

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou
Faculté des Sciences Biologiques et des Sciences Agronomiques
Département des Sciences Géologiques



Mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme de Master

Domaine : Géologie

Spécialité : Hydrogéologie

Thème :

Contribution de la modélisation géo-électrique à l'identification des intrusions salines dans les aquifères côtiers

Cas de la Mitidja Est

Réalisé par : **KOUMAD Rafik**

Encadré par : M^{me} **R. AISSAOUI**

Membres du jury :

M^r R. KARDACHE.....Maître de conférences A.....Président

M^{me} R. AISSAOUI.....Maître de conférences B.....Promotrice

M^r I. AHMED ZAID.....Maître de conférences A.....Examineur

M^r A. DROUCHE.....Maître de conférences B.....Examineur

Année universitaire : 2020 / 2021

Remerciements

Ma première pensée va vers mes chers parents que je ne pourrais jamais remercier assez pour tout ce qu'ils ont sacrifié pour moi et à la réussite de mon parcours académique. Sans leur amour, encouragements et valeureux conseils je ne serais pas arrivé là. Merci.

Je tiens à exprimer mon respect et ma reconnaissance envers l'ensemble de mes enseignants depuis ma première année à l'université pour le savoir que j'ai acquis de leur part ainsi que pour leur soutien moral.

Mes remerciements pour ma promotrice Madame **R. AISSAOUI** qui m'a assisté dans ce mémoire dans tous ses détails, ce qui m'a encouragé pour poursuivre la réalisation de ce projet de fin d'études. Je la remercie pour la confiance qu'elle m'a accordée en me confiant ce travail. Merci pour sa disponibilité quotidienne, grâce à elle, les moments de découragement furent rares et brefs.

Je remercie Monsieur **R. KARDACHE** de m'avoir fait l'honneur de présider le jury. Je remercie également Messieurs **I. AHMED ZAID** et **A. DROUCHE** d'avoir accepté d'évaluer mon travail.

Mes chaleureux remerciements à mes camarades avec lesquels j'ai partagé ces cinq dernières années au sein du département pour les bons moments passés ensemble.

Un grand merci à tous.

Résumé

La zone d'étude est située à la Mitidja Est dans la wilaya d'Alger. Elle présente un aquifère côtier complexe qui est constitué des alluvions du Quaternaire et des formations gréso-calcaire de l'Astien. La forte croissance démographique et le développement socio-économique important dans la région et par conséquent des besoins considérables en eau potable ce qui a engendré une surexploitation des eaux souterraines. Le phénomène d'intrusion marine observé au niveau de la Mitidja Est est lié principalement à la surexploitation locale de la nappe ce qui a généré une augmentation de la salinité, notamment en direction du champ captant d'El Hamiz.

L'utilisation de la méthode de prospection géophysique de surface (tomographie de résistivité électrique) appuyée par la modélisation géo-électrique nous ont permis d'illustrer l'état actuel de la nappe. Les profils de tomographies électriques réalisés à proximité d'El Hamiz, indiquent de très faibles valeurs de résistivités à des niveaux peu profonds. L'analyse des coupes lithologiques, conductivités et salinités des puits se trouvant dans la zone s'accordent avec nos résultats qui traduisent que la région est déjà affectée par le phénomène de l'intrusion marine.

Mots clés : Mitidja-Est, Aquifère côtier, Ressource en eau, Intrusion marine, Tomographie de résistivité électrique, Modélisation.

Abstract

The study area is located in Mitidja Est in the wilaya of Algiers. It presents a complex coastal aquifer which is made up of Quaternary alluvium and sandstone-limestone formations of the Astian. The strong demographic growth and the significant socio-economic development in the region and consequently the considerable needs for drinking water that generated an overexploitation of groundwater. The phenomenon of marine intrusion observed in the Mitidja East is mainly linked to the local overexploitation of the water table, which has generated an increase in salinity, in particular towards the catchment area of El Hamiz.

The use of the surface geophysical prospecting method (electrical resistivity tomography) supported by geo-electric modeling allowed us to illustrate the current state of the water table. Electrical tomography profiles, performed near El Hamiz, indicate very low values of resistivities at shallow levels. The analysis of the lithological sections, conductivities and salinities of the wells in the area agree with our results, which show that the region is already affected by the phenomenon of marine intrusion.

