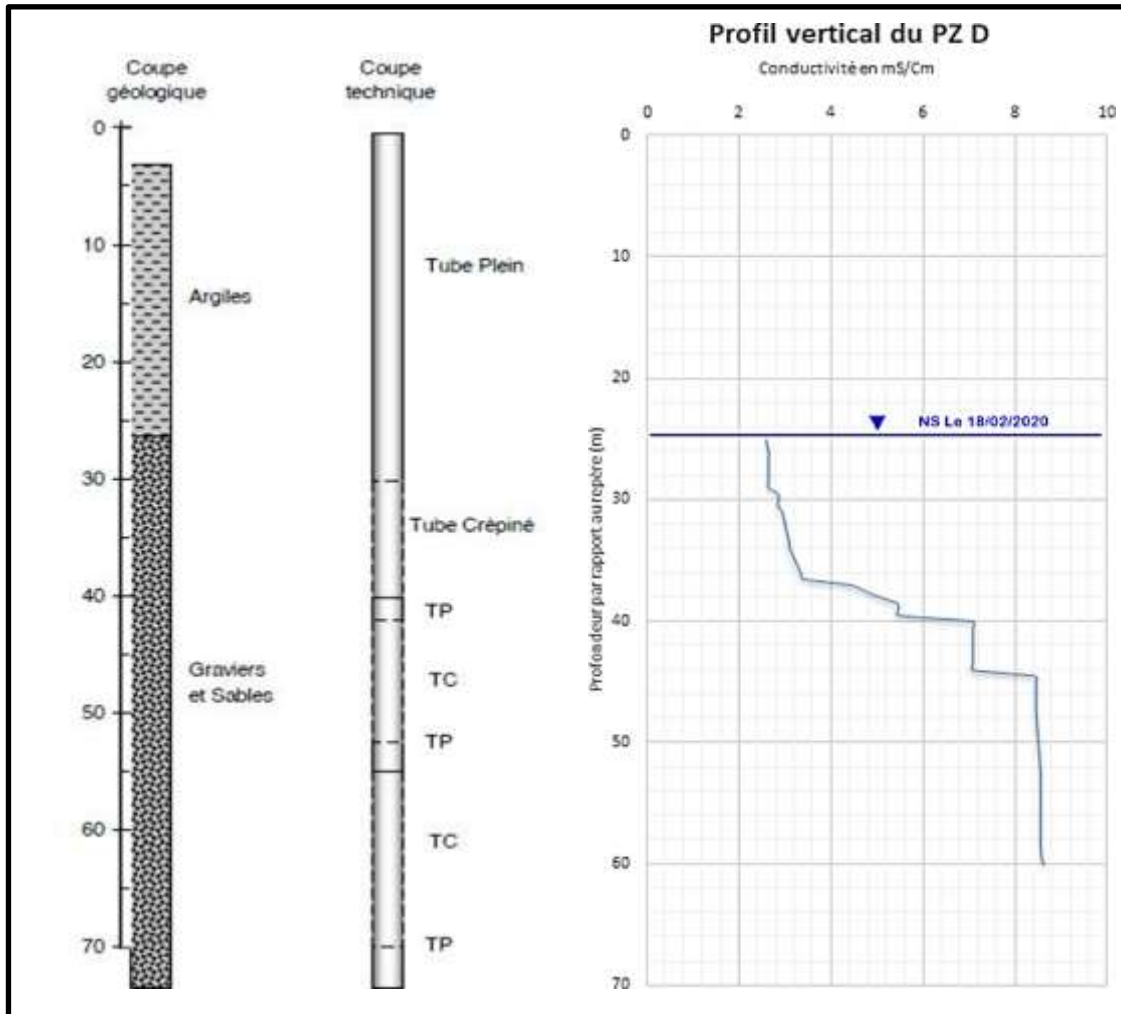


Fig.60: profil vertical de conductivité de PZ D [11]

Interprétation :

Ce piézomètre présente une augmentation progressive dans la valeur de conductivité qui été à la surface d'une valeur de **2500 uS/cm**, puis elle a commencé à augmenter progressivement de **25 m** jusqu'à **44 m** de profondeur pour qu'elle atteigne **7000 uS/cm**, cette valeur continue à augmenter pour atteindre sa valeur maximal de **8400 uS/cm** jusqu'au fond.

Cette augmentation progressive confirme la contamination de ce piézomètre.

4.3.4. Profils de conductivité de l'année 2021 :

a) profil du PZ 58 :

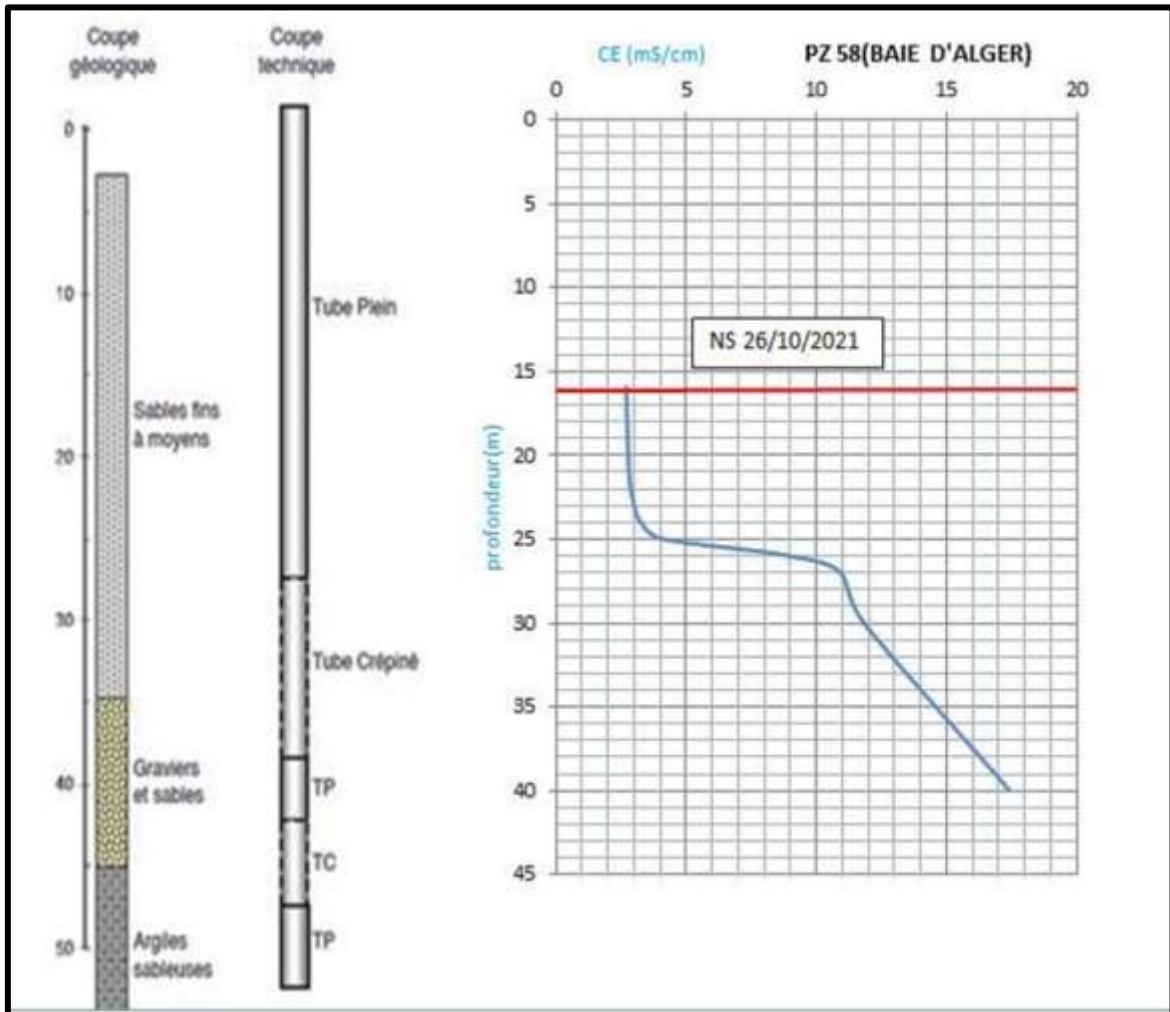


Fig.61 : profil vertical de conductivité de PZ 58.

Interprétation :

Noter à ce profil de conductivité, il ya 2 phases :

- La 1^{ère} phase : **16 m** jusqu'à **25 m** la conductivité augmente par rapport à l'année passée (**2020**) qui était **1098 uS/cm** qui montre que l'intrusion de l'eau salée est en état avancé.
- La deuxième phase : **26 m** jusqu'au fond de piézomètre, la conductivité augmente brusquement **17400 uS/cm** qui confirme l'évolution de l'intrusion marine.

b) profile du PZ D :

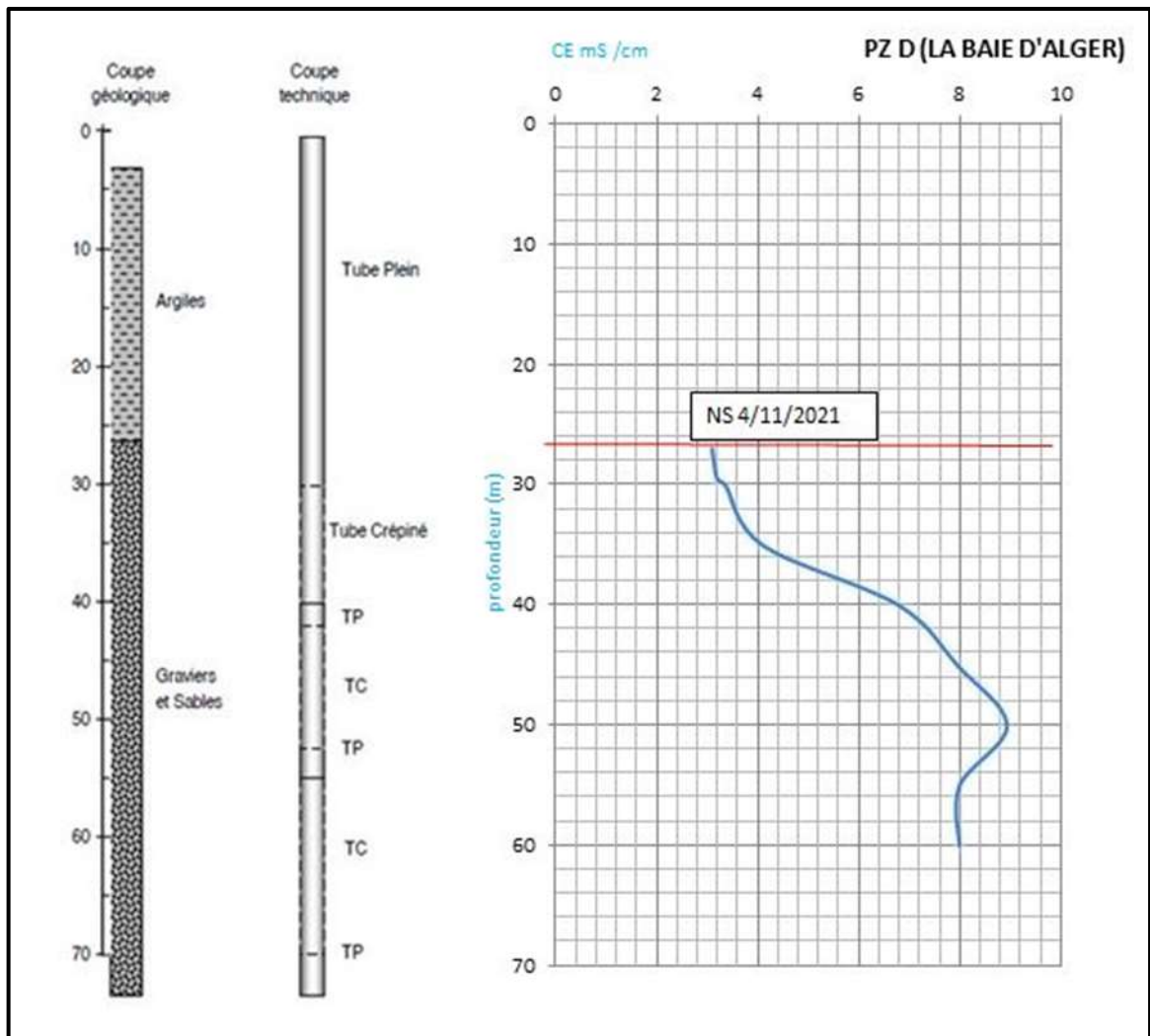


Fig.62: profil vertical de conductivité de PZ D

Interprétation :

On remarque dans ce piézomètre que la valeur de conductivité au niveau de la surface est de **3100 uS/cm**, et puis cette conductivité commence d'augmenter progressivement par rapport à la profondeur, jusqu'à elle atteigne une valeur maximale de **8000 uS/cm**. (fig62)

Alors de cette analyse, nous concluons que ce piézomètre est contaminé par l'intrusion marine.

c) profil du PZ B :

