

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
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 :

**Étude de l'intrusion marine par les profils de conductivité
(Cas de la Baie d'Alger)**

Réalisé par :

Zinet Hicham

Becherair Nassima

Devant les membres de jury composé de :

M. BESSENASSE M.	Professeur, U. de Blida	Président
Mme. BOUZOUIDJA S.	MCA, U. de Blida	Examinatrice
M. GUENDOZ A.	Professeur, U. de Blida	Promoteur

Promotion 2019 / 2020

Remerciements

Avant tout, nous remercierons le bon Dieu qui a illuminé notre chemin et qui nous a armés de force et de sagesse, ainsi la bonne volonté pour achever ce modeste travail.

Toute notre gratitude pour notre promoteur Mr. GUENDOUIZ AbdelHamid, pour ces judicieux conseils ainsi que sa disponibilité tout le long de l'élaboration de ce travail.

Toute notre gratitude à nos professeurs et enseignants qui nous ont guidés au cours de notre formation, et nos respects aux membres du jury qui nous feront l'honneur d'apprécier ce travail.

Nous remercierons tout l'équipe de l'Agence Nationale des Ressources Hydrique de Blida et M. BELAIDI Mouloud et de nous avoir accordés les données nécessaire pour réaliser ce travail.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

À mes parents, aucun hommage ne pourrait être à la hauteur de l'amour dont ils ne cessent de me combler. Que Dieu leur procure bonne santé et longue vie.

À celui que j'aime beaucoup et qui m'a soutenu tout au long de ce projet : mes frères, ma grande mère et à toute ma famille.

À tous mes amis, Mohamed, Fethi et Housseem et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce travail soit possible, je vous dis merci.

Hicham Zinet

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

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

Mes sœurs : Amel, Dounia ;

Mon frère : Brahim ;

Mes amis : Amel, Amira, Ichrak, Selma, Asma ;

A tous ceux que j'aime.

NASSIMA BECHRAIR

Résumé

L'Algérie, à l'instar de tous les pays riverains de la méditerranée, a connu une sécheresse au cours des trois dernières décennies. Les manques en eau ont 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 (2019/2020) 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 hydrochimiques (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

Algeria, like all countries bordering the Mediterranean, has experienced drought over the past three decades. Water shortages have resulted in a very increased demand on groundwater for the needs of agriculture, industry and water supply, particularly in coastal areas, inducing overexploitation of the latter, which has resulted in the continual deterioration of the quality of underground waters.

The main objective of this thesis is to make an observation on the current state (2019/2020) of the marine invasion in the bay of Algiers, which is confronted with this phenomenon since the eighties five (1985), and this by the use of different approaches, in particular hydrodynamic (chronicle of piezometric readings) and hydro chemical (use of the technique of conductivity profiles).

The interpretation of the results of these approaches made it possible to specify the spatio-temporal evolutions of salinity ; piezometry as well as the displacement of the salt front and its current position.

Keywords: Marine invasion, Conductivity profile, Piezometry, Coastal aquifer.

ملخص

لقد عانت الجزائر، مثلها مثل جميع البلدان المطلة على البحر الأبيض المتوسط، من الجفاف على مدى العقود الثلاثة الماضية. أدى نقص المياه إلى زيادة كبيرة في الطلب على المياه الجوفية لاحتياجات الزراعة والصناعة وإمدادات المياه، لا سيما في المناطق الساحلية، مما أدى إلى الاستغلال المفرط لهذه الأخيرة، مما أدى إلى التدهور المستمر في جودة المياه الجوفية.

الهدف الرئيسي من هذه الأطروحة هو رصد الوضع الحالي 2020/2019 للغزو البحري في خليج الجزائر الذي يواجهه هذه الظاهرة منذ خمسة وثمانين عاما (1985) وهذا عن طريق استخدام مناهج مختلفة، ولا سيما الهيدروديناميكية (مزمّن قراءات قياس الضغط) والهيدروكيميائية (استخدام تقنية منحني الناقلية) .

قياس الضغط. جعل تفسير نتائج هذه الأساليب من الممكن تحديد التغيرات المكانية والزمانية للملوحة ؛ قياس الضغط بالإضافة إلى إزاحة جبهة الملح وموقعها الحالي.

الكلمات المفتاحية : الغزو البحري ، منحني الناقلية ، قياس الضغط ، طبقة المياه الجوفية الساحلية.

Introduction Générale	01
------------------------------------	-----------

CHAPITRE 01 : Présentation du phénomène de l'intrusion marine

1.1.	Introduction	02
1.2.	Généralités sur l'intrusion marine.....	02
1.2.1.	Définition du phénomène	02
1.2.2.	Définition d'un biseau salé	03
1.2.3.	Définition d'un aquifère côtier	03
1.2.4.	La relation eau souterraine-eau marine	03
1.3.	Mécanismes de l'intrusion marine.....	04
1.4.	Les causes de l'intrusion marine	04
1.4.1.	Situation par rapport à la mer	04
1.4.2.	Alimentation de la nappe	05
1.4.3.	Hydrogéologie	05
1.4.4.	Changement climatique	05
1.4.5.	Pollutions diffuses par les activités anthropiques	06
1.4.6.	Effet de l'exploitation	06
1.4.7.	Puits mal positionné	06
1.5.	Facteurs déterminants dans l'évolution de l'intrusion marine	07
1.5.1.	Profondeur de la nappe	07
1.5.2.	Débit de la nappe	07
1.5.3.	Perméabilité	08
1.6.	Le principe de Ghyben-Herzberg	08
1.7.	Méthodes d'étude de l'intrusion marine	10
1.7.1.	Étude géophysique	10
1.7.2.	Étude de la piézométrie	10
1.7.3.	Étude hydro chimique	11
1.7.4.	Profils de conductivité	11
1.8.	Impact de l'intrusion marine	11
1.8.1.	Effet sur sols	11
1.8.2.	Effet sur l'économie	12
1.8.3.	Effet sur la santé des consommateurs	12
1.9.	Les solutions proposées contre l'intrusion marine	13
1.10.	Conclusion.....	13

CHAPITRE 02 : Présentation de la zone d'étude

2.1.	Situation géographique	14
2.2.	Cadre géologique et hydrogéologique	15
2.2.1.	Géologie et stratigraphie.....	15
2.2.2.	Hydrogéologie	17
2.2.3.	Caractéristiques Hydrodynamiques.....	19
2.3.	Présentation de la zone d'étude	20
2.3.1.	Situation géographique.....	20
2.3.2.	Hydrographie	20
2.3.3.	Caractéristiques morpho métriques	22

2.3.4.	Paramètres Physiques et géomorphologiques du sous bassin versant d'El-Harrach	25
2.4.	Étude hydro-climatologique	26
2.4.1.	Introduction	26
2.4.2.	La pluviométrie	26
2.4.3.	La Température	29
2.5.	Socio-économique	30
2.5.1.	Population	30
2.5.2.	Végétation et agriculture	30
2.5.3.	Industrie.....	31
2.6.	Conclusion	31

CHAPITRE 03 : Méthodologie du travail

3.1.	Introduction	32
3.2.	Partie Terrain	32
3.2.1.	Matériels utilisés	33
3.2.2.	Mesure du niveau statique	35
3.2.3.	Mesure de la conductivité	36
3.2.4.	Prélèvement des échantillons	40
3.3.	Partie Laboratoire	42
3.3.1.	Dosage quelque élément chimique	43
3.4.	Partie Logiciel	45
3.4.1.	Logiciel ARCGIS PRO.....	45
3.4.2.	Logiciel SUFER 2016.....	47
3.4.3.	Logiciel DIAGRAMME	47
3.4.4.	Logiciel Photoshop CC 2020	48

CHAPITRE 04 : Résultats et Discussions

4.1.	Introduction	49
4.2.	Approche hydrodynamique	49
4.2.1.	Mise en évidence de l'intrusion marine par la cartographie piézométrique.....	49
4.2.2.	Évolution de la piézométrie de la période 1983 -2020	49
4.3.	Approche hydrochimique par l'étude des profils de conductivité	56
4.3.1.	Historique de profil de conductivité	56
4.3.2.	Profile de conductivité de l'année 2020	68
4.3.3.	Les facies chimique	81
4.3.4.	Étude de couple chimique Na-Cl	83
4.3.5.	Cartes iso-teneurs	84
4.3.6.	État approximatif du biseau en 2019/2020.....	88
4.4.	Conclusion	89

Conclusion générale.....	90
---------------------------------	-----------

Recommandation.....	92
----------------------------	-----------

Liste des figures

Chapitre I :

Fig.01 : Phénomène d'intrusion marine.....	02
Fig.02 : Représentation du biseau salé.....	03
Fig.03 : Puits mal positionné	07
Fig.04 : Principe de Ghyben-Herzberg dans un tube en U.....	09
Fig.05 : Principe de Ghyben-Herzberg dans une coupe à travers un aquifère libre.....	10

Chapitre II :

Fig.06 : Localisation du site d'étude dans la plaine de la Mitidja.....	14
Fig.07 : Carte géologique de plaine de la Mitidja (Bennie And Partners, 1983).....	17
Fig.08 : localisation du site d'étude la baie d'Alger.....	20
Fig.09 : Les sous bassins versants de la Mitidja Est.....	21
Fig.10 : Carte de réseau hydrographie	22
Fig.11 : Courbe hypsométrique du bassin versant du Hamiz-Réghaia.....	24
Fig.12 : Réseau Hydrographique du bassin versant de l'oued El-Harrach.....	26
Fig.13 : Histogramme des précipitations moyennes mensuelles Période (2000 - 2018).....	27
Fig.14 : Histogramme des précipitations moyennes annuelles (2000-2018).....	28
Fig.15 : Histogramme des Variations de température à la station de Dar El Beida	29

Chapitre III :

Fig.16 : Répartition des piézomètres de la baie d'Alger.....	32
Fig.17 : Voiture utilisées pour le déplacement sur terrain.....	33
Fig.18 : Sonde multi paramètres utilisée pour la mesure de différents paramètres.....	33
Fig.19 : Escabeau utilisé	34
Fig.20 : Sonde utilisée pour les mesures sur terrain.(16/08/2020).....	34
Fig.21 : Échantillons prélevés sur terrain avec l'étiquettes.(17/08/2020).....	35
Fig.22 : Mesures du niveau statique sur les piézomètres au niveau de la Baie d'Alger.....	36
Fig.23 : Mesure de profil de conductivité PZ B.....	37
Fig.24 : Mesure de profil de conductivité PZ Hamiz 2.....	37
Fig.25 : mesure de profil de conductivité PZ F.....	37
Fig.26 : Mesure de profil de conductivité PZ 38.....	38
Fig.27 : Mesure de profil de conductivité PZ F.....	38
Fig.28 : Prélèvement d'échantillon PZ 62.....	40
Fig.29 : Prélèvement d'échantillon PZ 54.....	40
Fig.30 : Les échantillons.....	40
Fig.31 : Mesure CE et TDS et pH sur terrain.....	41
Fig.32 : Laboratoire de l'ANRH.....	42
Fig.33 : Échantillons au laboratoire.....	42
Fig.34 : Interface de Logiciel ARCGIS PRO.....	46
Fig.35 : Interface de commande de logiciel ARCGIS PRO.....	46
Fig.36 : Interface de logiciel Surfer.....	47
Fig.37 : Interface de commande du logiciel Diagrammes.....	48
Fig.38 : Interface de commande du logiciel Photoshop CC 2020.....	48

Chapitre IV :

Fig.39 : Carte piézométrique de la Baie d'Alger 1983.....	50
Fig.40 : Carte piézométrique de la Baie d'Alger septembre 2003.....	51
Fig.41 : Carte piézométrique de la Baie d'Alger septembre 2007	52
Fig.42 : Carte piézométrique de la Baie d'Alger avril 2010	53
Fig.43 : Carte piézométrique de la Baie d'Alger mai 2016	54
Fig.44 : Carte piézométrique de la Baie d'Alger mars 2018	55
Fig.45 : Carte piézométrique de la Baie d'Alger Aout 2020	56
Fig.46 : Profil vertical de conductivité du PZ 58.....	57
Fig.47 : Profil vertical de conductivité du PZ 54.....	58
Fig.48 : Profil vertical de conductivité du PZ 48.....	59
Fig.49 : Profil vertical de conductivité du PZ 60.....	60
Fig.50 : Profil vertical de conductivité du PZ 61.....	61
Fig.51 : Profil vertical de conductivité du PZ 36.....	62
Fig.52 : Profil vertical de conductivité du PZ B.....	63
Fig.53 : Profil vertical de conductivité du PZ D.....	64
Fig.54 : Profil vertical de conductivité du PZ F.....	65
Fig.55 : Profil vertical de conductivité du PZ 2 Hamiz.....	66
Fig.56 : Profil vertical de conductivité du PZ 1 Hamiz.....	66
Fig.57 : Profil vertical de conductivité du PZ 58.....	68
Fig.58 : Profil vertical de conductivité du PZ 54.....	69
Fig.59 : Profil vertical de conductivité du PZ 48.....	70
Fig.60 : Profil vertical de conductivité du PZ 60.....	71
Fig.61 : Profil vertical de conductivité du PZ 61.....	72
Fig.62 : Profil vertical de conductivité du PZ 36.....	73
Fig.63 : Profil vertical de conductivité du PZ B.....	74
Fig.64 : Profil vertical de conductivité du PZ D.....	75
Fig.65 : Profil vertical de conductivité du PZ F.....	76
Fig.66 : Profil vertical de conductivité du PZ E.....	77
Fig.67 : Profil vertical de conductivité du PZ 1 Hamiz.....	78
Fig.68 : Profil vertical de conductivité du PZ 2 Hamiz.....	79
Fig.69 : Profil vertical de conductivité du PZ 41.....	80
Fig.70 : Diagramme de Piper relatif aux points d'eau prélevés à la baie d'Alger 2002....	81
Fig.71 : Diagramme de Piper relatif aux points d'eau prélevés à la baie d'Alger 2007....	81
Fig.72 : Diagramme de Piper relatif aux points d'eau prélevés à la baie d'Alger 2010....	81
Fig.73 : Diagramme de Piper relatif aux points d'eau prélevés à la baie d'Alger 2020....	81
Fig.74 : Variation de sodium en fonction de chlorures la Baie d'Alger en 2010.....	84
Fig.75 : Variation de sodium en fonction de chlorures la Baie d'Alger en 2020.....	84
Fig.76 : Carte de conductivité à 35 m de Juillet 2007.....	84
Fig.77 : Carte de conductivité à 35 m de Février 2020	85
Fig.78 : Carte iso-teneur en Na^+ Février 2006	86
Fig.79 : Carte iso-teneur en Cl^- Février 2006	86
Fig.80 : Carte iso-teneur en Na^+ Février 2020	87
Fig.81 : Carte iso-teneur en Cl^- Février 2020	88
Fig.82 : État du approximatif du biseau en 2019/2020 la baie d'Alger	89

Liste des Tableaux

Tableau 01: paramètres géométriques des sous bassins versants.....	23
Tableau 02 : répartition altimétrique d'altitudes du bassin versant de l'oued El Hamiz.....	24
Tableau 03 : Les caractéristiques de relief de bassin versant du Hamiz-Reghaia.....	25
Tableau 04 : Paramètres géométriques du bassin versants d'oued El Harrach.....	25
Tableau 05 : Caractéristiques des stations pluviométriques.....	27
Tableau.06 : Résultats de la campagne piézométrique sur terrain de la Baie d'Alger Février et Aout 2020.....	36
Tableau.07 : Résultats de mesure de conductivité et TDS Février 2020.....	39
Tableau.08 : Résultats de mesure de conductivité et TDS Août 2020.....	39
Tableau.09 : Résultats de mesure sur le terrain (Février et Aout 2020).....	41
Tableau.10 : Résultats des analyses physico chimique de l'année 2020	45

Introduction Générale

Introduction Générale

Près du littoral, les aquifères constituent des ressources en eau très importantes, de ce fait on observe une forte densité de population et des activités agricoles intensives. Néanmoins, l'exploitation de ces nappes pose des problèmes complexes car elle associe la notion des réserves des eaux souterraines à celle de leur qualité.

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

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

Le présent travail s'intègre dans cette optique et son objectif consiste à appliquer différentes approches : Hydrodynamiques hydrochimiques : technique des profils de conductivité ainsi que l'examen de l'évolution spatio-temporelle de tous les paramètres chimiques. Afin de d'examiner la situation actuelle et de voir l'évolution de la location de l'invasion ces deux dernières années.

Le présent travail est structuré selon les chapitres suivants :

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

1.1. Introduction :

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

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

1.2. Généralités sur l'intrusion marine

1.2.1. Définition du phénomène :

Le phénomène d'intrusion saline est un processus actif qui correspond à une rupture de l'équilibre hydrodynamique entre l'eau douce et l'eau de mer par une baisse importante de la charge et des flux d'eau douce et/ou une augmentation de la charge d'eau de mer (**Fig.01**). Ce déséquilibre se traduit par une avancée de l'eau de mer dans l'aquifère et une dégradation souvent importante de la ressource en eau douce, sensible dès que la part d'eau de mer atteint **2%**.

Une des raisons les plus communes de ce déséquilibre est la surexploitation des aquifères côtiers, exacerbée par la population toujours croissante de ces zones, mais le déséquilibre peut également résulter d'une baisse naturelle de la recharge ou d'une montée du niveau marin.

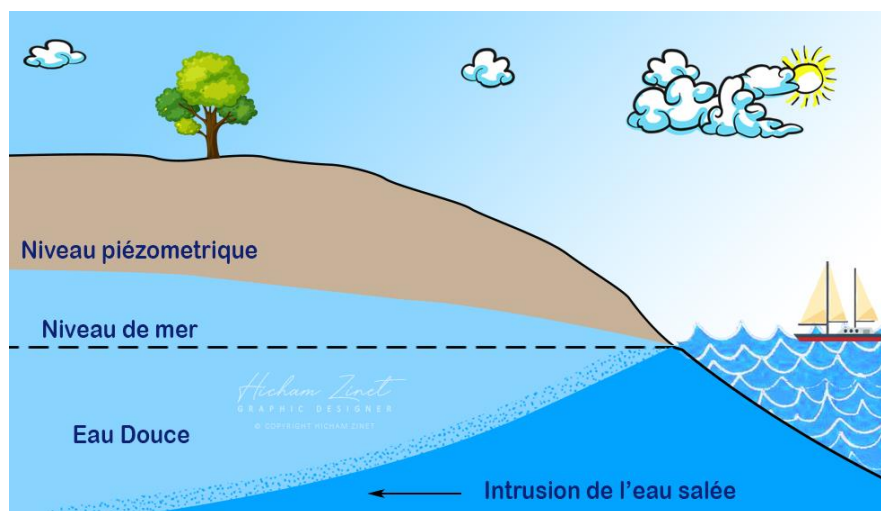


Fig.01 : Phénomène d'intrusion marine

1.2.2. Définition d'un biseau salé :

Le contact entre la mer et une nappe d'eau dans un aquifère poreux s'appelle l'interface eau douce/ eau salée (**Fig.02**).

Généralement cette interface est en bordure de mer, mais il peut se déplacer à l'intérieur des terres en cas d'exploitation trop importante de la nappe ou de précipitation insuffisantes dues à un changement climatique. [1]

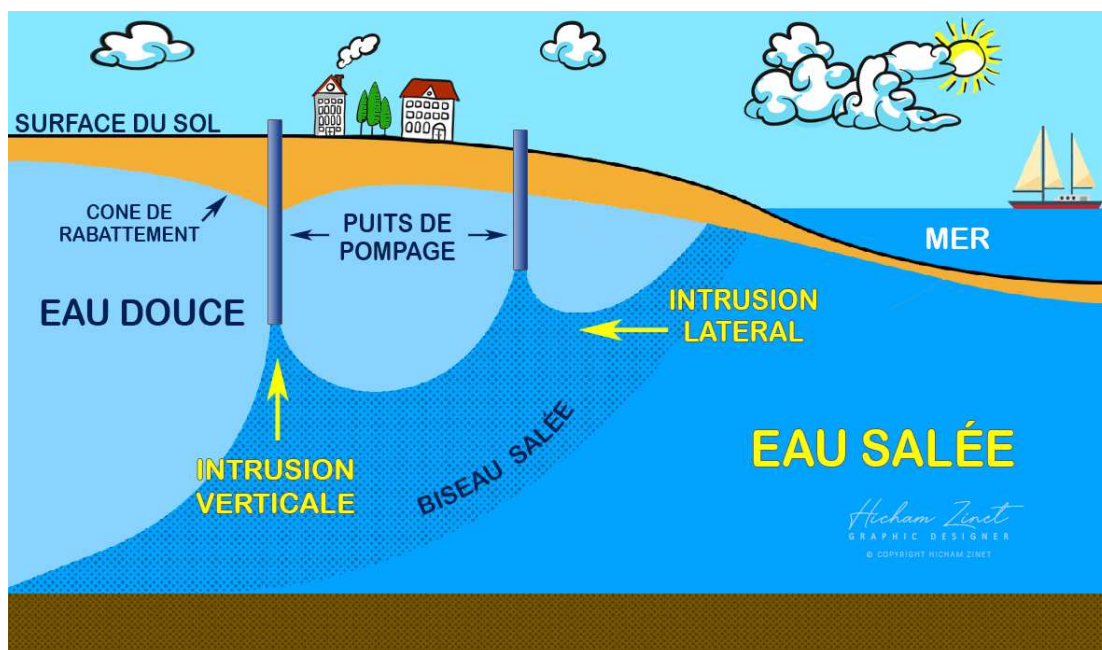


Fig.02 : Représentation du biseau salé

1.2.3. Définition d'un aquifère côtier :

Un aquifère côtier est un aquifère localisé en zone côtière et est en Communication avec la mer ou l'océan. Il peut être en relation directe avec la mer) ou par l'intermédiaire de zone humide.

1.2.4. La relation eau souterraine - eau marine :

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

1.3. Mécanismes de l'intrusion marine:

En l'absence de perturbation (surexploitation par exemple), la pénétration du niveau de la mer à l'intérieur des terres est naturellement régie par une différence de masse volumique entre deux eaux L'une salée et marine, plus dense et donc plus assujettie aux forces gravitationnelles; L'autre plus ou moins « douce » provenant de l'infiltration des précipitations et constituant ainsi une nappe côtière s'écoulant vers la mer.

- a) L'interface eau douce- eau salée prend une allure hyperbolique, qui limite la partie basale nommée « biseau ». Dans la réalité, on observe une zone de transition dont l'épaisseur ne dépasse guère quelques mètres.
- b) La différence de densité entre les deux liquides qui tend à maintenir l'eau salée en profondeur,
- c) La diffusion moléculaire du sel dans l'eau douce tendant à minimiser les gradients de concentration,
- d) Le débit de la nappe qui est fonction du régime d'exploitation et d'implantation des différents aménagements hydrauliques et de la recharge de la nappe,
- e) La porosité et la perméabilité des terrains aquifères littoraux, - La géométrie de l'aquifère : topographie du substratum imperméable au niveau de l'interface eau douce- eau salée,
- f) Les pluies susceptibles de recharger une nappe côtière engendrent une augmentation du débit des eaux souterraines et une poussée de l'interface eau douce- eau salée vers la mer voire une expulsion des niveaux salés vers des niveaux plus profonds.
- g) En présence de pompages intensifs et périodiques et lorsque l'aquifère est hétérogène, ce phénomène va engendrer une propagation des sels marins vers les eaux souterraines et une augmentation de la salinité de ces eaux pompées.

[2]

1.4. Les causes de l'intrusion marine :

1.4.1. Situation par rapport à la mer :

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

1.4.2. Alimentation de la nappe :

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

1.4.3. Hydrogéologie :

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

1.4.4. Changement climatique :

Les variabilités climatiques locales couplées aux changements globaux vont irrémédiablement modifier les caractéristiques des principales composantes du cycle hydrologique : l'abondance des précipitations leur type, leur fréquence ainsi que leur répartition géographique et saisonnière, les taux d'évaporation et d'évapotranspiration, la survenue et la vitesse de la fonte des neiges. L'évaluation des capacités actuelles et futures des modèles pour prédire les conditions climatiques futures et les composantes du cycle hydrologique est un enjeu fondamental pour prédire le devenir des ressources en eaux souterraines.

Il est largement établi qu'une hausse de la température de l'air induit une plus forte évapotranspiration et que l'infiltration des précipitations, étant dépendante du type d'événement pluvieux (durée, intensité et fréquence), une réduction de la recharge des aquifères serait probable dans le contexte des changements climatiques. Quels que soient les scénarios utilisés, les résultats des exercices de prédiction du GIEC (Groupe d'Experts Intergouvernemental sur les Changements Climatiques) indiquent tous un changement dans les niveaux piézométriques (qui dépendent de la température, des précipitations et du pompage) et les débits de base annuels simulés des eaux souterraines. Les résultats de Rivard et al. [3]

1.4.5. Pollutions diffuses par les activités anthropiques :

Comme pour tous les systèmes aquifères, les aquifères côtiers et insulaires sont sensibles aux pollutions diffuses qui s'exercent en surface ainsi qu'à celles qui s'exercent directement en profondeur. Cinq grandes classes d'activités peuvent être responsables de ces pollutions :

- a) occupation et transformation des sols (agriculture, foresterie, irrigation, barrage),
- b) urbanisation et développement municipal (extraction d'eau, aqueduc, fosse septique, etc.),
- c) développement industriel (perte ou déversement de produits, injection souterraine, etc.),
- d) développement d'exploitation minière (cendres volantes des centrales thermiques, zone de stockage et déversement d'hydrocarbures, etc.),
- e) Transport (stockage du sel pour les routes, ruissellement sur les infrastructures routières, etc.). Selon leur nature chimique, les contaminants qui atteignent la nappe d'eau souterraine se retrouveront soit dissous dans l'eau ou, s'ils sont non miscibles avec l'eau, flottant à la surface de la nappe pour les contaminants moins denses que l'eau ou ils s'accumuleront au fond de l'aquifère s'ils sont plus denses. [4]

1.4.6. Effet de l'exploitation :

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

- baisse du niveau de la nappe ;
- Pénétration du biseau d'eau salée vers les terres ;
- Salinisation des eaux de la nappe côtière à cause de cette pénétration, principalement dans les deux premiers kilomètres du rivage ;
- Abandon des puits à cause des fortes salinités des eaux. [5]

1.4.7. Puits mal positionné :

Si un ouvrage de captage est réalisé trop profond (la crépine est près de la zone de transition), donc l'eau pompée sera saumâtre et impropre à la consommation dès le début de son exploitation (**Fig.03**). Par ce que la crépine va se retrouver directement

dans la zone où l'eau est salée. De plus, pendant la saison sèche, puisque la nappe ne se recharge pas, on a alors une avancée de l'intrusion saline dans la nappe ce qui augmente le risque d'avoir un puits situé dans la zone de transition. [5]

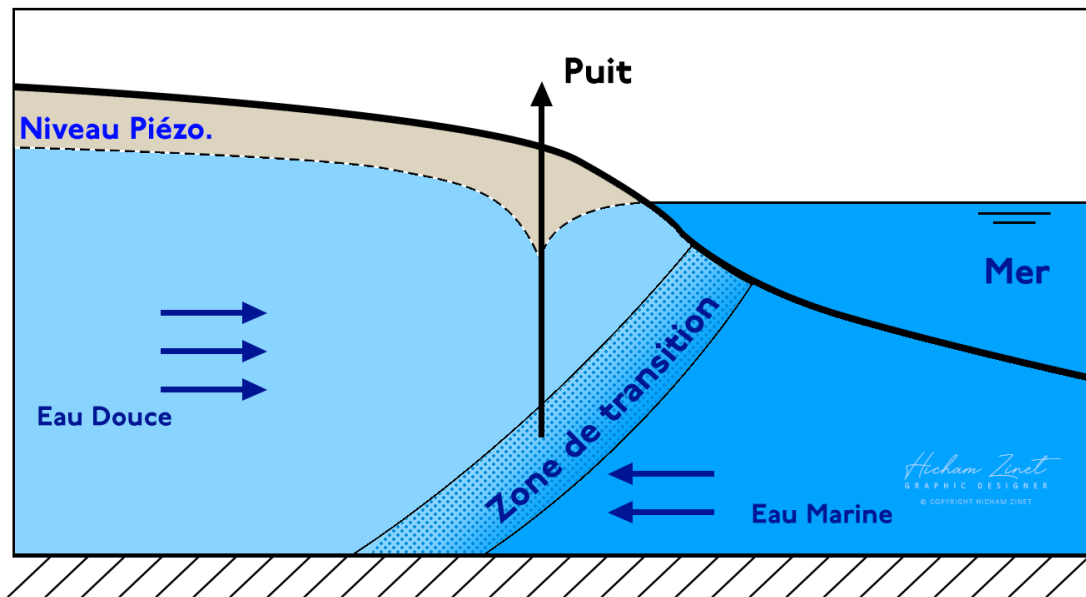


Fig.03 : Puits mal positionné

1.5. Facteurs déterminants dans l'évolution de l'intrusion marine :

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

1.5.1. Profondeur de la nappe :

Généralement, les nappes d'eaux souterraines dans les zones côtières circulent à des profondeurs généralement faibles, et qui diminuent au fur et à mesure qu'on se rapproche de la cote marine. Ce qui fait de ces secteurs, des zones considérées à priori comme les plus vulnérables au phénomène de l'intrusion marine. [6]

1.5.2. Débit de la nappe :

Avec les activités agricoles et les investissements réalisés dans les régions côtières, la demande en eau pour l'irrigation et pour l'alimentation augmente. Toute exploitation intense de la nappe côtière par creusements anarchiques des puits, va entraîner un déséquilibre hydrodynamique de l'interface «eau douce-eau salée marine». Cela se traduit par une diminution des débits souterrains et un abaissement du niveau de la nappe. Celui-ci va devenir inférieur à celui de la mer, ce qui va provoquer un écoulement des eaux marines vers l'aquifère côtier.

Ainsi, les aspects liés à l'exploitation d'un aquifère en zone côtière peuvent être énumérés comme suite : baisse du niveau de la nappe, pénétration du biseau salée vers les terres, salinisation des eaux de la nappe côtière à cause de cette pénétration (principalement dans les deux premiers kilomètres du rivage), abandon des puits à cause des fortes salinités des eaux...

Par ailleurs, les nappes d'eau souterraine côtières sont alimentées principalement par l'infiltration et la percolation des eaux de pluies efficaces. Le taux d'infiltration efficace conditionne l'évolution piézométrique et par conséquent l'évolution de la qualité des eaux souterraines. En effet, une importante infiltration efficace va favoriser une surélévation du niveau de la nappe et une augmentation de son débit, ce qui va permettre de chasser le biseau basé et empêcher son avancée vers le continent. [6]

1.5.3. Perméabilité :

L'intensité de la pollution des eaux souterraines (transport, vitesse de propagation des solutés,...) dépend essentiellement de la perméabilité des terrains aquifères. Dans les terrains à perméabilité d'interstice tels que les sables, la pollution ne se transmet qu'à une très faible vitesse, surtout s'il y a des particules argileuses. Dans les terrains à perméabilité de fissures (terrains cristallins et carbonatés), la vitesse de propagation des solutés est relativement plus rapide, elle est proportionnelle au degré de fissuration. Par contre, dans les terrains karstiques, la pénétration est rapide et souvent instantanée, la filtration est quasiment nulle. [6]

1.6. Le principe de Ghyben-Herzberg :

Le principe développé par **Ghyben (1888)** et **Herzberg (1901)** constitue le premier pas dans l'étude de l'intrusion saline et de l'interface entre l'eau douce et l'eau salée (**Fig.04**). La base de la formule est l'équilibre entre deux colonnes de fluides de densité différente. Dans un aquifère libre à l'équilibre hydrostatique, la position de l'interface entre l'eau salée et l'eau douce est liée à l'altitude de la surface de la nappe d'eau douce (**Fig.05**). À l'interface, l'égalité des pressions dans les deux fluides permet d'établir la formule de **Ghyben-Herzberg**, de laquelle on déduit la profondeur (**z**) de l'interface sous le niveau de la mer. [3]

$$\rho_s \cdot g \cdot z = \rho_f \cdot g \cdot (h + z)$$

Donc : $z = \frac{\rho_f}{\rho_f - \rho_s} \cdot h \dots \dots \dots (1)$

Avec :

ρ_f : La masse volumique de l'eau douce,

ρ_s : La masse volumique de l'eau de mer,

h : la charge en eau douce au-dessus du niveau de la mer.

Si $\rho_f = 1000 \text{ kg.m}^{-3}$ et $\rho_s = 1025 \text{ kg.m}^{-3}$, l'équation(1) donne $z = 40h$

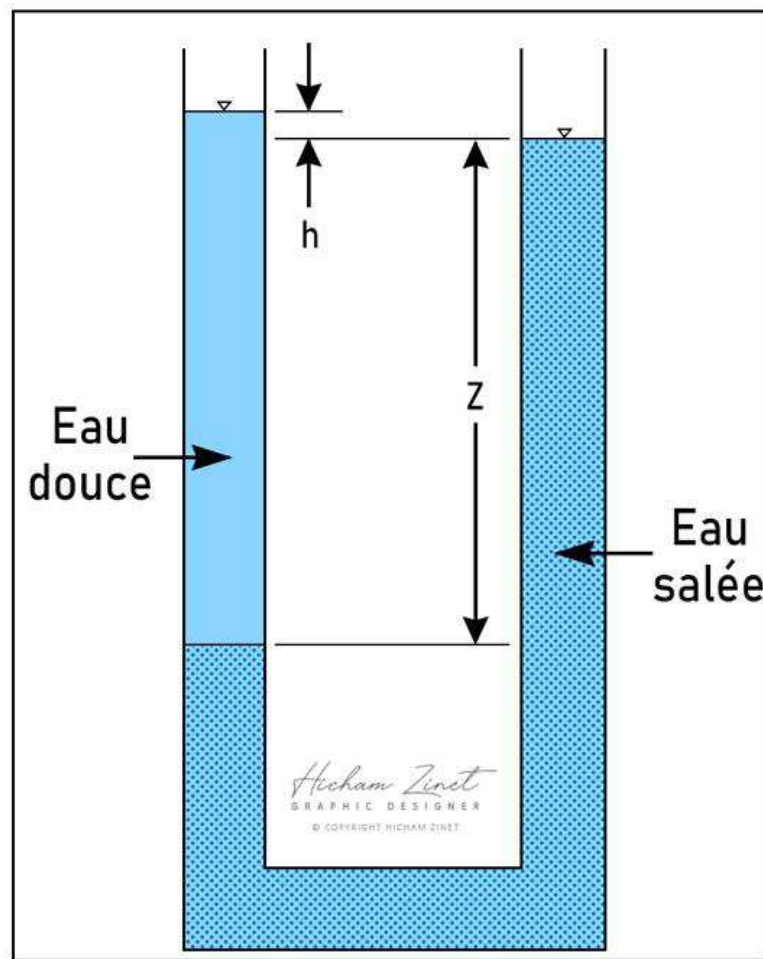


Fig.04 : Principe de Ghyben-Herzberg dans un tube en U contenant deux fluides de densité différente

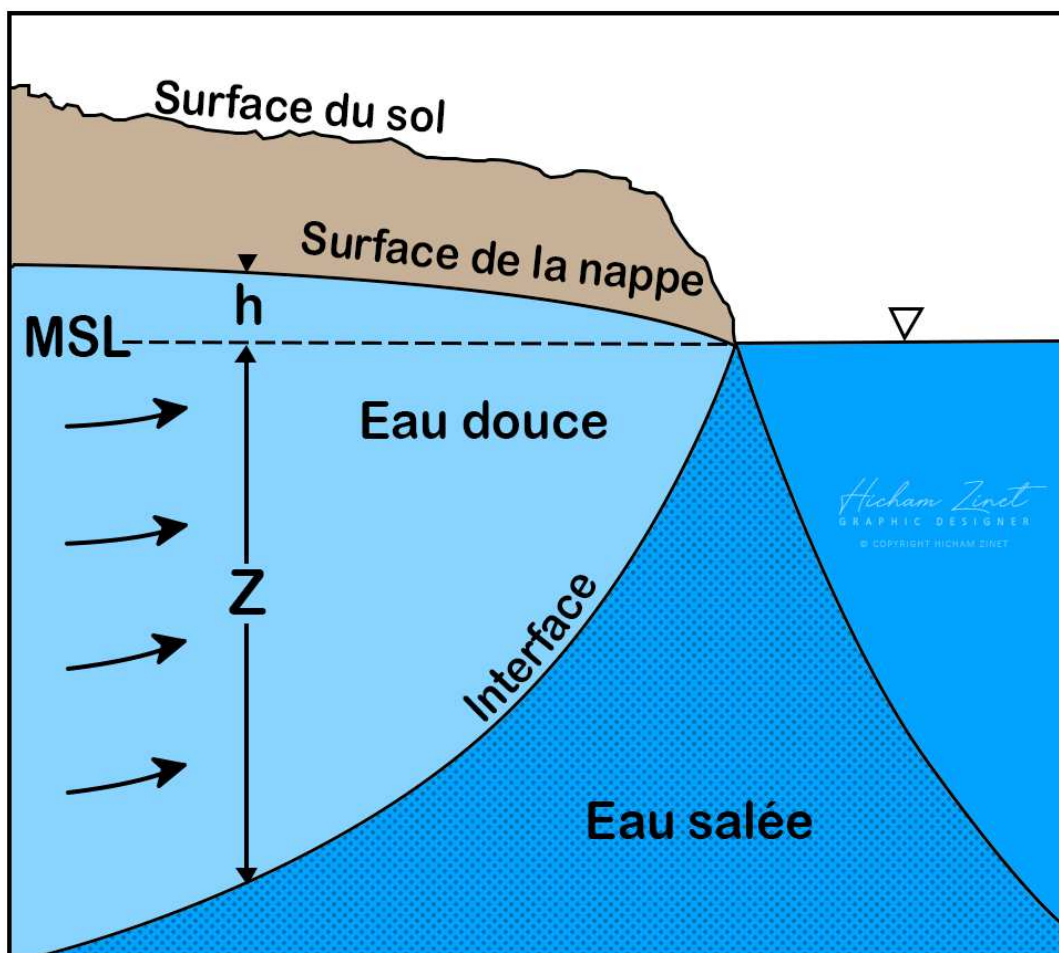


Fig.05 : Principe de Ghyben-Herzberg dans une coupe à travers un aquifère libre

1.7. Méthodes d'étude de l'intrusion marine :

La délimitation de l'interface eau douce-eau salée est très compliquée à déterminer, ce qui rend la lutte contre ce problème délicat, difficile et Nécessite une approche pluridisciplinaire. Plusieurs auteurs ont étudié le phénomène pour localiser la position de l'interface «eau douce - eau salée» par différentes méthodes tels que :

1.7.1. Étude géophysique :

La géophysique est un outil complémentaire indispensable à une étude hydrogéologique, elle complète les données d'un forage quand la zone d'étude est vaste et complexe. Les irrégularités sont généralement détectées de même que pour la puissance, l'allure et la structure de la formation étudiée. Prospection électrique (le changement des valeurs de résistivité) peut indiquer une intrusion marine.