Keywords: Mitidja-East, Coastal aquifer, Water resource, Marine intrusion, Electrical resistivity tomography, Modeling.

Sommaire

Introduction	9
1 ^{er} Chapitre: Généralités sur l'intrusion marine	12
1.1 Relation eau douce - eau salée.....	13
1.2 Intrusion saline causée par un pompage.....	15
1.3 Gestion des aquifères côtiers	16
1.3.1 Techniques de gestion	16
1.3.2 Gestion politique.....	16
1.4 Méthodes d'étude et de caractérisation	17
1.4.1 Approches hydrogéologiques classiques	17
1.4.2 Méthodes géophysiques.....	18
1.5 Aperçu sur les aquifères côtiers du Nord de l'Algérie	21
2 ^{ème} Chapitre : Présentation de la zone d'étude.....	23
2.1 Situation géographique.....	24
2.2 Aspects socio-économiques.....	24
2.2.1 Agriculture.....	25
2.2.2 Industrie.....	25
2.2.3 Ressources en eaux :	26
2.3 Aperçu géomorphologique	268
2.4 Réseau Hydrographique	27
2.5 Aperçu climatologique	29
2.5.1 Précipitations	29
2.5.2 Températures	31
2.5.3 Type de climat	32
2.6 Synthèse géologique	33
2.7 Synthèse hydrogéologique.....	36
2.8 Caractéristiques hydrodynamiques des aquifères	38
2.9 Piézométrie	39

3 ^{ème} Chapitre : Méthode d'investigation géo-électrique	43
3.1 Résistivité électrique	44
3.2 Facteurs affectant la résistivité électrique	45
3.2.1 Conductibilité solide	45
3.2.2 Conductibilité liquide électrolytique	45
3.3 Principes de la méthode.....	47
3.4 Méthodes de prospection électrique à courant continue.....	49
3.4.1 Sondage électrique vertical (SEV)	50
3.4.2 Trainé électrique	51
3.4.3 Tomographie de résistivité électrique	52
3.4.3.1 Principe d'acquisition.....	52
3.4.3.2 Dispositifs d'acquisition les plus utilisés	53
3.5 Profondeur d'investigation	56
3.6 Problèmes direct et inverse.....	57
3.6.1 Modélisation géo-électrique (problème direct).....	57
3.6.2 Inversion géo-électrique (problème inverse)	58
4 ^{ème} Chapitre : Application.....	60
4.1 Modélisation géo-électrique synthétique.....	61
4.2 Acquisition des données sur le terrain.....	67
4.3 Traitement des données électriques	69
4.4 Inversion 2D des données électriques	70
4.4.1 Comparaison des résultats	72
4.5 Qualité des modèles de résistivités obtenus.....	73
4.6 Conclusion.....	74
Conclusion générale.....	76
Bibliographie.....	80
Annexes.....	84