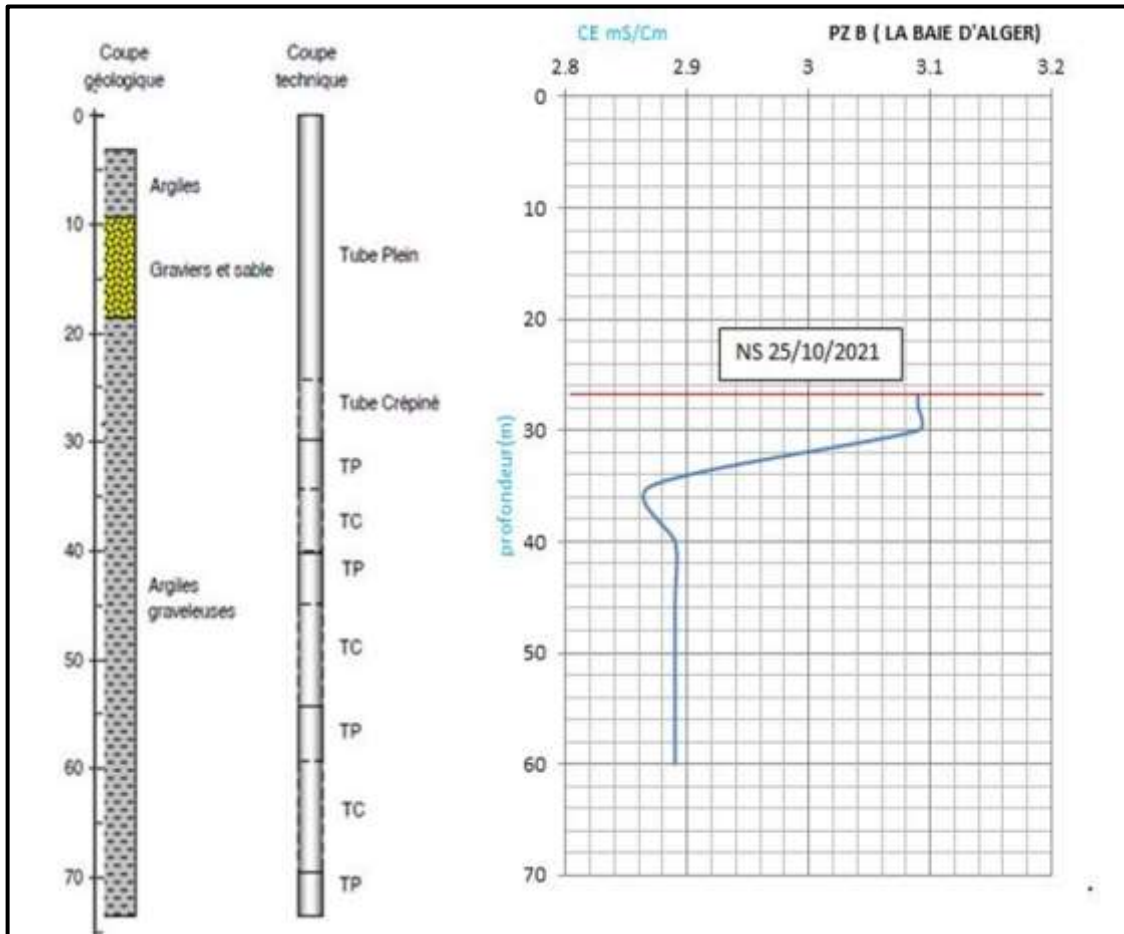


Fig.63: profil vertical de conductivité de PZ B

Interprétation :

Au niveau de ce piézomètre situé à environ **1 km** au nord du champ captant EL HAMIZ ,on distingue que la valeur de conductivité est de **3090 uS/cm** au niveau de la surface ,puis on voit clairement la diminution de conductivité en fonction de la profondeur jusqu'elle atteigne à la valeur de **2870 uS/cm** à partir de **35 m** de profondeur , et elle stabilise à la valeur de **2890 uS/cm** jusqu'au profond.(fig.63).

comme nous l'avons dit auparavant tant que ce piézomètre est situé près du champ captant el hamiz ,la contamination de ce piézomètre est toujours lié par rapport à la surexploitation de la nappe au niveau de le champ captant el hamiz .alors dans l'ensemble ,ce piézomètre est contaminé par les eaux de mer.

Le diagnostic de ce piézomètre, nous permet de confirmer que l'intrusion marine est liée principalement à la surexploitation locale de la nappe ayant entraîné une augmentation de la salinité, notamment en direction du champ captant du

Hamiz.L'abaissement du niveau continuera à évoluer, ainsi que l'avancé de cette intrusion marine, tant que le pompage des eaux souterraines reste tel qu'il est actuellement

d) profil du PZ F :

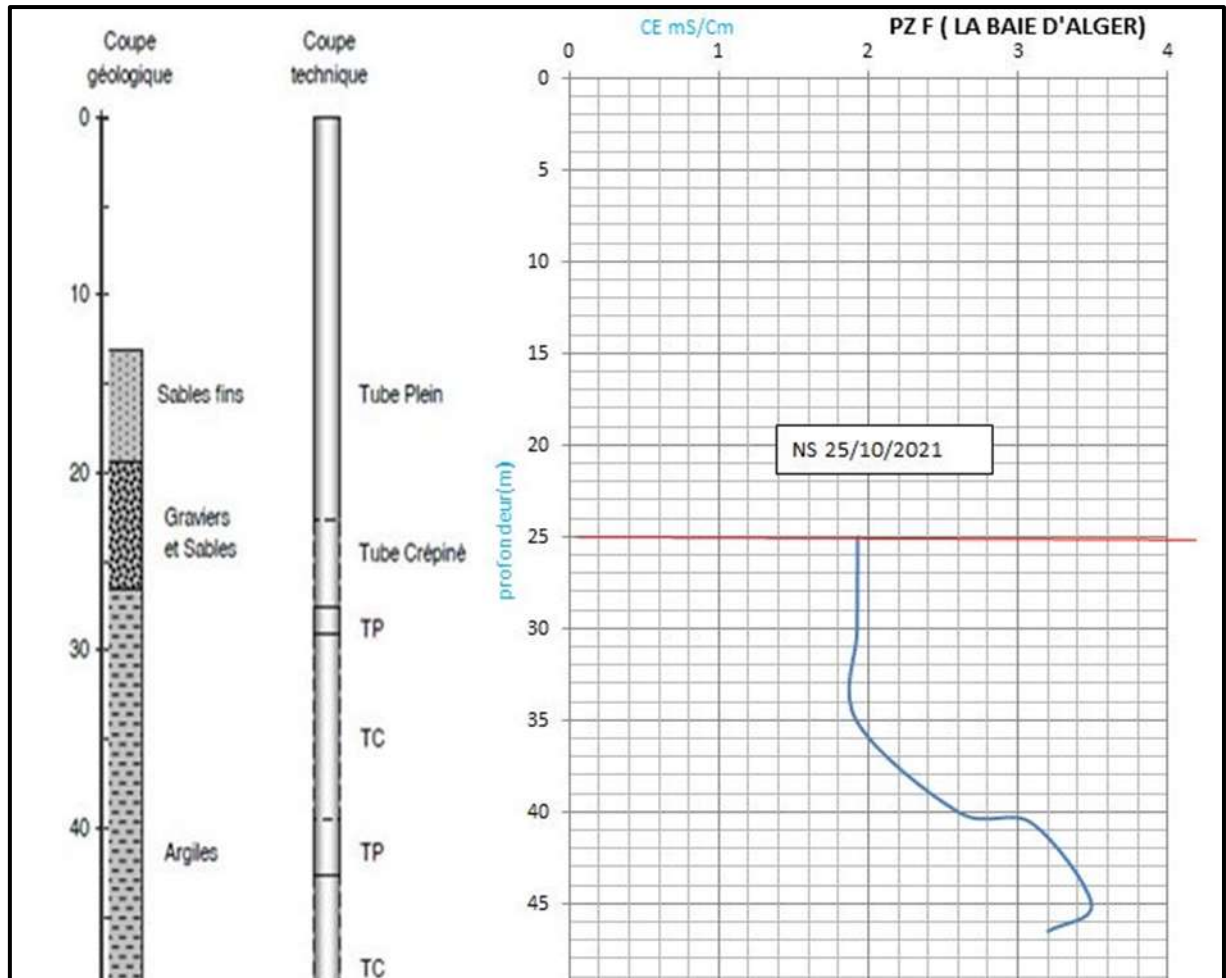


Fig.64: profil vertical de conductivité de PZ F

Interprétation :

La formation géologique dans laquelle se trouve ce piézomètre lui permet de capter une seule formation perméable. Suite à ça on remarque que la conductivité à profondeur de **25m** est de **1928 uS/cm**, et à partir de **40 m** on voit clairement une augmentation progressive de conductivité et on signale la valeur maximale **3490 uS/cm**.(fig.64).

Ce profil n'a pas enregistré une grande différence par rapport à l'année passée (2020).

Cette augmentation des valeurs de conductivités présente la contamination de ce piézomètre.

e) profil du PZ 48 :

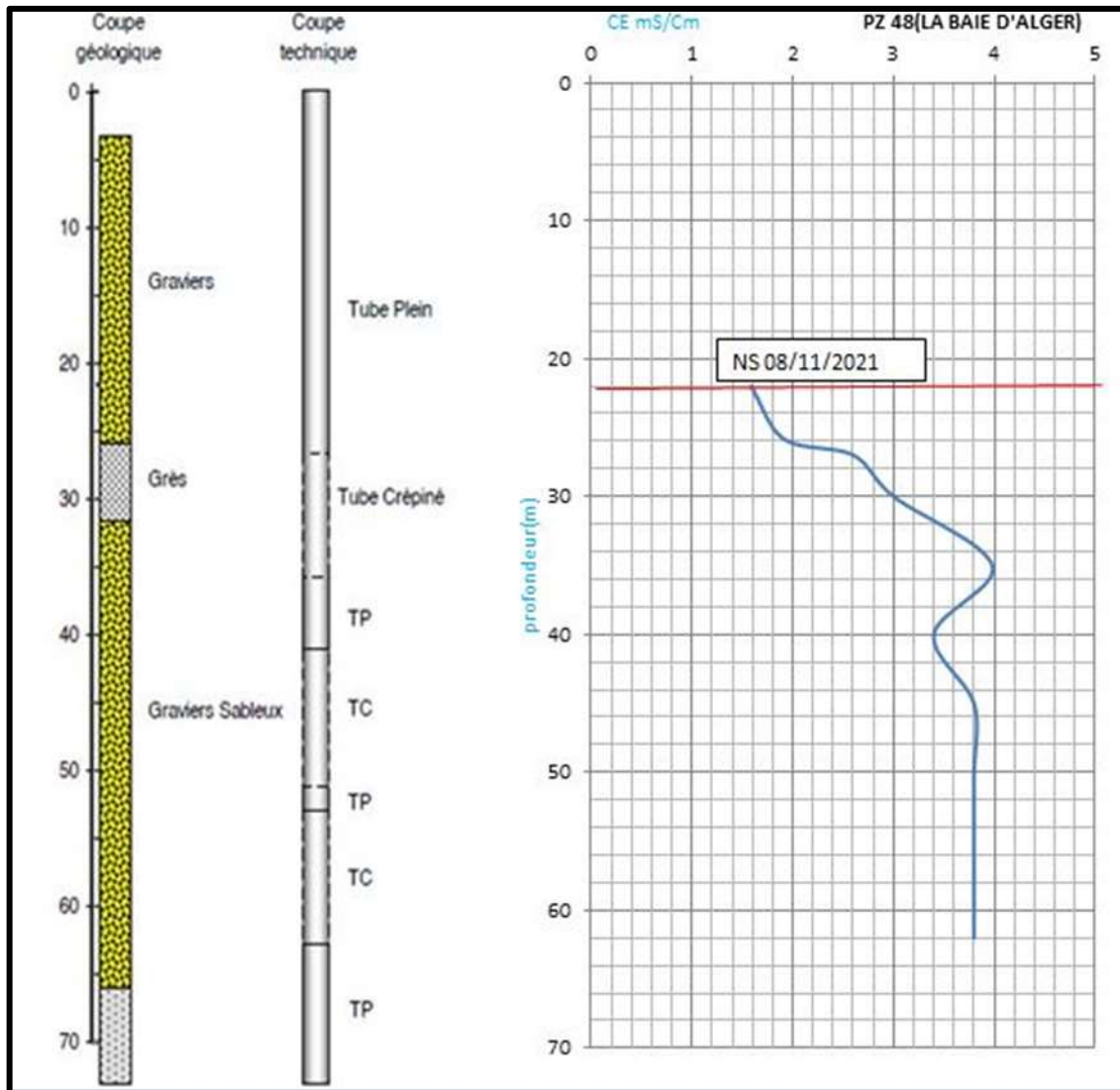


Fig.65: profil vertical de conductivité de PZ 48

Interprétation :

Au niveau de ce piézomètre on remarque que la valeur de conductivité dans le niveau statique est de **1586 uS/cm**, puis on observe qu'elle commence à augmenter progressivement de **23 m** jusqu'au profond de piézomètre, nous notons clairement que le profile enregistre une valeur de conductivité maximale de **4000 uS/cm** à **36 m**, après cette augmentation on enregistre une stabilisation de conductivité à **3800 uS/cm** jusqu'au fond de ce piézomètre.