1.7.2. Étude de la piézométrie :

La mesure du niveau des eaux souterraines est d'une importance fondamentale dans l'hydrogéologie. Ce niveau peut être utilisé pour plusieurs raisons, y compris

l'établissement d'une carte piézométrique, dont le but est de représenter à une date donnée, la distribution spatiale des charges et potentiels hydrauliques ; cette carte est nécessaire afin de connaître l'extension de l'aquifère, la direction et la vitesse de l'écoulement des eaux souterraines, ainsi que leur zones d'accumulation. Elle traduit le comportement hydraulique de la nappe (zones d'alimentation, d'exutoire et de surexploitation) et son évolution dans le temps.

L'interprétation des enregistrements piézométriques effectués selon des pas de temps réguliers ou variables, montre l'évolution piézométrique ponctuelle de la nappe suite à son alimentation ou à son exploitation locale.

1.7.3. Étude hydro chimique :

L'étude de la répartition dans l'espace, et l'évolution dans le temps des concentrations en ions majeurs constitue un atout important pour la mise en évidence du biseau salé. [7]

1.7.4. Profils de conductivité :

La conductivité électrique apparente s'exprime en milli-Siemens/mètre (mS/m) et dépend principalement de la teneur en eau, de la salinité (concentration ionique), de la teneur en argiles et de la nature lithologique des matériaux de la sub-surface. Le profil présente donc la variation de conductivité électrique en fonction de la profondeur, en une position spatiale donnée.

L'ordinateur dispose donc de toutes les données pour tracer point par point, qui indique :

- En abscisse (x) : La conductivité
- En ordonnée (y) : La profondeur

1.8. Impact de l'intrusion marine :

1.8.1. Effet sur sols :

Les effets délétères de l'intrusion marine ne sont pas ressentis seulement au niveau des caractéristiques qualitatives de l'eau souterraine mais surtout sur la fertilité des sols agricoles des champs irrigués. L'irrigation altère le bilan hydrique du sol en générant un apport d'eau supplémentaire; cet apport est toujours associé à un apport de sels. En effet, même une eau douce de la meilleure qualité contient des sels dissous et, si la quantité de sels apportée par cette eau peut sembler négligeable, les quantités d'eau apportées au fil du temps entraînent un dépôt cumulé de sels dans les sols qui peut s'avérer considérable. L'eau s'évapore mais les sels restent et

s'accumulent. Lorsque cette eau destinée à l'irrigation est initialement fortement salée, l'impact de la salinisation du sol est ainsi augmenté.

1.8.2. Effet sur l'économie :

La modélisation hydrogéologique d'un aquifère littoral peut être utilisée pour comprendre l'intrusion saline et tester différents scénarios. Ces scénarios permettent par exemple d'explorer l'impact des modifications de changement de niveau marin ou l'impact d'une évolution des prélèvements. Cependant, la réalisation d'une modélisation hydrogéologique nécessite de disposer d'une connaissance suffisante tant du point de vue de la géométrie que des paramètres physiques du réservoir souterrain. L'acquisition de données nécessite des investigations géophysiques ou la réalisation de forage avec des essais de pompages et des caractérisations hydro chimiques ; elle peut donc, en fonction des connaissances initiales et des enjeux, être coûteuse en temps et en argent.

La mise en exploitation des nappes côtières nécessite une bonne gestion de la ressource en eau afin d'éviter tout genre de pollution. Lorsqu'une pollution de l'eau douce par une eau salée par exemple a lieu, il est en général difficile d'en faire disparaître les effets. Il est alors préférable d'essayer de prévoir les risques d'intrusion marine, ce qui nous place directement devant un double problème complexe, associant la notion de quantité à celle de qualité. [4]

1.8.3. Effet sur la santé des consommateurs :

Processus et transformations chimiques du mélange eau douce/eau salée : L'effet le plus visible d'une intrusion saline dans un aquifère côtier ou insulaire est l'établissement d'un gradient de salinité de la côte vers l'intérieur de l'aquifère. La salinité, ou la concentration en ions chlorure (Cl^-) dans les eaux, sont un indice de cette pénétration. Le seuil de concentration des ions (Cl^-) fixé par l'Agence de Protection de l'Environnement est de 0,5 g/l pour que l'eau soit potable (la concentration de l'eau de mer est de 30 à 35 g/l). Par ailleurs, la salinisation de la masse d'eau entraîne tout un cortège de réactions chimiques et de processus dont il faut tenir compte puisqu'ils peuvent affecter la qualité de l'eau souterraine.

La formation de composés organo-halogénés est une autre conséquence importante à l'intrusion d'eau salée. La formation de composés organo-halogénés est une autre conséquence importante à l'intrusion d'eau salée.

Ces composés organo-halogénés sont sous haute surveillance dans les eaux de consommation des aquifères côtiers car ils sont reconnus comme cancérogènes. [4]

1.9. Les solutions proposées contre l'intrusion marine :

La meilleure prévention de nappes côtières qui présentent un risque d'intrusion marine c'est l'adoption d'un système d'exploitation adéquat :

- Le volume annuel prélevé de la nappe doit être inférieur à la recharge totale. Les dépressions des niveaux piézométriques peuvent entraîner un avancement du biseau salé.
- La position des pompes ou des crépines et le débit de pompage doit être bien étudié. Étant donnée les conditions climatiques et les exploitations intensives, la mise en place d'un réseau de surveillance du niveau de la nappe et de la salinité est nécessaire.

Lorsqu'on se trouve en face de ce problème, des méthodes de lutte sont recommandées à savoir :

- Réduire le pompage d'eau souterraine dans les zones sensibles.
- Arrêter le fonctionnement des forages qui captent l'interface eau douce - eau salée.
- La réalimentation artificielle de la nappe. Cette méthode est parfois coûteuse et demande des connaissances précises sur les paramètres hydrologiques et hydrogéologiques.
- La mise en place des barrières hydrauliques (la recharge de la nappe avec de l'eau douce le long de la côte sur les zones proches de la mer, soit par pompage des eaux salées de l'aquifère, soit en combinaison les deux méthodes).
- Faire des analyses chimiques et géophysique pour suivre et localiser l'interface eau douce- eau salée
- Étudier et modéliser la propagation du biseau salé. [8]

1.10. Conclusion:

Phénomène d'intrusion marine demeure une problématique universelle et constitue une menace sérieuse pour les réserves en eau douce souterraine des zones côtières. De plus, il s'avère que les activités anthropiques sont en partie responsables de cette pollution saline, notamment par le biais de pompage excessif en zone littorale surpeuplée et particulièrement en saison estivale. Cette forte demande de la ressource provoque un rabattement de la nappe et engendre une perturbation au niveau de l'interface eau douce - eau salée.

CHAPITRE 02

PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE

2.1. Situation géographique :

La plaine de la Mitidja est située au Sud d'Alger. Elle s'étend sur les territoires d'Alger, Boumerdès, Tipaza et Blida (**Fig.06**). D'une orientation WSW – ENE et d'une altitude moyenne de 50m, 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 Blidéen.
- 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 sous bassins sont :

- Le sous bassin occidental (Oued Nador).
- Le sous bassin du Mazafran (Oued Mazafran, Oued Chiffa, Oued Djer, Oued Bouroumi).
- Le sous bassin d'El Harrach (Oued El-Harrach et Oued Djemaa).
- Le sous bassin oriental (Oued Hamiz et Oued Réghaia).

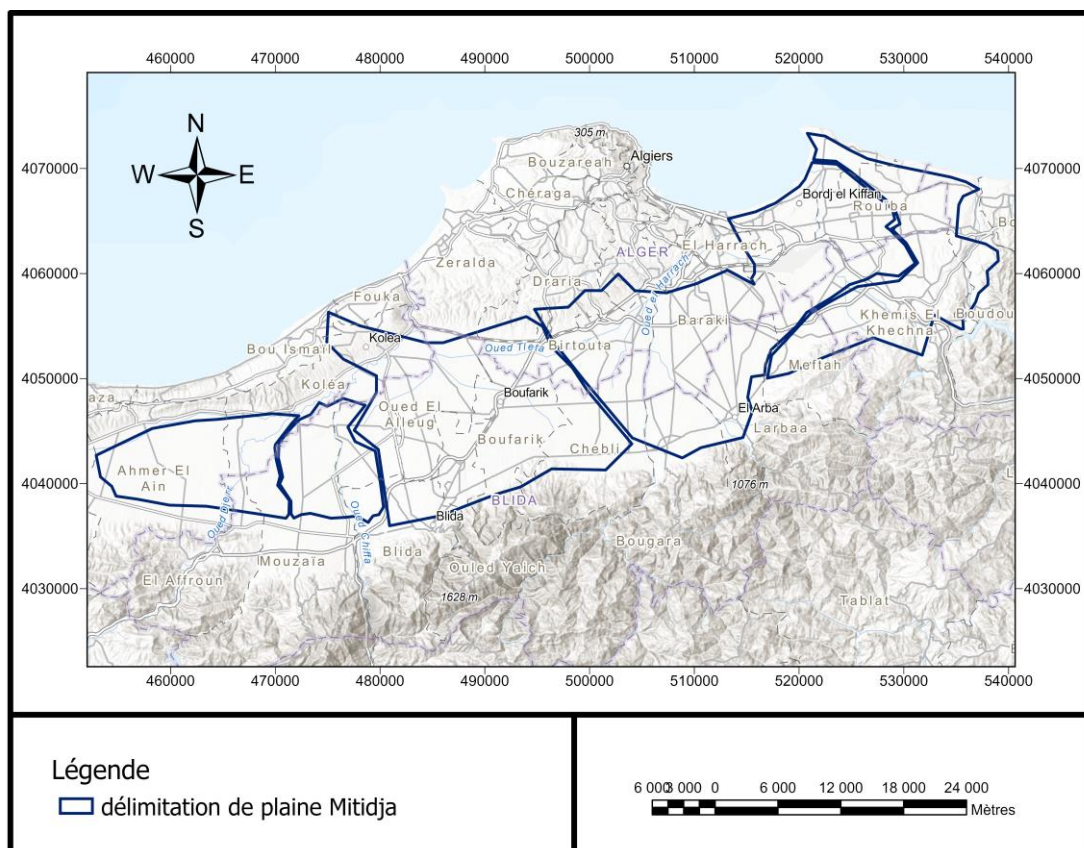


Fig.06 : Localisation du site d'étude dans la plaine de la Mitidja. Extrait de la carte de localisation de la région d'Alger.

2.2. Cadre géologique et hydrogéologique

2.2.1. Géologie et stratigraphie.

La succession lithologique rencontrée dans la plaine de la Mitidja [9] se présente comme suit :

a) Le Quaternaire :

❖ Les dépôts récents :

Ces dépôts recouvrent une partie relativement peu importante du remplissage de la plaine de la Mitidja. Ils comprennent les formations suivantes :

- Dépôts de sables dunaires
- Dépôts de lits des oueds actuels
- Dépôts de piémont de l'atlas

❖ Les formations du Mazafran et de Halloula :

Ces deux formations contenues dans la plaine sont séparées par les Oued Djer et Bou Roumi. À l'Ouest de l'Oued Djer, dans l'ancien lac Halloula, les dépôts sont limoneux et argileux de couleur généralement noire ou grise, et sont probablement des vases et/ou des argiles organiques, riches en matière organiques. Leur épaisseur est de 10m en moyenne. À l'Est de l'oued Djer, les limons de la formation du Mazafran se localisent le long de la cluse de l'Oued Mazafran. (fig.07)

❖ La formation de la Mitidja :

La formation de la Mitidja est constituée essentiellement de matériaux alluvionnaires sable, argiles sableuses, argiles graveleuses, graviers, galets, graviers et galets gréseux souvent argileux ou limoneux. Celle-ci est présente sur toute l'étendue de la plaine à l'exception de la partie occidentale où ces alluvions sont recouvertes par les marnes et argiles de la basse plaine du Mazafran et de Halloula. (fig.07)

❖ La formation d'El Harrach :

C'est une formation (dénommée par L. Glangeaud) constituée par des argiles plastiques jaunâtres dont la base est grise. On y rencontre des niveaux lenticulaires de graviers, de sables et de lits tourbeux de deux à six mètres d'épaisseur. Nous la retrouvons visible, en surface, dans la région d'El-Harrach, le long du versant Sud du Sahel et à l'Ouest de Hadjout. (fig.07). [9]

b) Le Tertiaire :**❖ Le Miocène et roches plus anciennes :**

Ces formations sont présentes sous le bassin de la Mitidja dans le cœur de l'anticlinal du Sahel et affleurent par endroits dans l'Atlas, sur la bordure Sud du bassin.

- Les formations les plus anciennes :

Elles sont constituées par les roches éruptives du tertiaire (rhyolites et andésites) sont visibles sur le pourtour SW de la Mitidja.

- Le Miocène :

Affleure le long de l'Atlas entre Meftah et Khemis El Khechna, et à l'Est de Oued Réghaia. Il est représenté par des marnes de 50 m d'épaisseur du Vindobonien contenant des lentilles de calcaires, et aussi des lentilles de grès d'épaisseur variable du Burdigalien. (**fig.07**)

❖ Le Pliocène :

Il est formé par des dépôts astiens et plais anciens bien distincts. Il est bien développé à l'Est de Koléa, à la limite (Sahel Mitidja) et apparaît très peu sur la bordure Sud près de Hadjout. Sur cette bordure méridionale le Pliocène est masqué par les formations quaternaires qui viennent recouvrir les formations du paléocène. Le Pliocène comprend :

- L'Astien :

L'Astien montre une lithologie variée composée de calcaires ou de calcaires sableux, grès, argiles calcaires de couleur jaune et des calcaires à faciès récifal ou subrécifal. L'épaisseur moyenne de cette série est située entre 100 et 130 m. La formation de L'Astien est bien développée sur le côté Sud de la Mitidja. Elle se trouve à des profondeurs allant de 250 à 300 m. On la rencontre particulièrement à l'est de Rouïba à de faibles profondeurs

- Le Plaisancien :

Il est constitué de marnes qui forment l'essentiel du bourrelet sahélien et une partie du remplissage de la Mitidja, et localement de bancs de grès faiblement glauconieux. Les affleurements du Plaisancien sont visibles sur le Sahel en dessous de l'Astien et dans la région de Khemis-El-Khechna où ils viennent reposer en discordance sur les formations miocènes. (**fig.07**). [9]

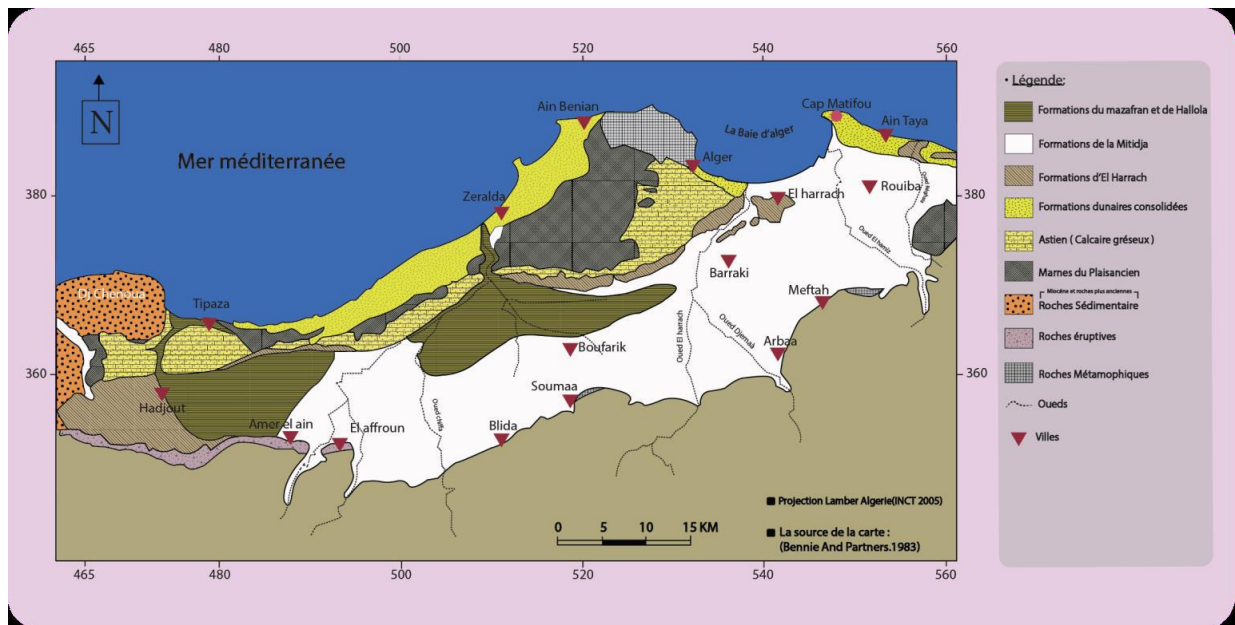


Fig.07 : Carte géologique de plaine de la Mitidja [9]

2.2.2. Hydrogéologie :

La plaine de la Mitidja est un bassin alluvial côtier formé par affaissement puis sédimentation, deux ensembles de réservoirs aquifères s'individualisent :

- L'aquifère gréseux de l'Astien
- L'aquifère alluvionnaire du Quaternaire

Ces deux ensembles sont séparés de manière plus ou moins continue par les marnes jaunes du Villafranchien d'El Harrach. Le substratum des deux aquifères est représenté par les marnes de Plaisancien. L'aquifère alluvionnaire est le plus important vu que sa limite supérieure affleure sur la majeure partie de son étendue d'où la réalimentation qu'il reçoit est beaucoup plus importante que celle reçue par l'Astien.

a) Aquifère Astien :

C'est une nappe qui s'étend sur la majeure partie de la plaine à des profondeurs allant de 200 à 400m. Ce réservoir aquifère est essentiellement gréseux ou gréso-calcaire. Il est alimenté par l'infiltration des eaux de pluie sur le sahel et le piémont de l'atlas ou il affleure et probablement par la nappe alluviale sus-jacente par drainance à travers la formation d'El Harrach (présence de sable et de gravier).

L'Astien est alimenté par les alluvions dans la partie piémont de l'Atlas, alors que dans la basse plaine d'El Harrach l'Astien alimente les alluvions. L'aquifère de l'Astien est directement réalimenté en eau dans les zones

d'affleurement situées principalement dans le Sahel. Ces zones sont faibles si on les compare à l'étendue de l'aquifère de ce fait la part de l'infiltration représente uniquement 7% de la réalimentation totale que reçoivent les nappes de la plaine. C'est pourquoi l'aquifère de l'Astien, malgré sa grande étendue ne possède qu'une importance limitée dans les ressources totales en eau de la Mitidja.

Les seuls exutoires sont constitués par un flux de drainance ascendant vers la nappe alluviale à travers la formation d'El Harrach et au moins un forage situé à Oued El Alleug. [10]

b) Aquifère Quaternaire (Alluvions de la Mitidja) :

Il correspond à une nappe alluvionnaire d'environ 100 à 130m d'épaisseur. Cette aquifère libre qui devient captif dans le bas de Mazafran sous les limons récent de la formation du Mazafran. Ce réservoir aquifère est composé de gravier, de sables plus au moins consolidés et les intercalations d'argiles. On observe une hétérogénéité et une évolution du facies du nord vers le sud avec une réduction des alluvions grossiers en allant vers les bordures du bassin. L'aquifère alluvial essentiellement alimenté par infiltration directe des précipitations et indirecte à travers des cours d'eau et les écoulements souterrains de l'astien par le biais de la formation d'El Harrach le long du sahel.

Les exutoires de cet aquifère sont plus important comparativement à l'aquifère Astien, ils sont assurés naturellement par le drainage des oueds dans leur cours aval et les fuites souterraines vers la mer (partie est de la plaine) et artificiellement par pompage des ouvrages de captage (puits et forages).

Cet aquifère est très exploité pour les besoins agricoles (irrigation), industriels et l'alimentation en eau potable des agglomérations.

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. [10]

2.2.3. Caractéristiques Hydrodynamiques

a) Transmissivité :

La transmissivité représente le produit de la perméabilité par l'épaisseur productive de l'aquifère, elle caractérise la facilité avec laquelle l'eau souterraine peut se déplacer.

Les transmissivités de l'aquifère astien varient entre 10^{-3} et $3.3 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, et $1.7 \cdot 10^{-3}$ à $3 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$. [11]

Les transmissivités de l'aquifère des alluvions varient entre 10^{-3} et $5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ avec des valeurs plus faibles dans le bassin de Halloula. La valeur médiane est de $1.5 \cdot 10^{-3}$ à $3 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$. [11]

b) Le coefficient d'emmagasinement :

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

Bennie et Partners, (1980-1981) donnent une valeur de $5 \cdot 10^{-6}$ à $5 \cdot 10^{-3}$ de l'aquifère astien, et des valeurs de l'ordre de $7 \cdot 10^{-3}$ concernant l'aquifère quaternaire. [11]

c) Perméabilité Verticale :

Ce paramètre caractérise l'écoulement vertical (drainance) entre les deux nappes. Aucune donnée n'existe pour le système aquifère de la Mitidja. Toute fois Bennie et Partners (1983) considèrent que ces perméabilités sont très faibles.

Mac Donald (1992) estime que la perméabilité verticale des marnes jaunes de la formation d'El Harrach et celle de la formation limoneuse du Mazafran est comprise entre 10^{-7} et 10^{-8} m/s . La perméabilité verticale de la Mitidja est d'environ $6 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$ et celle de l'Astien 10^{-5} m/s . Cependant pour les aquifères, les perméabilités verticales ont moins d'influence sur les écoulements horizontaux. [11]

2.3. Présentation de la zone d'étude

2.3.1. Situation géographique

a) La Baie d'Alger :

La baie d'Alger fait partie de l'unité hydrogéologique de la Mitidja. Elle s'étend de Bordj El Bahri à El Harrach. Elle est limitée au Nord par la mer méditerranée, à l'Est par l'oued Réghaia, à l'Ouest par l'oued El Harrach et au Sud par une extension d'une dizaine de kilomètres vers le continent.

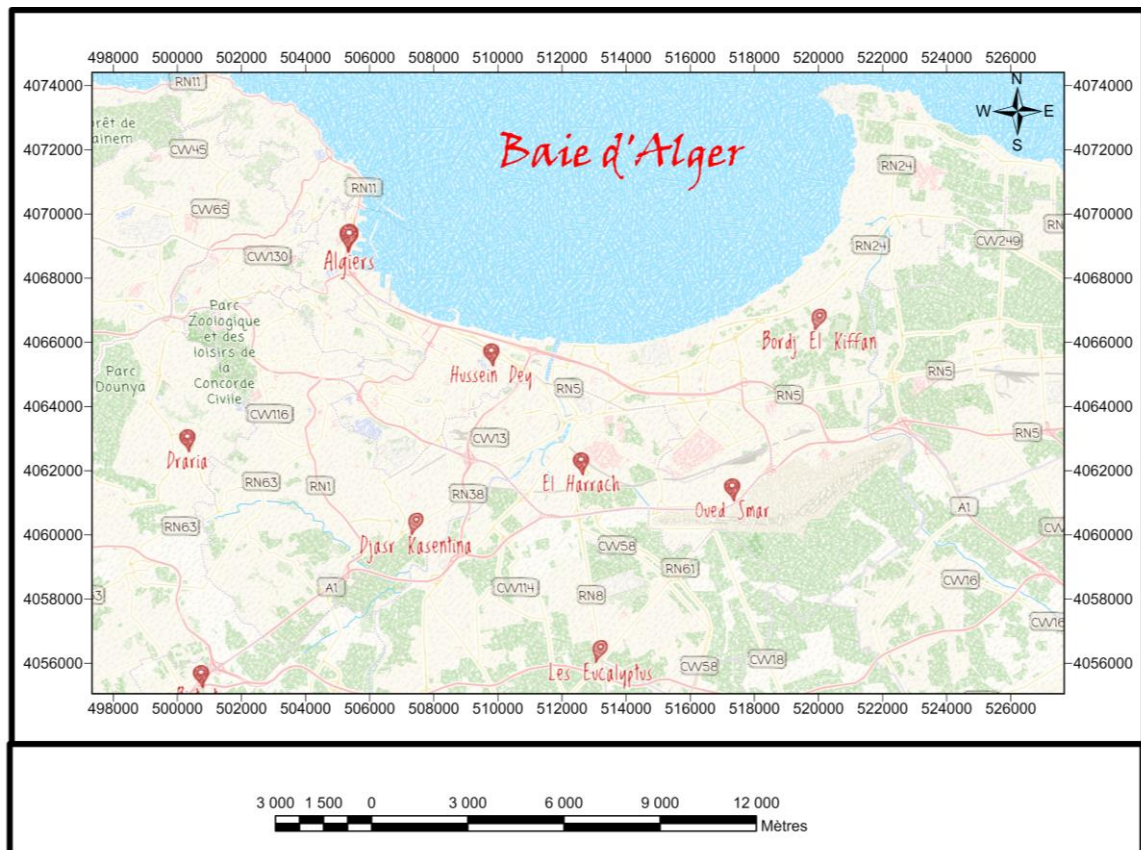


Fig.08 : Localisation du site d'étude la baie d'Alger

2.3.2. Hydrographie :

a) Réseau hydrographique :

Cinq oueds principaux drainent la plaine de la Mitidja (**Fig.09**). Ce sont d'Ouest à l'Est : Oued Nador (réunion des oueds Bou Ardoun, Meurad et Bourkika), Oued du Mazafran (résultant d'oued Djer grossi de Bou Roumi et la Chiffa avec l'oued Kébir), Oued El Harrach (reçoit sur sa rive droite l'oued Djemaa et l'oued Smar) et Oued El Hamiz et Oued Réghaïa. Ces trois derniers oueds se jettent directement dans la mer sans rencontrer d'obstacles de relief. [12]

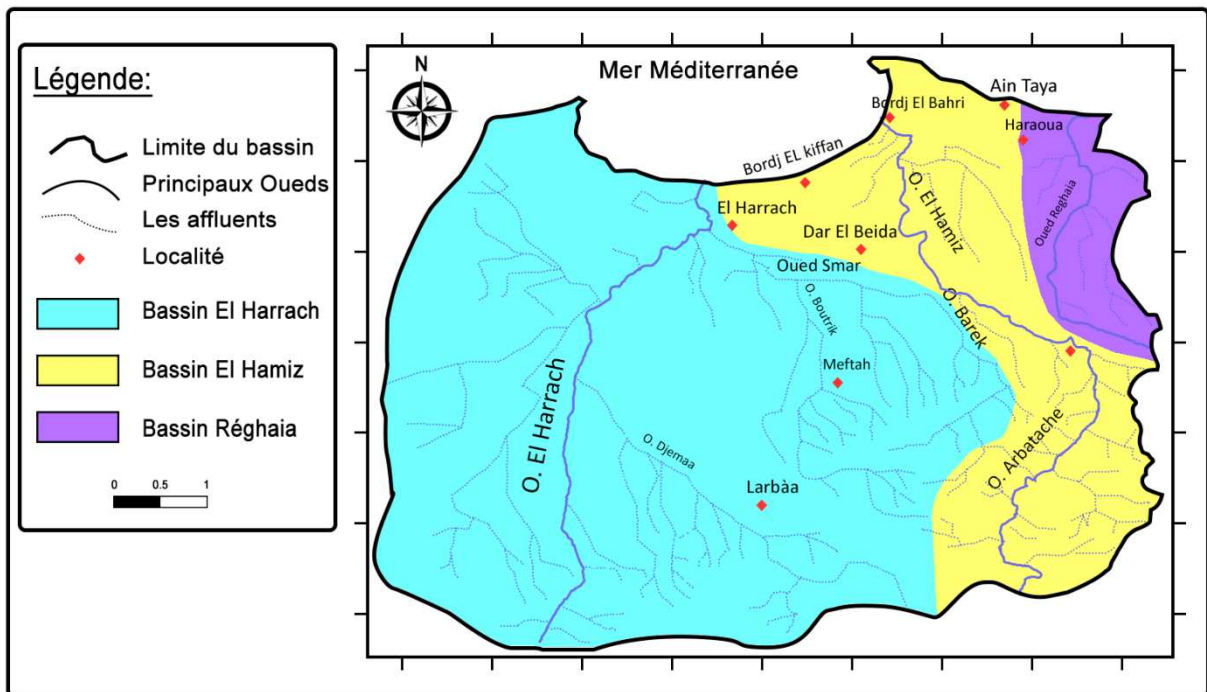


Fig.09 : Sous bassins versants de la Mitidja Est.

La plaine de la Mitidja orientale est d'une superficie de 510 km². Elle est partagée en deux bassins fluviaux principaux (**Fig.09**) qui sont :

- Le bassin de l'oued El-Harrach : Sa superficie est de 1236 km².
- Le bassin de l'oued Hamiz : il occupe une superficie de 370 km², situé à l'est de la plaine.

Vu la faible superficie du bassin de Réghaia, il est regroupé dans le bassin du Hamiz. Le réseau hydrographique de la plaine de la Mitidja orientale est principalement représenté par trois oueds principaux : Oued El Harrach Oued Hamiz et Oued Réghaia. Ces derniers la traversent perpendiculairement selon des directions méridiennes, avec plusieurs plans d'eau naturels ou artificiels comme le lac Réghaia et le barrage de Hamiz.

- **Oued El Harrach** : il prend naissance dans les monts de Tablât. Cet oued est dévié plusieurs fois. Actuellement il traverse la plaine du sud au nord pour s'infléchir vers le N.E au pied du sahel jusqu'à la cluse d'El Harrach. Vers le milieu de la plaine, oued El Harrach reçoit sur sa rive droite oued Djemaa, qui conclue avec celui-ci avant de se jeter dans la mer. Les affluents de cet oued sont oued Djemââ, oued Smar et oued Boutrik.
- **Oued El Hamiz** : dont les affluents sont l'oued Arbattache, l'oued sekhine. Cet oued qui prend une direction N.O à partir de Fondouk jusqu'à Hamadi se redresse jusqu'au Sahel pour se jeter dans la mer au sud de cap Matifou (Bordj El Bahri).

- **Oued Reghaia** : cet oued est considéré comme un oued secondaire. Ces oueds côtiers présentent un certain nombre de caractéristiques communes : - Ils prennent tous naissance dans l'Atlas et sont tous de dimensions restreintes. - Tous présentent un profil longitudinal divisé en deux parties très distinctes. - Leur pente est très forte en montagne. - Dans un passé récent elles ont été constamment maintenues par le jeu tectonique. [12]

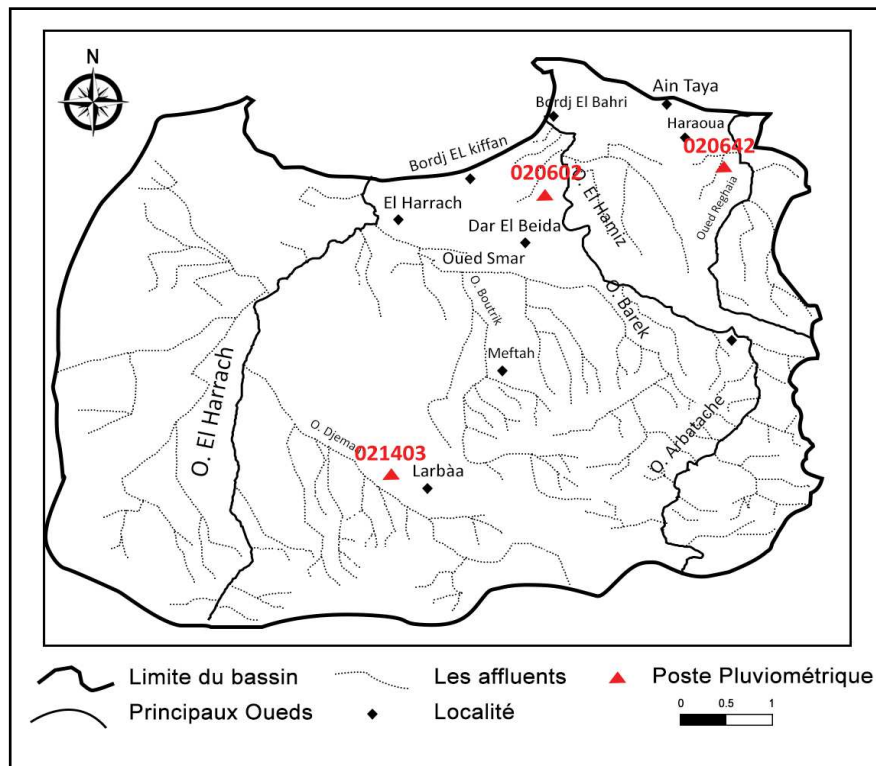


Fig.10 : Carte de réseau hydrographie

2.3.3. Caractéristiques morpho métriques

a) Paramètres géométriques

Pour l'estimation de ces paramètres nous avons regroupé les deux sous bassins versants Hamiz et Réghaia sous un seul sous bassin versant dénommé Hamiz-Réghaia qui occupe 370 km² de la superficie de la Mitidja Est.

Les caractéristiques géométriques et morpho métriques du bassin du Hamiz sont représentées dans le tableau suivant :

Tableau 01 : paramètres géométriques des sous bassins versants [7].

Paramètres	Unité	Formule de Calcule	valeur
Superficie (S)	Km ²		370,9
Périmètre (P)	Km		127,5
Longueur du talweg Principale (L)	Km		
Indice de compacité de Gravelius (K _c)	%	$Kc = 0,28 \frac{P}{\sqrt{A}}$	1,7
Longueur du rectangle équivalent (L)	Km	$L = \frac{Kc\sqrt{A}}{1,12} \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{Kc} \right)^2} \right]$	53,91
Largeur du rectangle équivalent (l)	Km	$l = \frac{Kc\sqrt{A}}{1,12} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{Kc} \right)^2} \right]$	7,62
Facteur de forme (R _f)		$\frac{L^2}{S}$	7,83
Indice de conformité (I _c)		$\frac{S}{L}$	6,88
Coefficient de compacité		$\frac{L}{l}$	7,075

Avec un indice de compacité de l'ordre de **1.7** qui est supérieur à **1**, notre bassin est de forme allongée qui traduit un temps de concentration et de ruissellement assez long, donnée confirmé par la forme du rectangle équivalent (**L>2l**).

b) Paramètres de relief :

L'influence du relief sur l'écoulement se conçoit aisément, car de nombreux paramètres hydrométéorologiques varient avec l'altitude (précipitations, températures, etc.) et la morphologie du bassin. En outre, la pente influe sur la vitesse d'écoulement. Le relief se détermine lui aussi au moyen d'indices ou de caractéristiques suivants :

○ La courbe hypsométrique :

La courbe hypsométrique fournit une vue synthétique de la pente du bassin, donc du relief. Cette courbe représente la répartition de la surface du bassin versant en fonction de son altitude. Elle porte en abscisse la surface (ou le pourcentage de surface) du bassin qui se trouve au-dessus (ou au-dessous) de l'altitude représentée en ordonnée. Elle exprime ainsi la superficie du bassin ou le pourcentage de superficie, au-delà d'une certaine altitude. [12]

Tableau 02 : répartition altimétrique d'altitudes du bassin versant de l'oued El Hamiz [12]

Tranche d'altitude (m)	Centre de classe (m)	surface Ai (km²)	%Ai	% Ai cumulé	Ai/Hi
0 - 200	100	175,14	42,79	100	17514
200 - 400	300	49,12	12	57,21	14736
400 - 600	500	85,5	20,89	45,2	42750
600 - 800	700	58,33	14,25	24,31	40831
800 - 1000	900	35,08	8,57	10,06	31572
1000 - 1200	1100	6,09	1,49	1,49	6699
		409,26			184102

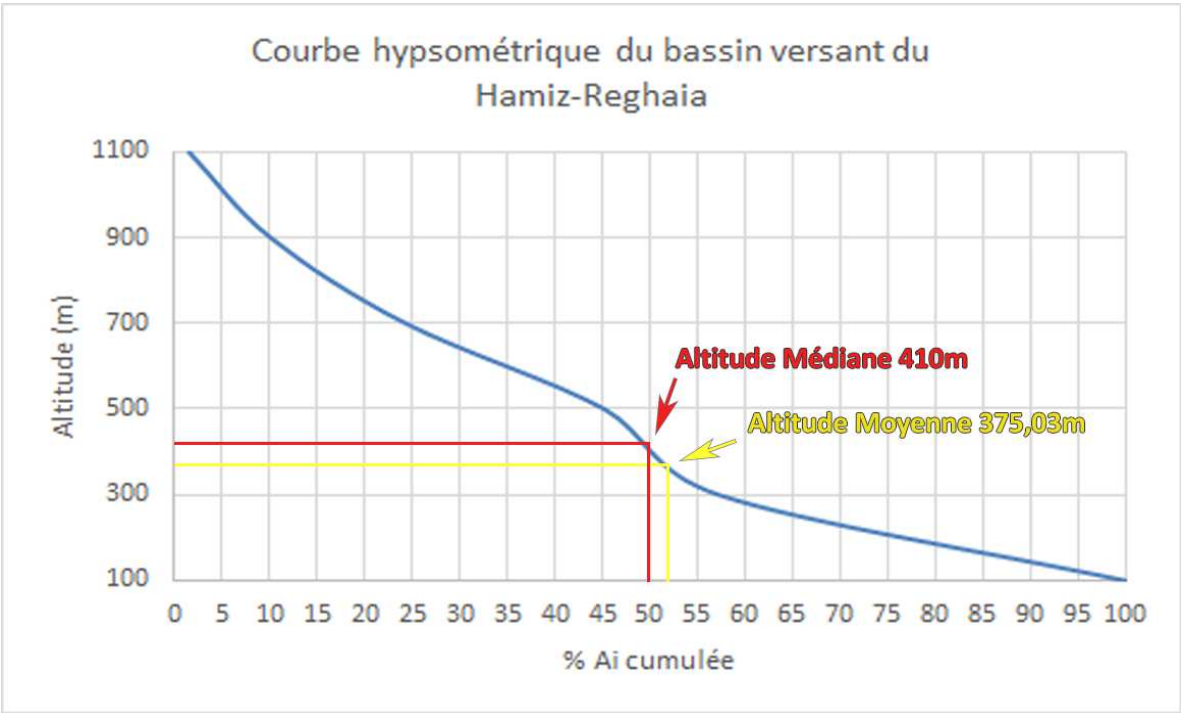


Fig.11 : Courbe hypsométrique du bassin versant du Hamiz-Réghaia

La courbe hypsométrique du bassin de Hamiz-Reghaia (Fig.07), montre que plus de 50% de la surface du bassin correspond à des altitudes allant de 0 à 450 m, et que les altitudes supérieures à 300 m sont peu étendues.