Liste des Figures

• Figure 1 Représentation respective d'un modèle à interface franche et d'un modèle à interface diffuse.....	13
• Figure 2 La profondeur de l'interface marine selon des conditions hydrodynamiques en système d'équilibre	14
• Figure 3 Formation d'une remontée conique d'eau marine causée par un pompage	15
• Figure 4 Schéma simplifié d'une sonde conductivimètre	18
• Figure 5 Identification de la zone de transition eau douce-eau salée avec une diaggraphie.....	19
• Figure 6 Exemple de profil TRE en 2D d'un aquifère côtier avec une comparaison avec deux profils de conductivité électrique en forage.....	20
• Figure 7 Principaux aquifères côtiers d'Algérie	22
• Figure 8 Situation géographique de la Mitidja au Nord de l'Algérie.....	24
• Figure 9 Zone industrielle de Reghaia.....	25
• Figure 10 Unités géomorphologiques de la région d'étude.....	27
• Figure 11 Sous-bassins versants de la Mitidja-Est.....	28
• Figure 12 Histogramme des précipitations annuelles 2006-2016	30
• Figure 13 Histogramme représentant les précipitations mensuelles de l'année 2020 à Dar El Beida.....	30
• Figure 14 Courbes des températures moyennes mensuelles en 2020.....	32
• Figure 15 Classement de la zone d'étude selon l'indice de Dermatonne	33
• Figure 16 Carte géologique de la Mitidja-Est réalisée sur ArcMap	34
• Figure 17 Coupes géologiques des formations aquifères de la Mitidja-Est.....	37
• Figure 18 Valeurs des transmissivités dans la Mitidja-Est	39
• Figure 19 Carte piézométrique de la Mitidja-Est (année 2015).....	40
• Figure 20 Carte des valeurs de perméabilité de l'aquifère des alluvions de la Mitidja Est.....	41
• Figure 21 Productions d'eau par les champs de captages de la région	42
• Figure 22 Schéma explicatif de la résistance R en fonction de la résistivité ρ	44
• Figure 23 Résistivimètre, câbles et électrodes (matériel utilisé en prospection électrique)	48
• Figure 24 Schéma expliquant l'injection du champ électrique et la mesure de la résistivité par les électrodes AMNB	48
• Figure 25 Augmentation de la profondeur d'investigation en fonction de l'espacement AB dans un SEV	50
• Figure 26 Exemple de carte de résistivités électriques apparentes réalisée à l'aide de trainé électrique	51

- Figure 27 Exemple de tomographie de résistivité électrique en 2D52
- Figure 28 Principe d'acquisition d'une TRE53
- Figure 29 Comparaison de la sensibilité des dispositifs55
- Figure 30 Fenêtre d'investigation et densité des points de mesures des dispositifs.....56
- Figure 31 Exemple de courbe de profondeur d'investigation caractéristique (NDIC) pour le dispositif Wenner α 57
- Figure 32 Résistivités apparentes (avant l'inversion) d'un même modèle géologique avec des dispositifs différents58
- Figure 33 Model géo-synthétique d'intrusion marine dans le cas d'absence d'ouvrages de captage.....62
- Figure 34 Model géo-synthétique d'intrusion marine avec la présence d'un forage en activité62
- Figure 35 Résultats d'inversion du modèle sans forage avec les dispositifs Wenner α et Wenner Schlumberger63
- Figure 36 Résultats d'inversion du modèle sans forage avec les dispositifs Dipôle dipôle et Pôle Pôle.....64
- Figure 37 Résultats d'inversion du modèle avec un forage en activité avec les dispositifs Wenner α et Wenner Schlumberger65
- Figure 38 Résultats d'inversion du modèle avec un forage en activité avec les dispositifs Dipôle dipôle et Pôle pôle.....66
- Figure 39 Localisation des profils TRE réalisés et de piézomètres à proximité68
- Figure 40 Répartition des points de mesures de la TRE 169
- Figure 41 Tomographies de résistivités électriques obtenues après l'inversion des mesures des profils TRE 1 et TRE 2.....70
- Figure 42 Tomographies de résistivités électriques obtenues après l'inversion des mesures des profils TRE 3 et TRE 4.....71
- Figure 43 Coupes lithologiques des piézomètres à proximité.....72
- Figure 44 Variation de salinité et de conductivité en fonction de la profondeur dans les piézomètres73
- Figure 45 Décroissement de l'erreur RMS aux cours des inversions des tomographies74

Liste des tableaux

- Tableau 1 Caractéristiques des principaux aquifères côtiers d'Algérie22
- Tableau 2 Caractéristiques des sous-bassins versants de la Mitidja-Est.....28
- Tableau 3 Précipitations annuelles durant les années 2006-201629
- Tableau 4 Températures moyennes mensuelles en 202031
- Tableau 5 Distance entre les électrodes, Profondeur d'investigation et résolution des dispositifs55
- Tableau 6 Coordonnées GPS des profils TRE réalisés67