Cette augmentation brusque de conductivité nous confirme que ce piézomètre est pollué par les eaux de mer.

f) profil du PZ E :

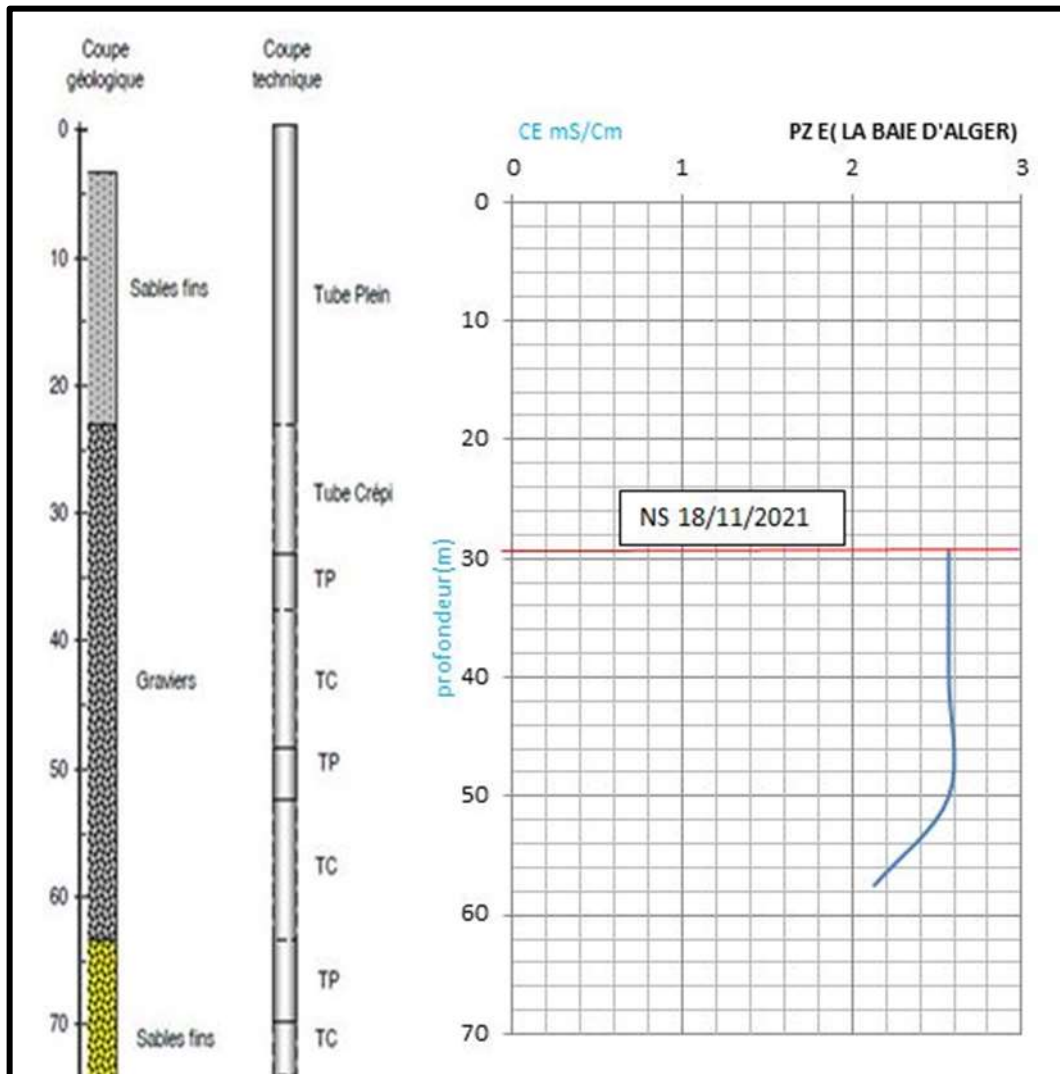


Fig.66: profil vertical de conductivité de PZ E.

Interprétation :

Nous notons dans ce piézomètre la conductivité en surface est de **2570 uS/cm**, et on remarque une croissance de conductivité constante et stable jusqu'à **50 m**, on enregistre fluctue en valeur à profondeur de **50 m** jusqu'à ce qu'elle diminue progressivement à une valeur de **2300 uS/cm**,

Ce profil et cette augmentation de conductivité nous permettent de constater que ce piézomètre est au début de contamination par l'invasion marine.

g) profil du PZ 60 :

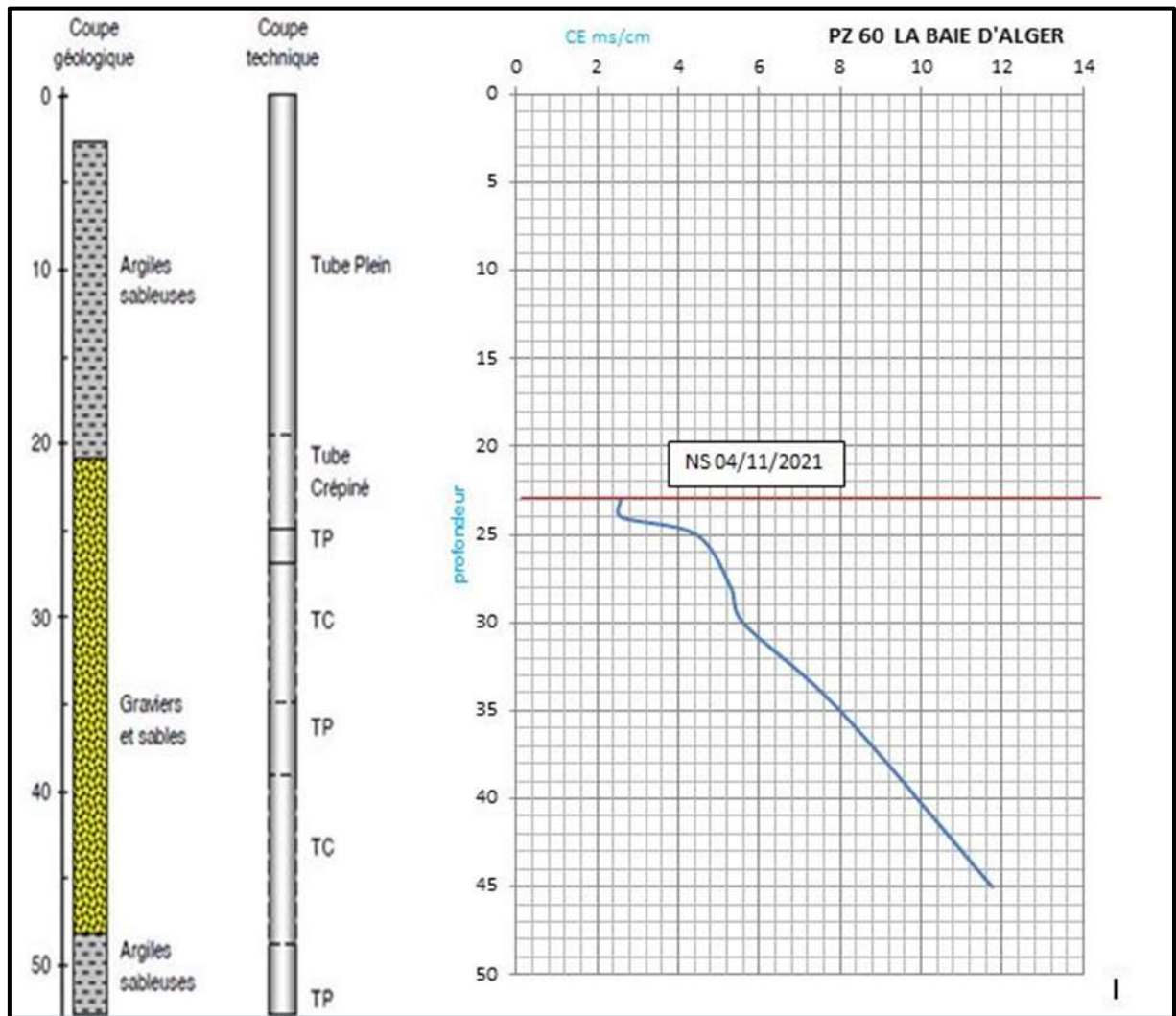


Fig.67: profil vertical de conductivité de PZ 60

Interprétation :

On remarque dans ce profil la valeur de conductivité est en augmentation progressive en fonction de la profondeur, on enregistre une conductivité en surface de **2580 uS/cm**, on voit clairement que la conductivité continue à augmenter progressivement jusqu'à **45 m** de profondeur et se coïncide à **11270 uS/cm** Jusqu'au fond.(fig67)

Par rapport à les années passées (**2007.2009**) la conductivité est en progression positive ce qui confirme l'évolution de l'intrusion marine.

h) profil du PZ HAMIZ 2 :

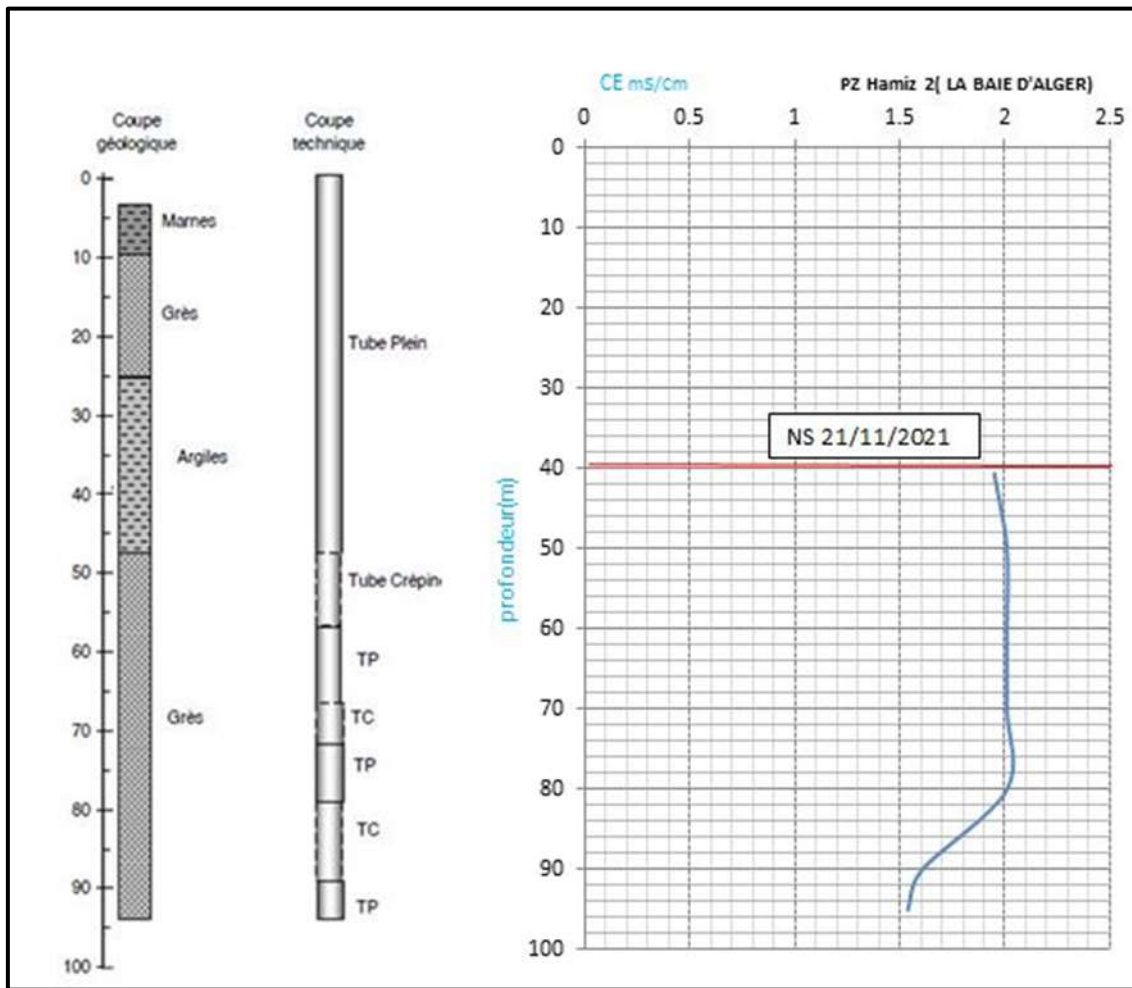


Fig.68: profil vertical de conductivité de PZ HAMIZ 2

Interprétation :

On remarque dans ce piézomètre la conductivité varie entre **1949 uS/cm** et **2010 uS/cm** . Ce piézomètre capte des formations à grande perméabilité formée de sables gréseux. Ce profil nous permet de confirmer que ce piézomètre n'est pas contaminé par les eaux salées.(fig.68).

i) profil du PZ 62 :