○ **Les altitudes caractéristiques :**

Le tableau ci-dessous résume les différentes altitudes et l'indice de pente globale.

Tableau 03 : Les caractéristiques de relief de bassin versant du Hamiz-Reghaia [12]

Paramètres	Unité	Formule de calcule	Valeur
Altitude max (H _{max})	m		1100
Altitude min (H _{min})	m		28
Altitude Médiane (H _{méd})	m		410
Altitude moyenne (H _{moy})	m	$H_{moy} = \frac{1}{A} \sum H_i . A_i$	375,03
La Dénivelée totale (D _t)	m	H _{max} - H _{min}	1072
Indice de pente globale (I _g)		$I_g = \frac{h5\% - h95\%}{L} = \frac{D}{L}$	19,88

L'indice de pente global montre que le sous bassin versant Hamiz-Réghaia a un relief relativement faible, traduisant ainsi une infiltration favorable optimale qui dépend du ruissellement. [7]

2.3.4. Paramètres Physiques et géomorphologiques du sous bassin versant d'El-Harrach :

Le Tableau 04 représente les différentes caractéristiques physiographiques du sous bassin Versant :

Tableau 04 : Paramètres géométriques du bassin versants d'oued El Harrach. [9]

Paramètres	Paramètres géométriques		Paramètres de forme			Paramètres de relief	
Sous Bassin Versant	Surface (Km ²)	Périmètres (Km)	Indice de compacité Gravelius (KC)	Longueur de rectangle équivalent (Km)	Largeur du rectangle équivalent (Km)	Altitude moyenne (m)	Indice de pente globale (I _g) M/Km
El Harrach	1236,28	188,17	1.5	78.30	15.80	430	13.8

- L'Indice de compacité traduit une allure allongée du sous bassin versant d'El Harrach. (Fig.03)
- La valeur de l'indice de pente global « I_g » caractérise un relief peu accusé qui permet un écoulement long et par conséquent une infiltration favorable des eaux superficielles

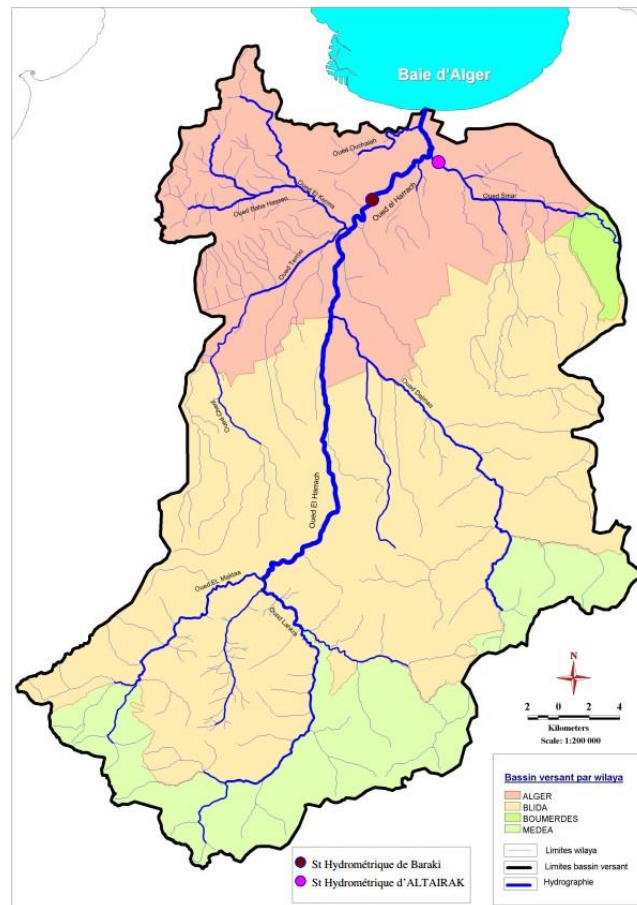


Fig.12 : Réseau Hydrographique du bassin versant de l'oued El-Harrach. [12]

2.4. Étude hydro-climatologique :

2.4.1. Introduction :

Les réserves en eaux souterraines de la Mitidja orientale dépendent des paramètres hydro climatiques. Cependant, le fonctionnement des aquifères et l'évolution des niveaux piézométriques dépendent principalement des précipitations. Il s'avère donc nécessaire d'étudier l'aspect climatique de notre région d'étude.

2.4.2. La pluviométrie :

Les précipitations constituent la composante fondamentale de l'hydrologie. La connaissance de ces apports d'eau au sol est essentielle pour appréhender l'état des réserves, la recharge des nappes et le régime des cours d'eau.

Les données pluviométriques sont recueillies au niveau de trois stations réparties de façon plus ou moins homogènes sur le sous bassin versant d'oued El-Harrach. Nous avons choisi ces stations climatiques en fonction de leurs répartitions par rapport à notre région d'étude et de la qualité des données requises. [12]

Les stations de Réghaia, Dar El Beida et Hamiz Bge ont été choisies afin de calculer les précipitations moyennes mensuelles et annuelles durant une période de **18 ans (2000-2018)** (**fig.13**).

Les différentes caractéristiques relatives à ces stations sont regroupées dans le tableau suivant :(**Tableau 05**)

Tableau 05 : Caractéristiques des stations pluviométriques. [12]

Station	Code ANRH	Cordonnées Lambert		Altitude (m)
		X	Y	
Dar El Beida	020611	547,400	379,600	25
Réghaia	020632	557820	382230	20
Hamiz Bge	020602	558,550	367,400	130

a) Précipitations moyennes mensuelles :

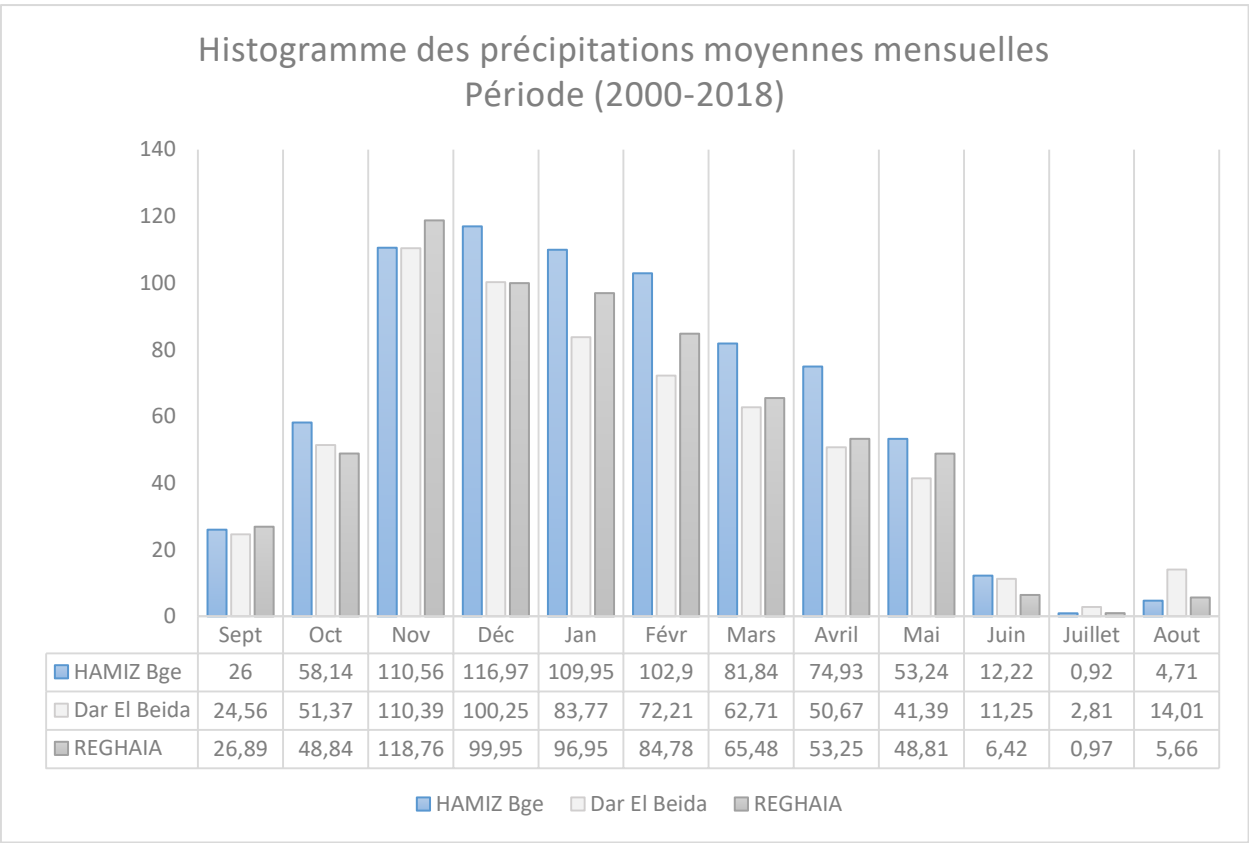


Fig.13 : Histogramme des précipitations moyennes mensuelles Période (2000 - 2018)

La pluviométrie moyenne mensuelle calculée sur **18 ans (2000 - 2018)** dans les stations climatiques Reghaia, Dar El Beida montre (**fig.13**) :

- Une saison pluvieuse qui s'étend du mois de novembre à avril, avec une valeur maximale de l'ordre de **118.76 mm** enregistré au mois de novembre au niveau de la station de Reghaia.
- Une saison sèche qui s'étend du mois de mai à octobre avec une valeur minimale de l'ordre de **0.92 mm** enregistré au mois de juillet au niveau de la station de Hamiz Barrage.
- Le mois le plus pluvieux à la station de Réghaia est novembre avec une valeur maximale de l'ordre de **118.76 mm**, Janvier pour la station de Hamiz Bge avec **116.97 mm**.
- Les précipitations sont très irrégulières d'une année à l'autre. Leur répartition au cours de l'année n'est pas homogène. Elles dépendent de plusieurs facteurs qui sont la latitude et la continentalité.

b) Précipitations moyennes annuelle :

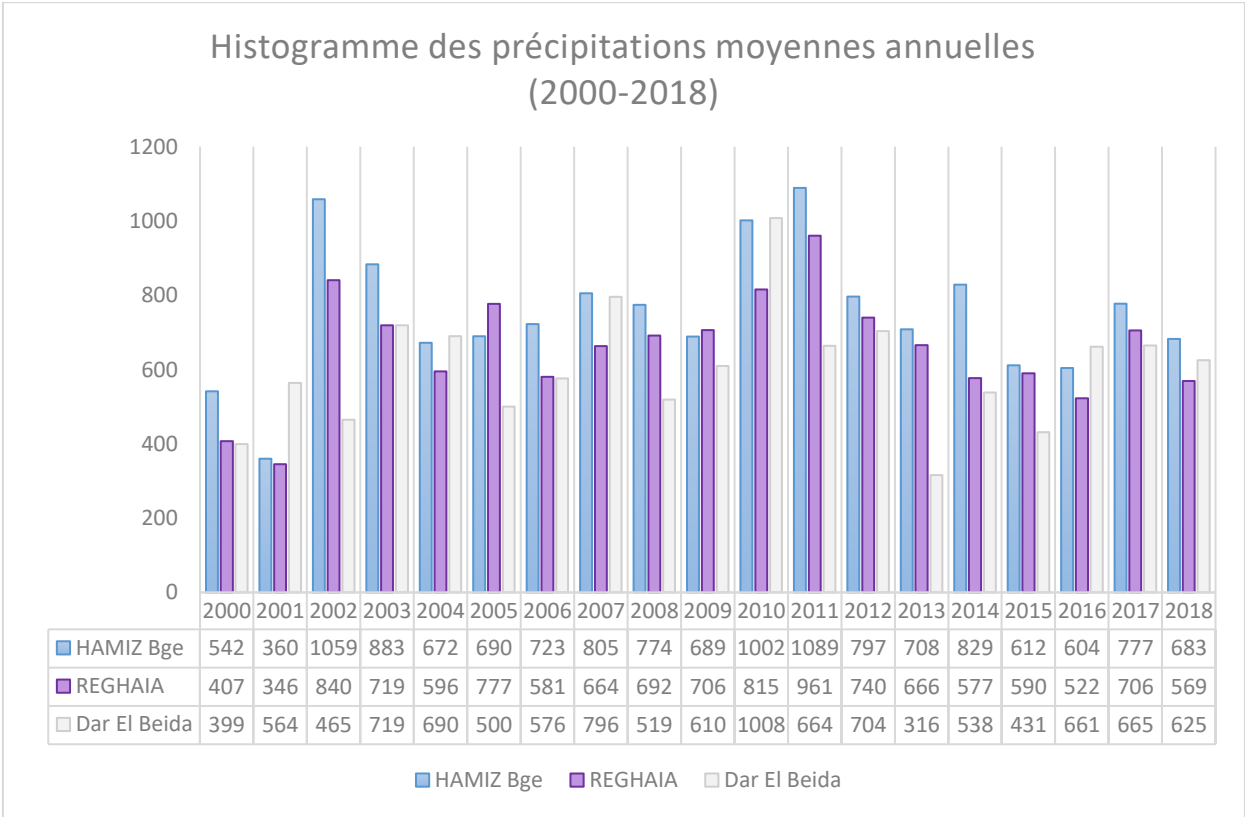


Fig.14 : Histogramme des précipitations moyennes annuelles (2000-2018)

La pluviométrie moyenne annuelle calculée sur une période de **18 ans (2000 - 2018)** dans les stations climatiques Hamiz barrage, Réghaia et Dar El Beida montre (fig.14) :

- La pluviosité moyenne annuelle aux différentes stations est de **670 mm**, avec une valeur minimale de **316 mm** enregistrée **en 2013** à la station de Dar El Beida et un maximum de **1089 mm** en **2011** dans la station de Hamiz Barrage.
- La pluviométrie annuelle calculée varie dans le temps et dans l'espace. Cette pluviosité varie de **316** à **1089 mm** durant la période de **(2000 - 2018)**. À cette irrégularité annuelle, s'ajoute une irrégularité interannuelle, les années humides pouvant être deux fois plus arrosées que les années sèches.

2.4.3. La Température :

La température permet de caractériser le régime climatique d'une région. Pour calculer la température mensuelle de notre région sur une période de **33** ans **(1985 - 2018)** (**fig.15**), le choix de la station des relevés des températures s'est fait sur la station de Dar El Beida, vu que cette station possède des données sur une période assez importante.

Notons aussi que les autres stations considérées pour les précipitations (Réghaia et Dar El Beida) ne disposent pas de mesures de température.

a) Température mensuelle et annuelle

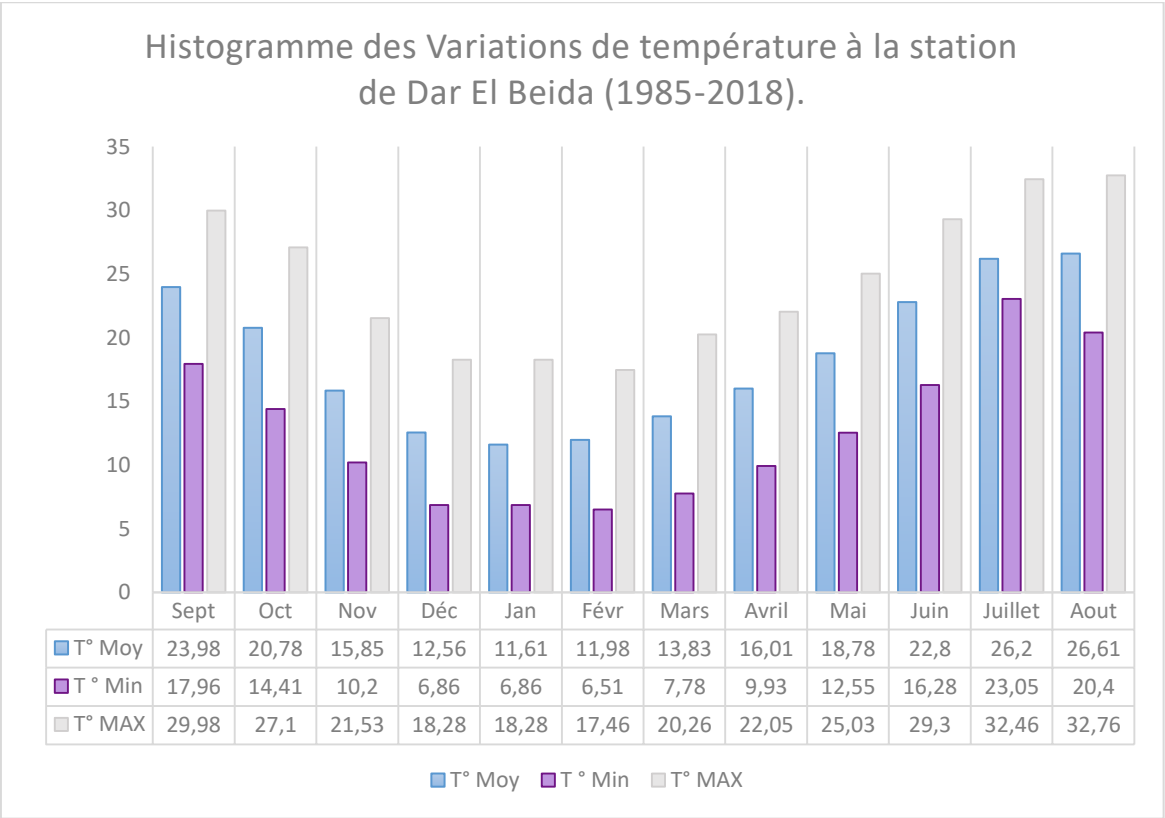


Fig.15 : Histogramme des Variations de température à la station de Dar El Beida. (1985-2018).

L'analyse des valeurs mensuelles moyennes enregistrées au niveau de la station Dar EL Beida pendant **33** ans de **(1985 - 2018)**. (**Fig.15**), montrent :

- Une température maximale mensuelle de l'ordre de **32.76 °C** en août et une température minimale mensuelle de **6.51 °C** enregistrée au mois de février (**Fig.15**)
- La saison hydrologique est subdivisée en deux périodes :
 - Une période froide (saison humide) qui débute au mois de Novembre jusqu'au mois de mai .La température moyenne la plus basse enregistrée dans cette saison est de **11.61 °C** en mois de janvier.
 - Une période chaude (saison sèche) débute en mois de juin jusqu'au mois d'octobre. La température moyenne la plus élevée enregistrée dans cette saison est de **26.61 °C** en mois d'Août.

2.5. Socio-économique :

2.5.1. Population :

La population de la plaine de la Mitidja a connu un croissement démographique très rapide (qui dépasse les **7** million d'habitants) d'après le recensement de **2015**. D'ouest en Est, la plaine traverse successivement les wilayas de Tipaza, de Blida, d'Alger, de Boumerdès et l'extrême nord-est de Médéa. De nombreuses agglomérations occupent les lisières de la Mitidja, dont quatre importants centres urbains situés aux points cardinaux :

Alger au nord, Blida au sud, Médéa au sud-est, Boumerdès à l'est et Tipaza à l'ouest, le centre de gravité étant occupé par Boufarik. [9]

2.5.2. Végétation et agriculture :

La plaine est considérée comme l'une des régions les plus fertiles d'Algérie. La majorité de la zone est irriguée par pompage privé des eaux souterraines de la nappe quaternaire (de l'ordre de **17 000 ha**). Le couvert végétal joue un rôle important dans le comportement hydrologique du bassin versant et une influence mécanique sur le ruissellement superficiel.

La plaine de la Mitidja est une région agricole très intensive en raison de sa topographie et de sa fertilité. Les activités agricoles les plus répandues sont l'arboriculture et les cultures maraîchères.

La végétation en tant que facteur de pédogénèse a été presque complètement détruite par une exploitation intensive, autant dire qu'aujourd'hui, elle n'existe presque plus. Cependant, les forêts de Réghaia

et le bois de Boulogne au Sud de la ville de Larbaa sont parmi les seuls vestiges de cette végétation naturelle. Cette végétation est constituée, principalement, d'une association de chêne-vert et d'épais bosquets de maquis méditerranéen. Cette végétation naturelle exerçait un rôle prépondérant dans l'évolution des sols. [9]

2.5.3. Industrie :

La région est l'une des plus importants pôles industriels de l'Algérie (zone industrielle de Réghaia et Rouïba). L'image de cette région se caractérise par le poids des industries chimiques et agro-alimentaires (sucrieries, unités laitières.). En plus de ces branches, la région est connue aussi par ses industries de textile, de conserves de poissons, de plastique et produits pharmaceutiques. [9]

Conclusion :

Ce chapitre a permis de caractériser la zone d'étude des points de vue climatologique géologique et hydrogéologique.

La baie d'Alger est caractérisée par un climat méditerranéen.

L'étude géologique montre l'existence de deux ensembles de terrains, l'un sédimentaire et l'autre métamorphique. Les formations dunaires et alluvionnaires d'âge Quaternaire constituent l'une des roches réservoir du système aquifère de la Mitidja.

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

- L'aquifère contenu dans les calcaires et grès de **l'Astien**.
- Les alluvions du **Quaternaire** (Soltano-Tensiftien) qui reposent sur les marnes du Plaisancien formant la limite étanche de presque tout le bassin. Ces deux aquifères sont séparés par la formation d'El Harrach, sauf dans la partie Est où ils sont en contact direct.

CHAPITRE 03

MÉTHODOLOGIE DU TRAVAIL

3.1. Introduction :

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

- ❖ Première partie : correspond à des missions de terrain sur la Baie d'Alger (Réseau d'observation de la nappe installé par l'ANRH : mesure physico chimique et profils de conductivité).
- ❖ 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 et Photoshop CC 2020) pour divers domaines.

3.2. Partie Terrain :

Afin d'examiner l'évolution de mesure sur terrain et prélèvement, nous avons effectué 2 missions de terrain (les hautes eaux) (17, 18 et 19 février et 13, 16, 17 et 18 Août 2020). Les points échantillonnés lors de ces missions de terrain sur la carte suivant :

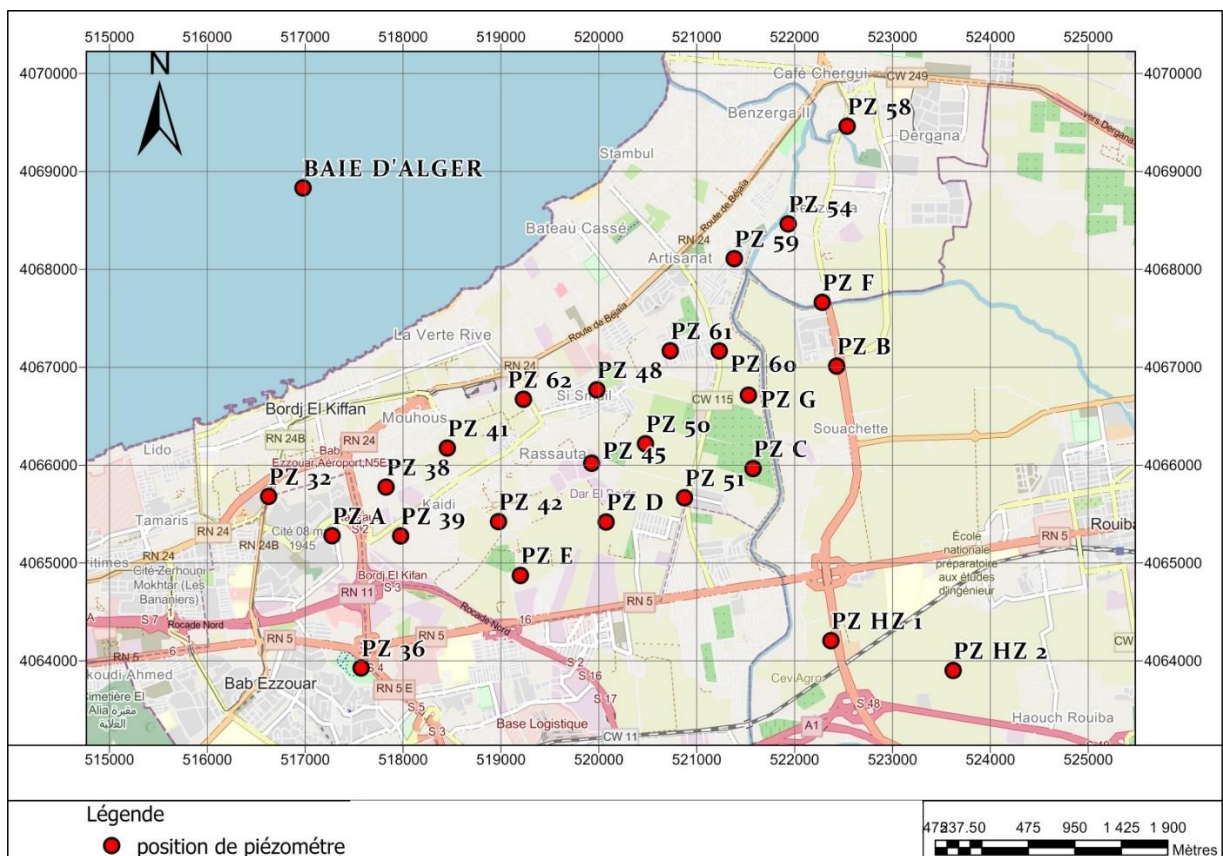


Fig.16 : Répartition des piézomètres de la baie d'Alger

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

Cette équipe était composé de :

- ✓ Un Ingénieur hydrogéologue (Mohamed SADAT)
- ✓ Deux étudiants de Master 2 (Hicham ZINET et Nassima BECHERAIR)
- ✓ Un chauffeur.

3.2.1. Matériels utilisés :

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

a) Véhicule de terrain :



Fig.17: Voiture utilisées pour le déplacement sur terrain

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



Fig.18: Sonde multi paramètres utilisée pour la mesure de différents paramètres

c) Escabeau :**Fig.19 : Escabeau utilisé****d) Une sonde multi paramètres sans fil :****Fig.20 : Sonde utilisée pour les mesures sur terrain.(16/08/2020)**

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



Fig.21 : Échantillons prélevés sur terrain avec l'étiquettes.(17/08/2020)

3.2.2. Mesure du niveau statique :

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



Fig.22 : Mesures du niveau statique sur les piézomètres au niveau de la Baie d'Alger.
(16/08/2020)

Tableau.06 : Résultats de la campagne piézométrique sur terrain de la Baie d'Alger Février et Aout 2020.

NOM	Date	Profondeur du NS en mètre
PZ 58	17/02/2020	11,75
PZ 60	17/02/2020	21,5
PZ 51	17/02/2020	26,55
PZ D	18/02/2020	24,8
PZ 48	18/02/2020	19,85
PZ 40	18/02/2020	32,21
PZ 38	18/02/2020	17,8
PZ B	17/02/2020	25,2
PZ F	17/02/2020	20,8
PZ 36	18/02/2020	25,7
PZ HAMIZ 1	13/08/2020	34
PZ HAMIZ 2	16/08/2020	38.5
PZ B	16/08/2020	26
PZ 54	16/08/2020	13,7
PZ 61	16/08/2020	18,6
PZ 62	17/08/2020	21,1
PZ 41	17/08/2020	24
PZ E	17/08/2020	27

3.2.3. Mesure de la conductivité :

À l'aide de la sonde multi paramètres a différent profondeur, nous avons mesuré la conductivité des piézomètres de baie d'Alger a différent profondeur.



Fig.23 : Mesure de conductivité PZ B



Fig.24 : Mesure de conductivité PZ Hamiz 2



Fig.25 : mesure de conductivité PZ F



**Fig.26 : Mesure de conductivité
PZ 38**



**Fig.27 : Mesure de conductivité
PZ F**

❖ Résultats de mesure de conductivité et TDS :

Nom	Profondeur (m)	CE (mS/cm)	TDS
PZ 58	11.75	1.66	1098
	24.65	2.7	1850
	25.6	4.2	2900
	25.45	7.03	4640
	28	9.11	6010
	32.65	10.85	7200
	39.8	14.9	9830
	40.3	19.26	12650
	47	19.3	12710
PZ 60	21.5	2.5	1665
	26.5	32.4	3050
	32.4	7.92	5220
	44.6	11.22	7400
PZ 51	26.55	3.84	2530
	40	2.46	1628
PZ D	24.8	2.58	1705
	34.1	3.1	2050
	37	4.41	2900
	38.5	5.44	3580
	40	7.08	4660
	44.6	8.44	5540
	60	8.62	5690
PZ 48	19.85	1.68	1111
	26.6	2.05	1362
	41.5	3.2	2350
	57	2.99	1975
PZ 41	32.21	2.58	1708
	68	2.58	1708
PZ 38	17.8	0.607	401
	28.3	0.876	578
	31.8	0.876	578
PZ B	25.2	2.98	1916
	39.3	3.13	2070
	66.1	2.61	1724
PZ F	20.8	1.794	1184
	24.1	5.94	4000
	25	7.04	4620
	25.7	7.4	4870
PZ 36	25.7	1.925	1271
	73	1932	1275

Nom	Profondeur (m)	CE (mS/cm)	TDS
PZ Hamiz1	34	0.037	21
	38	0.041	73
	41.4	1.54	1021
	58	1.56	1033
	76	1.58	1044
PZ Hamiz 2	38.5	1.73	1143
	48.8	1.92	1269
	52	1.92	1269
PZ B	26	3.54	2320
	41	3.13	2060
	67	3.09	2040
	72	3.11	2050
PZ 54	13.7	1.34	886
	24.1	2.38	15.73
	25.7	9.65	6320
	27.2	10.84	7260
	33.7	12.99	8570
	47	13.08	8700
	57	12.17	8030
PZ 61	18.6	1.78	1176
	21.2	2.51	1660
	22.5	4.73	3060
	24	5.06	3300
	63	5.18	3300
PZ 62	21.1	1.84	1216
	27.8	1.9	1256
	48	1.15	763
	50	1.15	763
PZ 41	24	1.66	1235
	24.5	2	1318
	38	2	1318
PZ E	27	2.57	1701
	53	2.57	1701

Tableau.07 : Résultats de mesure de conductivité et TDS Février 2020

Tableau.08 : Résultats de mesure de conductivité et TDS Août 2020

3.2.4. Prélèvement des échantillons :

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



Fig.28 : Prélèvement d'échantillon
PZ 62



Fig.29 : Prélèvement d'échantillon
PZ 54



Fig.30 : Les échantillons

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

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



Fig.31 : Mesure de conductivité et TDS et pH sur terrain

Tableau.09 : Résultats de mesure sur le terrain (Février et Aout 2020)

Piézomètre ou Forage	Date	Conductivité en $\mu\text{S}/\text{cm}$	TDS	pH
PZ 38	18/02/2020	567	291	7.78
PZ 58	17/02/2020	1290	646	8.4
PZ D	18/02/2020	1985	996	7.3
F à 100m du PZ D	18/02/2020	5490	2800	7.1
PZ B	16/08/2020	3210	1610	6.12
PZ 54	16/08/2020	1110	1110	7.4
PZ 61	16/08/2020	2850	2850	6.83
PZ 62	17/08/2020	1500	1500	6.6
PZ 41	17/08/2020	1403	1403	7.6
PZ E	17/08/2020	1530	1530	6.4

3.3. Partie Laboratoire :

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



Fig.32 : Laboratoire de l'ANRH



Fig.33 : Échantillons au laboratoire

3.3.1. Dosage quelque élément chimique :

a) Dosage des chlorures :

○ Principe :

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

○ Mode opératoire :

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

Les PE des solutions étalons, le témoin (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 :

○ 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.

○ 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 à chaque PE 20ml de la solution de BaSO_4 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 :

○ 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 couplage avec Naphtylamine. On mesure la densité du colorant ainsi formé à 520nm.

○ Mode opératoire :

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

- PE = 1ml
- Solution de Soude 0,05M = 5ml
- Mélange Réducteur = 5ml

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

- Mélange colorant = 40ml

laisser la coloration se développer dans l'obscurité pendant $\frac{1}{4}$ 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 [13].

Tableau.10 : Résultats des analyses physico chimique de l'année 2020 :

NOM	pH	CE 25C	Ca	Mg	Na	K	HCO ₃	Cl	SO ₄	NO ₃	TAC
PZ 54	8,1	1058	24	30	140	5	106,75	183	105	1	8,75
PZ B	8,3	4170	160	240	320	0	231,8	1075	284	120	19
PZ E	8,1	1894	96	86,4	139	2	311,1	193	245	66	25,5
PZ 32	8	1520	80	96	85	2	237,9	162	277	20	19,5
PZ 61	8,2	3300	304	19,2	281	1,5	244	700	319	67	20
PZ 62	8,1	1600	112	62,4	118	6,5	274,5	159	245	33	22,5
PZ 41	8,2	1700	104	91,2	114	4	323,3	223	277	8	26,5
PZ 38	8	502	40	24	32	14	152,5	77	30	0	12,5
PZ 58	8,3	1322	30	42	151	20	137,25	265	87	0	11,25
PZ D	7,75	2050	252	16,8	125	2,2	198,25	430	109	41	16,25
PZ D / FORAGE	7,62	6450	624	105,6	525	6	228,75	1755	472,5	66	18,75

3.4. Partie Logiciel :

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

3.4.1. Logiciel ARCGIS PRO :

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

Le système ArcGIS Pro permet de :

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

Faire des analyses spatiales : ArcGIS Pro fournit un jeu d'outils complet de modélisation d'information géographique pour soutenir des décisions intelligentes et rapides.

Cartographier : ArcGIS Pro offre de puissants outils de visualisation et de cartographie pour une utilisation d'entreprises ou scientifiques. Il est possible d'interagir avec les données, visualiser des changements au cours du temps et dans l'espace.