Notations et des abréviations

TRE : Tomographie de résistivité électrique

SEV : Sondage électrique vertical

$W\alpha$: Dispositif de mesure Wenner Alpha

WSC : Dispositif de mesure Wenner Schlumberger

DD : Dispositif de mesure Dipôle dipôle

PP : Dispositif de mesure Pôle pôle

AMNB : Quadripôle d'électrodes d'injection et d'enregistrement

EM : Méthodes électromagnétiques

TDEM : Technique électromagnétique dans le domaine des temps

TEM : Technique électromagnétique transitoire

ΔV : Différence de potentiel électrique (Volts)

R : Résistance électrique (ohms)

I : Intensité d'un courant électrique (Ampères)

ρ : Résistivité électrique (ohms.mètres)

σ : Conductivité électrique (siemens.mètres⁻¹)

RMS : Mean squared error, Erreur quadratique moyenne (%)

γ_s : Masse volumique de l'eau de mer (kg/m³)

γ_f : Masse volumique de l'eau douce (kg/m³)

AEP : Alimentation en eau potable

ANRH : Agence nationale des ressources hydrauliques

DIC : Courbe de profondeur d'investigation caractéristique

NDIC : Courbe normalisée de profondeur d'investigation caractéristique

Z_e : Profondeur effective d'un dispositif de mesure

Introduction

Le développement humain depuis son début s'est fait dans des zones géographiques privilégiées qui sont à proximité de grands cours d'eau ou près des côtes marines. La ressource en eau étant indispensable pour toute vie, elle est donc un facteur majeur de la distribution de la flore, la faune ainsi que les populations humaines dans le monde. Les régions littorales dans le 21^{ème} siècle connaissent d'importantes explosions démographiques à travers le monde en raison de l'exode rural. Ces régions se trouvent alors face à de fortes demandes en différentes ressources pour satisfaire les besoins des habitants.

La zone étudiée, à savoir la partie Est de la Mitidja, est limitée à l'Ouest par l'Oued d'El Harrach, à l'Est par l'Oued de Boudouaou, les collines du Sahel algérois au Nord et l'Atlas blidéen au Sud. Il s'agit d'une plaine côtière qui subit les effets d'une multiplication de sa population par quatre depuis l'indépendance du pays. Cet accroissement du nombre d'habitants est accompagné d'une évolution des secteurs économiques, à savoir l'agriculture et l'industrie, ce qui provoque une importante demande en ressource en eau. Les statistiques du Plan National de L'eau (PNE) montrent que la wilaya d'Alger à elle seule a enregistré un besoin net en eau de 114 millions de m³/an en 2005, et une valeur a été évaluée à environ 145 millions de m³/an pour l'année 2025. Cette augmentation significative a emmené à une exploitation intensive des eaux souterraines qui sont l'une source d'approvisionnement principales dans la région casant la dégradation des aquifères, une situation appuyée par les changements climatiques et les longues périodes de sécheresses. A noter que la Mitidja-Est compte un système de deux aquifères importants à savoir : l'aquifère superficiel représenté par les alluvions du Quaternaire et l'aquifère profond des grès de l'Astien. La formation des marnes jaunes d'El Harrach sépare ces deux aquifères sauf à l'Est d'El Hamiz où ils sont en contact direct.

La diminution de la surface piézométrique, et l'intrusion des eaux de mer par l'appel des champs d'exploitation sont les conséquences les plus ressenties lors d'une dégradation d'un aquifère côtier. La salinisation progressive des eaux souterraines qui se chargent en minéraux dissous peuvent atteindre des teneurs anormalement élevées et dépasser les normes de potabilité et d'irrigation. Une fois affectée par ce phénomène, le retour à l'état initial de la nappe est quasi-impossible ; ainsi l'intrusion marine vers les aquifères côtiers est un risque hydrogéologique majeur qui menace la qualité de la ressource. La mission des autorités est donc de veiller sur la gestion et la durabilité de cette eau douce.

Pour ce travail de protection de la ressource en eau souterraine, la modélisation géo-électrique qui est une technique d'investigation moderne s'avère être un outil de surveillance

efficace et offre des résultats très satisfaisants. Plus explicitement, la tomographie de résistivité électrique (TRE), une méthode de plus en plus utilisée en hydrogéologie est adaptée pour l'imagerie de l'interface eau douce – eau salée s'appuyant sur les propriétés résistantes et conductrices de ces deux derniers.