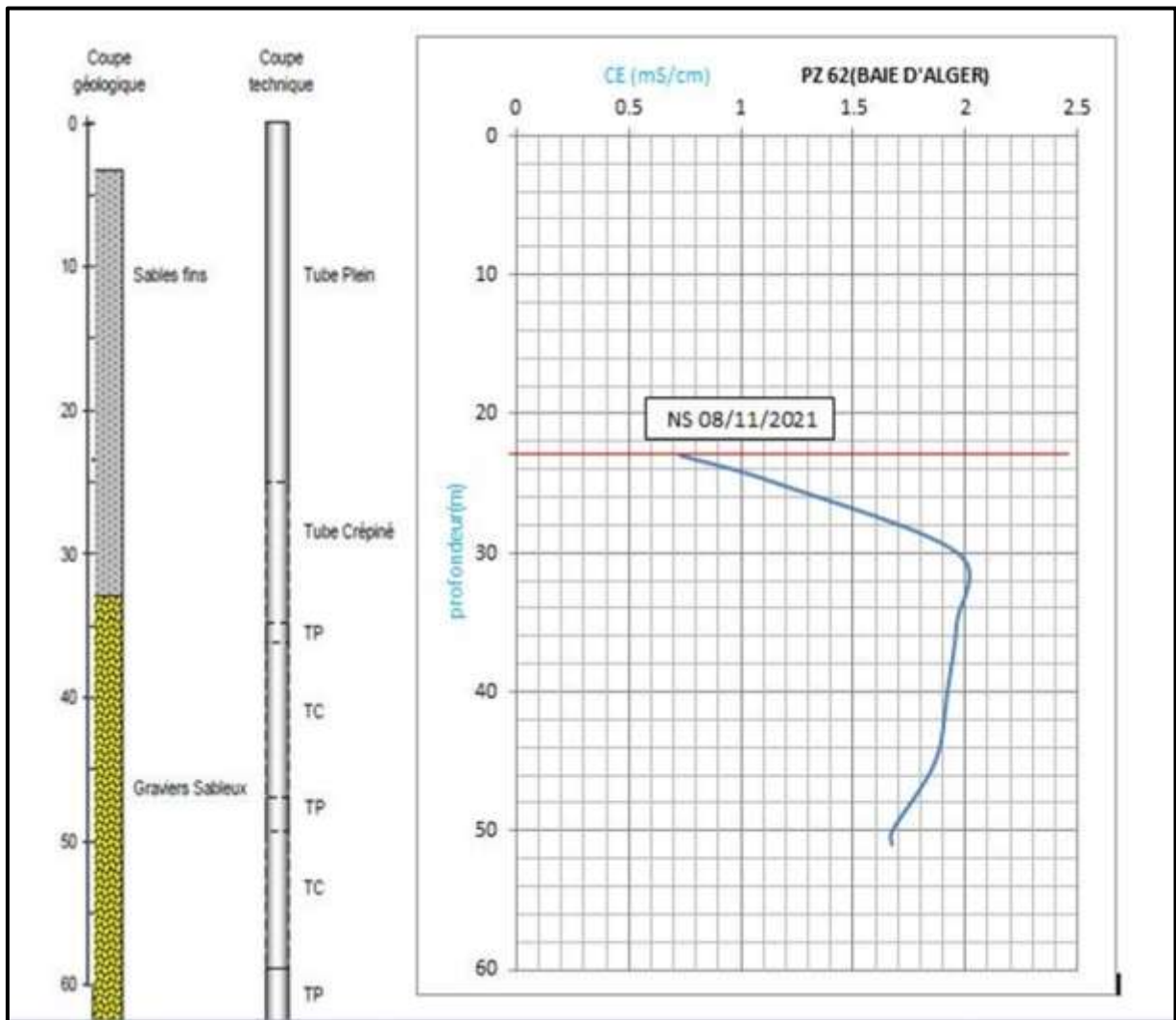


Fig.69: profil vertical de conductivité de PZ 62

Interprétation :

Dans ce piézomètre le profil de conductivité présente une valeur de **730 uS/cm**, ensuite cette conductivité augmente à partir de **25 m** de profondeur, puis on enregistre la valeur maximale de conductivité c'est de **1090 uS/cm** à profondeur de **40 m**, on voit qu'elle reste stable jusqu'au fond avec une valeur de **1672 uS/cm**. D'après cette interprétation de ce profil on a constaté que ce piézomètre n'est pas contaminé par l'intrusion marine.(fig.69).

j) profil du PZ 36 :

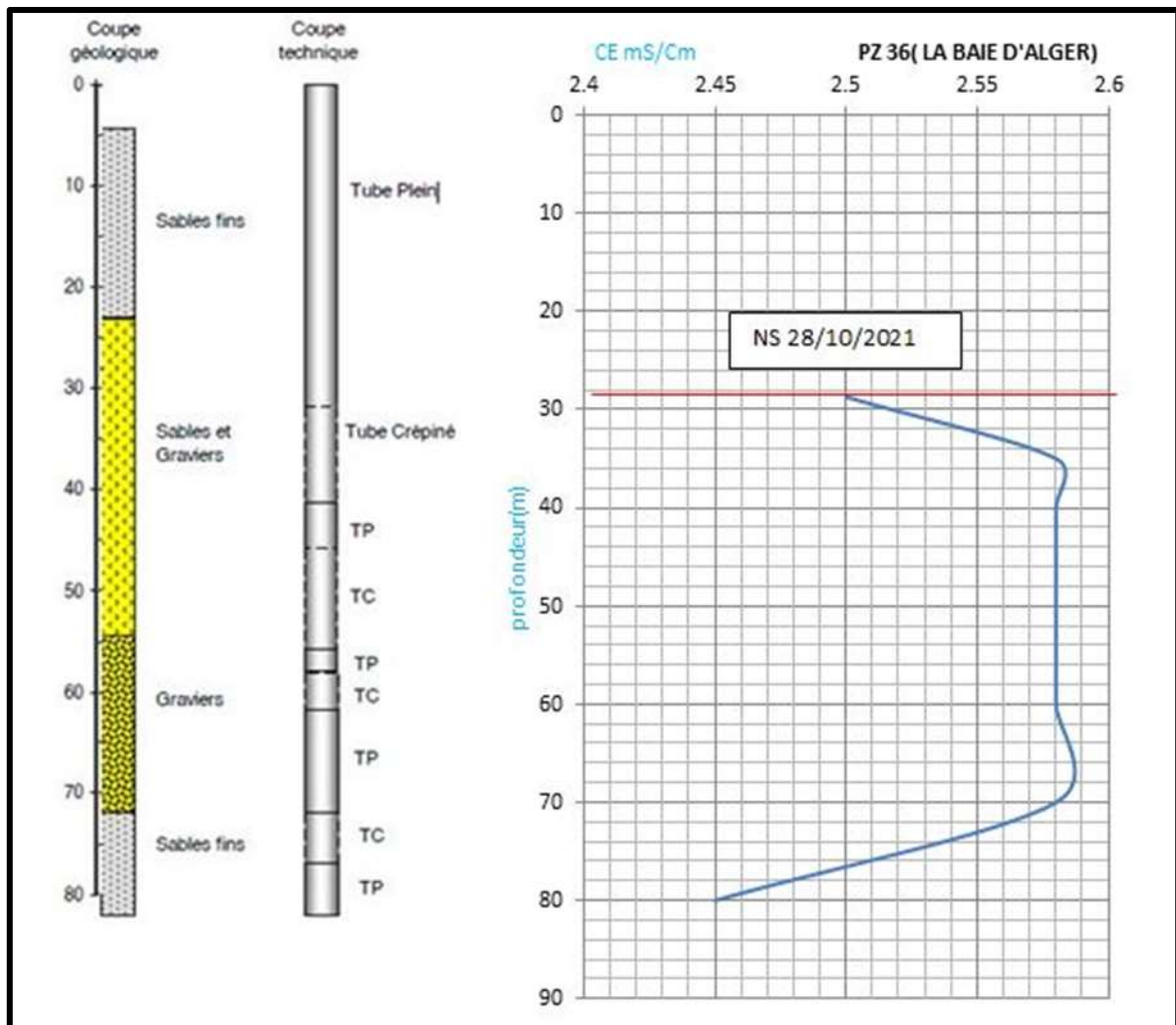


Fig.70: profil vertical de conductivité de PZ 36

Interprétation :

Ce profil de conductivité montre une augmentation progressive de conductivité en surface d'une valeur de **2500 uS/cm** à partir d'une profondeur de **30 m** jusqu'à **35m** on enregistre une stabilisation de conductivité, elle est restée constante jusqu'à **68 m** avec une conductivité de **2580 uS/cm** on remarque une diminution de conductivité à une valeur de **2450 uS/cm** jusqu'au fond de piézomètre.(fig.70).

On peut dire après cette interprétation que ce piézomètre est au début de contamination par l'intrusion marine.

4.3.5. Les faciès chimiques :

Le diagramme de Piper utilise les éléments majeurs pour représenter les différents faciès des eaux souterraines. Il permet également de voir l'évolution d'une eau, passant d'un faciès à un autre, grâce à des analyses espacées dans le temps ou des analyses d'échantillons pris à des endroits différents.

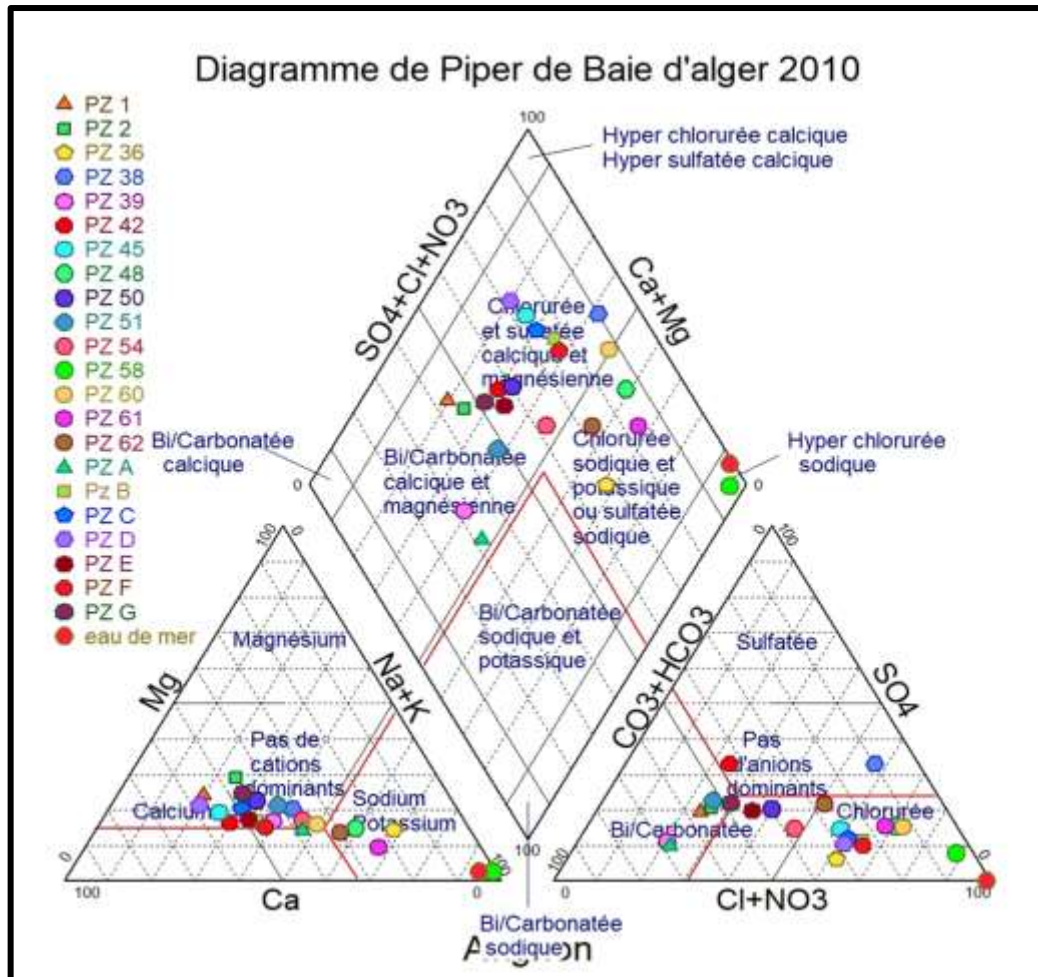


Fig.71 : Diagramme de piper relative aux points d'eau prélevés à la Baie d'Alger (2010).

- **Baie d'Alger 2010 :**

En 2010 sur le diagramme de Piper (Fig.25) 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 faciès du type chlorurée et sulfatée calcique et magnésienne.
- **2ème groupe** (PZ A, PZ B, PZ 1, PZ 39 et PZ 51) ont un faciès du type bicarbonatée calcique et magnésienne.

➤ **3ème groupe** (PZ 36, PZ 48, PZ58, PZ 61, PZ 62 et Eau de mer) ont un faciès 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 faciès témoigne une intrusion marine à la baie d'Alger en **2010**.

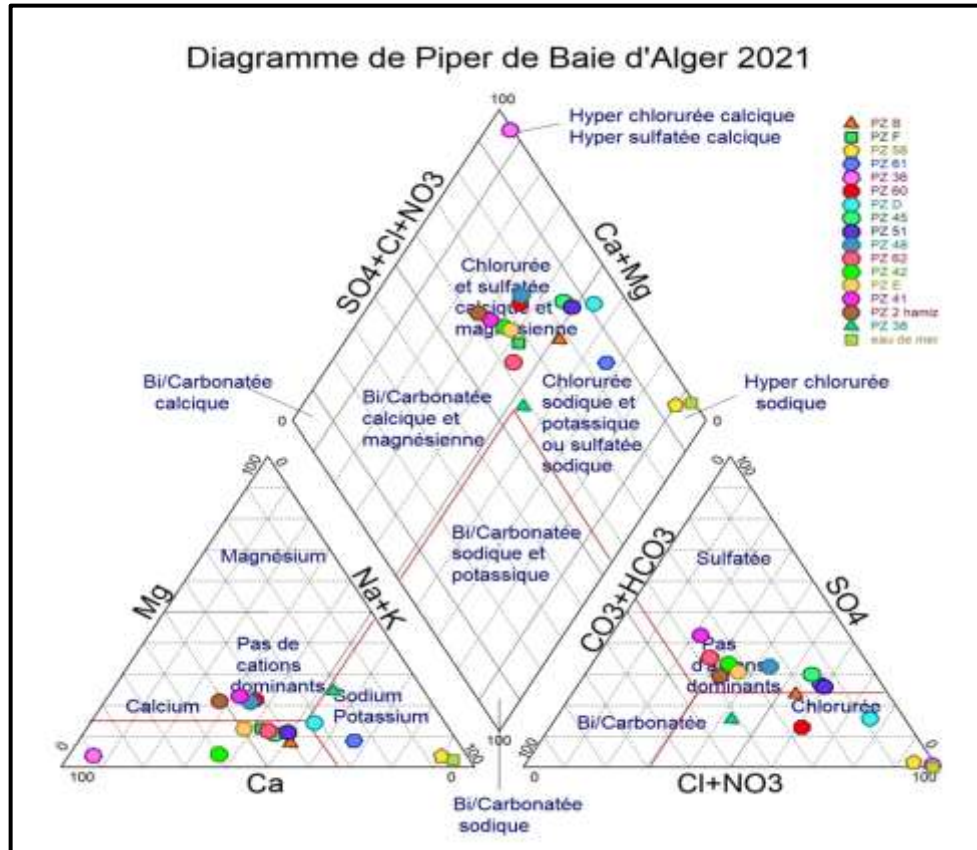


Fig.72 : Diagramme de piper relative aux points d'eau prélevés à la Baie d'Alger (2021).