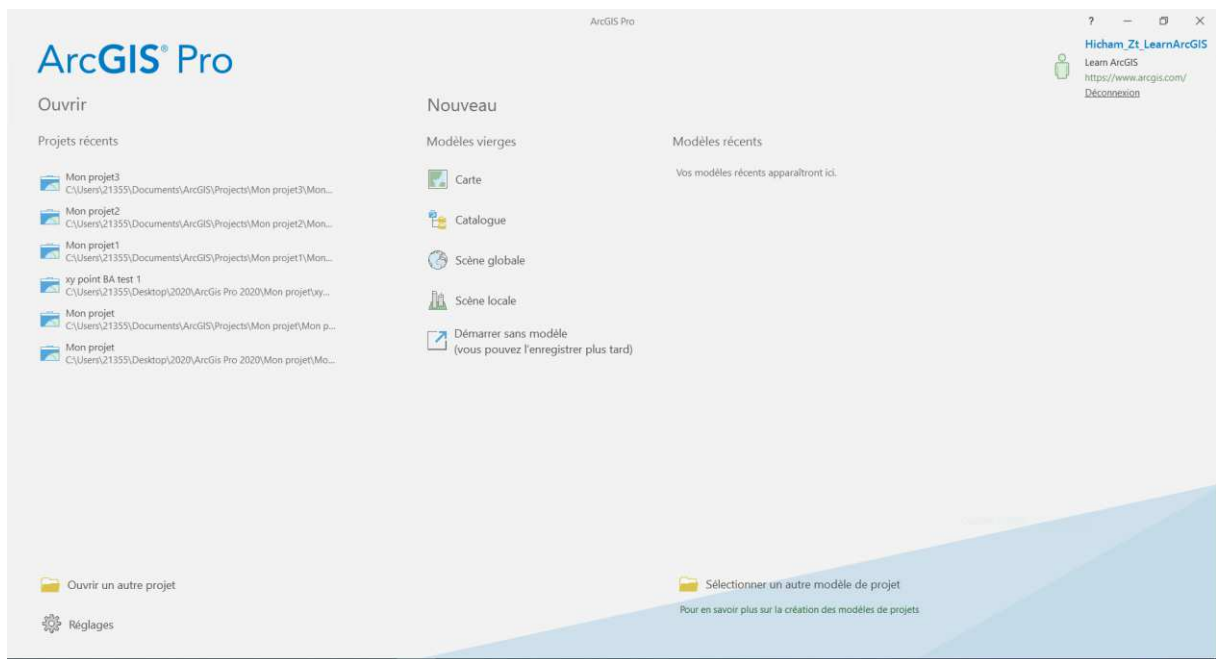


Fig.34 : Interface de Logiciel ARCGIS PRO

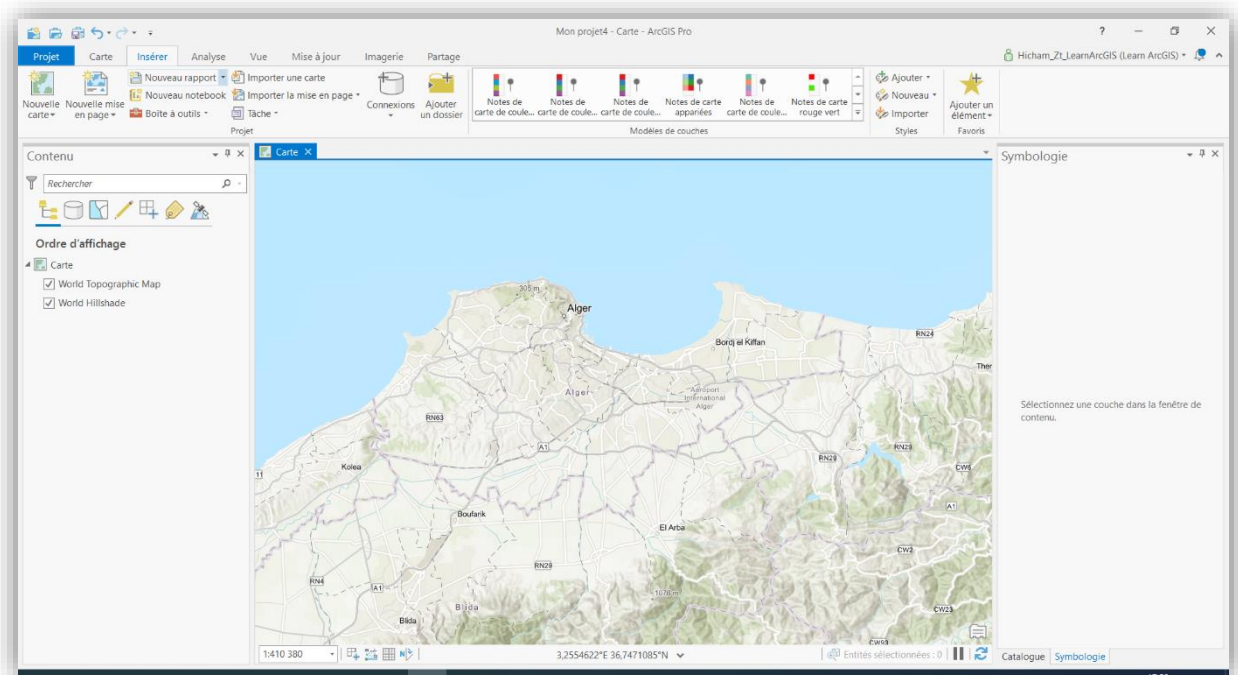


Fig.35 : Interface de commande de logiciel ARCGIS PRO

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.

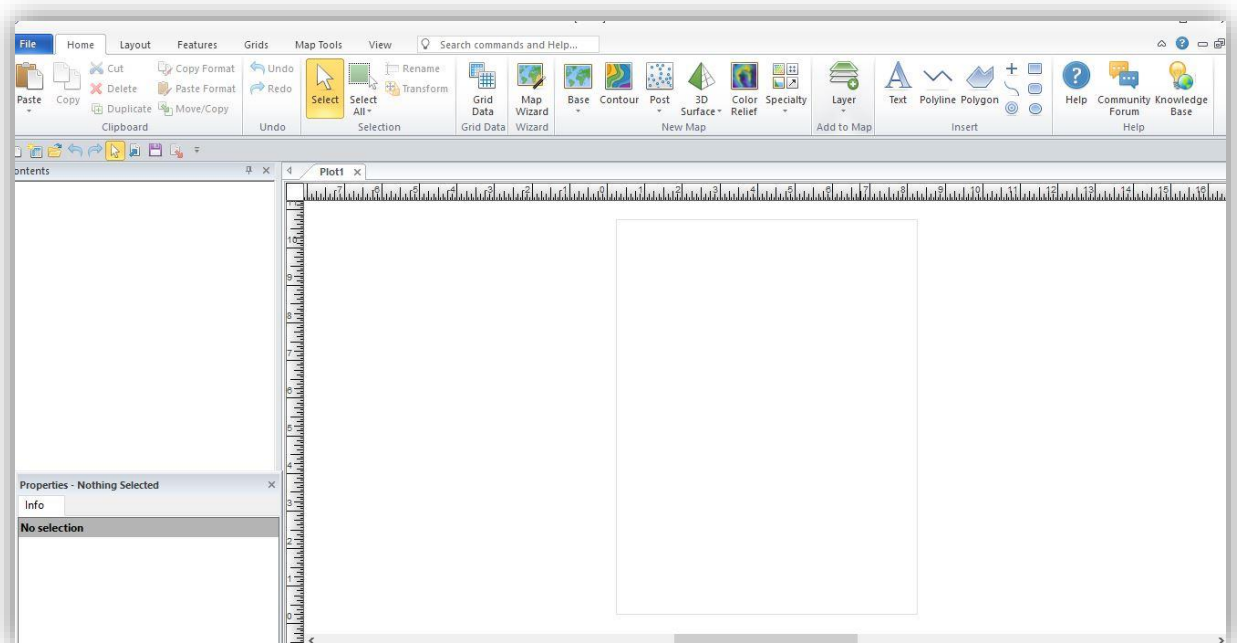


Fig.36 : Interface de logiciel Surfer

3.4.3. Logiciel Diagramme :

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

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

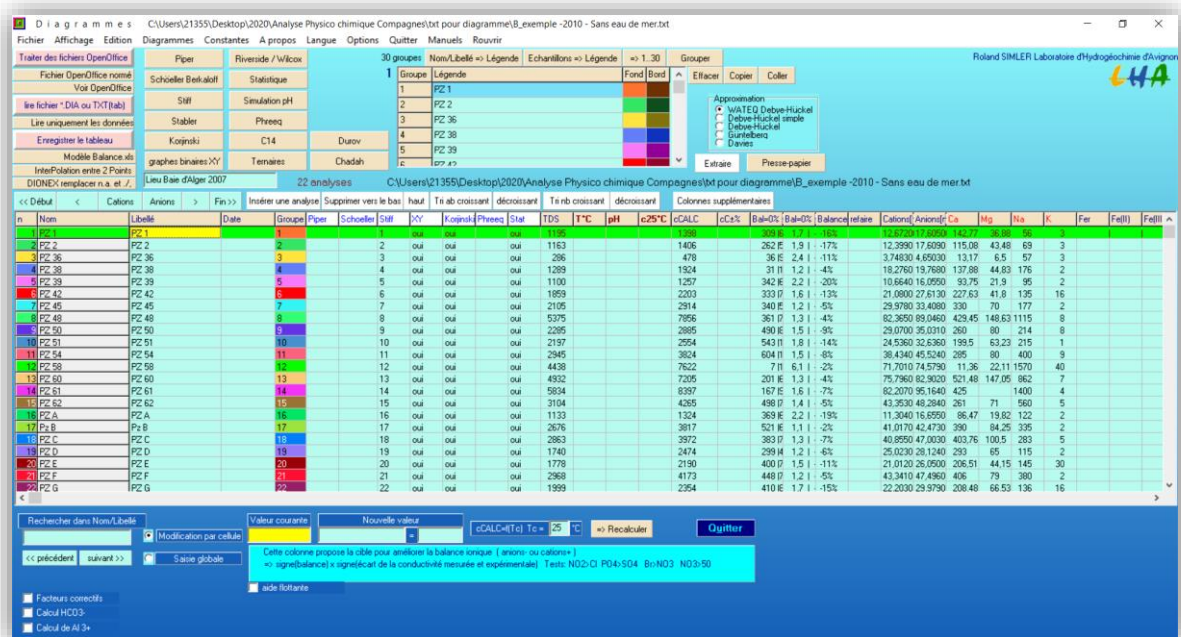


Fig.37: Interface de commande du logiciel Diagrammes

3.4.4. Logiciel Photoshop CC 2020 :

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

Grâce à Photoshop, nous avons illustré tout le phénomène de l'intrusion marine sous forme des images démonstrative simple montrant le phénomène que nous avons étudié dans cette recherche.

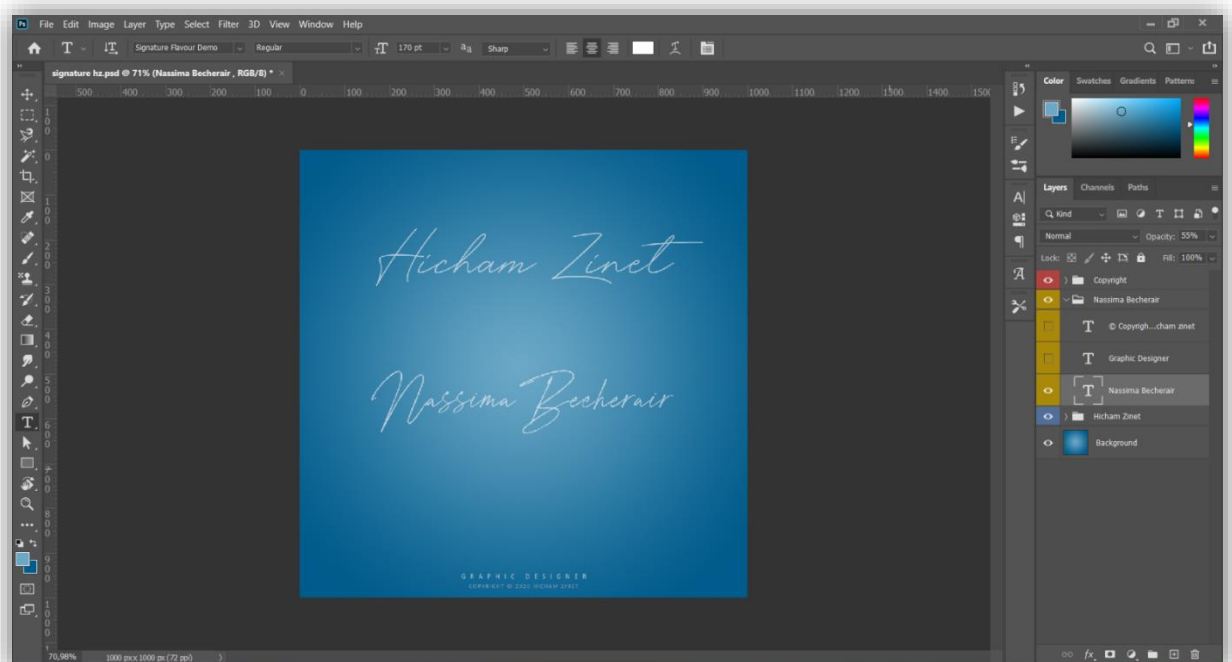


Fig.38: Interface de commande du logiciel Photoshop CC 2020.

CHAPITRE 04

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

4.1. Introduction :

Dans ce chapitre nous avons interprété les résultats obtenues et examiner l'évolution spatio-temporelle du phénomène étudié (extension du biseau salée) par l'utilisation des outils hydrodynamiques et hydro-chimique :

- Approche hydrodynamique : l'évolution de la piézométrie,
- Approche hydrochimique : Utilisations des profils de conductivité électrique, faciès chimique, corrélation des couples chimiques et cartes d'isovaleurs.

4.2. Approche hydrodynamique :

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

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

Le suivi de la piézométrie dans la baie d'Alger, l'ANRH a mis en place un réseau de surveillance de 20 piézomètres.

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

Nous avons tracé les cartes piézométriques sur logiciel **ARCGIS PRO 2020** et **SURFER 2016** pour les différentes campagnes basse d'eau et haute d'eau :

a) Cartes piézométriques 1983 :

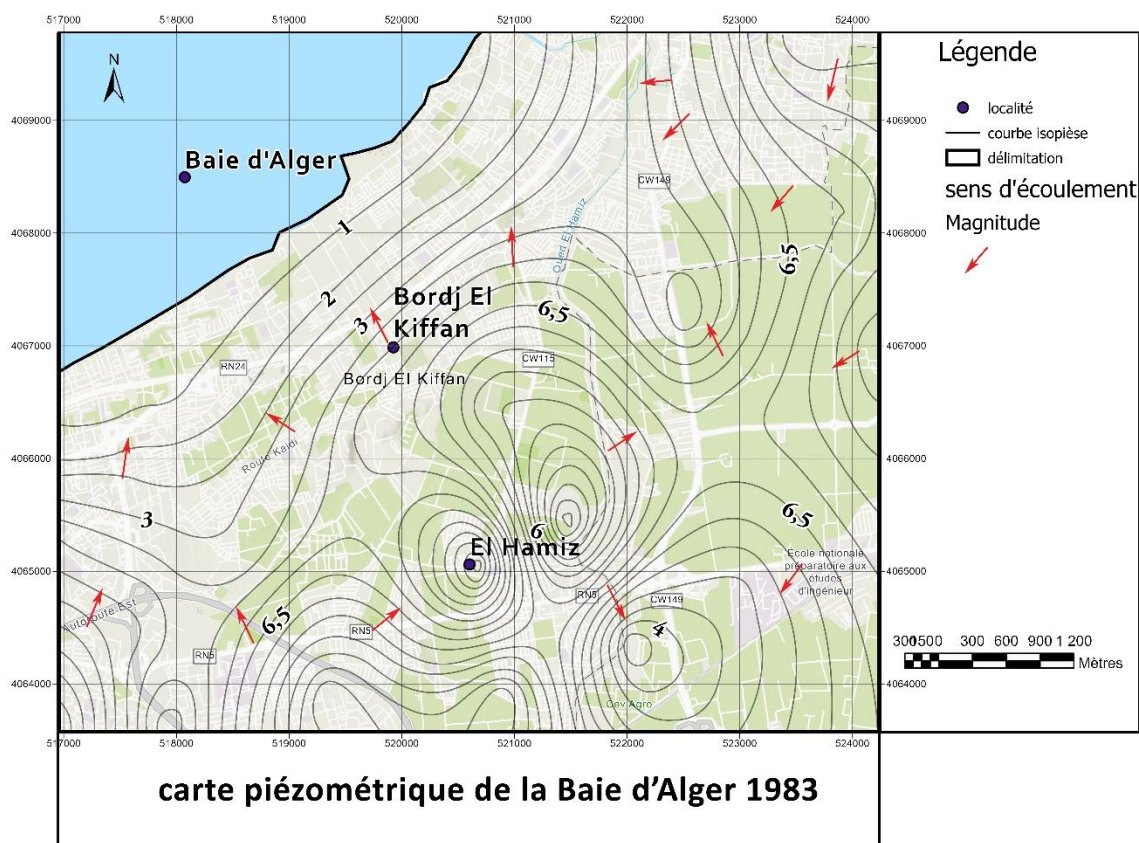


Fig.39 : Carte piézométrique de la Baie d'Alger 1983 réalisé à l'aide de logiciel ArcGIS PRO

○ **Interprétation :**

Une zone où les isopièzes sont espacées qui correspond à l'aval de la nappe et qui est caractérisé par un gradient hydraulique faible de l'aquifère remarquant ça dans la région de Striboul et Bordj El Kiffan où la côte piézométrique est presque égale ou légèrement supérieur à celle de la mer à certains endroits (**1 m**) , l'écoulement de la nappe se fait vers la mer, donc à cette époque l'intrusion ne se faisait pas sentir (**Fig.39**).

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

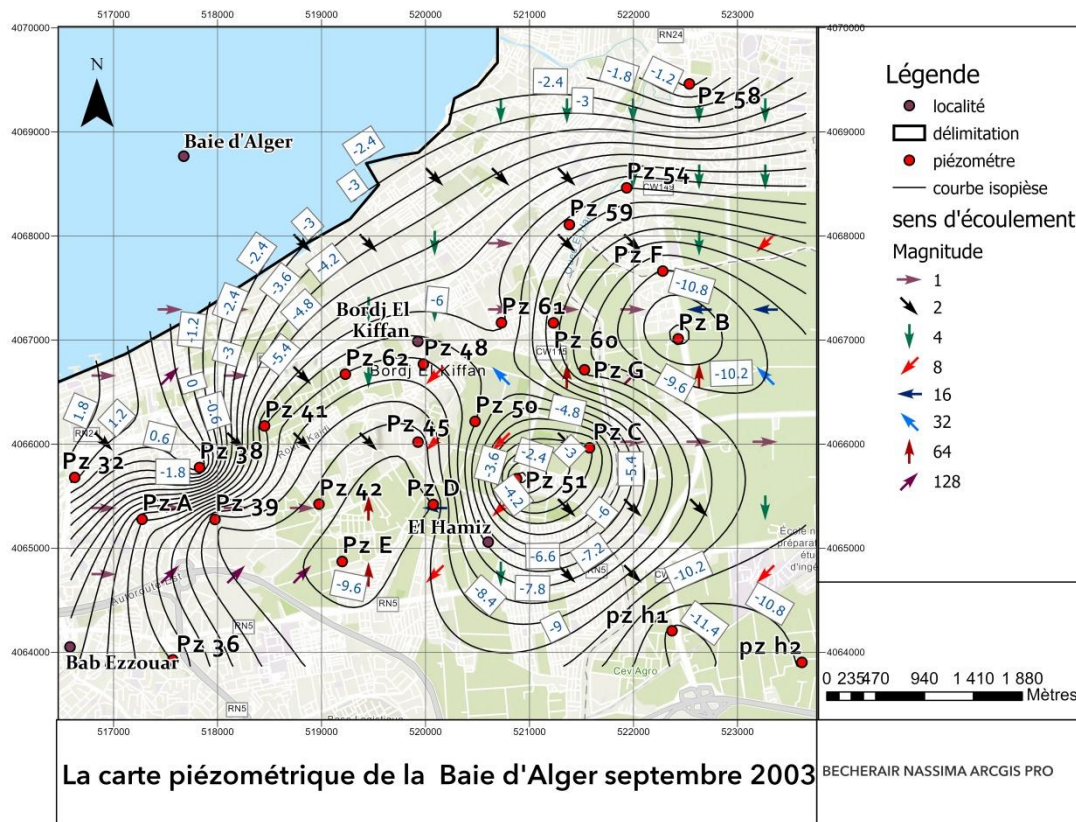


Fig.40 : Carte piézométrique de la Baie d'Alger septembre 2003 réalisé à l'aide de logiciel ArcGIS PRO

○ **Interprétation :**

La carte piézométrique de l'année **2003** montre que le phénomène de l'intrusion marine a déjà été entamé depuis les années 1985/1990 de plus en plus. Les cotes piézométriques sont déjà à **-10.2 m** jusqu'à **-11.4 m** au niveau du **PZ Hamiz 1** et **2**. Près du champ de captage d'El Hamiz. Non loin de littoral, le front salé progresse de plus en plus du nord vers le sud. Les principaux axes d'écoulement sont nord-ouest sud-est les cotes piézométrique atteignent **-11 m** et confirme l'exploitation excessive au niveau de champ de captage d'El Hamiz (**Fig.40**).

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

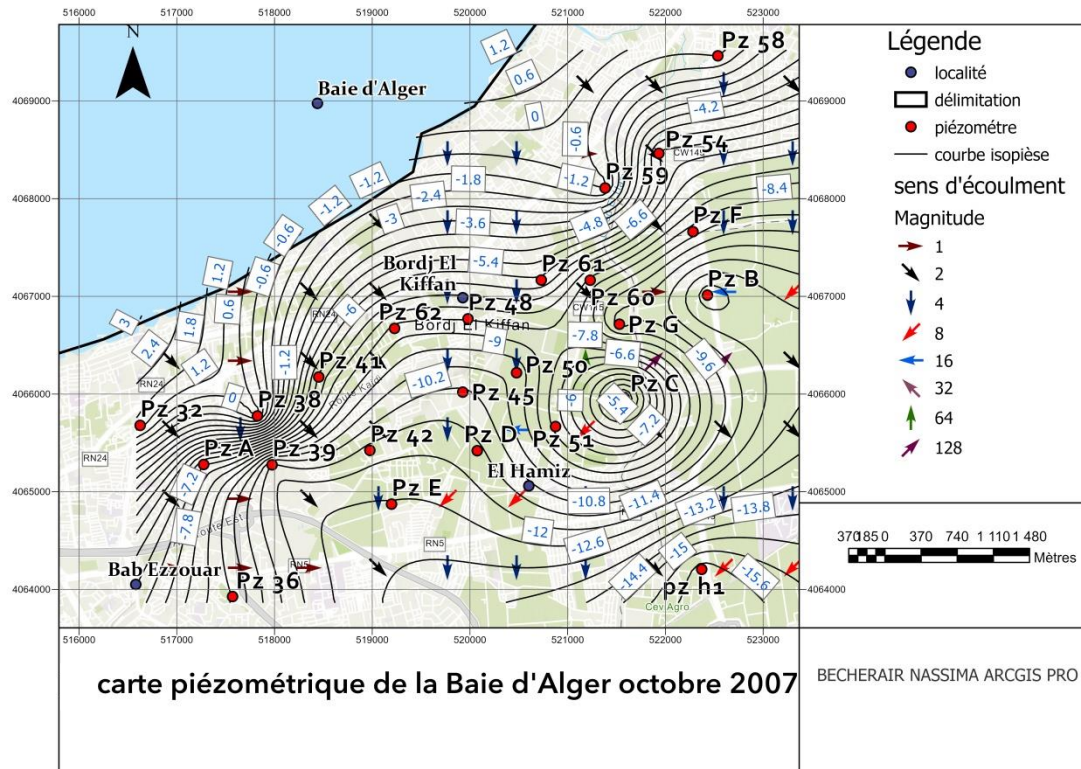


Fig.41 : Carte piézométrique de la Baie d'Alger septembre 2007 réalisé à l'aide de logiciel ArcGIS PRO

○ **Interprétation :**

En remarque que durant l'année **2007** (Cartes des basses eaux) les cotes piézométriques au niveau du champ de captage El Hamiz montre une évolution négative jusqu'à **-15.6 m** sur le **PZ 1 Hamiz** qui était **-11.4 m** en **2003 (Fig.41)**. Il sera pris comme remarque après l'examen de cette carte les faits suivants :

- Un écoulement se faisant de la mer vers la plaine du fait que les cotes piézométriques sont inférieurs au niveau de la mer décroissant en allant de la mer vers l'intérieur de la baie d'Alger. Pratiquement toute la zone étudiée est envahie par les eaux salées.
- Au sud-est il y a une zone de dépression ceci est dû à l'influence de champs de captage de El Hamiz et la surexploitation dans cette zone.

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

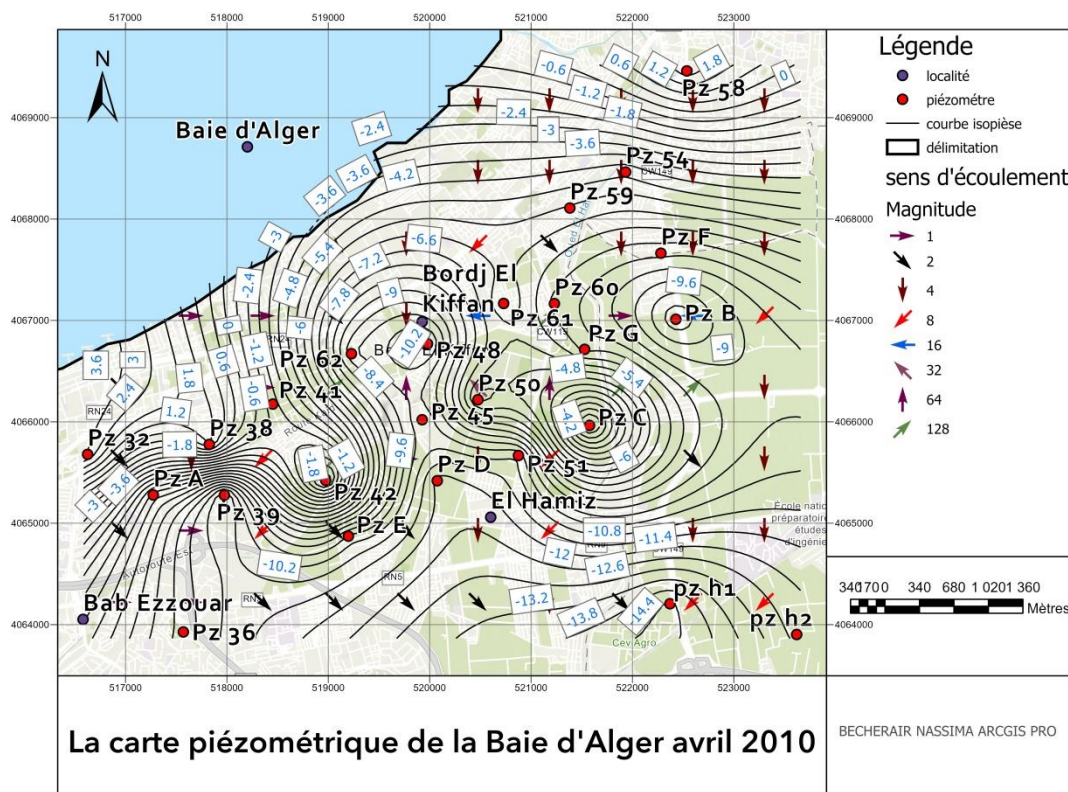


Fig.42 : Carte piézométrique de la Baie d'Alger avril 2010 réalisé à l'aide de logiciel ArcGIS PRO

○ **Interprétation :**

La carte piézométrique de l'année **2010** montre une baisse du niveau statique au niveau de champ de captage de Baraki à l'ouest et au champ du captage du Hamiz, Dar el Beida, Bouréah et Rouïba favorisant ainsi le phénomène d'intrusion marine (Fig.42).

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

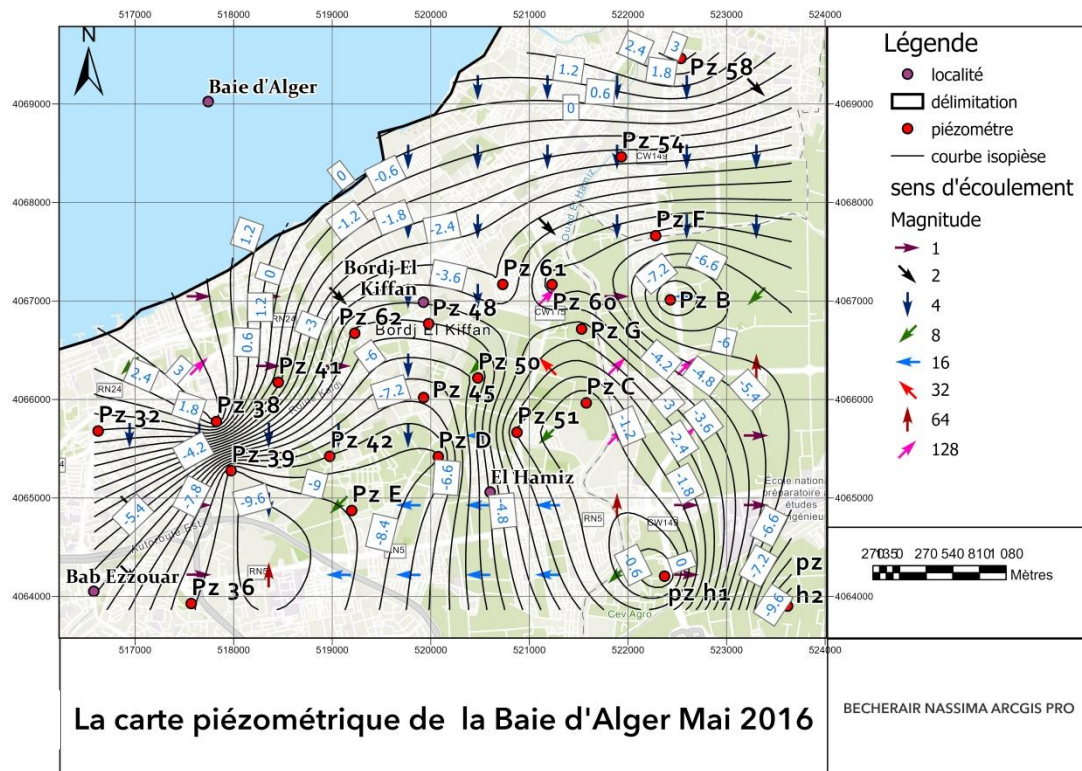


Fig.43 : Carte piézométrique de la Baie d'Alger mai 2016 réalisé à l'aide de logiciel ArcGIS PRO

○ **Interprétation :**

En remarque que durant l'année **2016** (hauts eau) les cotes piézométriques au niveau du champ de captage El Hamiz montre une évolution positive jusqu'à **-0.6 m** sur le **PZ 1 Hamiz** qui était **-14 m** en **2010** (**Fig.43**), 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.

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

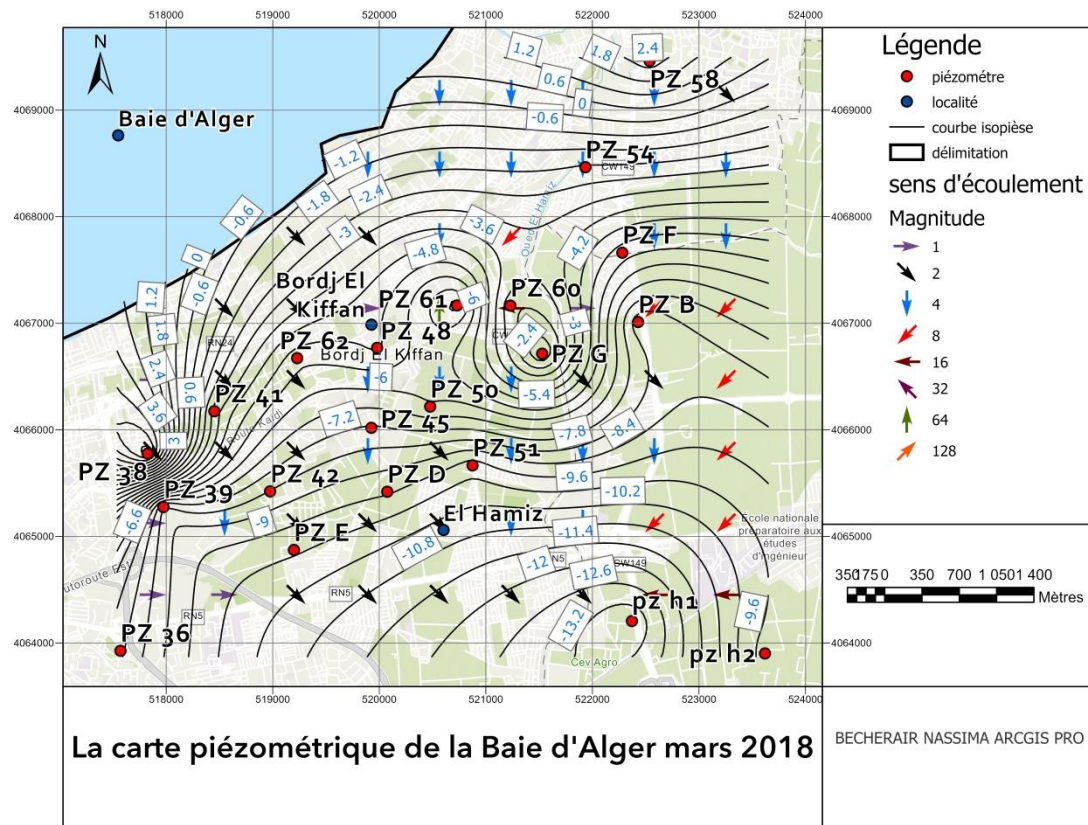


Fig.44 : Carte piézométrique de la Baie d'Alger mars 2018 réalisé à l'aide de logiciel ArcGIS PRO

○ **Interprétation :**

L'analyse de la carte piézométrique de 2010 (**Fig.44**) 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.

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

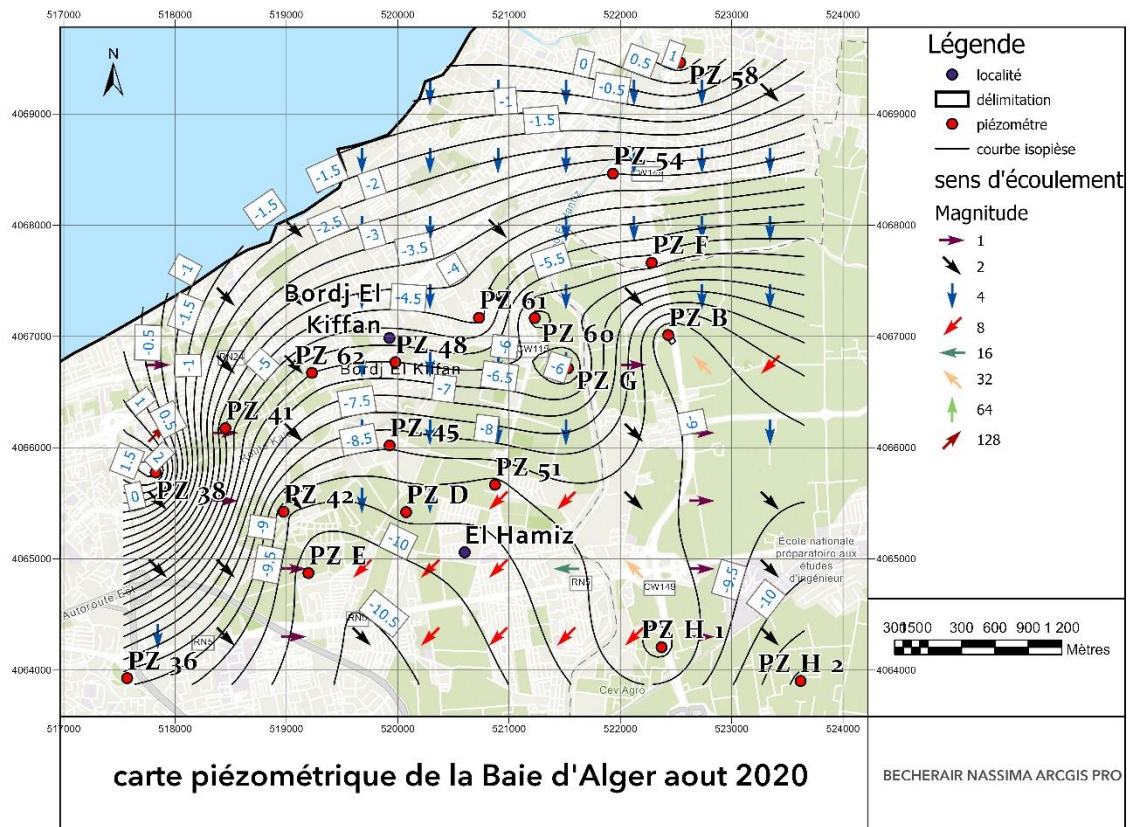


Fig.45 : Carte piézométrique de la Baie d'Alger Aout 2020 réalisé à l'aide de logiciel ArcGIS PRO

○ 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.45).

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 au niveau de la mer **NGM**.