L'objet de ce mémoire est de déterminer le dispositif le plus adapté à détecter l'interface eau douce - eau salée à travers la modélisation géo-électrique.

Une approche qui s'articule autour de 4 chapitres a été adoptée. Le premier traite les généralités de l'intrusion marine ; une description de la relation eau douce – eau salée et la gestion des aquifères côtiers suivie d'une description des méthodes d'étude et de caractérisation de l'interface eau douce – eau salée, ainsi qu'un aperçu sur les aquifères côtiers du Nord de l'Algérie.

La situation géographique ainsi que les contextes géologique, géomorphologique, climatologique et hydrogéologique de la zone d'étude font l'objet du deuxième chapitre.

Le troisième chapitre, s'étale sur la définition de la notion de résistivité électrique et la présentation des différentes techniques de mesure sur le terrain utilisées dans prospection électrique à courant continue à savoir : le sondage électrique vertical (SEV), le trainé électrique et la tomographie de résistivité électrique (TRE). Ensuite une description de la modélisation géo-électrique (problème direct) et l'inversion géo-électrique (problème inverse).

Le quatrième chapitre parcourt l'ensemble des travaux réalisés : la modélisation géo-électrique synthétique ; l'acquisition, le traitement, l'inversion et l'interprétation des profils de tomographie de résistivité électrique réalisés dans la zone d'étude.

Enfin, une conclusion générale achèvera ce travail.

1^{er} Chapitre :
Généralités sur
l'intrusion marine

1.1 Relation eau douce - eau salée

L'étude quantitative des écoulements densitaires (eau douce – eau salée) en aquifères côtiers a commencé par la recherche de solutions analogiques ou analytiques en 2D. Pour ce qui est de la conception de la zone de contact souterrain entre ces eaux qui sont de différentes densités, deux types d'approches avaient et ont toujours cours (Figure 1) :

- les modèles à interface franche (ne supposant aucun mélange entre l'eau douce et l'eau salée)
- les modèles à interface diffuse (impliquant une zone de mélange, ou zone de transition entre les deux masses d'eau).