• Baie d'Alger 2021 :

En **2021** sur le diagramme de Piper (**Fig.72**) permet de distinguer deux groupes :

➤ **1er groupe** (PZ41, PZE, PZHAMIZ2, PZ42, PZ45, PZF, PZ36, PZ 60, PZ48 et PZ62) ont un faciès du type chlorurée et sulfatée calcique et magnésienne.

➤ **2ème groupe** (PZ 38, PZ 58, PZB, PZD, PZ51et l'eau de mer) ont un faciès du type chlorurée sodique et potassique ou sulfatée sodique.

Les piézomètres où l'intrusion été déjà atteintes ont vu leur faciès tendre beaucoup plus vers les pôles chlorures sodique ce qui indique que le phénomène d'intrusion marine est toujours en évolution en 2021 par rapport à les années précédentes.

Les piézomètres où l'intrusion a été déjà atteinte ont vu leur faciès tendre beaucoup plus vers les pôles chlorures sodique ce qui indique que le phénomène d'intrusion marine est toujours en évolution en 2021 par rapport à les années précédentes.

4.3.6. Étude de couple chimique Na-Cl :

- On remarque dans la corrélation **Na-Cl (2010)** qu'il y'a 2 groupes :
 - **1er Groupe** : les piézomètres (PZ A, PZ 51, PZ 39, PZ 42) se répartissent sur la droite de la dissolution de l'Halite.
 - **2ème Groupe** : les piézomètres (PZ 50, PZ B, PZ 54, PZ 48, PZ F, PZ 45, PZ 60, PZ D)

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, qui confirme le phénomène d'intrusion marine.

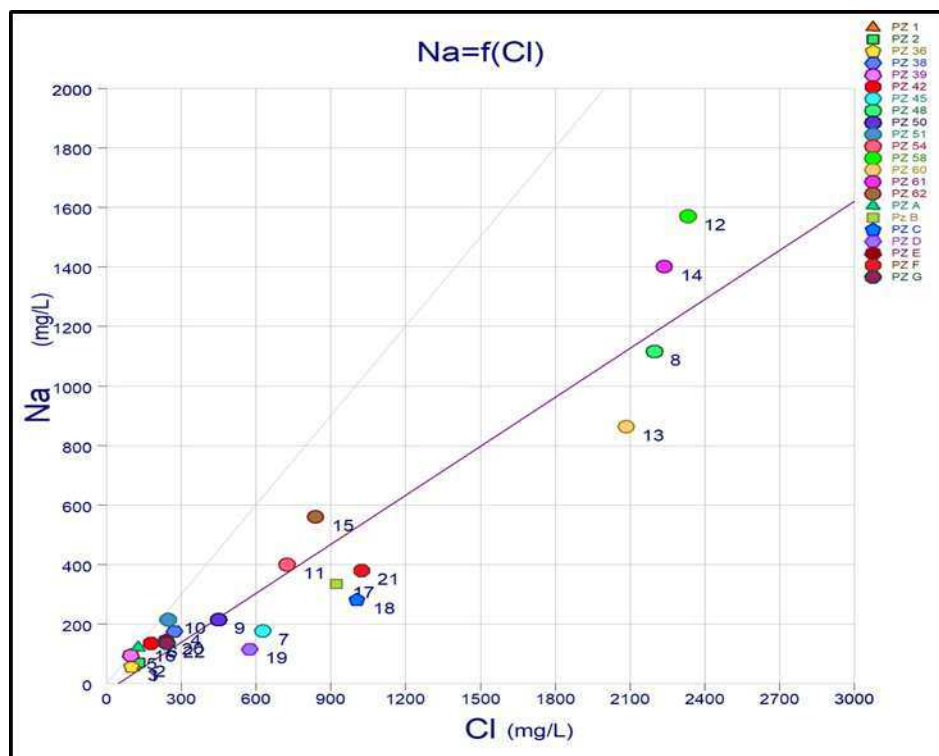


Fig.73: Variation de sodium en fonction de chlorures la Baie d'Alger en 2010

- On remarque dans la corrélation **Na-Cl (2021)** : qu'il y'a 2 groupes :
 - **1er Groupe** : les piézomètres (PZ 41, PZ 62, PZ 42) se répartissent sur la droite de la dissolution de l'Halite.

➤ **2ème Groupe** : les piézomètres (PZ B, PZ HAMIZ 2, PZ 45, PZ 51, PZ 58, PZ 41) 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, qui confirme le phénomène d'intrusion marine.

Cette interprétation montre et confirme que l'origine de salinité de l'eau souterraines c'est l'intrusion marine.

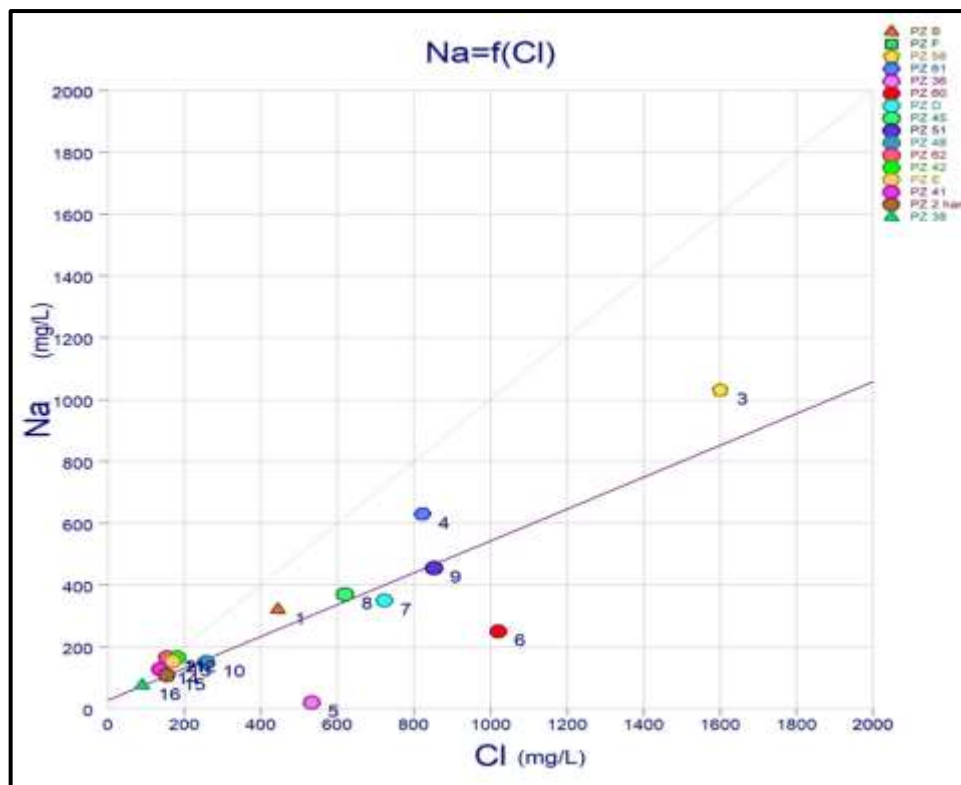


Fig.74: Variation de sodium en fonction de chlorures la Baie d'Alger en (2021).

4.3.7. Les cartes iso-teneurs :

Grace à la généralisation de la campagne de profils de conductivité au niveau de tous les points de réseau de surveillance, c'est ce qui nous a permis d'éditer des cartes d'iso conductivité a différentes profondeurs.

a)Interprétation des cartes iso-teneurs en conductivité :

*En 2020 :

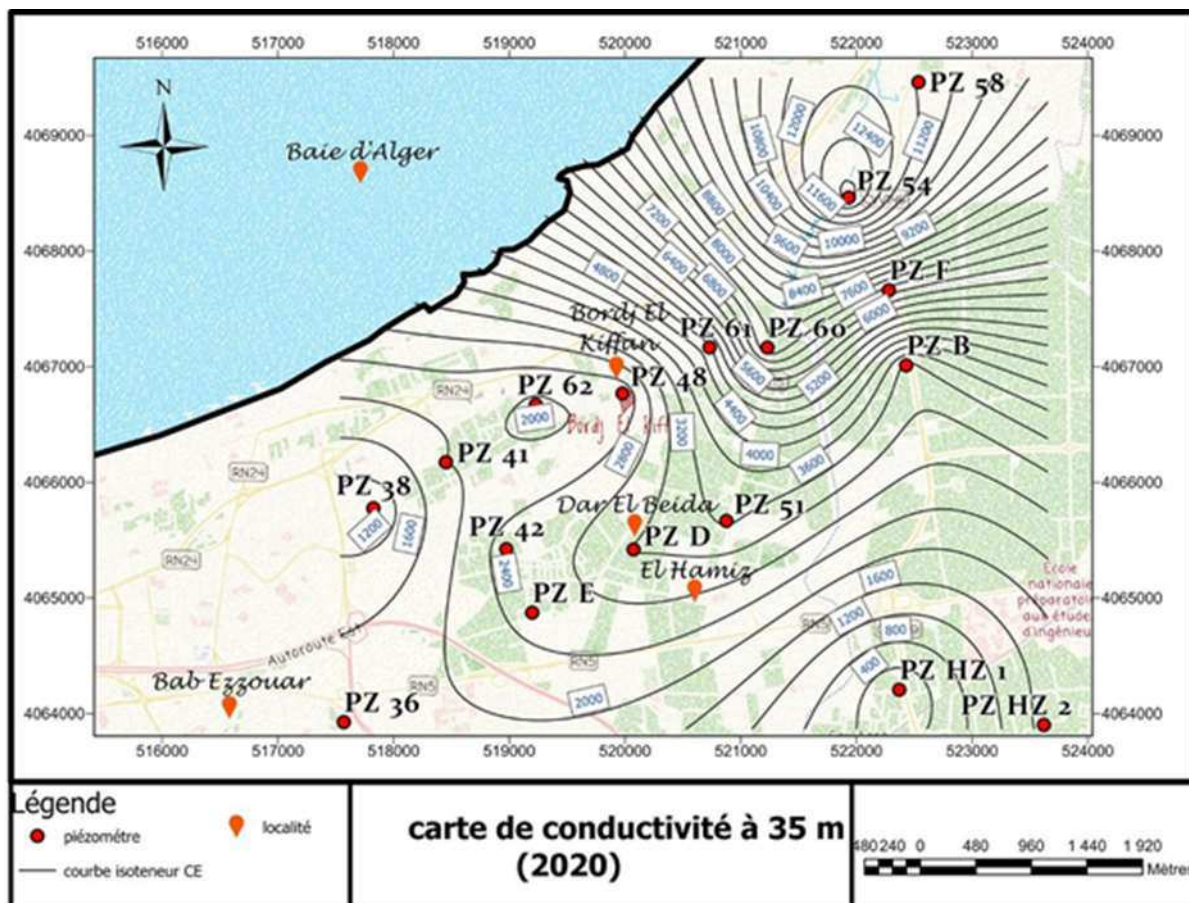


Fig.75 : Carte de conductivité à 35 m de Février 2020 réalisé à l'aide de logiciel ArcGIS PRO [11]

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 a des conductivités très élevés qui dépasse **12000 uS/Cm**. on a également constaté qu'on a une salinité d'origine marine.