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

4.3.1. Historique de profil de conductivité :

Afin de localiser avec précision l'interface eau douce - eau salée et de contrôler et mesurer la variation verticale de la conductivité, on dispose d'un certain nombre de piézomètres qui ont été retenus. [14]

Profils de conductivité et interprétation qualitative :

a) Profil du PZ 58 :

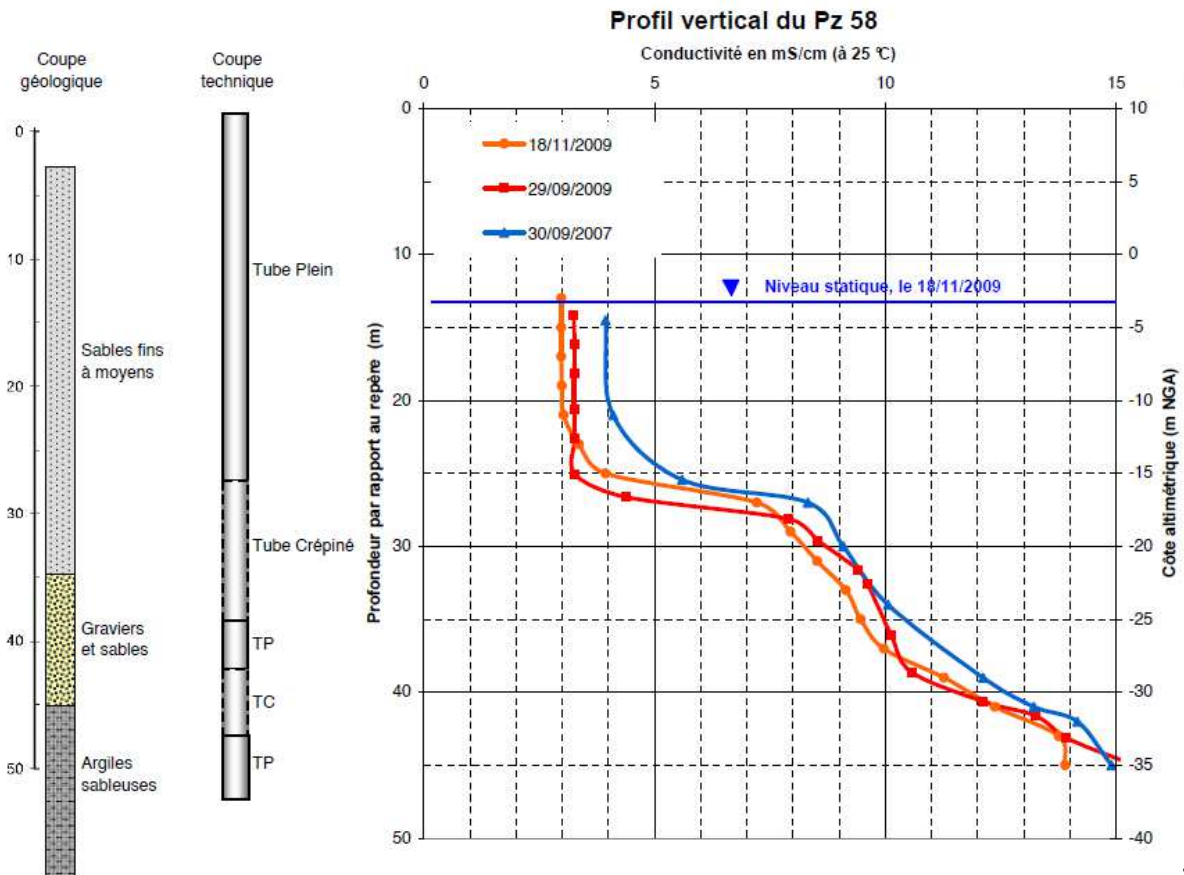


Fig.46 : Profil vertical de conductivité du PZ 58

○ Interprétation :

Pour l'année **2007**, la conductivité est de **4000 $\mu\text{S}/\text{Cm}$** de **14 m** (NS) à **21 m** par contre en **2009** pour les deux mois Novembre et Septembre nous avons une valeur inférieure par rapport à celle de **2007**, elle est de **3000 $\mu\text{S}/\text{Cm}$** de **14 m** à **25 m**. Cette diminution est causée par les précipitations considérables durant cette année qui permettent la dilution des sels dans des eaux souterraines douces (**Fig.46**).

La progression des valeurs de conductivités continuent jusqu'à **45 m** pour atteindre **15000 $\mu\text{S}/\text{Cm}$** pour les trois profils. Cette valeur de conductivité est une valeur identique à celle de l'eau de mer. Ce piézomètre est donc complètement envahi par les eaux salées.

b) Profil du PZ 54 :

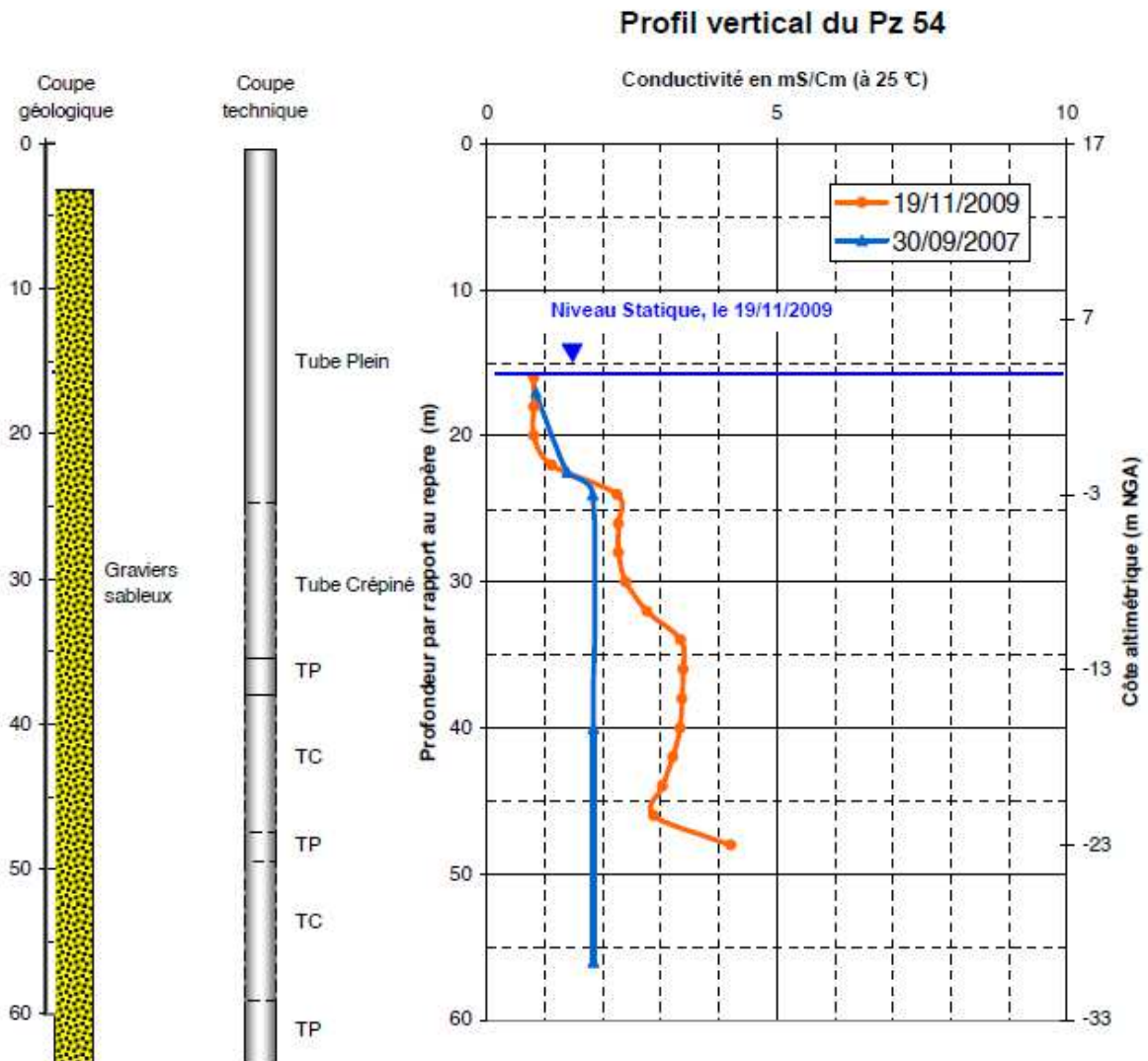


Fig.47 : Profil vertical de conductivité du PZ 54

○ **Interprétation :**

Le profil de conductivité démarre à une conductivité de **1000 $\mu\text{S/Cm}$** de **16 m (NS)** jusqu'à **25 m**, la conductivité fluctue pour donner une valeur de **2000 $\mu\text{S/Cm}$** jusqu'au fond (**60 m**). Par ailleurs la coupe géologique de ce piézomètre montre sur toute sa longueur une formation très perméable et vénérable formée de graviers sableux (**Fig.47**).

La conductivité varie de **1000 $\mu\text{S/Cm}$** de **16 m** à **25 m** jusqu'à **45 m** là où elle donne une dernière valeur de **4000 $\mu\text{S/Cm}$** .

On conclue que ce piézomètre est contaminé par les eaux salées.

c) Profil du PZ 48 :

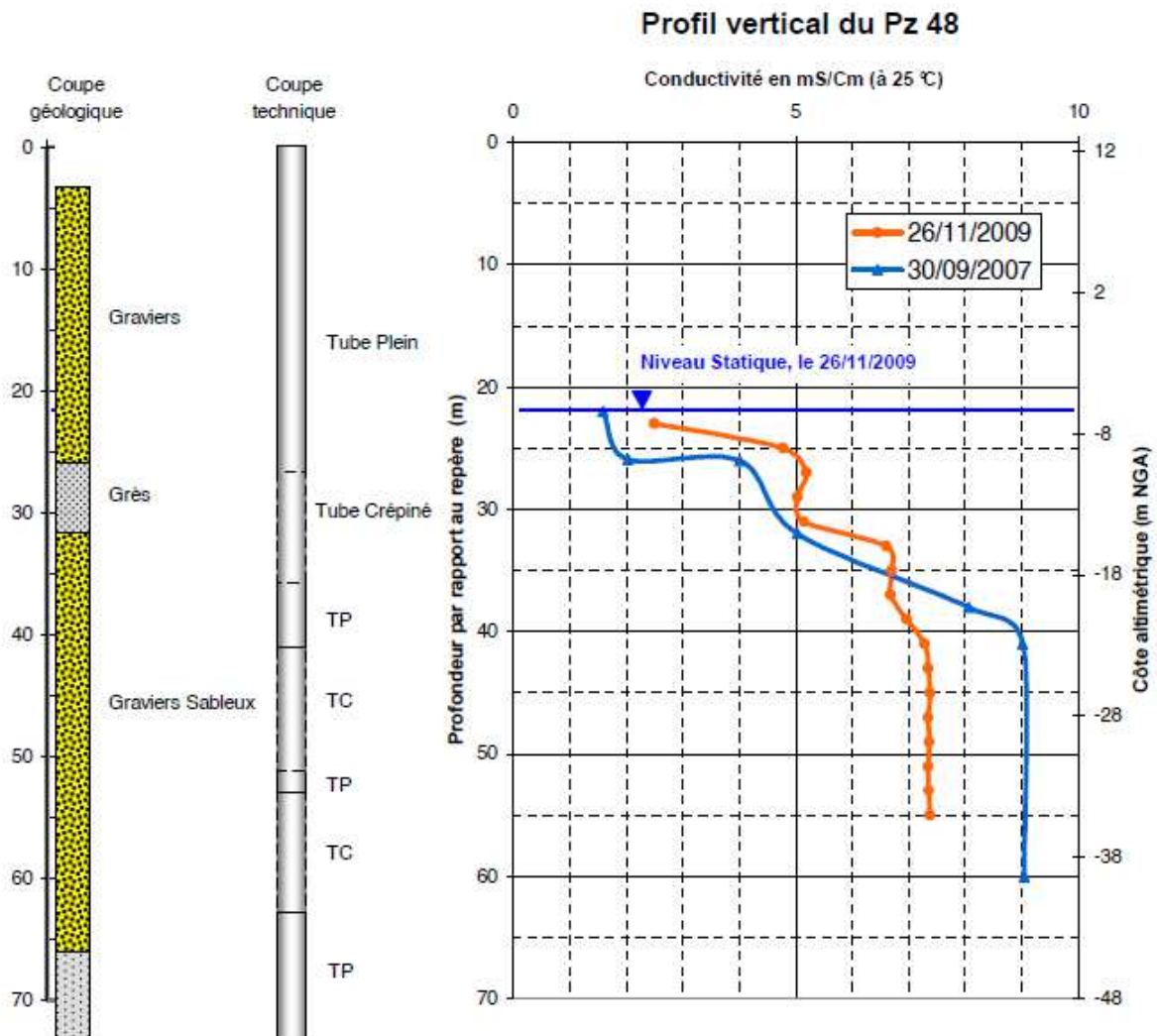


Fig.48 : Profil vertical de conductivité du PZ 48

○ **Interprétation :**

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

En **2007**, on note **9000 $\mu\text{S}/\text{Cm}$** mais en **2009** cette valeur diminue à **7200 $\mu\text{S}/\text{Cm}$** , cette réduction est le produit des précipitations importantes enregistrées durant l'année **2009**, qui ont permis la dilution des sels d'eau de mer. Ces valeurs sont importantes témoignant la contamination de ce piézomètre par l'invasion marine (Fig.48).

d) Profil du PZ 60 :

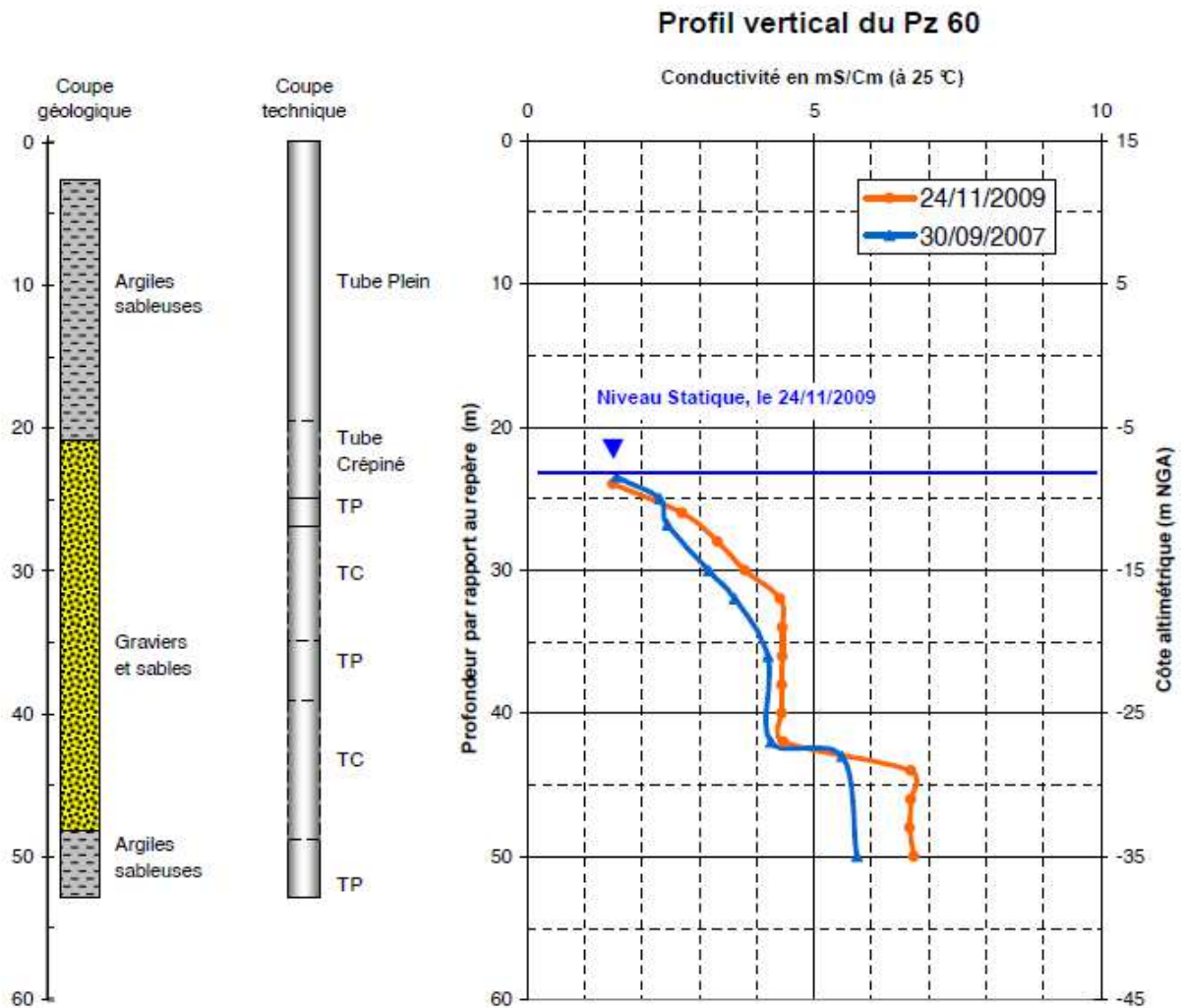


Fig.49 : Profil vertical de conductivité du PZ 60

○ **Interprétation :**

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

Ces grandes valeurs de conductivité est un indice de contamination de ce piézomètre par les eaux de mer (**Fig.49**).

e) Profil du PZ 61 :

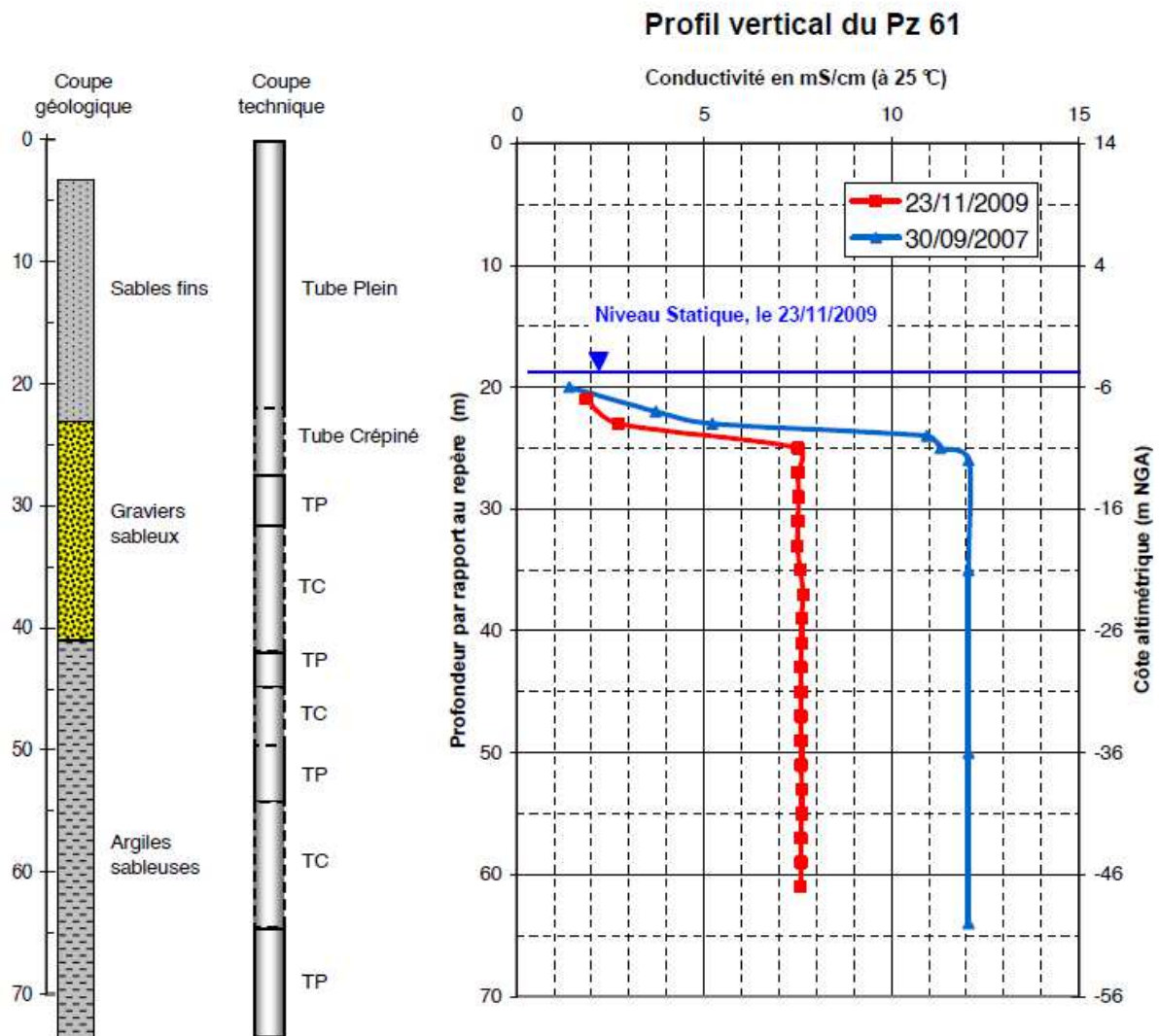


Fig.50 : Profil vertical de conductivité du PZ 61

○ **Interprétation :**

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

Les deux débutent à environ **1800 $\mu\text{S}/\text{Cm}$** à **20 m** et fluctuent graduellement pour atteindre **7500 $\mu\text{S}/\text{Cm}$** de 25m à environ **62 m** pour l'année **2009** et **12000 $\mu\text{S}/\text{Cm}$** de **25 m** à environ **69 m** en **2007**. Ces grandes valeurs de conductivité présentent une contamination de ce piézomètre par les eaux de mer (**Fig.50**).

f) Profil du PZ 36 :

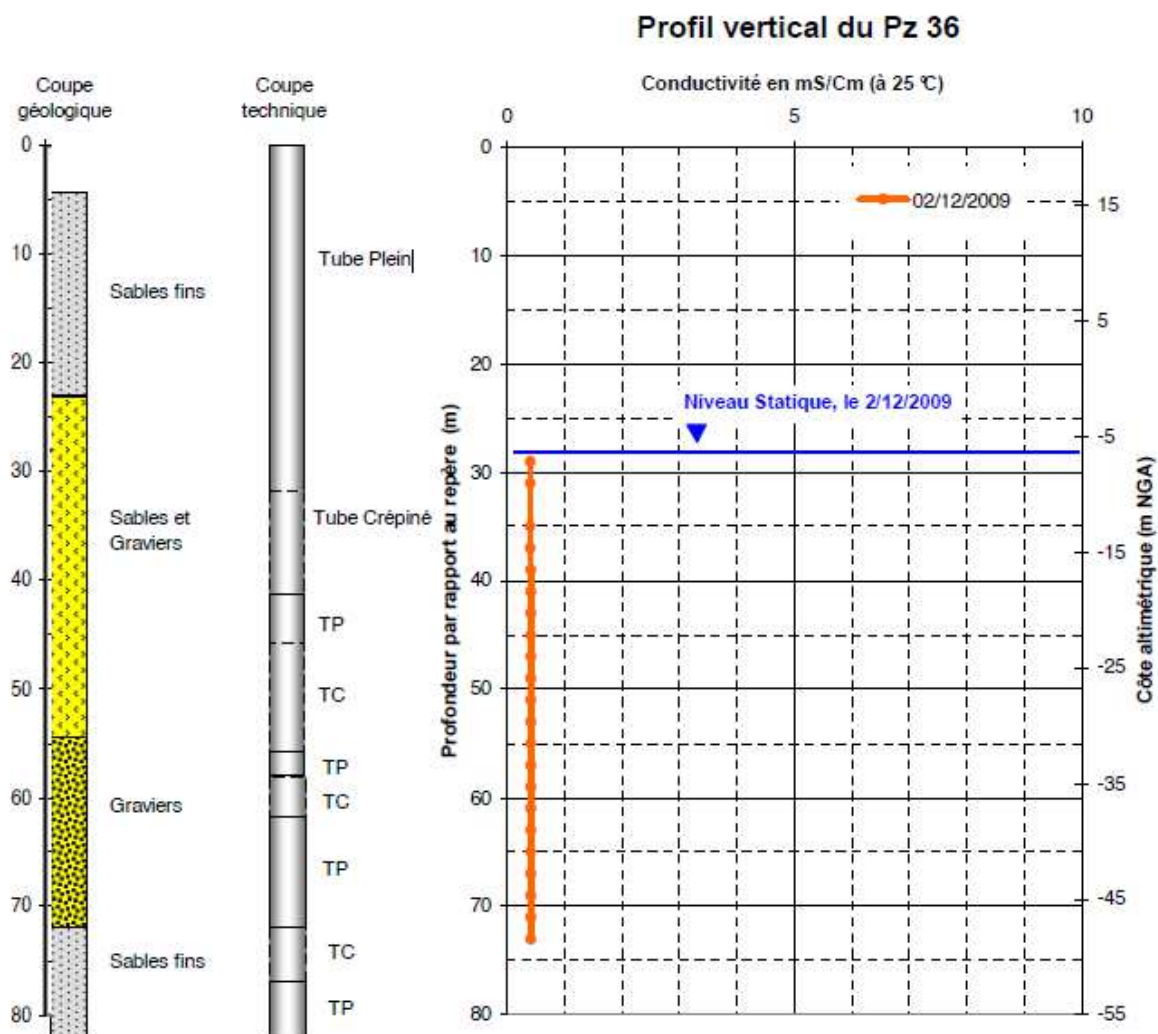


Fig.51 : Profil vertical de conductivité du PZ 36

○ **Interprétation :**

Pour ce piézomètre le profil est fixé sur une valeur d'environ **400 μ S/Cm** de **29 m** jusqu'à **70 m**.

Cette valeur traduit la présence d'une eau potable dans ce piézomètre, il n'est pas donc du tout contaminé par les eaux de la mer (**Fig.51**).

g) Profil du PZ B :

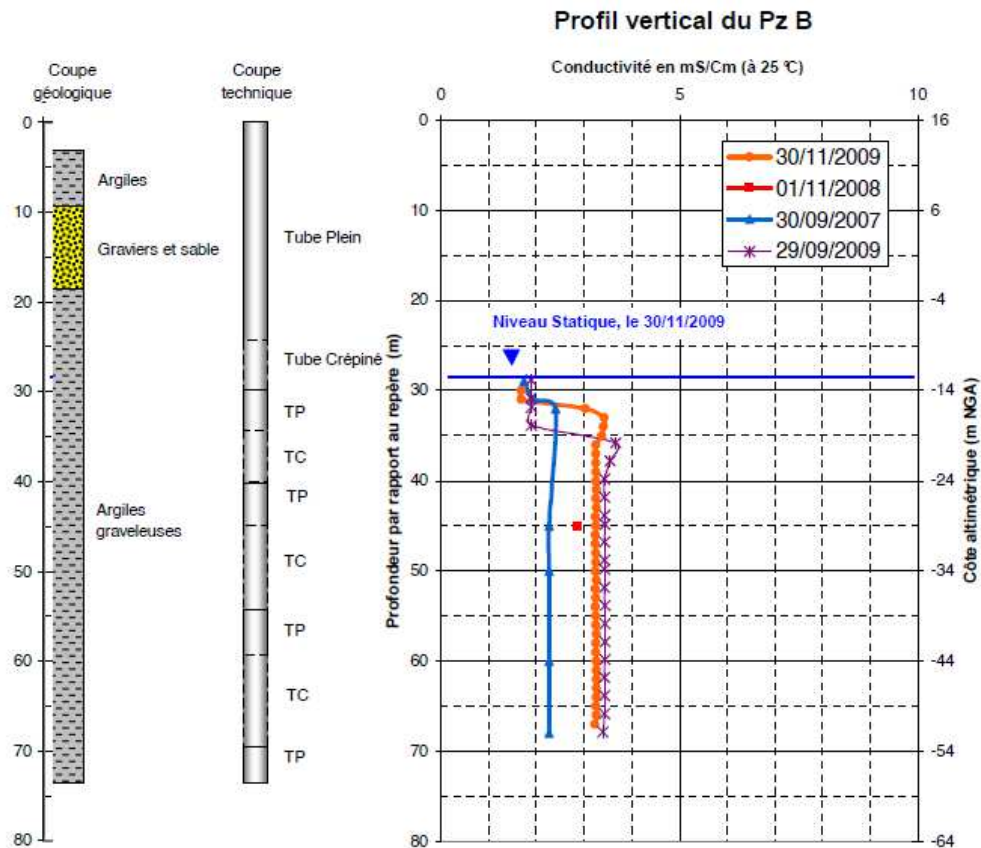


Fig.52 : Profil vertical de conductivité du PZ B

○ **Interprétation :**

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

Les quatre profils présentent une conductivité de **1900 $\mu\text{S/Cm}$** à partir du niveau statique situé à la côte **29m**, pour donner par la suite une valeur constante de **2200 $\mu\text{S/Cm}$** en **2007** jusqu'au top du profil, **3500 $\mu\text{S/Cm}$** en **2009** et une valeur intermédiaire de **2900 $\mu\text{S/Cm}$** en **2008**. On voit très bien que par rapport aux profils précédents que les valeurs de conductivité n'ont pas diminuées en **2009** malgré les précipitations importantes de cette année. Cela pourra s'expliquer par la formation géologique dans laquelle le piézomètre a été implanté, il s'agit d'une formation argileuse semi-perméable, une faible proportion de graviers et sables et une grande proportion d'argiles graveleuse semi-perméable de **15m** à **70m** (fond du piézomètre).

Ce piézomètre est proche du champ de captage du Hamiz. Dans le cas où les pompages dans ce champ restent tels qu'ils sont exercés, ce piézomètre enregistrera des conductivités supérieures. Dans l'ensemble ce piézomètre est contaminé par les eaux de mers (**Fig.52**).

h) Profil du PZ D :

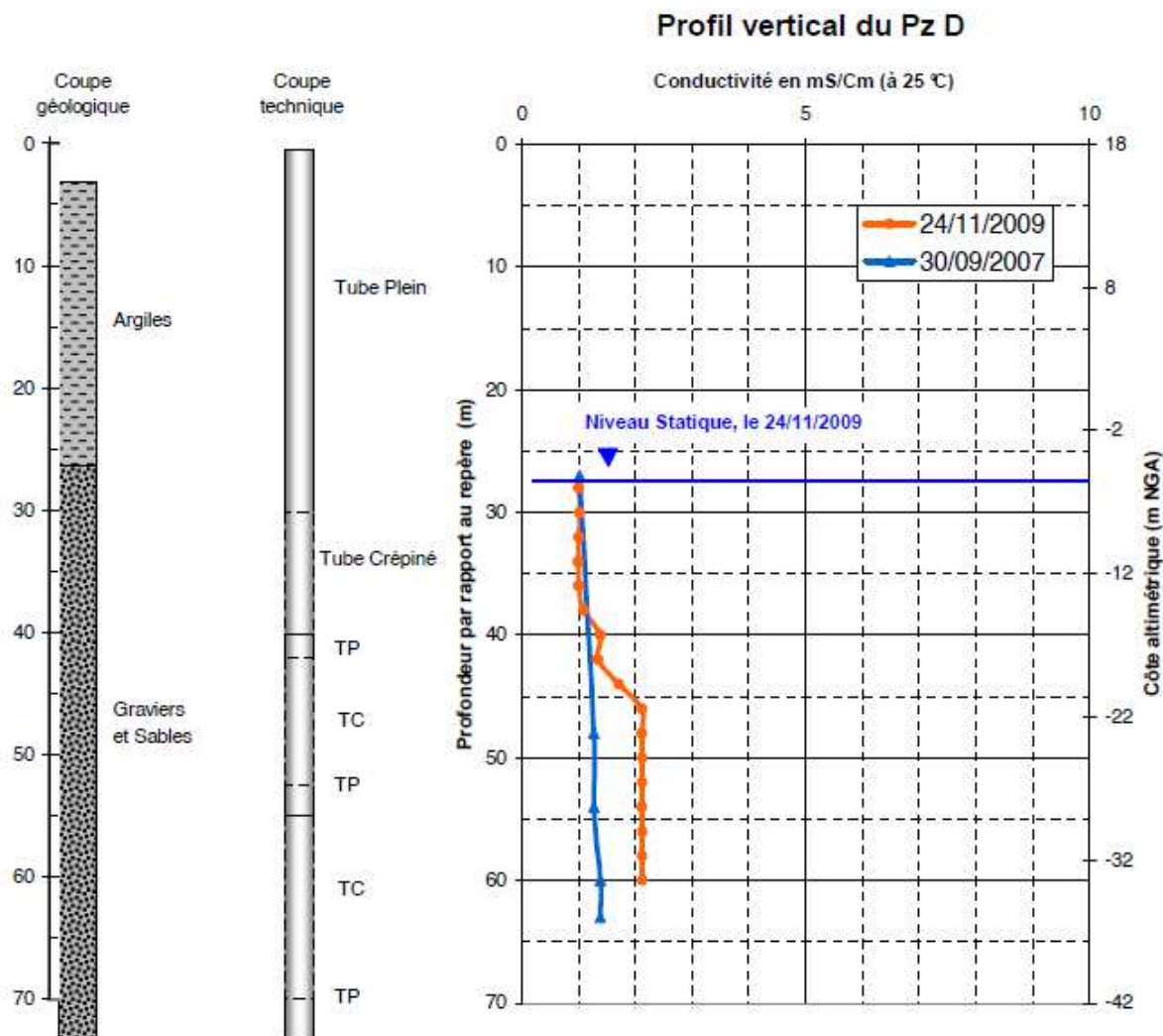


Fig.53 : Profil vertical de conductivité du PZ D

○ **Interprétation :**

Les deux profils conductivité en **2007** et en **2009** se coïncident à **1000 $\mu\text{S}/\text{Cm}$** de **28m (NS)** jusqu'à **42 m** et à partir de cette cote le profil établie en **2007** reste stable autour de **1000 $\mu\text{S}/\text{Cm}$** par contre en **2009** il évolue progressivement pour atteindre la valeur **2000 $\mu\text{S}/\text{Cm}$** (**Fig.53**).