En 2021 :

L'interprétation des profils de conductivité nous a permis de délimiter avec précision l'interface eau douce /eau salée, pour cela on a édité des cartes de conductivité à différentes profondeur pour montrer et confirmer l'intérêt des profils de conductivité :

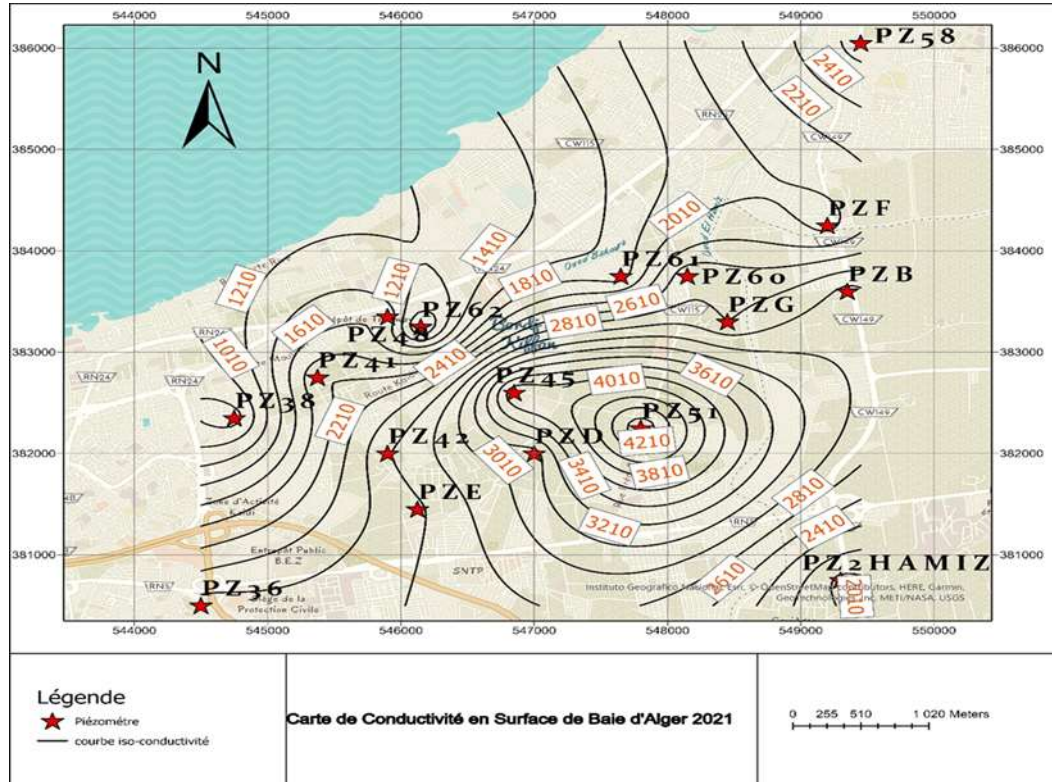


Fig.76: Carte de conductivité en surface de 2021 réalisé à l'aide de logiciel ArcGIS PRO

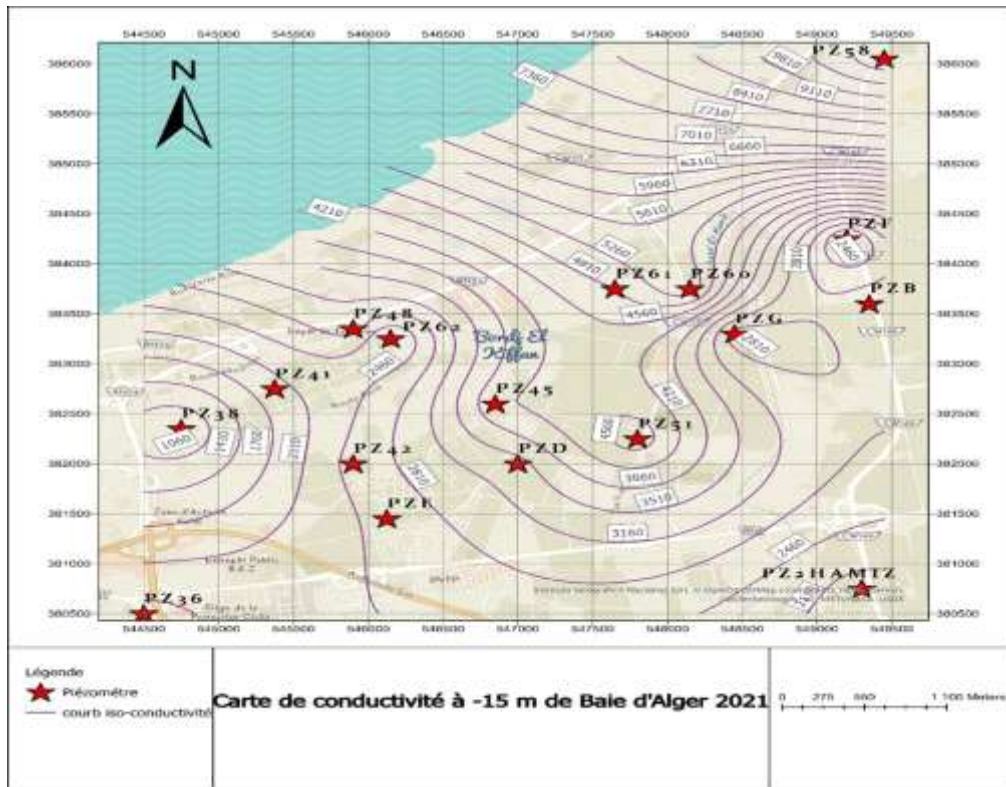


Fig.77 : Carte de conductivité à -15 m de 2021 réalisé à l'aide de logiciel ArcGIS PRO

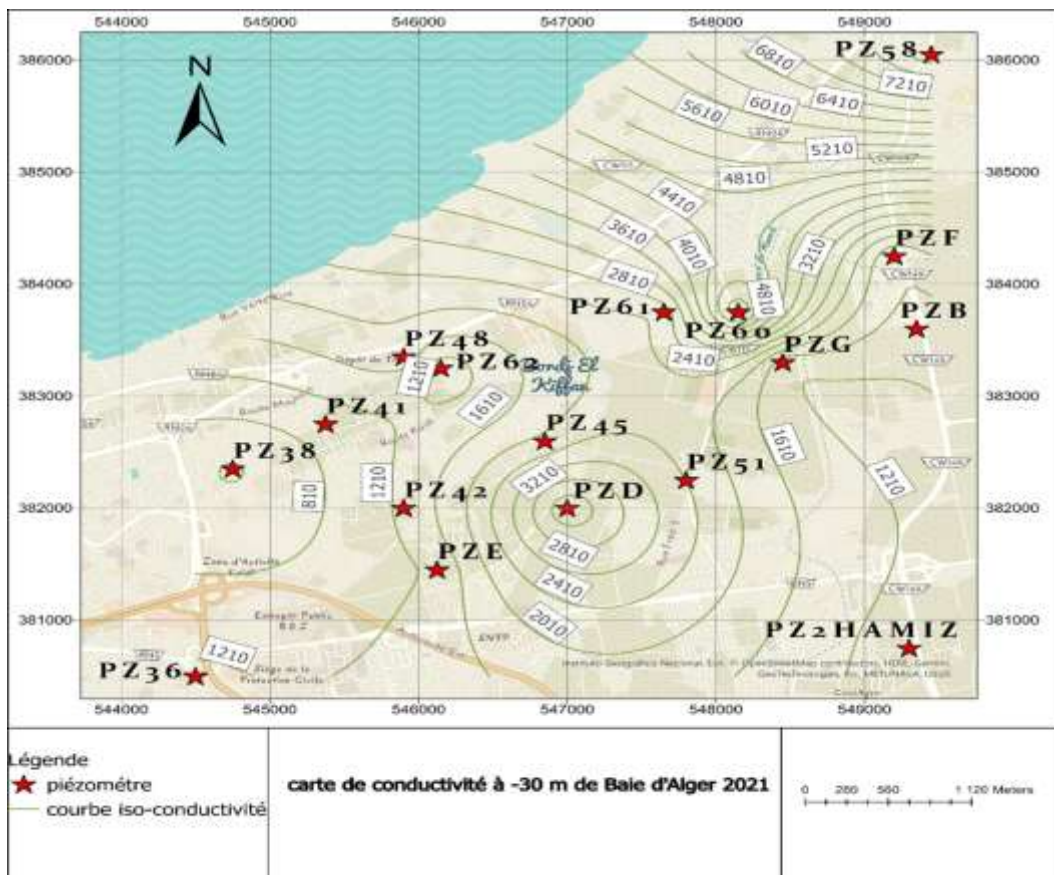


Fig.78 : Carte de conductivité à -30 m de 2021 réalisé à l'aide de logiciel ArcGIS PRO

L'interprétation des cartes de conductivité à différentes profondeurs (2021) la baie d'Alger :

Les profils de conductivité à différentes profondeurs qui ont été réalisés sur les piézomètres de surveillance, ils nous ont permis de réaliser ces cartes d'iso-valeurs de conductivité à différentes profondeurs (fig.77, fig.78, fig.79) .et pour cela on pourra constater que la comparaison entre ces trois cartes montre clairement l'augmentation des conductivités par rapport à la profondeur jusqu'à **9810 uS/Cm** et **11000 uS/Cm** comparant à les années précédentes au (PZ58 ,PZB,PZ61).

La comparaison entre les cartes d'iso-conductivité établie en 2020 et celle qu'on a réalisées en 2021 ont mis en évidence cette évolution progressive du front salé.

D'après les valeurs de conductivité augmentées qui sont enregistrées, on remarque une avance plus poussée du front salé toujours vers le champ captant du HAMIZ .et une contamination progressive de l'ensemble des points d'eau à l'intérieur du champ captant.

b) L'interprétation des cartes d'iso-teneurs en Chlorures et Sodium :

En 2006 :

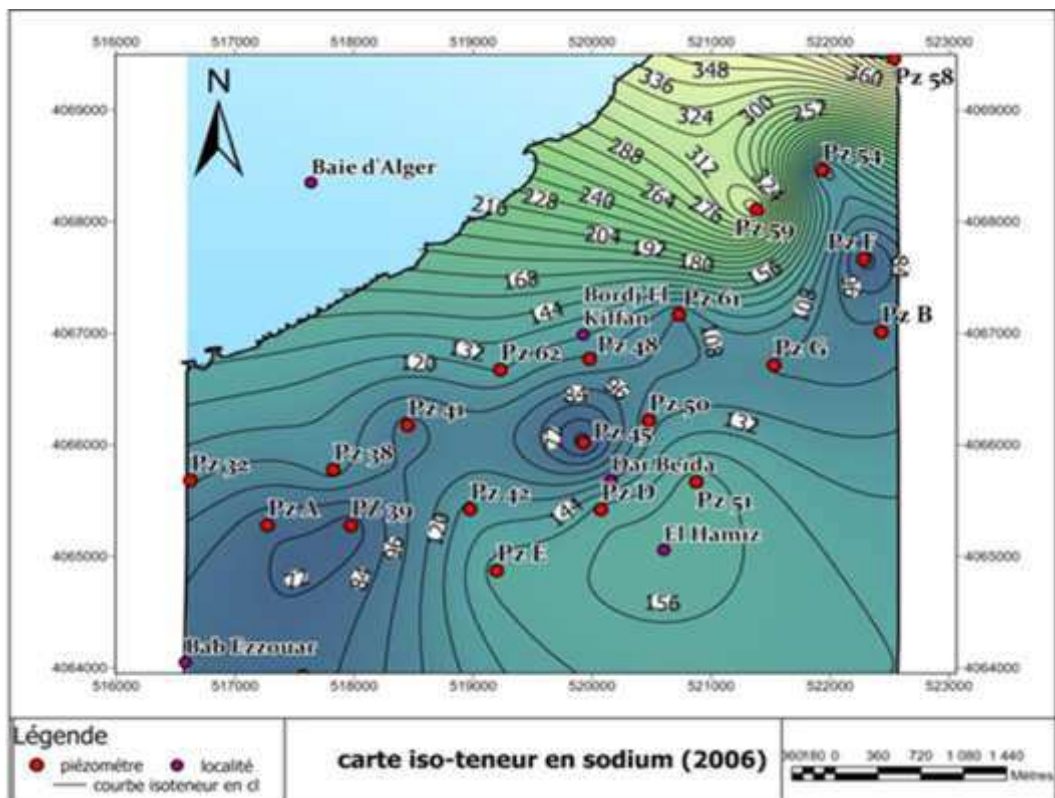


Fig.79: Carte iso-teneur en Na+ Février 2006 réalisé à l'aide de logiciel ArcGIS PRO

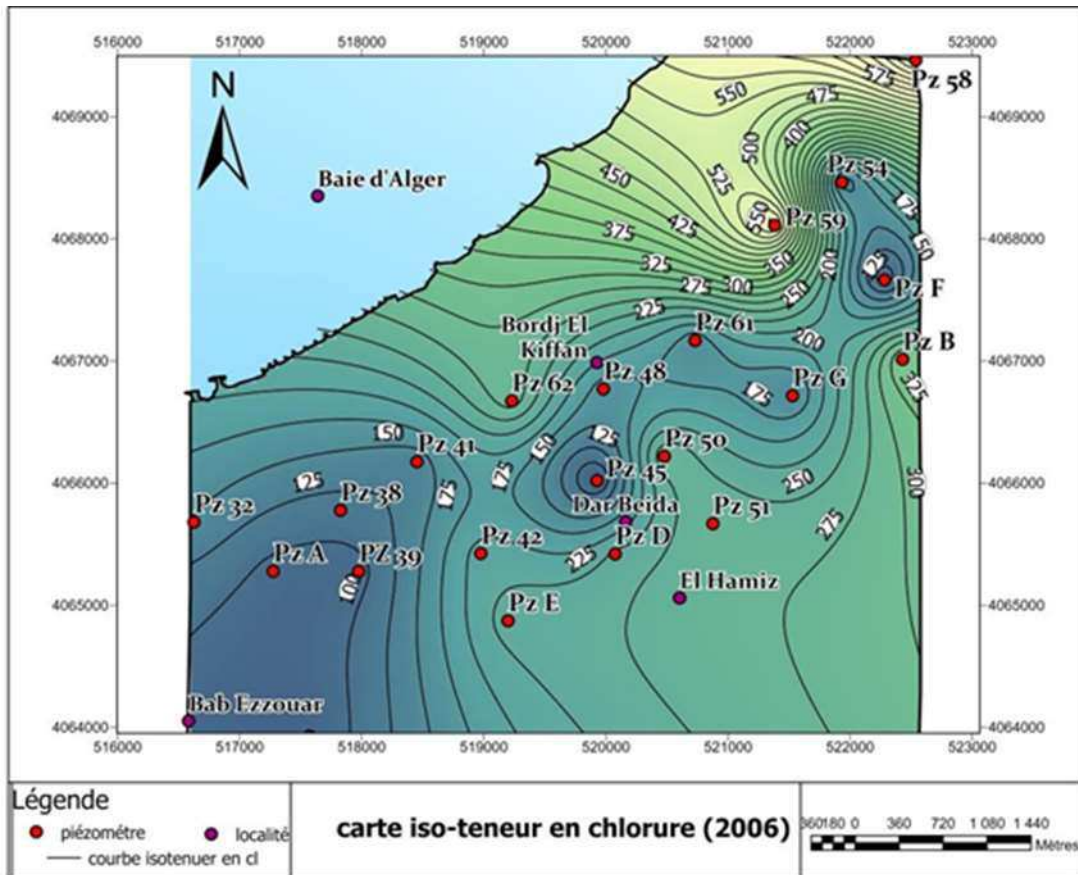


Fig.80 : Carte iso-teneur en Cl- Février 2006 réalisé à l'aide de logiciel ArcGIS PRO [11]

L'interprétation :

L'examen des cartes iso-teneur en sodium et chlore (**Fig.79**) et (**Fig.80**) 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 situées le long de la côte Est. Ce qui montre la présence d'une intrusion marine assez importante.