On constate que ce piézomètre est en voie de contamination.

i) Profil du PZ F :

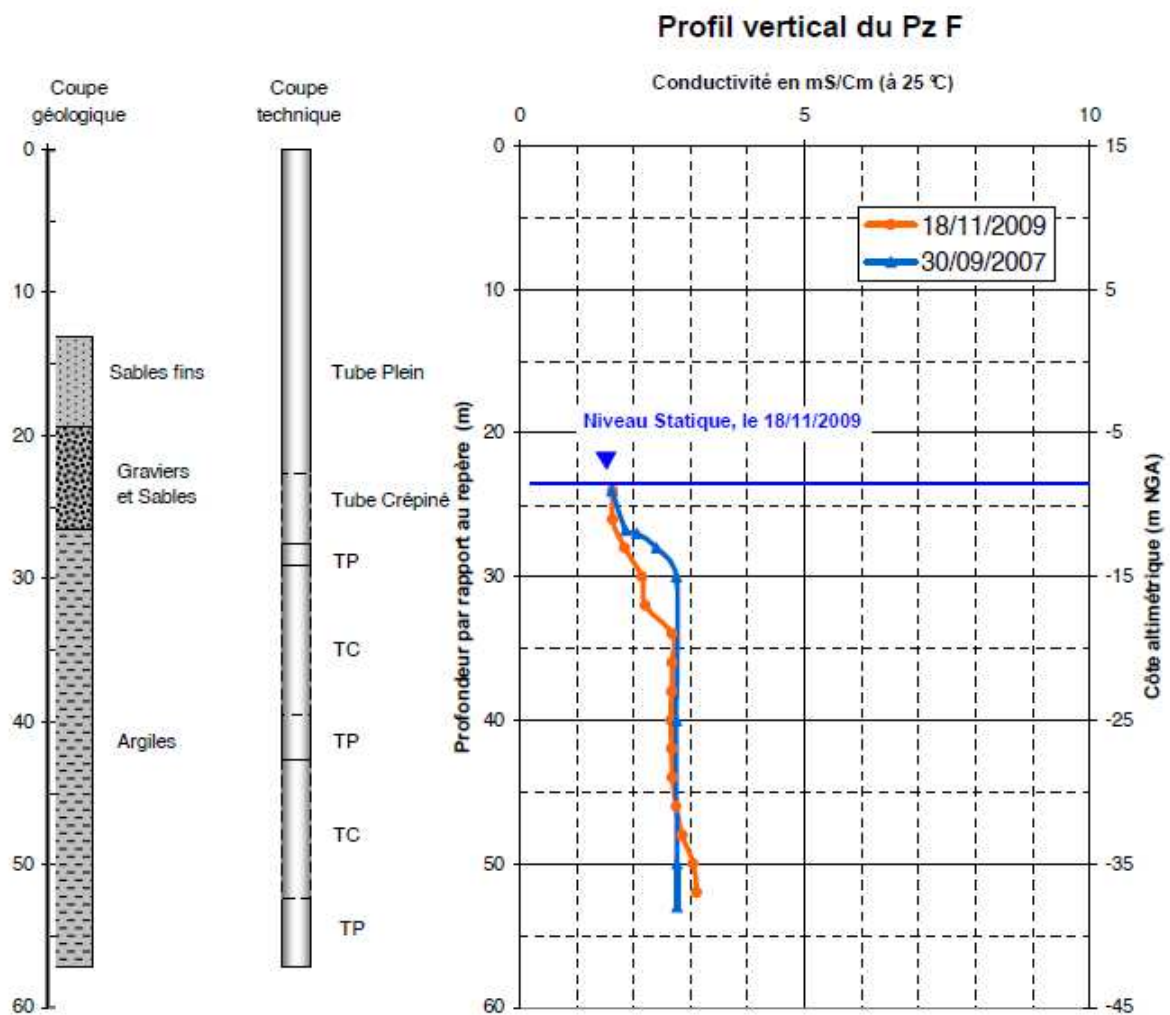


Fig.54 : Profil vertical de conductivité du PZ F

○ **Interprétation :**

Sur ce piézomètre deux profils ont été effectués en **2007** et en **2009**. Il capte une seule formation perméable formée de gravier et de sables. En **2007**, le profil démarre à **28 m** avec une conductivité de **1600 $\mu\text{S}/\text{Cm}$** jusqu'à **30 m** on signale une valeur de **2900 $\mu\text{S}/\text{Cm}$** . En **2009**, le profil n'a pas enregistré une grande différence par rapport à celui de **2007**. Ce piézomètre est contaminé par les eaux salées (**Fig.54**).

j) Profil du PZ Hamiz 1 et 2 :

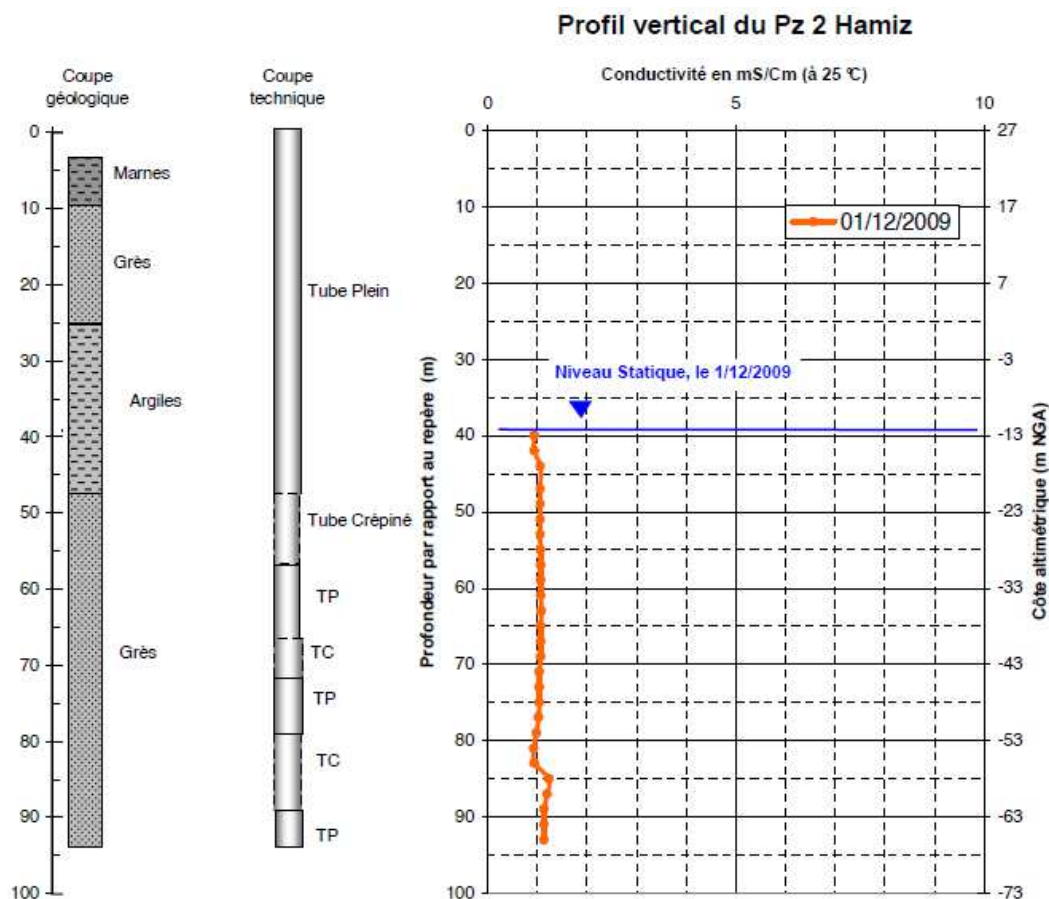


Fig.55 : Profil vertical de conductivité du PZ 2 Hamiz

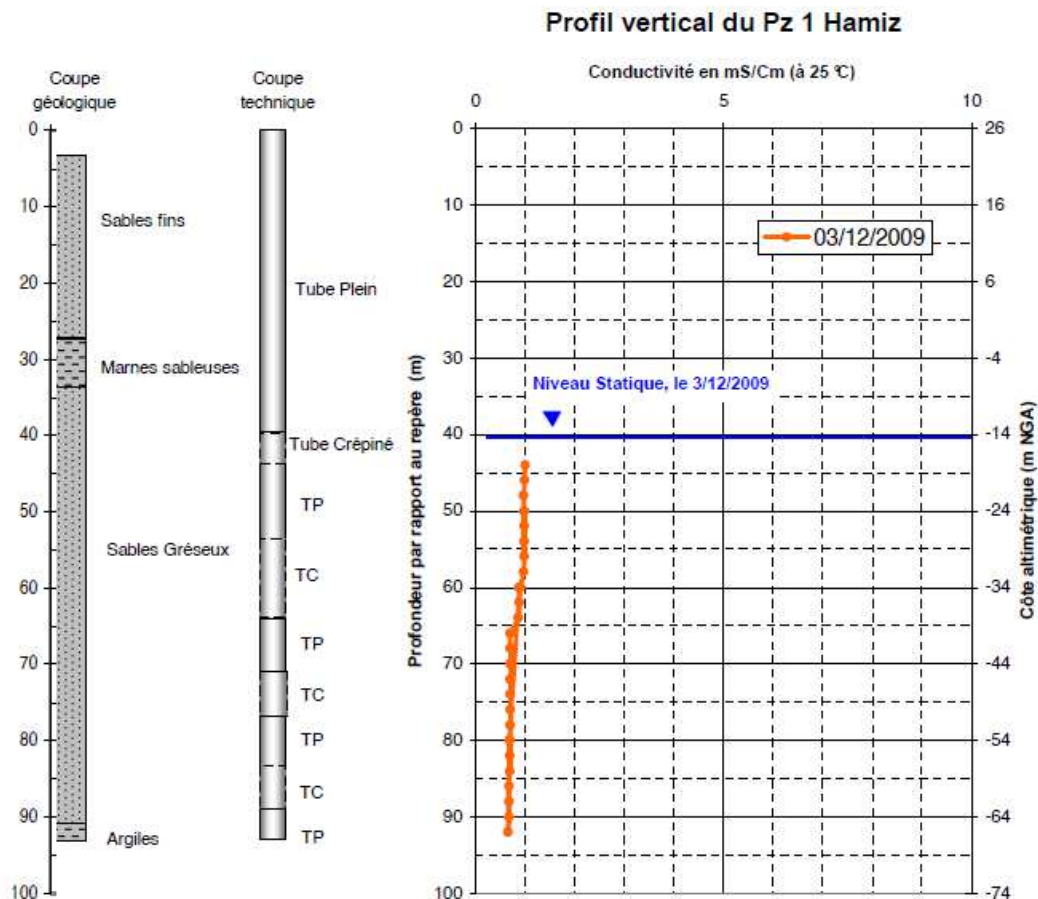


Fig.56 : Profil vertical de conductivité du PZ 1 Hamiz

- **Interprétation :**

Un seul profil de conductivité a été enregistré en **2009** pour les deux piézomètres **PZ 1** et **PZ 2 Hamiz**.

On remarque un tracé constant de profil de conductivité au tour de **1000 $\mu\text{S}/\text{Cm}$** de **40 m** à **90 m**. Ces deux piézomètres captent des formations à grande perméabilité formée de sables gréseux pour le **PZ 1** et de grès pour le **PZ 2**.

Ces deux piézomètres **PZ 1** et **PZ 2 Hamiz** ne sont pas contaminés par les eaux salées de la mer (**Fig.55**) et (**Fig.56**).

4.3.2. Profil de conductivité de l'année 2020 :

a) Profil du PZ 58 :

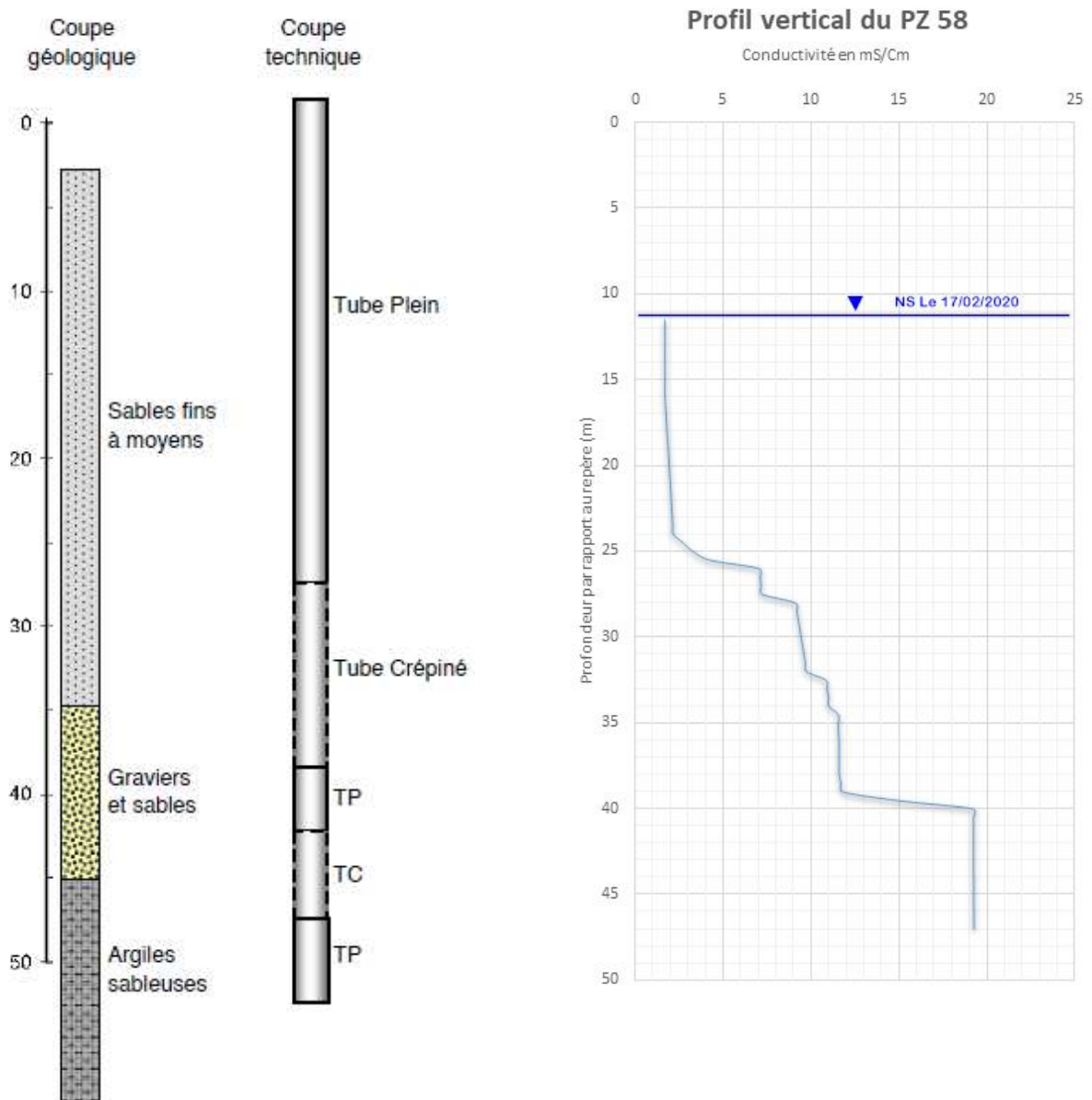


Fig.57 : Profil vertical de conductivité du PZ 58

○ Interprétation :

On remarque qu'il y a 3 parties, La 1^{ère} partie de **11.75m** jusqu'à **25 m** la conductivité diminue par rapport à l'année **2009** qui était **3660 uS/cm** cette diminution peut-être à cause de la précipitation qui permettent la dilution des sels dans l'eau douce (hauts eau) (**Fig.57**).

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

La 3^{ème} partie : de **40 m** jusqu'à le font du piézomètre la conductivité augmente brusquement de **11800uS/cm** à **19300 uS/cm** cette valeurs est identique à celle de

l'eau de mer. Ce piézomètre est complètement contaminé par l'eau de mer depuis l'année **2007** qui était **15000 uS/cm**.

b) Profil du PZ 54 :

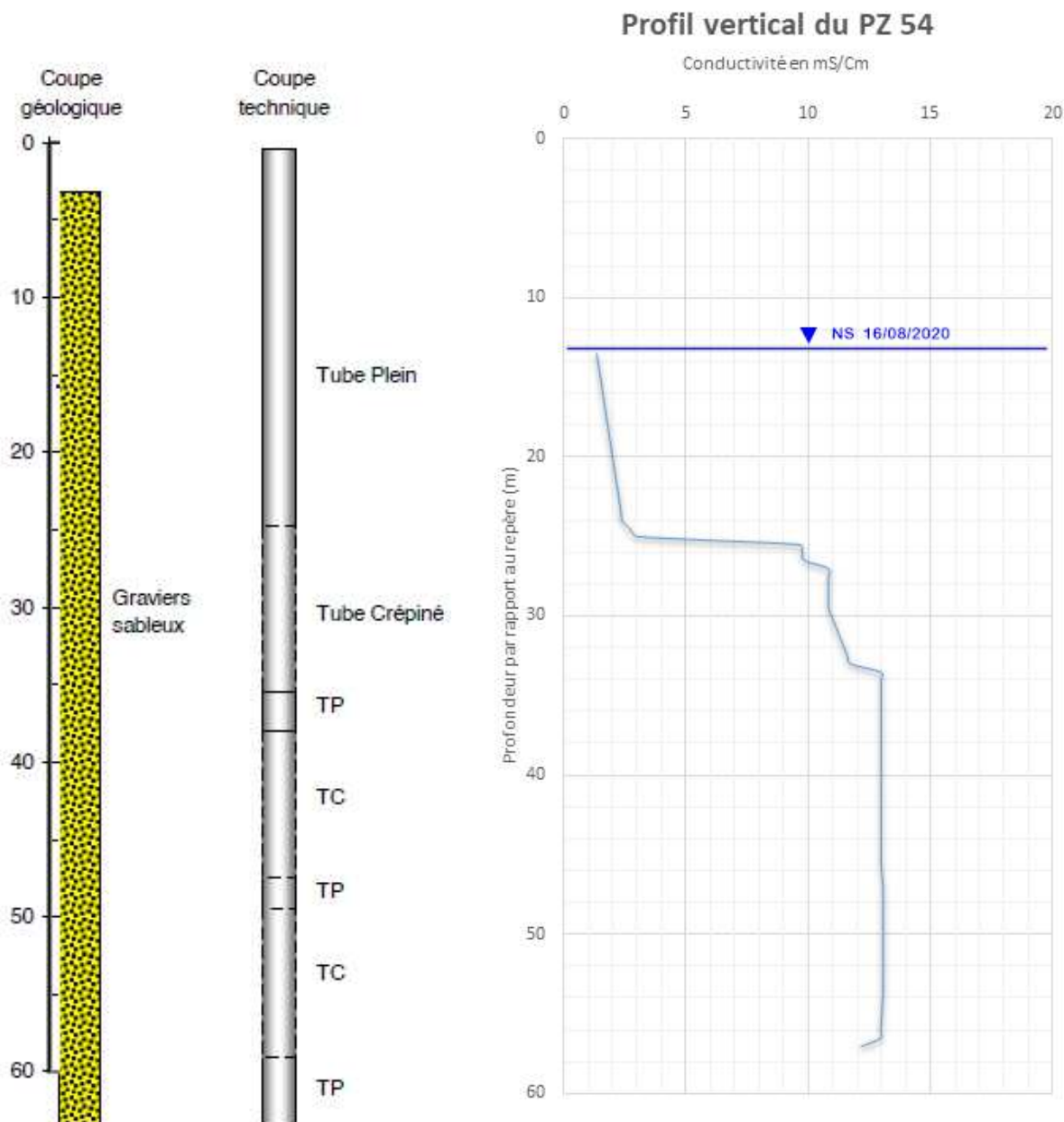


Fig.58 : Profil vertical de conductivité du PZ 54

○ **Interprétation :**

Dans ce piézomètre on remarque que la valeur de la conductivité à la surface est de **1340 uS/cm** et atteint **13000 uS/cm** à partir de la profondeur de **34 m** jusqu'à le fond ce qui montre que l'intrusion de l'eau salée est en état avancé (**Fig.58**).

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

c) Profil du PZ 48 :

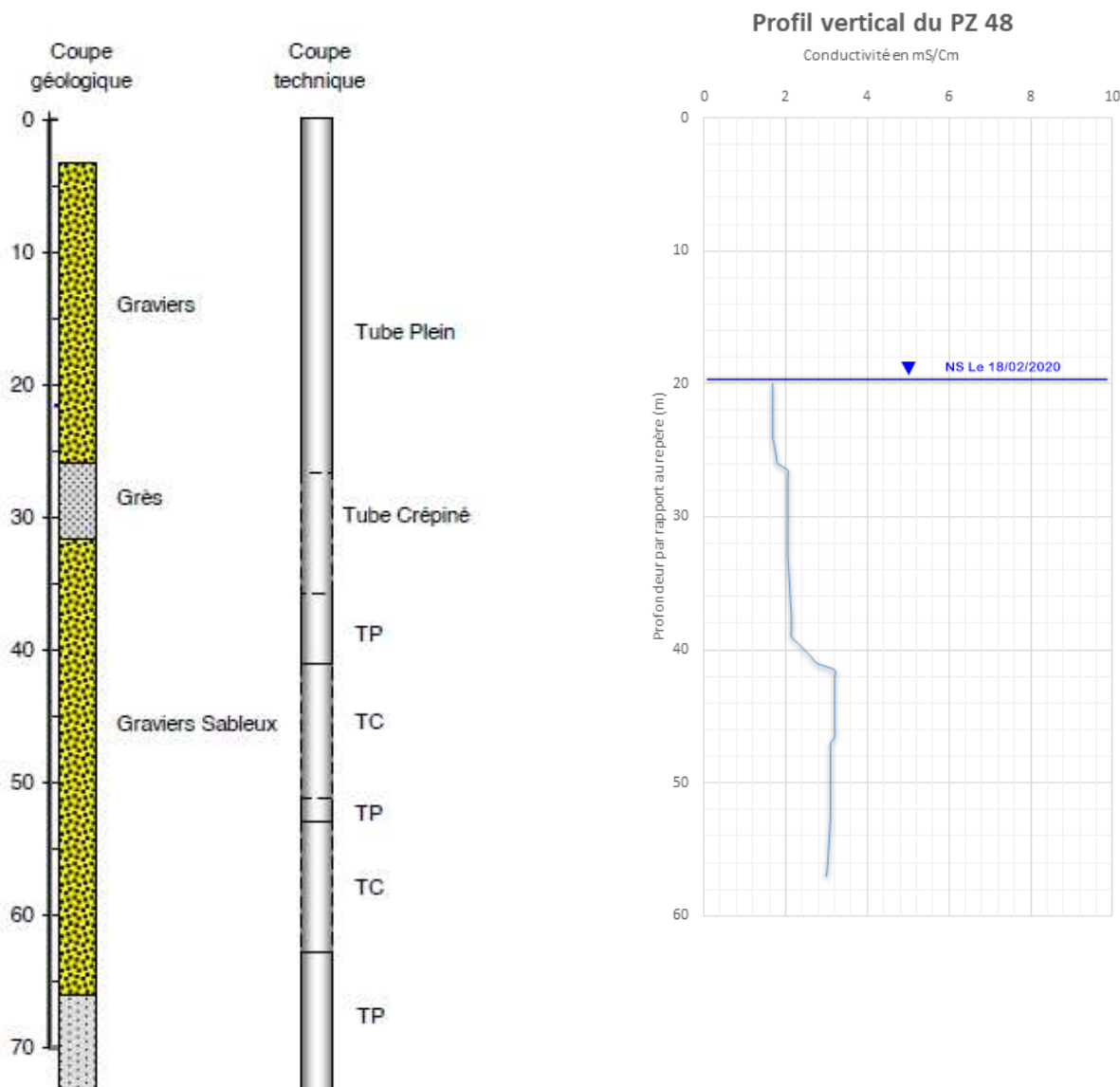


Fig.59 : Profil vertical de conductivité du PZ 48

○ Interprétation :

Dans ce piézomètre (**Fig.59**) on note que la conductivité de l'année **2007** était **9000 uS/cm** à **40 m** et on **2009** sur même profondeur était **7200 uS/cm** et on **2020** la conductivité que nous avons mesuré est de **2400uS/cm** à **42 m** de profondeur cette diminution depuis l'année **2007** peut-être expliqué par 2 hypothèses :

- Les précipitations importantes enregistrées qui ont permettent une bonne recharge de la nappe dès lors la dilution des sels d'eau de mer.
- Probablement un arrêt de pompage ce fait quelque part dans cette zone pour cette raison le niveau statique augmente et le front salé recule.

d) Profil du PZ 60 :

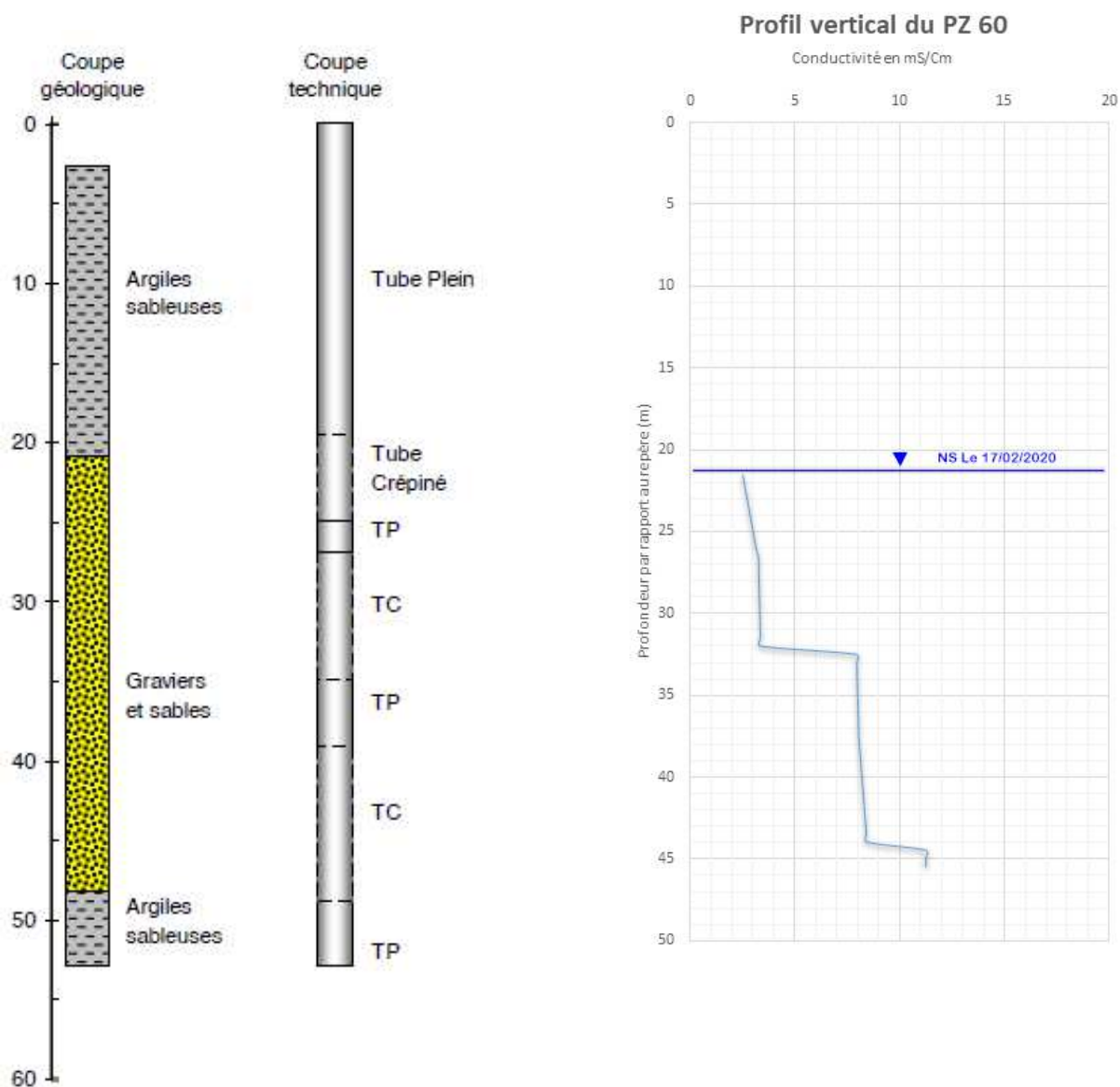


Fig.60 : Profil vertical de conductivité du PZ 60

○ **Interprétation :**

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

Par rapport les années précédentes la conductivité est en progression positive ce qui confirme l'évolution de l'intrusion marine (**Fig.60**).

e) Profil du PZ 61 :

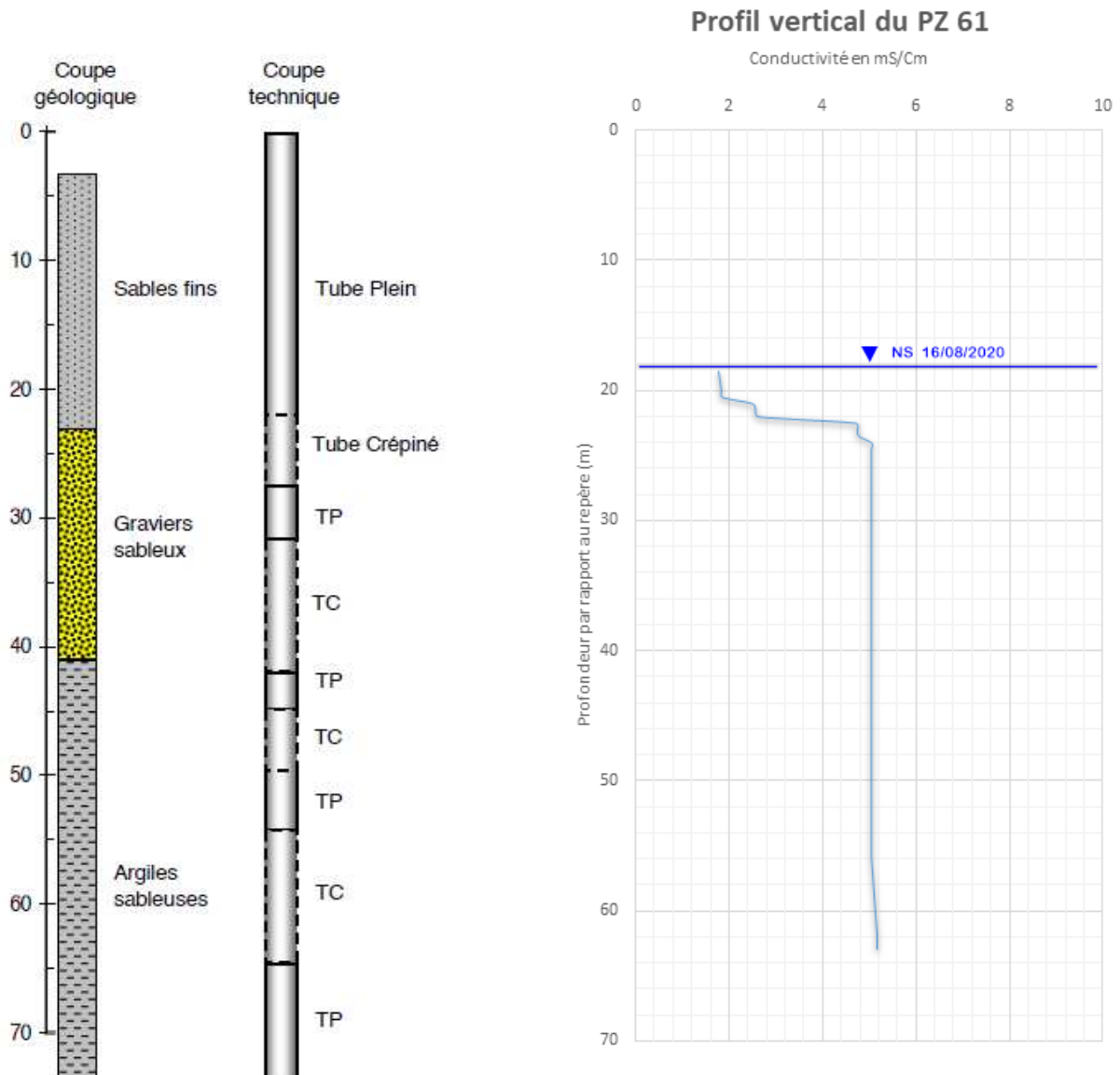


Fig.61 : Profil vertical de conductivité du PZ 61

○ Interprétation :

Dans ce piézomètre (**Fig.61**) on note que la conductivité de l'année **2007** était **12000 uS/cm** à partir de **25 m** jusqu'au fond et on **2009** sur même profondeur la conductivité diminue de **35%** par rapport à l'année **2007** et on **2020** la conductivité que nous avons mesuré est de **5000uS/cm** cette diminution depuis l'année **2007** peut-être expliqué par 2 hypothèses :

- Les précipitations importantes enregistrées qui ont permettent une bonne recharge de la nappe dès lors la dilution des sels d'eau de mer.
- Probablement un arrêt de pompage ce fait quelque part dans cette zone pour cette raison le niveau statique augmente et le front salé recul.

f) Profil du PZ 36 :

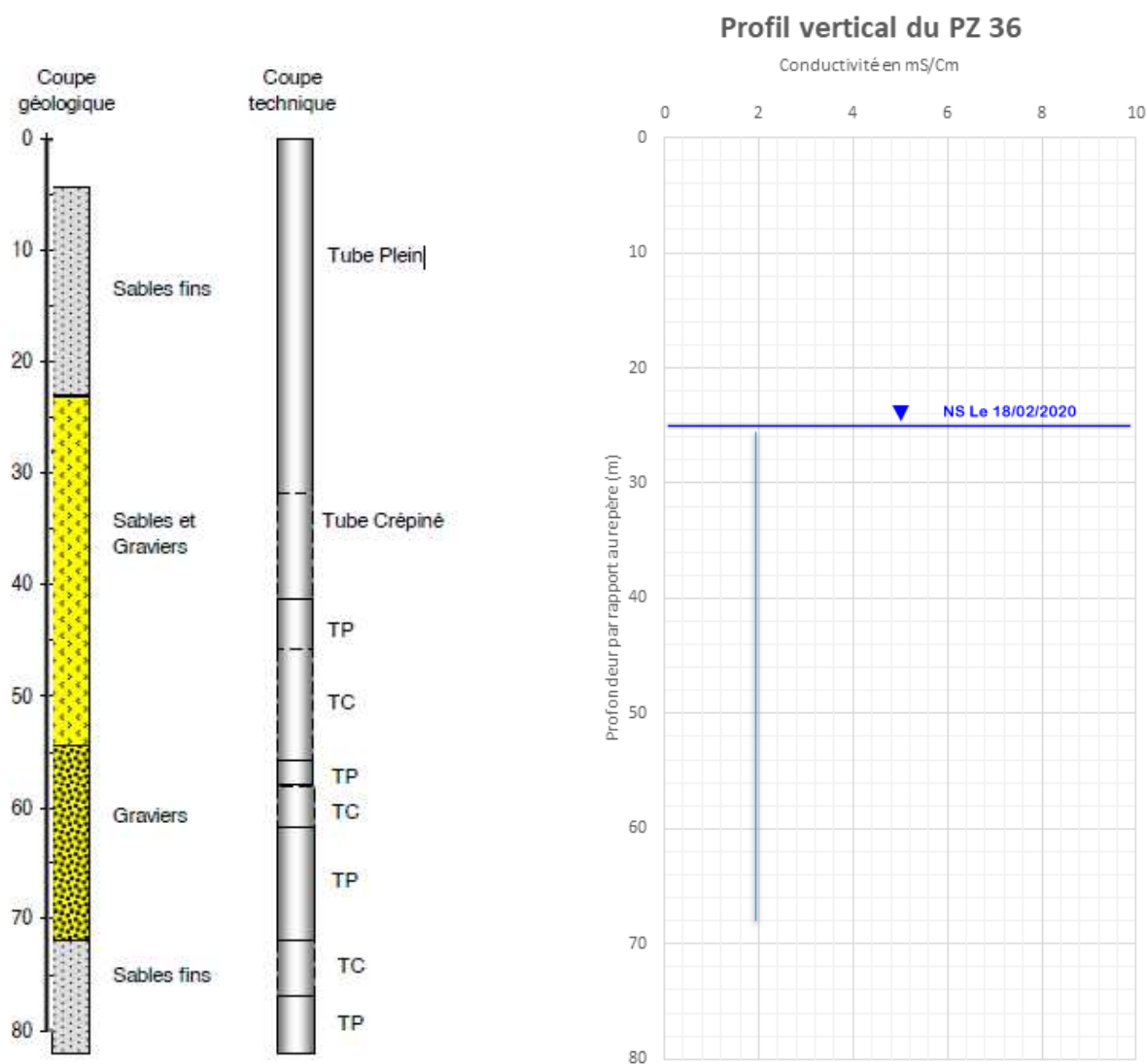


Fig.62 : Profil vertical de conductivité du PZ 36

○ **Interprétation :**

Dans ce piézomètre (**Fig.62**), la conductivité est d'environ **1900 uS/Cm** à la surface à profondeur de **25 m** ça reste stable le long du piézomètre jusqu'au fond, ce piézomètre est légèrement contaminé par l'eau de mer par rapport l'année **2009**.

g) Profil du PZ B :

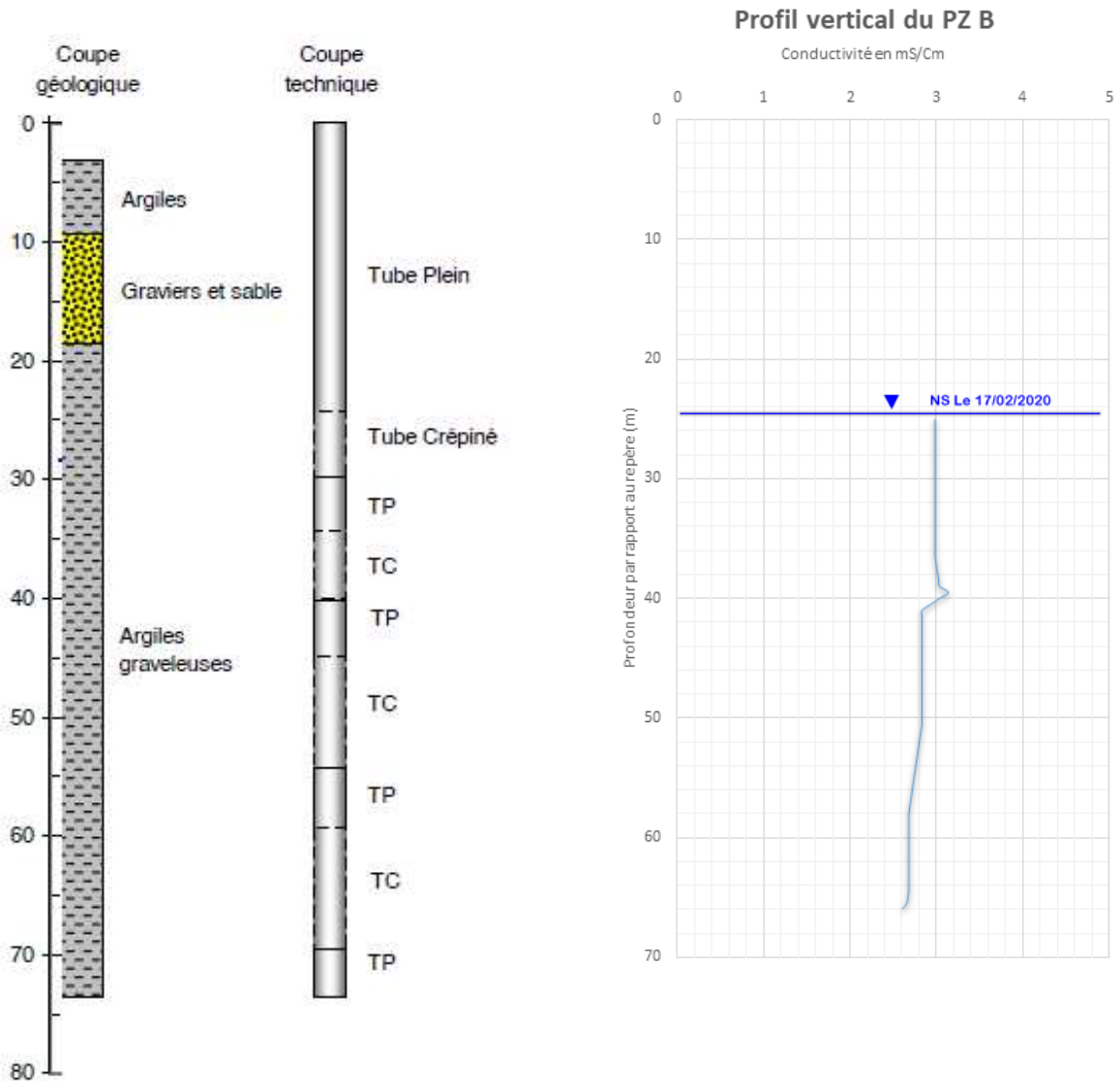


Fig.63 : Profil vertical de conductivité du PZ B

○ Interprétation :

Dans ce piézomètre (**Fig.63**), le profil de conductivité présente une valeur de **3000 uS/Cm** à la surface ensuite cette conductivité diminue de petit à petit à partir de **40 m** de profondeur et stabilise à la valeur de **2600 uS/Cm** à partir de **55 m** de profondeur jusqu'au fond de ce dernier.

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

h) Profil du PZ D :

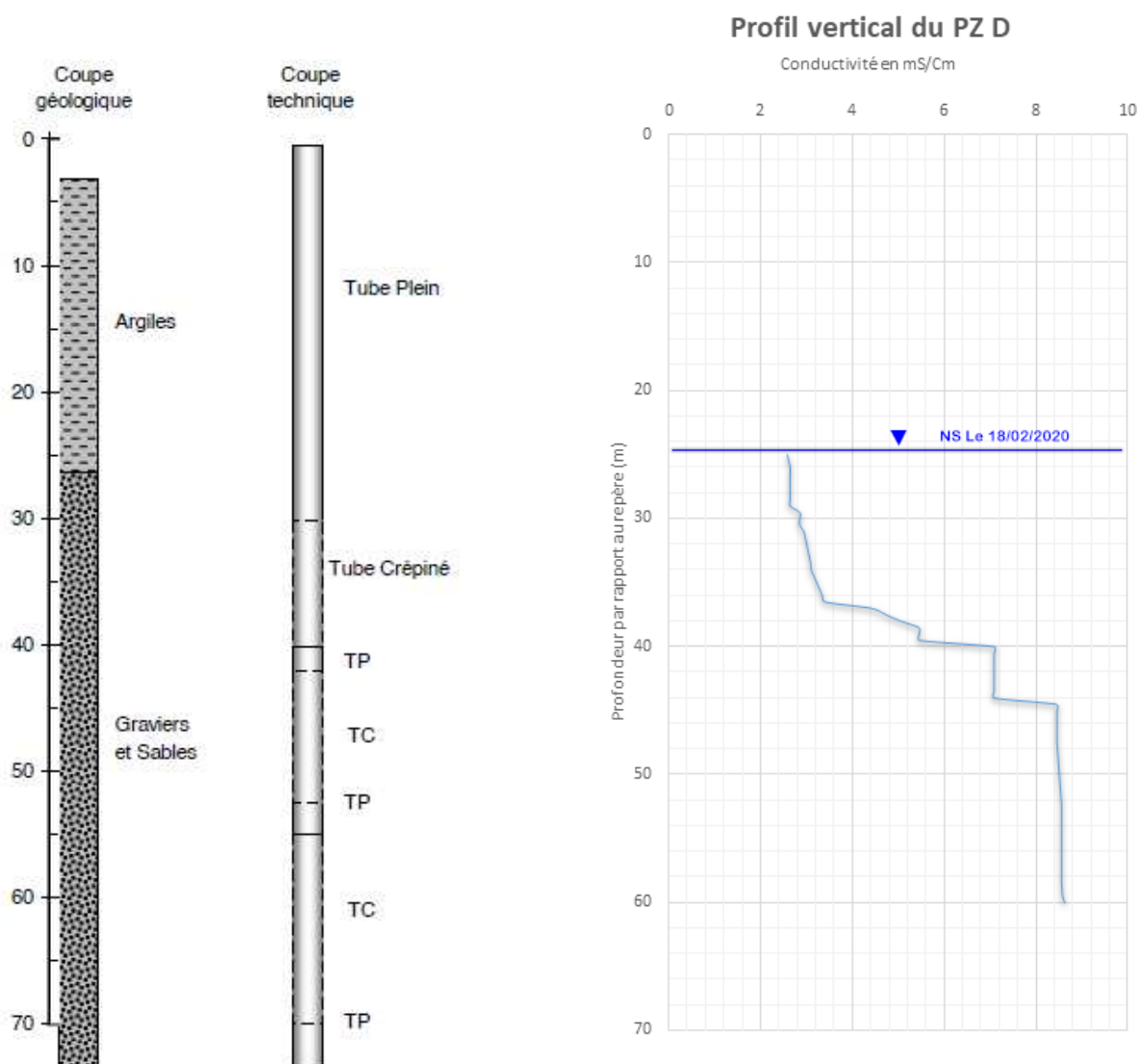


Fig.64 : Profil vertical de conductivité du PZ D

○ **Interprétation :**

Dans ce piézomètre (**Fig.64**), on remarque que la conductivité à la surface est de **2300 uS/Cm** et augmente progressivement de **25 m** jusqu'à **44 m** de profondeur et se coïncide à **8200 uS/Cm** jusqu'au fond. En **2007** la conductivité était stable autour de **1000 uS/Cm** et en **2009**, elle augmente pour atteindre une valeur maximum de **2000 uS/Cm**.

On constate que ce piézomètre est contaminé.

i) Profil du PZ F :

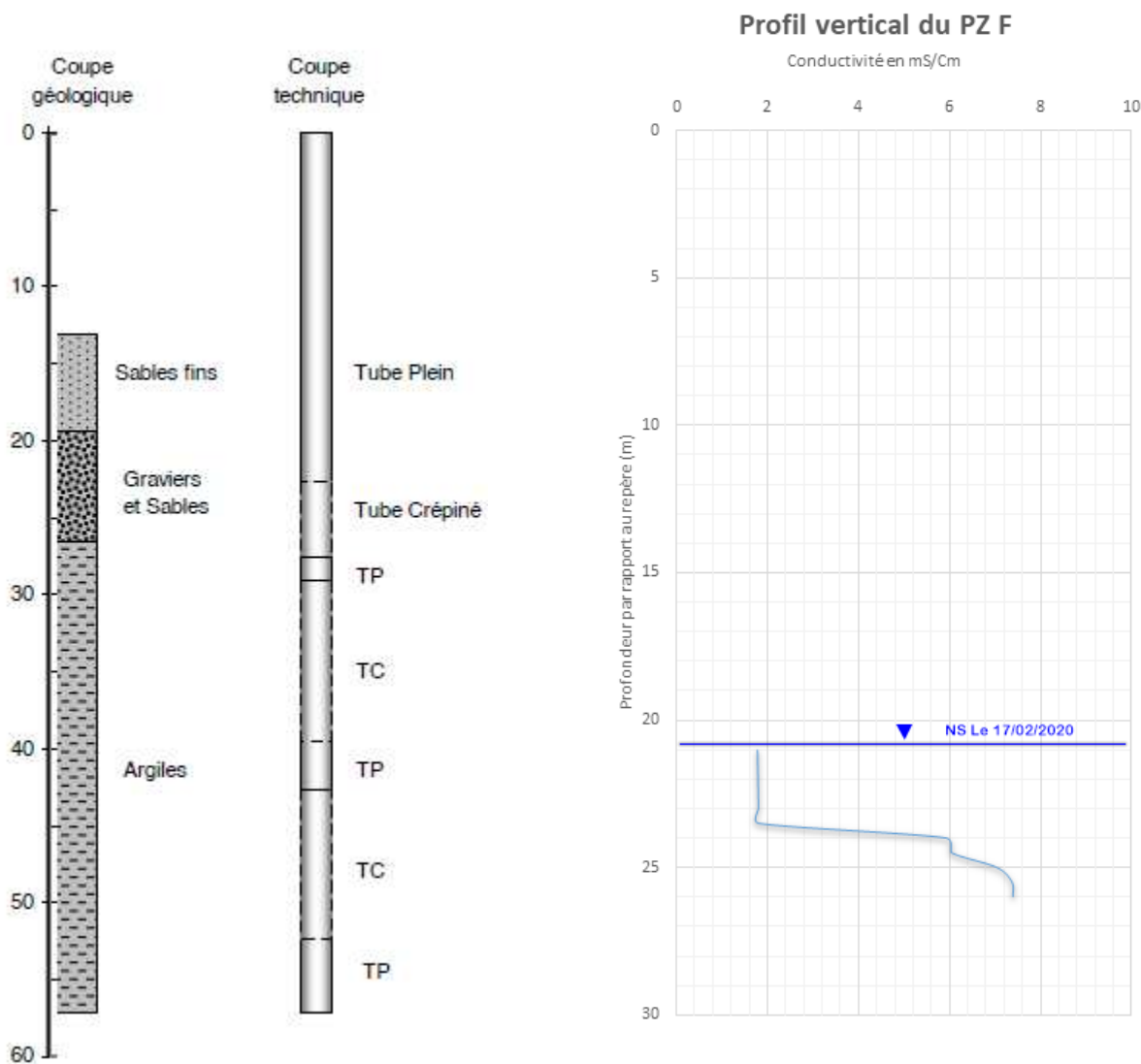


Fig.65 : Profil vertical de conductivité du PZ F

○ Interprétation :

Dans ce piézomètre (**Fig.65**), le niveau statique est à **21 m** et la conductivité est **1900 uS/Cm**, et à partir du premier tube crépiné on remarque une augmentation agressive de conductivité sur une courte distance de **3 m** pour atteindre **7400 uS/Cm** comme une valeur maximale.

j) Profil du PZ E :

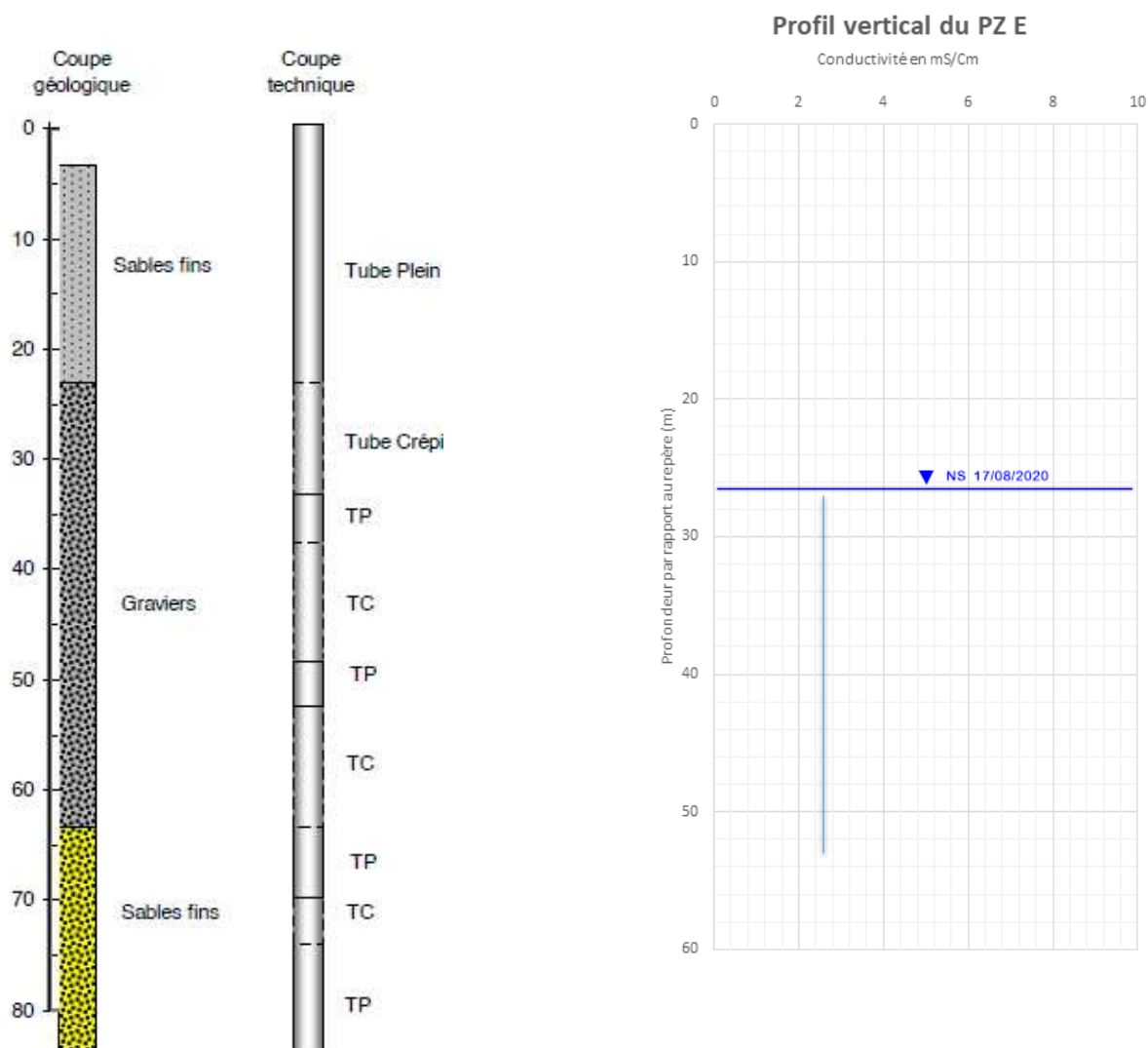


Fig.66 : Profil vertical de conductivité du PZ E

○ **Interprétation :**

Dans ce piézomètre (**Fig.66**), on remarque que la conductivité est stable dès le début de mesure à une valeur de **2570 uS/Cm**. En **2007** et **2009**, la conductivité était stable autour de **2000 uS/Cm**. On observe une augmentation légère durant la période **2009 – 2020**, alors on peut dire qu'il est en voie de contamination.

k) Profil du PZ Hamiz 1:

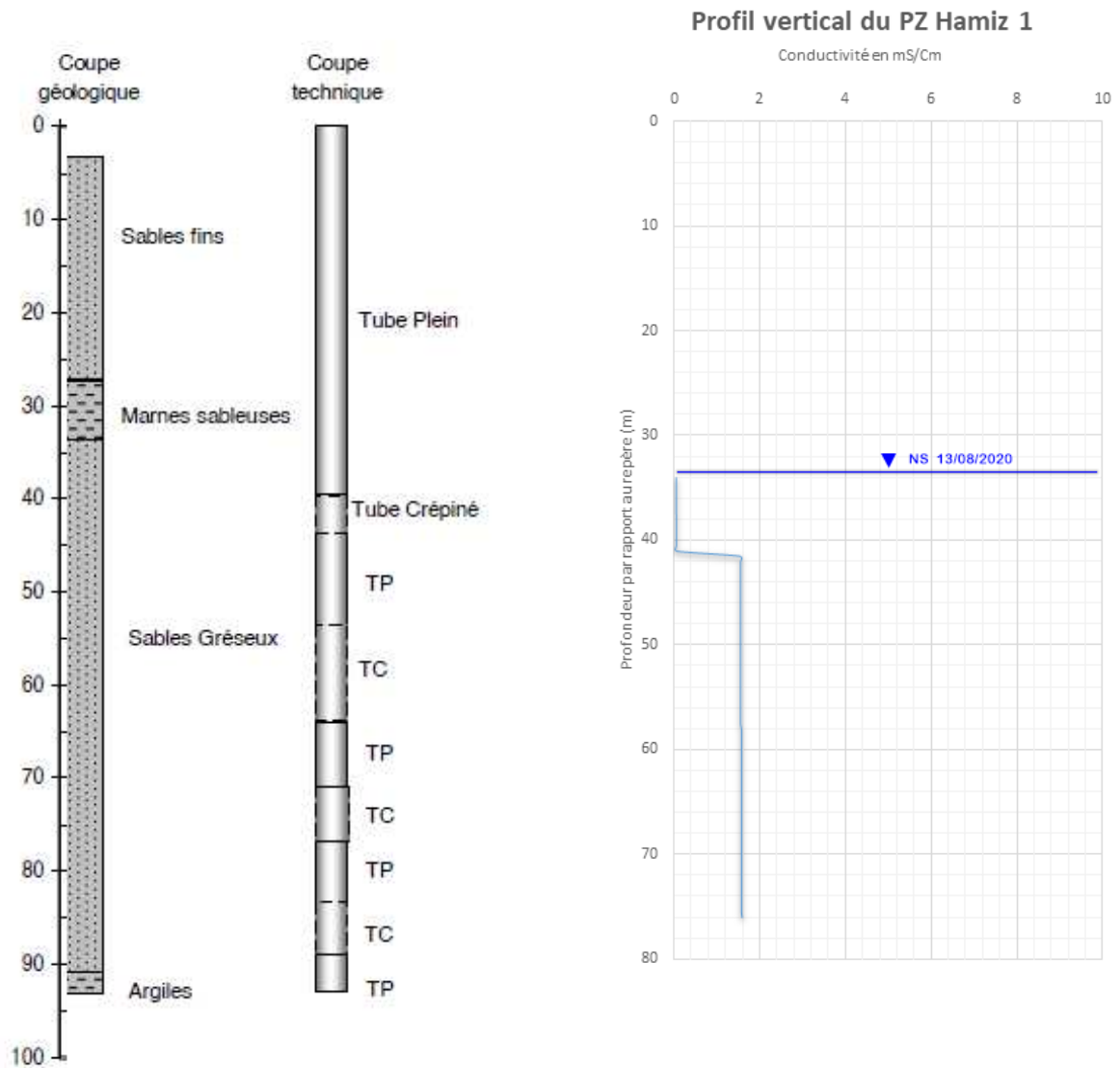


Fig.67 : Profil vertical de conductivité du PZ 1 Hamiz

○ **Interprétation :**

Dans le **Pz 1 Hamiz**, on remarque que la conductivité est de **340 uS/Cm** à partir de **34 m** à **41 m** de profondeur et s'augmente brusquement pour atteindre **1500 uS/Cm** et se stabilise jusqu'au fond **76 m (Fig.67)**.

I) Profil du PZ Hamiz 2:

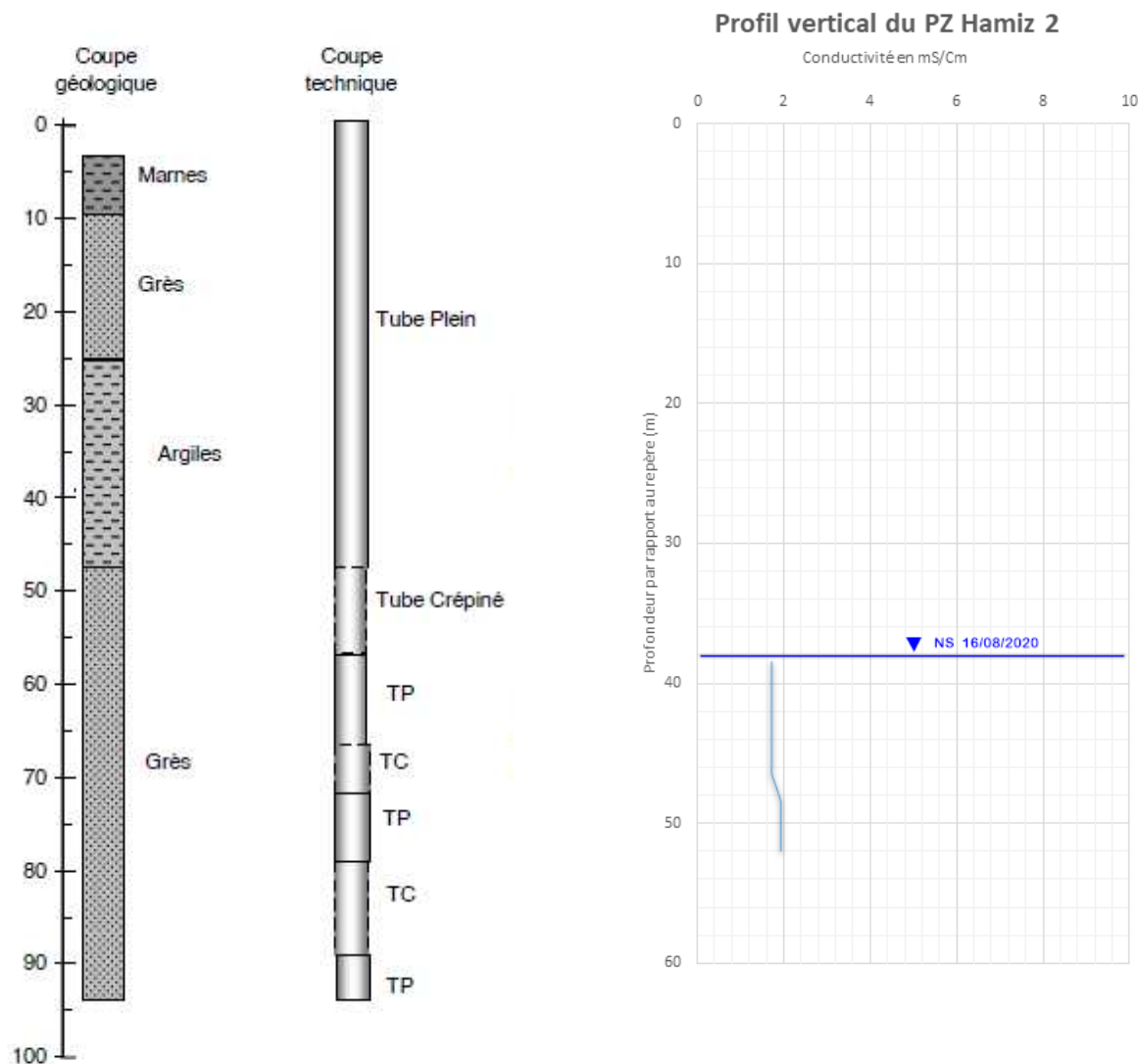


Fig.68 : Profil vertical de conductivité du PZ 2 Hamiz

○ Interprétation :

Dans le **PZ 2 Hamiz**, on observe que la conductivité varie entre **1800 uS/Cm** et **2000 uS/Cm**. En **2009**, la conductivité était autour de **1000 uS/Cm**, alors on peut dire que la salinité a augmenté ce qui peut être expliqué par un effet de l'intrusion sous le pompage excessif des forages du champ captant d'el Hamiz (**Fig.68**).

m) Profil du PZ 41:

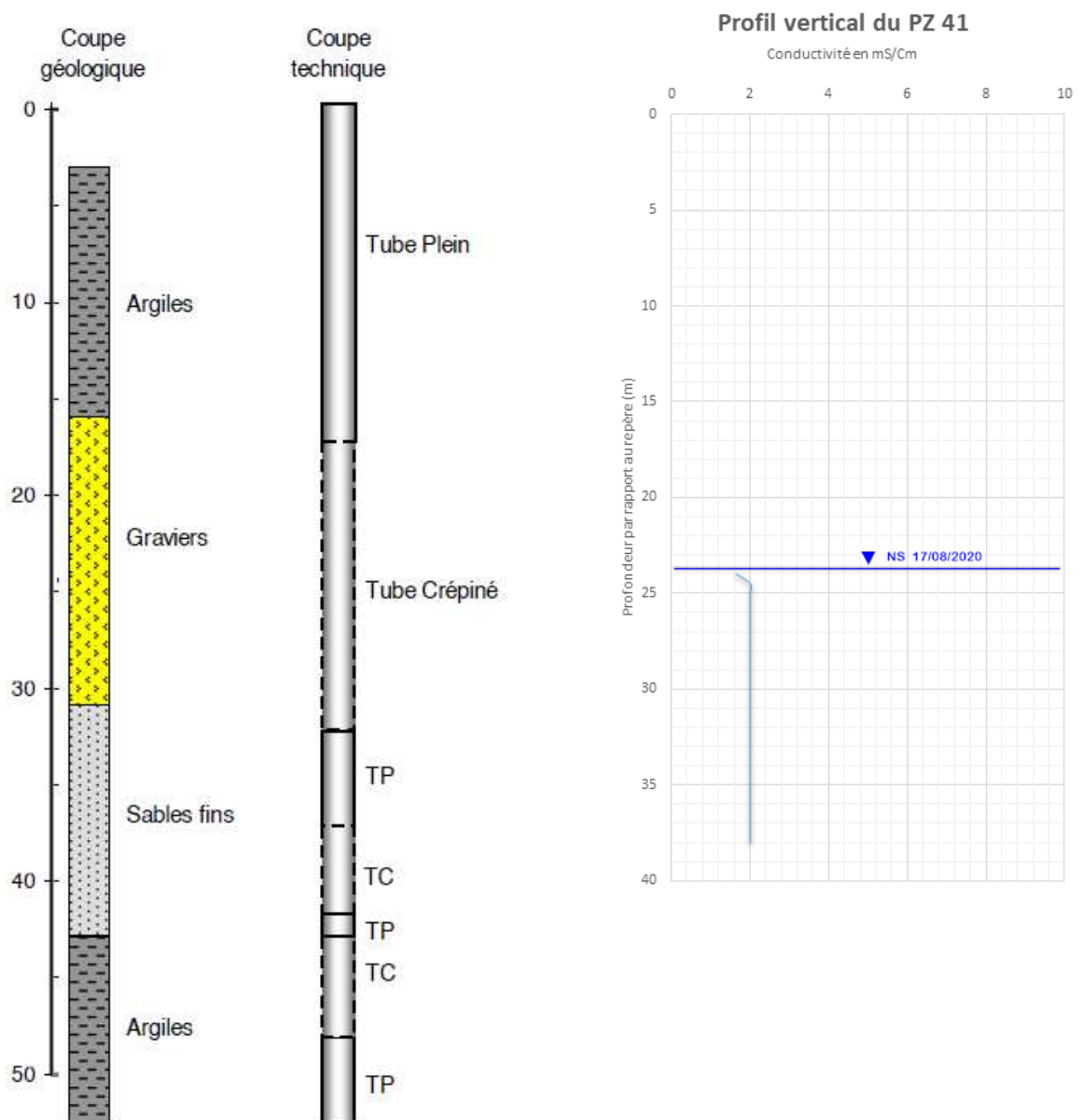


Fig.69 : Profil vertical de conductivité du PZ 41

○ **Interprétation :**

Ce profil enregistre une valeur de conductivité **2500 uS/Cm**. A la profondeur de **32 m** la conductivité reste stable le long du piézomètre jusqu'au fond. En **2009** la conductivité était **2000 uS/Cm** donc on peut dire que ce piézomètre est en voie de contamination (**Fig.69**).

4.3.3. Les facies chimique :

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

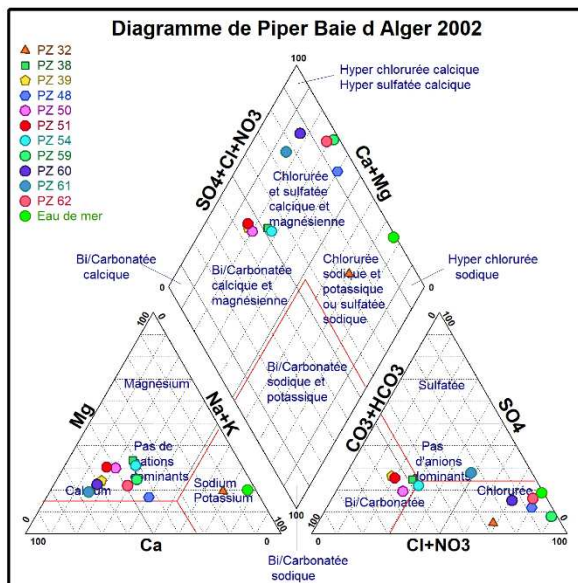


Fig.70 : Diagramme de Piper relatif aux points d'eau prélevés à la baie d'Alger 2002

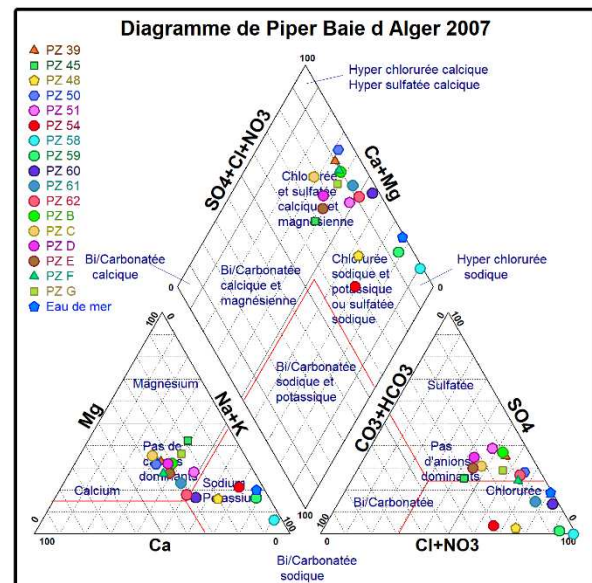


Fig.71 : Diagramme de Piper relatif aux points d'eau prélevés à la baie d'Alger 2007

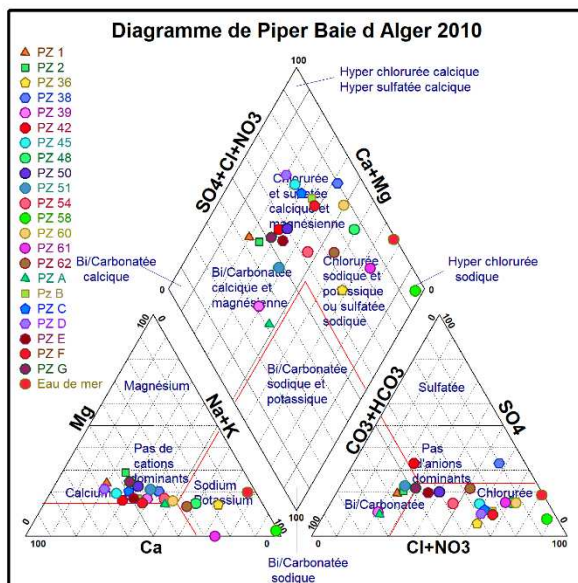


Fig.72 : Diagramme de Piper relatif aux points d'eau prélevés à la baie d'Alger 2010

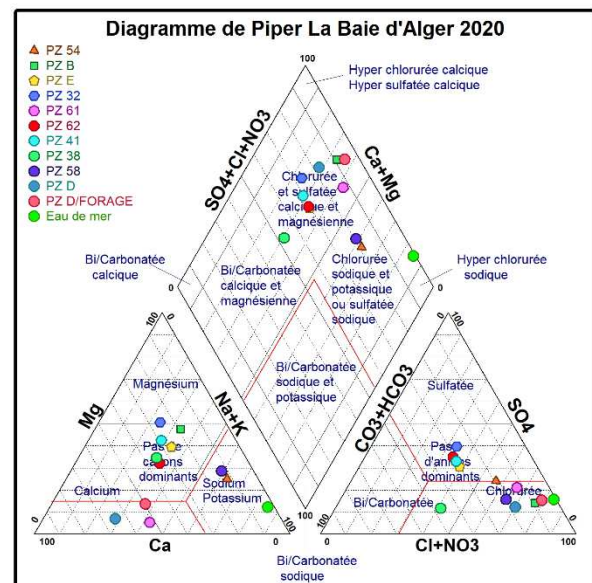


Fig.73 : Diagramme de Piper relatif aux points d'eau prélevés à la baie d'Alger 2020

- **Baie d'Alger 2002 :**

La représentation des données d'analyses chimiques des points d'eau de la baie d'Alger en 2002 sur le diagramme de Piper (**Fig.70**) permet de distinguer trois groupes :

- **1^{er} groupe** (PZ 38, PZ 48, PZ 54, PZ 59, PZ 60, PZ 61, PZ 62) ont un facies du type chlorurée et sulfatée calcique et magnésienne avec une augmentation de concentration de calcium.
- **2^{ème} groupe** (PZ 38, PZ 39, PZ 50, PZ 51 et PZ 54) ont un facies du type bicarbonatée calcique et magnésienne avec une augmentation de concentration de sulfate pour PZ 38 et PZ 54.
- **3^{ème} groupe** (PZ 32 et Eau de mer) ont un facies du type chlorurée sodique et potassique ou sulfatée sodique dont le point de l'eau de mer est hyper chlorurée sodique.

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

- **Baie d'Alger 2007**

La représentation des données d'analyses chimiques des points d'eau de la baie d'Alger en **2007** sur le diagramme de Piper (**Fig.71**) permet de distinguer deux groupes :

- **1^{er} groupe** (PZ 39, PZ 45, PZ 50, PZ 51, PZ 59, PZ 60, PZ 61, PZ 62, PZ C, PZ D, PZ E, PZ F et PZ G) ont un facies du type chlorurée et sulfatée calcique et magnésienne avec une augmentation de concentration de calcium.
- **2^{ème} groupe** (PZ 48, PZ 54, PZ 58, PZ B et Eau de mer) ont un facies du type chlorurée sodique et potassique ou sulfatée sodique dont les points PZ B PZ 58 et Eau de mer sont hyper chlorurées sodiques.

Ce facies témoigne de l'avancée de l'eau de mer de plus en plus en 2007.

- **Baie d'Alger 2010**

En **2010** sur le diagramme de Piper (**Fig.72**) permet de distinguer trois groupes :

- **1^{er} groupe** (PZ 2, PZ 38, PZ 42, PZ 45, PZ 50, PZ 54, PZ 60, PZ C, PZ D, PZ E, PZ F et PZ G) ont un facies du type chlorurée et sulfatée calcique et magnésienne.
- **2^{ème} groupe** (PZ A, PZ B, PZ 1, PZ 39 et PZ 51) ont un facies du type bicarbonatée calcique et magnésienne.
- **3^{ème} groupe** (PZ 36, PZ 48, PZ58, PZ 61, PZ 62 et Eau de mer) ont un facies du type chlorurée sodique et potassique ou sulfatée sodique dont PZ 58 et le point de l'eau de mer sont hyper chlorurée sodique.

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

• Baie d'Alger 2020

En **2020** sur le diagramme de Piper (**Fig.73**) permet de distinguer deux groupes :

- **1^{er} groupe** (PZ B, PZ E, PZ 32, PZ 61, PZ 62, PZ 41, PZ D D/FORGAE et PZ 38) ont un facies du type chlorurée et sulfatée calcique et magnésienne.
- **2^{ème} groupe** (PZ 54, PZ 58, et l'eau de mer) ont un facies du type chlorurée sodique et potassique ou sulfatée sodique.

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

4.3.4. Étude de couple chimique Na-Cl :

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

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

2^{ème} et **3^{ème}** **groupe** s'alignent sur la droite de dilution de l'eau de mer, et donc subit un apport d'eau salée, on peut dire qu'il y a un mélange entre les eaux de mer et les eaux de la nappe (**Fig.74**).

En 2020, la répartition des points reste toujours sur la droite de dilution de l'eau de mer.

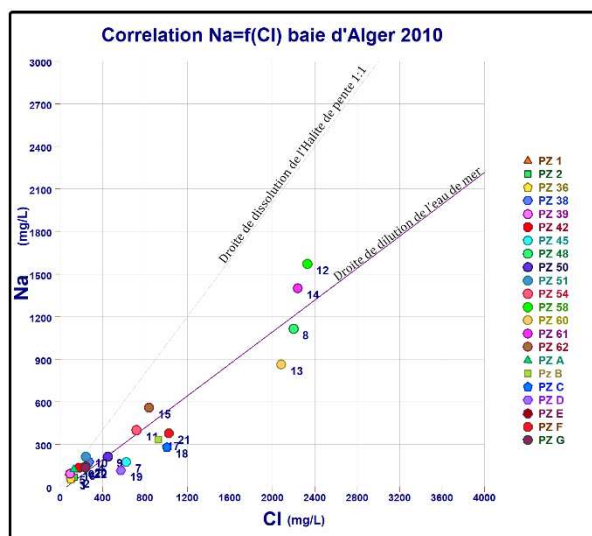


Fig.74 : Variation de sodium en fonction de chlorures la Baie d'Alger en 2010

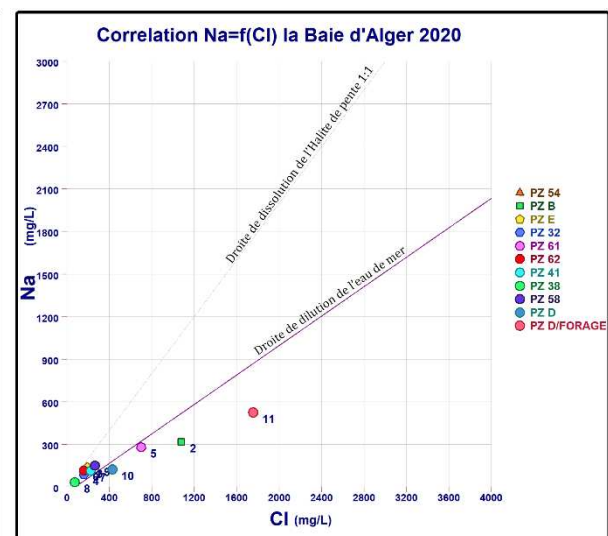


Fig.75 : Variation de sodium en fonction de chlorures la Baie d'Alger en 2020

4.3.5. Cartes iso-teneurs :

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

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

- En 2007 :

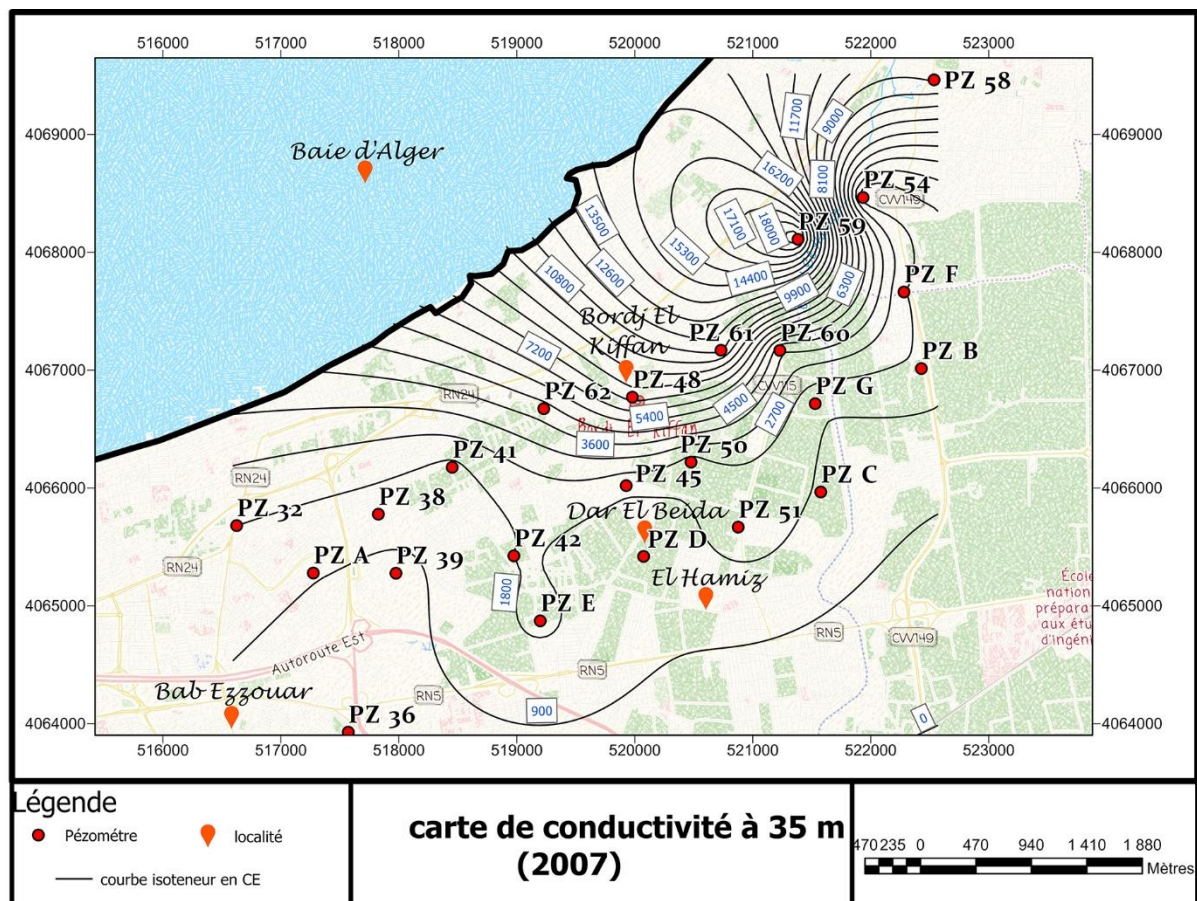


Fig.76 : Carte de conductivité à 35 m de Juillet 2007 réalisé à l'aide de logiciel ArcGIS PRO

- Interprétation :

Après l'examen de la carte iso-teneurs en conductivité que nous avons établi on remarque qu'on a une conductivité très élevée à l'ordre de **18000 uS/Cm** au niveau du **PZ 59** qui s'étend pour toucher le **PZ 58**, **PZ 48**, et **PZ 61** qui ont une conductivité varie entre **8550 uS/Cm** et **12050 uS/Cm**. La courbe iso valeur de **5400 uS/Cm** atteint le **PZ 62** ce qui n'était pas le cas à les années précédents mettant en évidence l'envahissement de toute la bordure côtière est par les eaux salées (Fig.76).