En 2020 :

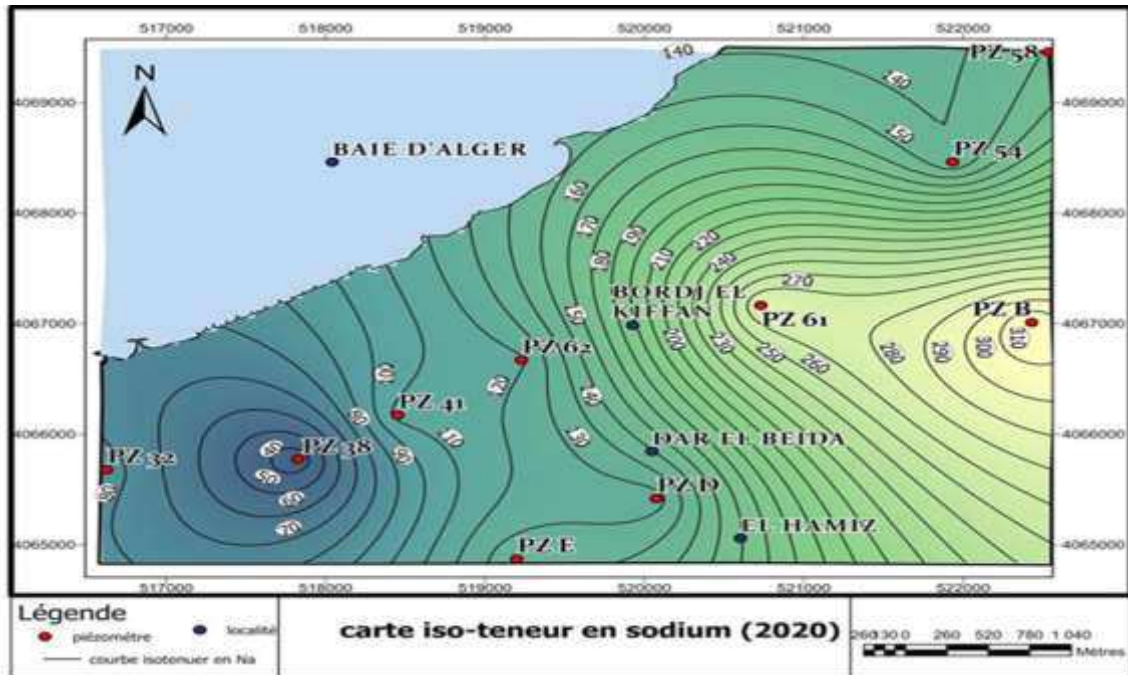


Fig.81: Carte iso-teneur en Na⁺ Février 2020 réalisé à l'aide de logiciel ArcGIS PRO [11]

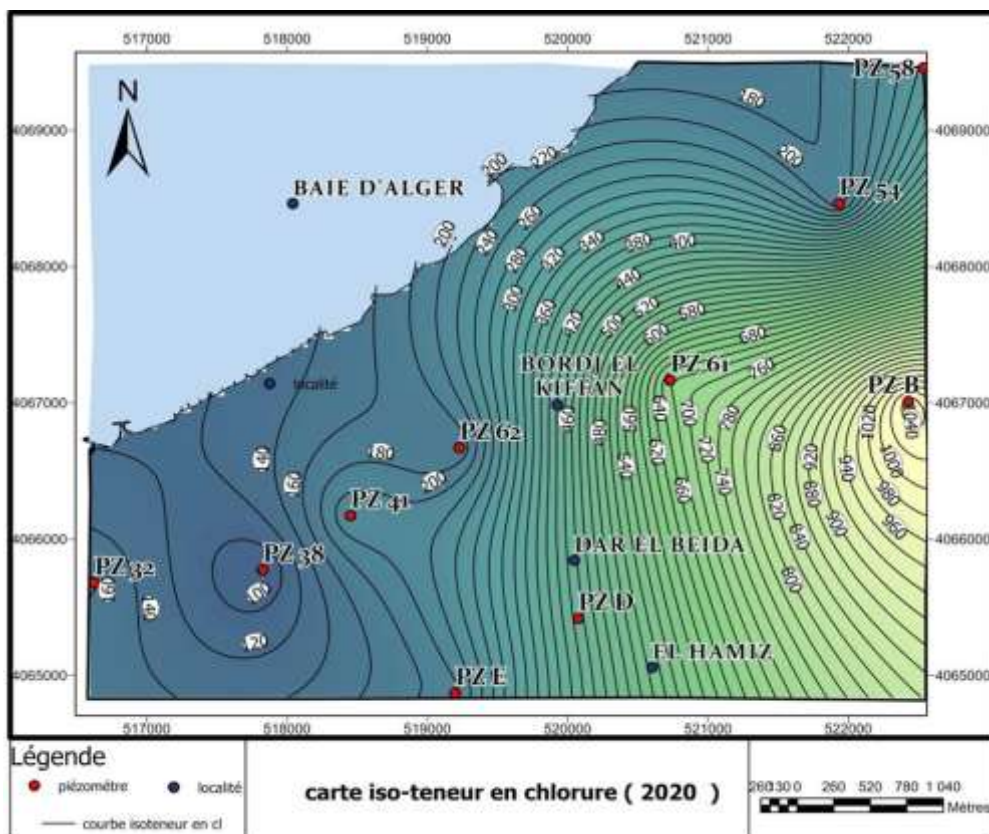


Fig.82: Carte iso-teneur en Cl⁻ Février 2020 réalisé à l'aide de logiciel ArcGIS PRO [11]

Interprétation :

Les cartes d'iso-teneur en chlorures et sodium montrent une augmentation des concentrations des chlorures et sodium qui dépassent les normes maximale admissible **Na=200** et **Cl=500**, cette augmentation est surtout au niveau du **PZB**, et cette progression confirme l'évolution du front salé, qui est provoqué par le con de dépression au niveau du champ captant el HAMIZ qui situe à **1 km** de **PZB**.

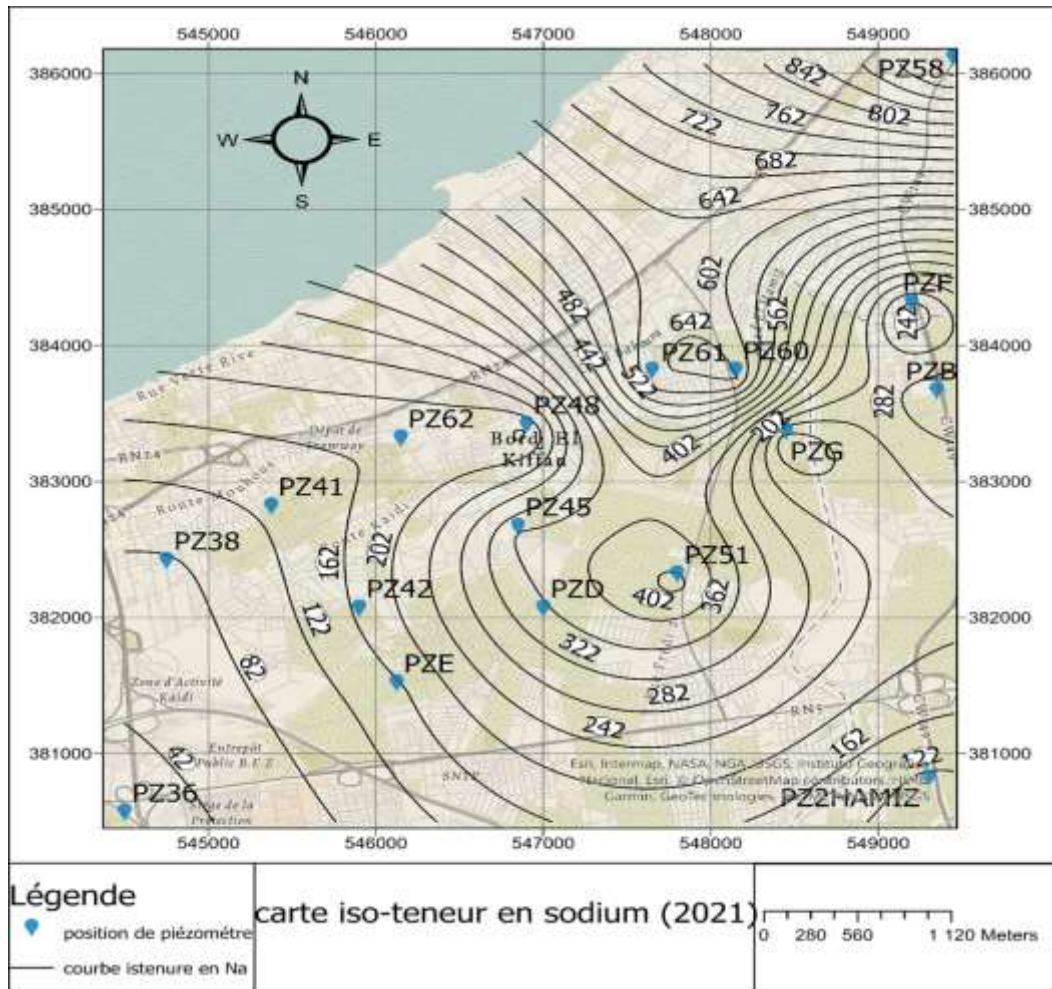


Fig.83: Carte iso-teneur en Na+ octobre novembre 2021 réalisé à l'aide de logiciel ArcGIS PRO

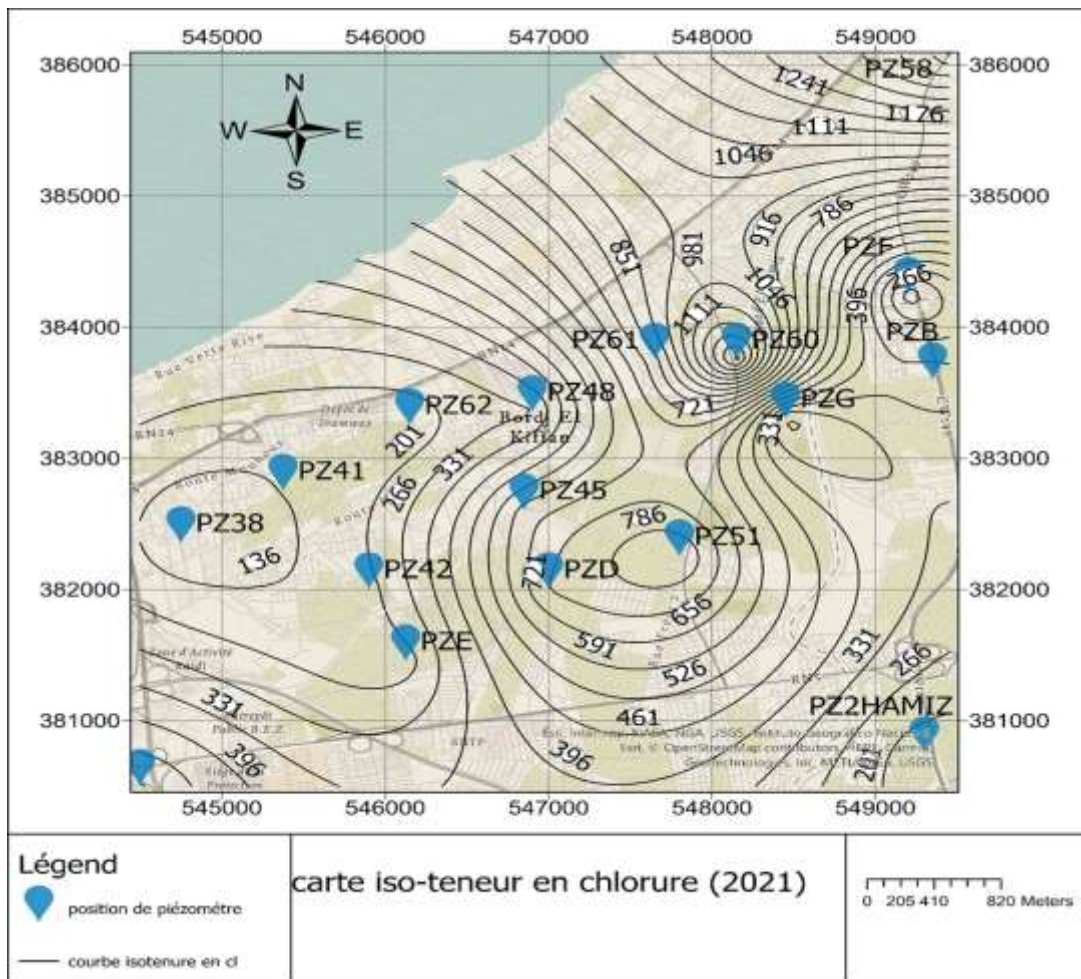


Fig.84: Carte iso-teneur en Cl- octobre, novembre 2021 réalisé à l'aide de logiciel ArcGIS PRO

L'interprétation :

On remarque sur les cartes d'iso-teneurs en chlorures et sodium (**fig.83**) et (**fig.84**) une augmentation des concentrations des chlorures et sodium qui dépassent les normes maximale admissible Na=200 et Cl=500, la concentration évolue du sud vers le nord avec des concentration très élevées qui dépassent 1200 par rapport à la concentration des chlorures et 800 par rapport au sodium surtout au niveau du PZ 58 et PZ B qui situe à 1 km du champ captant el hamiz , cette augmentation qui dépasse la norme confirme le problème de l'avancement progressif de l'intrusion marine du nord vers le sud .