- En 2020 :

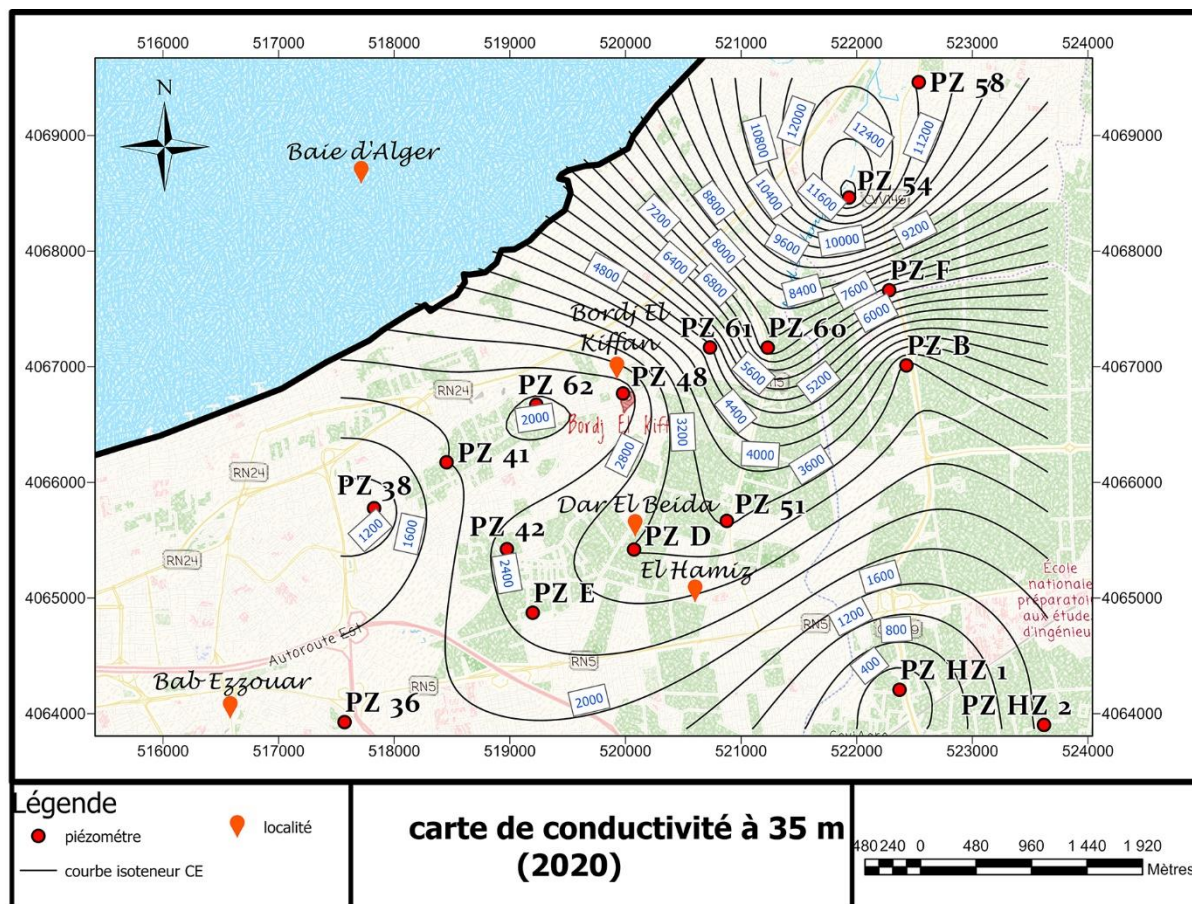
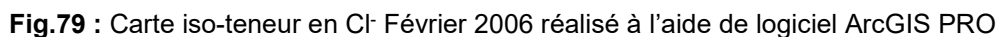
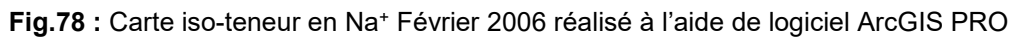


Fig.77 : Carte de conductivité à 35 m de Février 2020 réalisé à l'aide de logiciel ArcGIS PRO

- **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 élevées qui dépassent **12000 uS/Cm**. on a également constaté qu'on a une salinité d'origine marine (**Fig.77**).

- **En 2006 :**



○ **Interprétation :**

L'examen des cartes iso-teneur en sodium et chlore (**Fig.78**) et (**Fig.79**) 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 :**

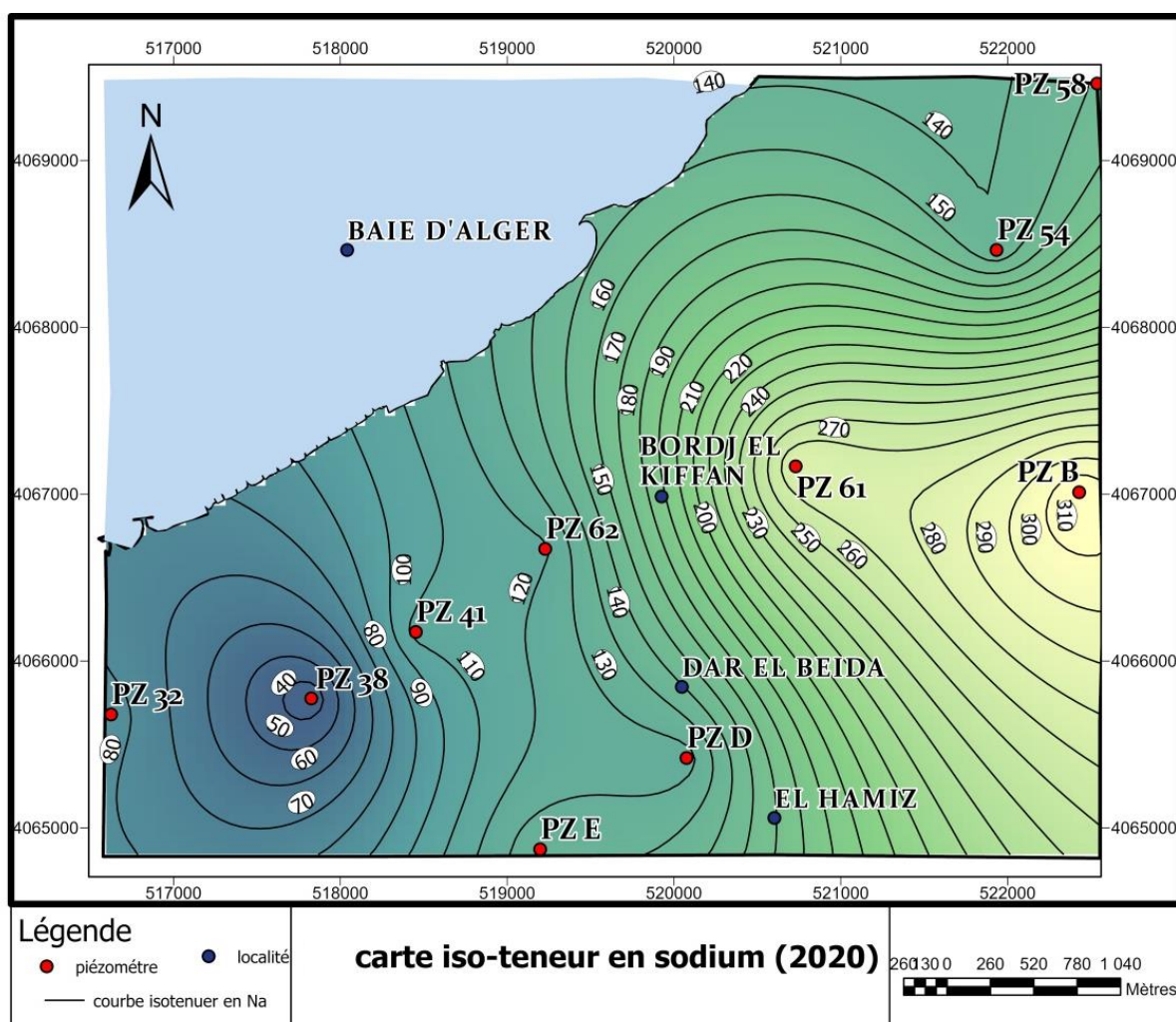


Fig.80 : Carte iso-teneur en Na^+ Février 2020 réalisé à l'aide de logiciel ArcGIS PRO

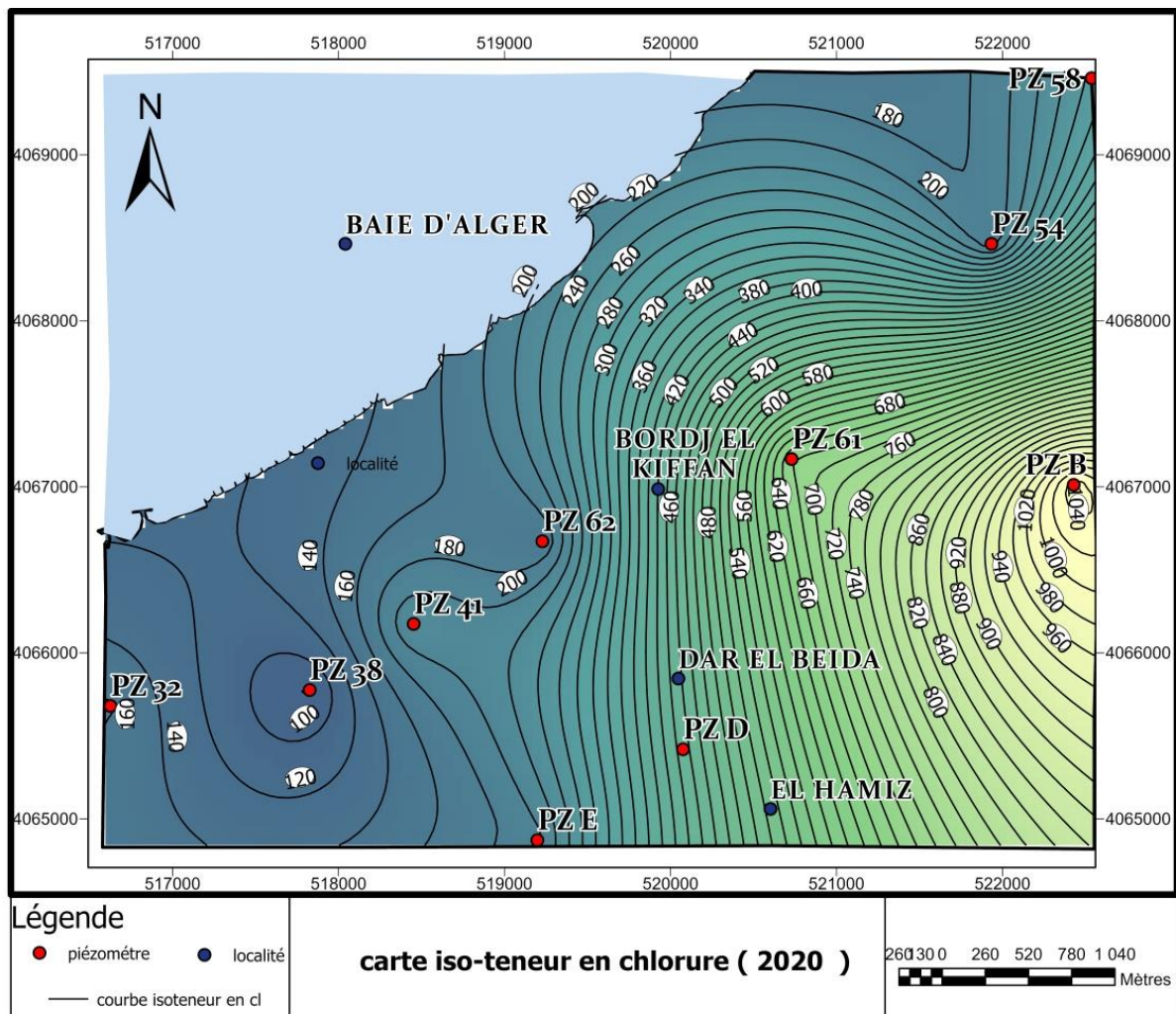


Fig.81 : Carte iso-teneur en Cl⁻ Février 2020 réalisé à l'aide de logiciel ArcGIS PRO

○ Interprétation :

L'examen des cartes iso-teneur en sodium et chlorures (**Fig.80**) et (**Fig.81**) montre que la concentration de sodium et chlorures augmente au **PZ B** cette progression en concentration est dû à l'avancement du front salée qui est provoqué par le cône de dépression créé au niveau du champ de captage d'El Hamiz qui situe à **1 Km** du **PZ B**.

4.3.6. État approximatif du biseau en 2019/2020 :

La carte des conductivités actuelle (**2020**) montre que le front salé provient du secteur de Bateau cassé et semble avoir avancé.

La limite de **4000 $\mu\text{S}/\text{cm}$** se trouve désormais au-delà des piézomètres **PZ B**, **PZ G**, **PZ 50**, **PZ 45**, **PZ 61**, **PZ 60** et **PZ 62**. Ce qui n'était pas le cas au cours des années précédentes.

En 2020 l'extension maximale de l'intrusion marine s'étend actuellement sur près de 5 km vers le champ captant du Hamiz.

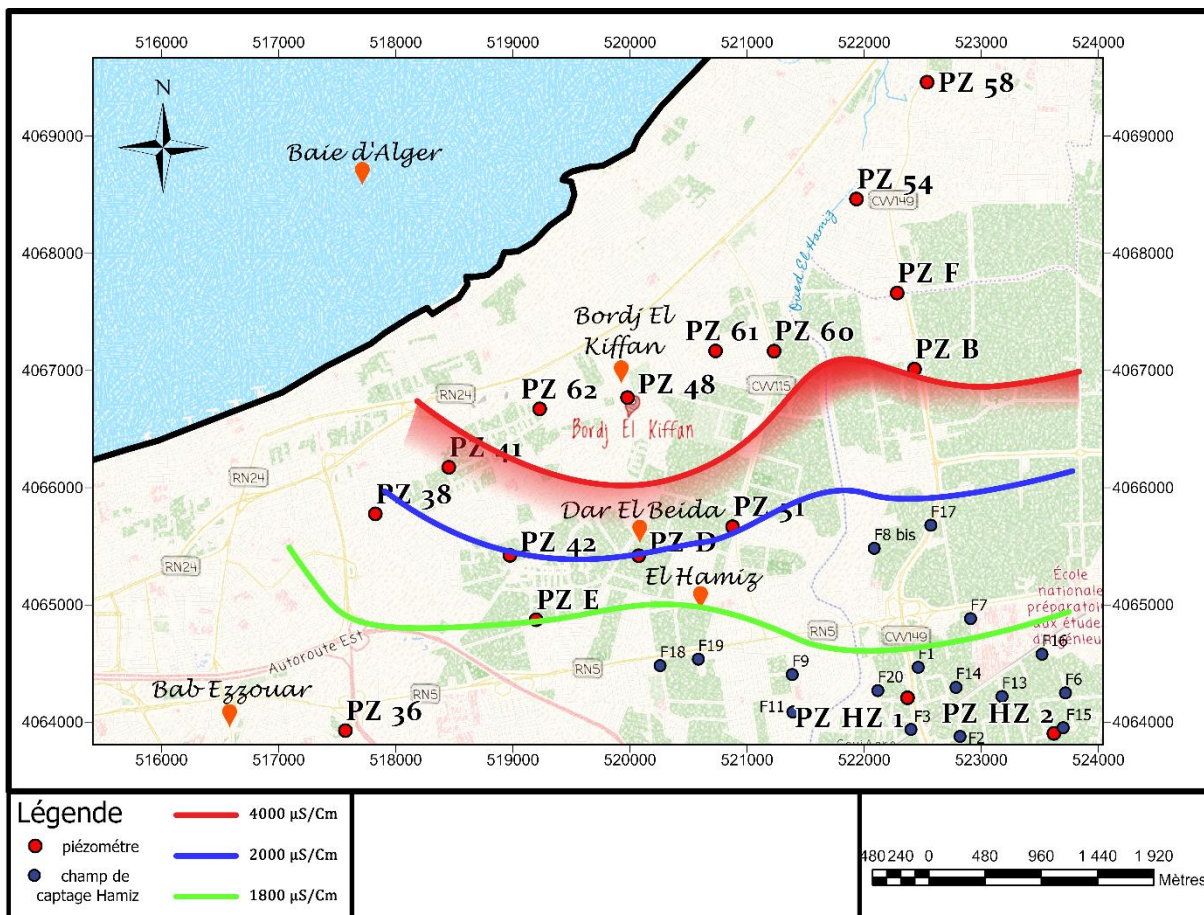


Fig.82 : État du approximatif du biseau en 2019/2020 la baie d'Alger

4.4. Conclusion :

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

Conclusion générale :

La baie d'Alger est l'une des régions d'Algérie les plus touchées par le phénomène de l'intrusion marine. Ce phénomène dans la région d'étude a été prouvé par combinaison de plusieurs approches (hydrodynamique, hydrochimique). Les résultats obtenus par ces méthodes ont permis de mettre en évidence cette intrusion marine.

La comparaison de l'état piézométrique récent (2020) 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.

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 de la côte jusqu'au champ captant du Hamiz.

Les données hydrochimiques montrent que le faciès Chlorurée et sulfatée calcique et magnésien est prédominant dans (PZ 39, PZ 45, PZ 50, PZ 51, PZ 62, PZ D, PZ E et PZ F) et le faciès hyper chloruré caractérise les points (PZ 48, PZ 54, PZ 58, PZ B, PZ 60 et PZ 61) qui sont très proches de la côte.

La Baie d'Alger se caractérise par des valeurs de conductivité qui varient entre 500 à 900 $\mu\text{S}/\text{Cm}$ cela conduit à conclure que le chimisme de l'eau a complètement changé surtout dans les zones côtières où elles atteignent des valeurs supérieures à 12990 $\mu\text{S}/\text{Cm}$, ce qui explique l'avancée de le front salé vers le continent.

La comparaison entre les cartes d'iso-conductivités fait apparaître qu'il y a trois zones sensibles le long de la côte (Stamboul, Bordj El Kiffan et la partie Est de Verte Rive) une frange contaminée par l'eau de mer a progressé depuis 2006 de plus en plus. En 2020 l'extension maximale de l'intrusion marine s'étend actuellement sur près de 5 km vers le champ captant du Hamiz.

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.

Recommandations :

L'intrusion marine est un phénomène irréversible pour cette raison on essaie de trouver des solutions afin de freiner ce phénomène. Les solutions sont multiples mais exigent des mesures à prendre avant d'envisager les solutions requises. Les solutions possibles de lutte contre l'intrusion marine, imposent des mesures à prendre tels que :

- Faire une investigation complète des forages licites et illicites d'industrie et d'agriculture, les piquages d'eau d'AEP et leur quantification en mètre cube.
- Mise en place d'un plan de gestion de la ressource en eau souterraine qui prit en considération le bilan hydrogéologique de la nappe.
- Racheter la quantité d'eau qui ne sera pas prélevée dans la nappe dans le champ captant du Hamiz pour l'alimentation en eau potable, industrielle et d'irrigation.
- Assurer le volume d'eau suffisant et la ressource adéquate pour la recharge artificielle en nappe.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE

[13] Agence Nationale Des Ressources Hydriques (ANRH)

[10] **Benaich, B. 2011.** État de l'intrusion marine dans la baie d'Alger .cas champ de captage Bouréah et Hamiz : Mémoire de Master, Université Saad Dahleb - Blida.

[5] **Bouderbala, A. (2015).** Contribution des méthodes hydrochimiques et géophysiques à l'acquisition de la minéralisation dans les zones côtières cas de la nappe alluviale de l'oued Nador - Tipaza (Algérie) : Doctorat en hydraulique. Université Hassiba Benbouali de Chlef.227p.

[4] **CHAOUA OUISSEM, 2017.** État de la pollution des nappes aquifères du bassin méditerranéen contaminées par les eaux de mer.

[9] **CHERIET Abdelkarim, CHIRANI Nabil, 2018.** La recharge artificielle de l'aquifère alluvial dans la région de TABAINET (Mitidja Orientale). Mémoire de Master, Université des sciences et de la Technologie Houari Boumediene (U.S.T.H.B).

[3] **CHIMOUNI HICHEM, 2017.** L'évaluation du degré de pollution par l'intrusion marine de l'oued Sebaou. Mémoire de Master Université M'Hamed Bougara Boumerdes.

[2] **HADDAD Ouissam, 2017.** Étude de la vulnérabilité d'une nappe d'eau souterraine basée sur l'approche méthodologique GALDIT (Cas de la nappe de BOUTELDJA, Nord EST Algérien.) : Mémoire de Master, École Nationale Supérieure d'Hydraulique.

[6] **Haddani, H. 2010.** Mise en évidence de l'intrusion marine vers les aquifères côtiers de la zone comprise entre El Jadida et Oualidia (Maroc). Mémoire de fin d'étude Université CADI AYYAD Faculté des Sciences et Techniques Marrakech (Maroc).

[7] **KHOUALED Radja REMILI Safaa, 2017.** Mise en évidence de l'intrusion marine vers les Aquifères côtiers : cas de la plaine de Mitidja Orientale : Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah - Ouargla

[12] MAKHLOUF ép. BEHIRI Nouara .2010. Cartographie et évolution de l'état actuel du biseau salé de la baie d'Alger et son impact sur l'AEP (champ de captage du Hamiz) et l'industrie (champ de captage de Rouïba) : Mémoire Magister.

[11] Morcli, M. 2013. Apport des méthodes hydrochimiques et hydrodynamique à l'étude de intrusion marine cas baie d'Alger : Mémoire de Master, Université Saad Dahleb - Blida.

[1] MOUSSELMAL Mohammed, 2015. Contribution à l'étude de la recharge des nappes par procédés artificielles : Mémoire de Master, École Nationale Supérieure d'Hydraulique.

[8] REMINI B. (2010). La problématique de l'eau en Algérie du nord, Département des Sciences de l'eau et de l'environnement, Faculté des sciences de l'ingénieur, université Saad Dahlab – Blida.

[14] SOGREAH et ANRH, 2010. Rapport finale de SOGREAH : la lutte contre l'intrusion marine en Baie d'Alger .Blida, ANRH.

Annexe

Annexe 1 : Historique de niveau statique de piézomètres de la baie d'Alger.

Annexe 2 : Tableau d'analyse des eaux des piézomètres de l'ANRH, campagne de l'année 2002.

Annexe 3 : Tableau d'analyse des eaux des piézomètres de l'ANRH, campagne de l'année 2006.

Annexe 4 : Tableau d'analyse des eaux des piézomètres de l'ANRH, campagne de l'année 2007.

Annexe 5 : Tableau d'analyse des eaux des piézomètres de l'ANRH, campagne de janvier 2010.

Annexe 1 : Historique de niveau statique de piézomètres de la baie d'Alger.

Nom	X(UTM)	Y(UTM)	cote/RR	sept-03	oct-07	avr-10	mai-16	oct-18	août-20
PZ 32	516625,974	4065680,2	27,007	1,477	1,557	3,007	0,607	Imp	Imp
PZ 36	517570,548	4063927,5	18,074	-6,026	-9,026	-9,226	-8,926	-7,456	-8,326
PZ 38	517826,149	4065776,5	19,647	1,397	0,847	-4,353	3,247	1,897	2,297
PZ 39	517974,612	4065276,1	17,665	-8,885	-11,035	-0,635	-9,335	-8,335	Imp
PZ 41	518452,297	4066174,6	19,377	-6,623	-6,143	-2,173	-0,973	-3,273	-4,623
PZ 42	518974,962	4065423,1	23,671	-9,259	-11,019	0,821	-7,829	-8,489	-9,379
PZ 45	519926,683	4066020,1	17,819	-9,381	-10,281	-10,031	-7,031	-7,581	-8,431
PZ 48	519978,955	4066769,9	14,2	-7,3	-7,7	-11,02	-4,78	-5,4	-6
PZ 50	520477,231	4066218,4	16,011	-6,689	-9,419	-5,089	-5,889	-7,439	Imp
PZ 51	520875,519	4065667,3	17,381	-1,419	-7,579	-10,119	-1,619	-9,319	-9,169
PZ 54	521933,898	4068463,8	10,687	-6,513	-5,463	-4,563	-1,433	-2,263	-3,013
PZ 58	522536,861	4069461,9	13,72	-0,28	-0,48	2,87	3,27	2,02	1,32
PZ 59	521382,704	4068109,2	13,726	-6,774	-0,394	-5,424	Imp	Imp	Imp
PZ 60	521230,033	4067166,1	15,106	-8,144	-7,944	-7,394	-5,194	-6,294	-6,744
PZ 61	520730,087	4067167,6	14,279	-5,821	-5,451	-5,501	-2,971	-3,721	-4,321
PZ 62	519228,733	4066672,2	15,104	-7,196	-7,996	-9,496	-4,996	-5,596	-5,996
PZ A	517274,687	4065278,3	19,235	-5,365	-6,615	-6,275	-4,265	Imp	Imp
PZ B	522429,448	4067012,4	16,38	-11,62	-12,42	-10,77	-7,97	-8,82	-9,62
PZ C	521576,355	4065965,1	18,344	-3,406	-2,716	-0,056	-0,656	Imp	imp
PZ D	520074,845	4065419,7	15,494	-9,606	-10,966	-12,356	-10,196	-11,106	-9,306
PZ E	519198,266	4064872,4	16,766	-9,734	-12,034	-9,134	-8,924	-9,234	-10,334
PZ F	522281,435	4067662,8	15,074	-10,226	-8,646	-7,526	-4,906	-5,526	-5,726
PZ G	521528,635	4066715,2	16,426	-9,424	-10,574	-7,474	-3,274	-1,374	Imp
PZ h 1	522370,768	4064206,569	25,71	-11,59	-15,94	-14,54	0,7	-13,74	-8,295
PZ h 2	523619,729	4063902,81	27,35	-10,75	-14,95	-11,8	-9,7	-10,1	-11,153

Annexe 2 : Tableau d'analyse des eaux des piézomètres de l'ANRH, campagne de l'année 2002.

Nom	X(UTM)	Y(UTM)	Ca	Mg	Na	Cl	HCO3-	SO4
PZ 32	516625,974	4065680,194	46,4	41,52	275	468	312	47
PZ 38	517826,149	4065776,532	85,2	41,76	60	100	303	122
PZ 39	517974,612	4065276,129	144	36,08	50	72	378	140
PZ 48	519978,955	4066769,89	520,6	121,44	550	1690	290	342
PZ 50	520477,231	4066218,432	129,2	47,08	60	100	362	100
PZ 51	520875,519	4065667,276	124	43	45	88	415	152
PZ 54	521933,898	4068463,787	98	44,16	75	135	354	130
PZ 59	521382,704	4068109,179	1288	435,6	1050	5100	226	615
PZ 60	521230,033	4067166,053	393	88	125	788	267	230
PZ 61	520730,087	4067167,57	242,8	42,48	65	297	250	230
PZ 62	519228,733	4066672,179	807,6	219,84	550	2600	310	725

Annexe 3 : Tableau d'analyse des eaux des piézomètres de l'ANRH, campagne de l'année 2006.

Nom	X(UTM)	Y(UTM)	Ca mg/l	Mg mg/l	Na mg/l	K mg/l	Cl mg/l	SO4 mg/l	CO3H mg/l	CO3 mg/l	CE mmhos	R.Sec mg/l
Pz 32	516625,974	4065680,194	173	19	110	1	148	241	217	0	1,93	1210
Pz 36	517570,548	4063927,488	43	11	78	0	79	6	221	0	1,93	1207
Pz 38	517826,149	4065776,532	31	65	115	1	116	171	293	0	1,86	1359
PZ 39	517974,612	4065276,129	52	17	65	0	91	11	252	0	1,86	1239
Pz 41	518452,297	4066174,588	174	45	91	0	134	325	346	0	1,83	1224
Pz 42	518974,962	4065423,073	264	46	124	3	212	463	275	0	1,76	1218
Pz 45	519926,683	4066020,123	126	43	52	5	64	86	436	0	1,3	1384
Pz 48	519978,955	4066769,89	83	15	119	3	162	18	325	0	1,55	1030
Pz 50	520477,231	4066218,432	185	53	116	0	274	334	240	0	1,46	964
Pz 51	520875,519	4065667,276	226	73	164	0	269	426	407	0	1,4	938
Pz 54	521933,898	4068463,787	14	19	110	4	129	20	191	0	1,4	900
Pz 58	522536,861	4069461,857	37	9	481	8	775	3	82	0	1,33	799
Pz 59	521382,704	4068109,179	69	11	349	6	618	4	171	0	1,27	869
Pz 61	520730,087	4067167,57	120	36	107	0	156	193	237	0	1,08	797
Pz 62	519228,733	4066672,179	222	31	134	0	293	226	242	0	1,06	760
Pz A	517274,687	4065278,258	72	24	75	0	92	55	265	0	0,95	652
Pz B	522429,448	4067012,43	226	51	100	0	354	186	253	0	0,95	644
Pz D	520074,845	4065419,731	60	24	150	0	231	69	156	0	0,76	524
Pz E	519198,266	4064872,448	197	43	150	0	238	231	346	0	0,67	442
Pz F	522281,435	4067662,815	113	27	65	0	77	102	338	0	0,61	405
Pz G	521528,635	4066715,192	149	50	107	0	147	184	369	0	0,5	359

Annexe 4 : Tableau d'analyse des eaux des piézomètres de l'ANRH, campagne de l'année 2007.

Nom	X(UTM)	Y(UTM)	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO4	HCO3	NO3
PZ 39	517974,612	4065276,129	81,5	47,5	89,8	3	128,4	190,4	69,3	158,6
PZ 45 / 29,54m	519926,683	4066020,123	34,9	47,2	76,6	10,1	83,9	101,1	160,2	79,3
PZ 45 / 36m	519926,683	4066020,123	161,3	66,5	106,1	4,9	442,2	194,8	67,8	120,2
PZ 48 / 25,92m	519978,955	4066769,89	359,5	83,1	318,4	24,7	951,3	313,8	97	121,5
PZ 48 / 46m	519978,955	4066769,89	407,2	152,4	1384	9,5	2964,9	640,6	69,3	101
PZ 50 / 27,73m	520477,231	4066218,432	158,8	83	156,9	5,1	408,5	259,5	73,9	75
PZ 51 / 29m	520875,519	4065667,276	103,5	74,4	240,3	3,6	323	396,9	177,1	67,6
PZ 54 / 22,46m	521933,898	4068463,787	20,2	31,1	136,8	9,4	200,6	24,6	192,5	33,1
PZ 58 / 43m	522536,861	4069461,857	54,5	67,1	1800,9	41,4	2824,2	3	53,9	20,9
PZ 58 / 14m	522536,861	4069461,857	20	27,3	676,5	23,2	1029,3	4,2	95,5	9,5
PZ 58 / 25,44m	522536,861	4069461,857	29,9	35,4	847,3	26,1	1363,2	2,9	94	9,8
PZ 59 / 19,5m	521382,704	4068109,179	29,6	57,5	514,4	15,9	935,5	18,9	101,7	25,7
PZ 59 / 33m	521382,704	4068109,179	450,7	226,6	3632,6	155,5	6945	999,5	147,9	59,8
PZ 60 / 46m	521230,033	4067166,053	253,1	87,9	555	4,1	1317,2	298,8	72,4	70
PZ 60 / 23m	521230,033	4067166,053	52,7	44,8	146,6	3,3	204,2	163,7	123,3	20,4
PZ 60 / 26,83m	521230,033	4067166,053	55,7	44,9	148,5	2,2	209,3	167,4	126,3	20,6
PZ 61 / 19,5m	520730,087	4067167,57	141,3	63,3	235,5	3,7	474,8	147	110,9	167,3
PZ 61 / 40m	520730,087	4067167,57	796,1	183,3	1554,6	5,8	4015,4	391,5	95,5	113,5
PZ 62 / 26,82m	519228,733	4066672,179	180,7	61,6	330,3	8,3	545,1	336,4	137,1	100,6
PZ B / 28,5 m	522429,448	4067012,43	87,5	55,8	124,3	2	222,6	250	87,8	72,2
PZ B / 50 m	522429,448	4067012,43	164,1	62,8	132,9	2,5	513,6	184,8	61,6	75,1
PZ C	521576,355	4065965,12	70,9	42	63,1	2,6	144,4	147,8	134	45,9
PZ D / 27,5m	520074,845	4065419,731	48,8	29,4	63,3	1,6	99,2	117,7	97	14,9
PZ D / 48 m	520074,845	4065419,731	64,9	29,9	60,4	2,1	113,4	115,9	144,8	39,6
PZ E	519198,266	4064872,448	69,3	34,4	89,3	7,6	127,4	140,8	154	53,6
PZ F / 26,8m	522281,435	4067662,815	123,3	56,6	143,1	2,6	288	180	100,1	121,9
PZ F / 32 m	522281,435	4067662,815	152	69,5	181,3	3,6	485,5	190,4	84,7	161,2
PZ G / 36m	521528,635	4066715,192	107,7	61,5	126,2	7,3	317,6	161,8	86,3	71,5

Annexe 5 : Tableau d'analyse des eaux des piézomètres de l'ANRH, campagne de janvier 2010.

Nom	X(UTM)	Y(UTM)	pH	CE 28°C	Ca	Na	K	HCO3-	Cl	SO4	NO2	NO3	TAC
Eau de mer	/	/	7,65	44,2	446,8	1615,3	400	31,2	19887	6244	0,06	2,6	13
PZ 1 à 60m	522370,768	4064206,569	7,18	1,16	142,77	36,88	3	610	104	164	0,03	78,05	25
PZ 2 à 65m	523619,729	4063902,81	7,11	1,16	115,08	43,48	3	579,5	133	172	0,03	48,28	23,75
PZ 36 à 60m	517570,548	4063927,488	7,79	0,23	13,17	6,5	3	91,5	102	13	0,02	0,15	3,75
PZ 39 à 50m	517974,612	4065276,129	6,96	0,95	93,75	21,9	2	671	97	86	0,03	32,92	27,5
PZ 42 à 60m	518974,962	4065423,073	6,93	2,03	227,63	41,8	16	732	180	436		90,6	30
PZ 45 à 45m	519926,683	4066020,123	6,94	2,49	330	70	2	549	626	234	0,04	116,61	22,5
PZ 48 à 50m	519978,955	4066769,89	7,17	6,95	429,45	148,63	8	768,6	2198	649	0,02	58,21	31,5
PZ 50 à 32m	520477,231	4066218,432	6,88	2,35	260	80	8	854	450	338	0,04	80,85	35
PZ 51 à 40m	520875,519	4065667,276	7,14	1,89	199,5	63,23	1	1037	247	355	0,12	79,43	42,5
PZ 54 à 50m	521933,898	4068463,787	7,1	3,42	285	80	9	1037	722	325	0,03	86,45	42,5
PZ 58 à 40m	522536,861	4069461,857	8,72	7,02	11,36	22,11	40	183	2331	280	0,03	0	7,43
PZ 60 à 45m	521230,033	4067166,053	6,94	6,82	521,48	147,05	7	634,4	2085	599	0,02	75,78	26
PZ 61 à 50m	520730,087	4067167,57	6,9	7,58	425	104	4	957,7	2240	696	0,04	111,28	39,25
PZ 62 à 40m	519228,733	4066672,179	6,96	3,61	261	71	5	799,1	839	499	0,04	70,19	32,75
PZ A à 45m	517274,687	4065278,258	7,27	0,98	86,47	19,82	2	695,4	128	79	0,05	0,12	28,5
PZ B à 55m	522429,448	4067012,43	7,16	3,26	390	84,25	2	610	923	232	0,79	99,78	25
PZ C à 50m	521576,355	4065965,12	6,92	4,22	403,76	100,5	5	757,62	1005	268	0,04	39,79	31,05
PZ D à 55m	520074,845	4065419,731	6,93	2,18	293	65	2	488	575	138	0,04	64,09	20
PZ E à 50m	519198,266	4064872,448	7,13	1,92	206,51	44,15	30	706,99	240	248	0,04	156,85	28,98
PZ F à 50m	522281,435	4067662,815	6,91	3,96	406	79	2	701,5	1025	223	0,04	151,79	28,75
PZ G à 50m	521528,635	4066715,192	7,03	1,3	208,48	66,53	16	884,5	242	314	0,03	131,39	36,25