4.3.8.État approximatif du biseau en 2021/2022 :

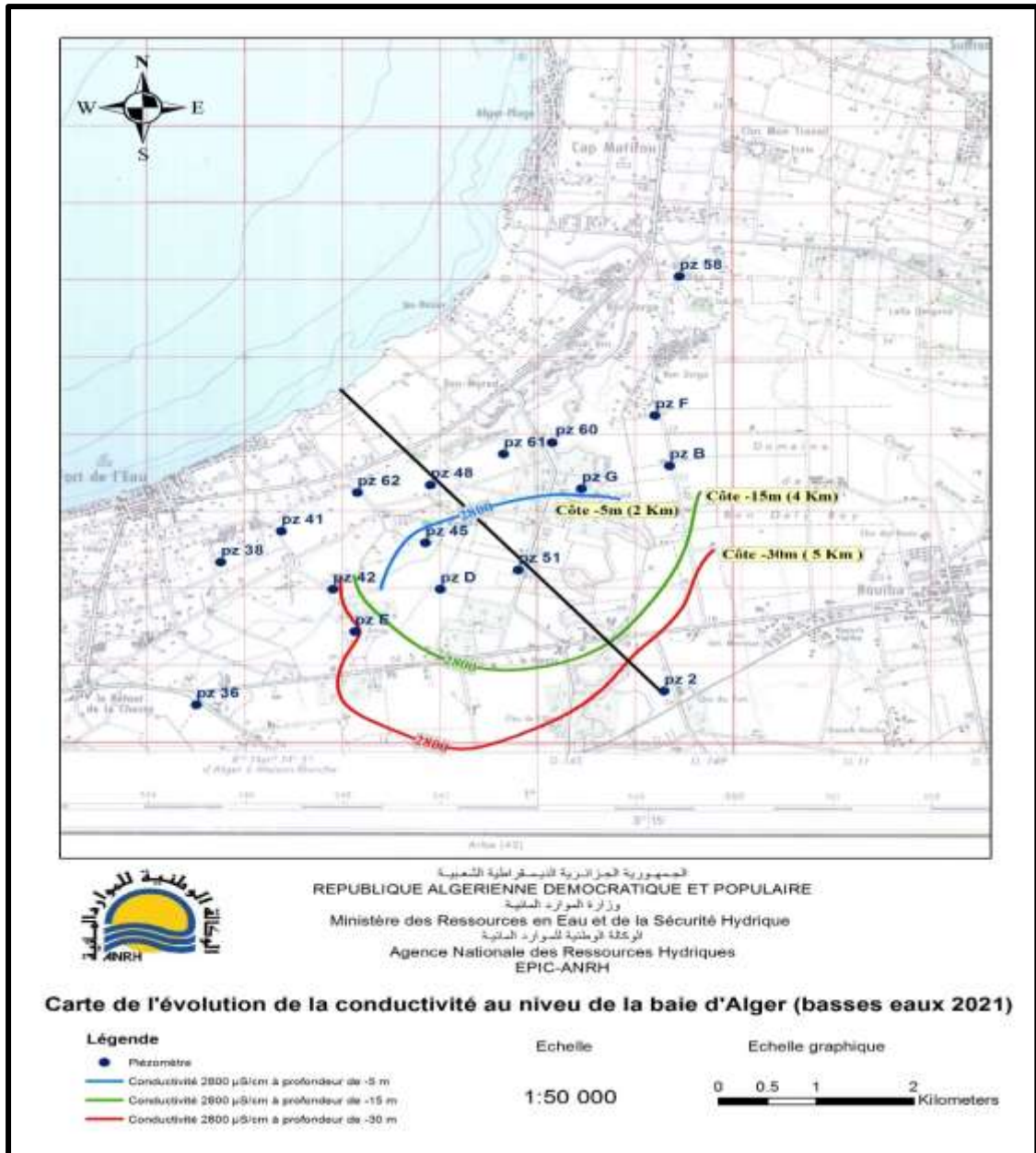


Fig.85: État du approximatif du biseau en 2021/2022 la baie d'Alger

D'après L'interprétation des cartes de conductivité à différentes profondeurs (2021) la baie d'Alger :

***Les mesures prises à la cote de -5 m :**

Après interprétation des mesures des profils de conductivité réalisés à la cote de **-5 m (en surface)** on a pu délimiter la zone envahie par l'intrusion marine, cette dernière se trouve à environ **2 km** par rapport à la cote.

*** Les mesures prises à la cote de -15 m :**

Après interprétation des mesures des profils de conductivité réalisés à la cote de **-15 m de profondeur** on a pu délimiter la zone envahie par l'intrusion marine, cette dernière se trouve à environ **4 km** par rapport à la cote.

* **Les mesures prises à la cote de -30 m :**

Après interprétation des mesures des profils de conductivité réalisés à la cote de **-30 m de profondeur** on a pu délimiter la zone envahie par l'intrusion marine, cette dernière se trouve à environ **5 km** par rapport à la cote.

La synthèse des trois cartes (**fig.77, fig.78, fig.79**) nous a permis de délimiter avec précision la zone envahie par le phénomène d'intrusion marine, et cette analyse confirme clairement que le front salé progresse dans une direction préférentielle et rejoint la trajectoire allant directement vers le champ de captage du Hamiz. Le front salé est actuellement situé à environ 5 km par rapport à la côte soit à moins de 0.5 km par rapport à la limite nord-ouest de périmètre de protection de ce champ de captage.

Alors dans ce cas-là on peut intervenir et noter que parmi les causes de l'avancement du phénomène

D'intrusion marine :

*L'influence de pompage continue et intensif.

*La force de transmissivité, ça va favoriser le changement du sens d'écoulement.

*L'effet densitaire eau douce /eau salée.

Conclusion

Le diagnostic actuel dans la région de la baie d'Alger, nous permet de conclure que l'intrusion marine est liée principalement à la surexploitation locale de la nappe ayant entraîné une augmentation de la salinité, notamment en direction du champ captant du Hamiz.

Dans le secteur côtier au niveau de la baie d'Alger, La comparaison de l'état piézométrique récent (2021) avec celui de 1983 montre un recul important des isopièzes vers l'intérieur des terres, donc un Abaissement du niveau de la nappe, avec inversement du sens d'écoulement, ce qui se traduit par l'avancé du front salé.

L'abaissement du niveau continuera à évoluer, ainsi que l'avancé de cette intrusion marine, tant que le pompage des eaux souterraines reste tel qu'il est actuellement. Le champ captant du HAMIZ est le moteur principal de cette intrusion marine mis-en évidence par les deux approches : piézométrique et hydrochimique.

Suite aux différents constats faits sur la situation de l'intrusion marine il est à souligner que si la cadence des prélèvements reste telle qu'elle est pratiquée actuellement, on assistera inévitablement à :

*une avancée plus poussée du front salée toujours vers le champ captant du hamiz (position du front salée actuellement est à 5 km par rapport à la cote).

*une contamination progressive de l'ensemble des forages à l'intérieur du champ de captage.

Les profils de conductivités réalisés sur un certain nombre de piézomètres ont permis d'apporter et de préciser : L'examen de tous les profils verticaux de conductivité montre que l'avancée de l'intrusion marine s'effectue préférentiellement selon un axe allant du la côte jusqu'au champ captant du Hamiz.

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

L'étude des couples Na-Cl et Br-Cl montrent L'origine de ces éléments dans les eaux, confirme la contamination de la nappe quaternaire par l'eau de mer et suggèrent une origine mixte de la salinité (mélanges). L'origine de la salinité acquise par les eaux a savoir un mélange entre deux processus d'acquisition : Eau de mer et

dissolution dans l'aquifère, ce qui confortent les résultats hydrochimiques et hydrodynamiques.

Recommandations :

Le front salé progresse dans une direction préférentielle, engendrée par le cône de dépression vers le champ captage du Hamiz. Il est actuellement situé à environ 5 km par rapport à la côte. Dans ce cas, nous incite à tirer encore une fois l'alarme du risque inévitable de l'avancement de cette invasion marine.

Devant une telle situation très préoccupante, qui menace la disparition de notre patrimoine national en matière de ressources en eaux souterraines à l'Est d'Alger, il est primordial de procéder dans le plus bref délai à la réduction des prélèvements.

Nous recommandons de :

- Réduire **les prélèvements** d'AEP au niveau du champ captant du Hamiz, pour permettre la reconstitution de la nappe et la préservation du champ de captage, La réduction des prélèvements au niveau du champ captant du Hamiz, constitue la solution la moins contraignante à mettre en place. Le déficit en approvisionnement en AEP induit par cette réduction de pompage, pourra être compensé à partir d'autres ressources.
- faire une application par le model de la MITIDJA, pour délimiter les zones critiques de rabattement de la nappe, au environ des champs de captage.
- Etablir de nouveaux scénarios d'exploitation pour simuler le comportement de la nappe en fonction des prélèvements actuels par le modèle hydrogéologique de l'ANRH.
- La mobilisation des eaux de surface, par la multiplication des retenues collinaires, au pied de l'Atlas blideén, sur les oueds ; chiffa, EL Harrach et Djemaa et leurs affluents, ainsi qu'au recours aux apports d'eau, issus de nouveaux barrages situés en dehors de la zone de la MITIDJA.
- La multiplication des bassins d'infiltration en vue de recharger artificiellement la nappe, en période des crues, du fait que, des volumes importants, d'eau superficielle se perdent vers la mer chaque année, ces quantités dépassent parfois le volume annuel prélevé de la nappe.
- La vulgarisation du système d'irrigation du type goute à goute, par des compagnes médiatiques, ce qui permettra une économie d'eau conséquente des ressources hydriques souterraines.
- Porter un regard particulier contre toute forme de pollution à la partie Est de la MITIDJA présentant un degré de vulnérabilité élevé.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE

- [11] **Becherair Nassima et Zinet Hicham .2020** étude de l'intrusion marine par profile de conductivité cas la Baie d'Alger :Mémoire Mastre Université Saad Dahleb - Blida.
- [4] **DAESSLEM et Join J.L (1988)**.cliché de salinité des nappes souterraines de la cote ouest de l'île de la reunion.Rapport BRGM 88 REU 05.
- [2] **DAESSLEM.MAUROUXB.MATHIEUF ,MIEHE J-M, VACHETTE CH (1992)**.Acquisition de données hydrogéologiques complémentaires sur la plaine des Galets :Approche de l'extension des aquifères dans les plateaux basaltiques et de la position de biseau salé par prospection géophysique audio magnétotellurique. Rapport BRGM R 34580.
- [1] **DAUM J.R**, avec la collaboration de BAKALOWICZL,CHERUL,LONGIN G.(1996)-Méthodes et moyens de contrôles de biseaux salés dans les aquifères littoraux. Rapport BRGM /RP-38847.FR ,77p,27 stable
- [9] **Djoudar /Hallal Dahbia**.Ecole Nationale supérieure de l'hydraulique.B.P 3109000BLIDA,Algérie.daly dz@yahoo.fr Toubal Ahmed cherif.université des sciences et de technologie Houari Boumediene.toubal@hotmail.com
- [8] Evolution mitidja **2015 [ANRH]** .
- [7] **Hydro expert (2000)-PDRE**.Bilan et synthèse hydrogéologique de quinze années de recherche. Rapport RPOHO18.
- [6] **JOINJ.L.COUDRAY.J.POMME.JB et DAESSLE.M (1987)**.comportement hydrodynamique d'une nappe côtière d'un lagon(la réunion –commune de saint paul)Rapport BRGM87REU24.
- [3] Le phénomène d'intrusion saline à la reunion :état des connaissances et synthèse des données disponibles rapport « final » BRGM/RP-54330-FR Décembre 2005.etude réalisée dans le cadre des projets de service public du BRGM 2005 05 EU AU D16 N.frissant,c.Reni-coraill Collaboration de j.Bonnier et y.de la tone.

[10] Makhlouf ép.BEHIRI nouara.2010 cartographie et evolution de l'état actuel du biseau salé de La baie d'Alger et son impact sur L'AEP (champs de captage du HAMIZ) et l'industrie (cham de Rouiba) Mémoire Magister.