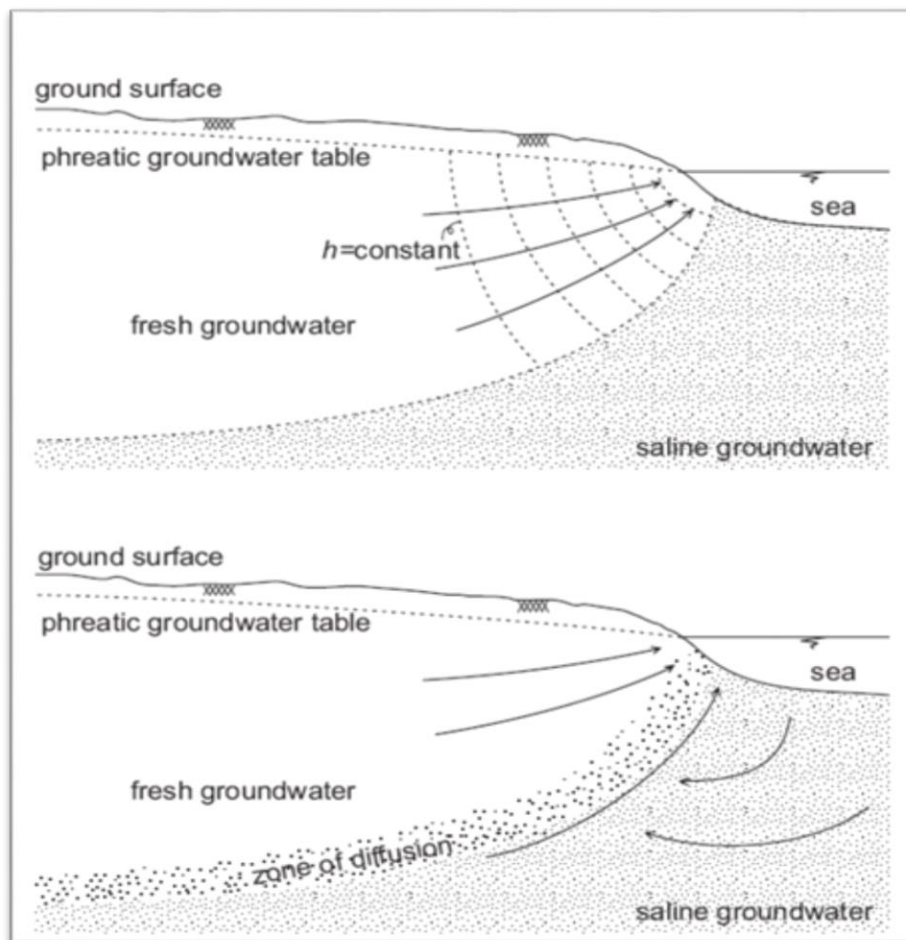


Figure 1 Représentation respective d'un modèle à interface franche et d'un modèle à interface diffuse

Sachant que la masse volumique de l'eau de mer $\gamma_s = 1025 \text{ kg/m}^3$, et la masse volumique de l'eau douce $\gamma_f = 1000 \text{ kg/m}^3$, alors $C = 40$. Il en résulte que l'interface saline

serait située à 40 m sous le niveau de la mer pour une hauteur piézométrique de 1 m au-dessus du niveau marin. Ainsi une nappe s'écoulant vers l'océan voit naturellement sa piézométrie diminuer, de même que la profondeur de l'interface qui remonte 40 fois plus rapidement (Figure 2).

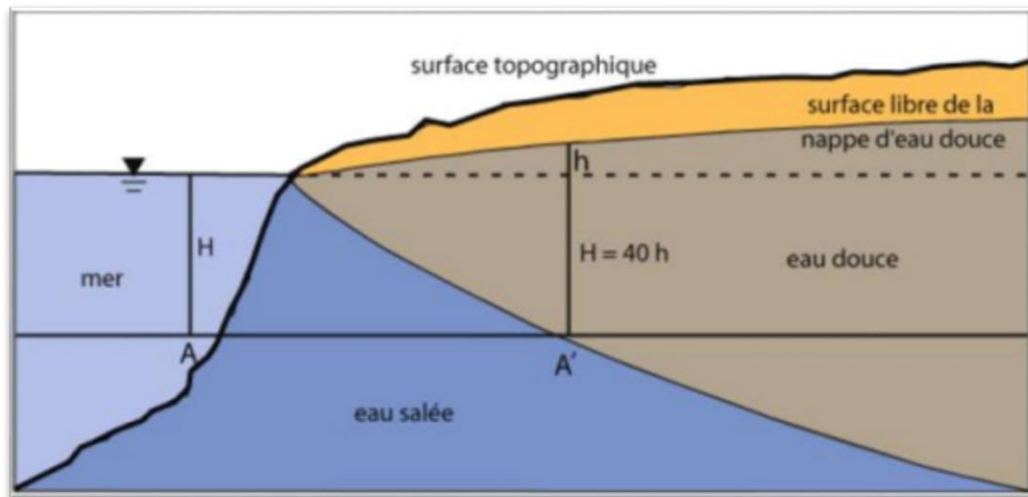


Figure 2 La profondeur de l'interface marine selon des conditions hydrodynamiques en système d'équilibre

Le concept de la zone de transition au sein d'un milieu aquifère continue et dynamique a connu un développement lors des années 1980 grâce au progrès informatique et les développements numérique. Une approche 3D avec zone de diffusion est physiquement plus juste que le concept d'interface franche, mais elle est difficile à réaliser vu le manque de données dans les propriétés 3D des aquifères.

Lorsqu'on s'intéresse à la problématique de la déstabilisation de l'interface saline, comme dans le cas des remontées salines engendrées par des pompages, les modèles d'interface franche montrent alors rapidement leur limitation. En effet, de tels phénomènes transitoires génèrent d'importants mélanges entre l'eau douce et l'eau salée, qui dans la plupart des cas ne peuvent être abordés qu'avec une approche 3D considérant une zone de transition eau douce-eau salée.

1.2 Intrusion saline causée par un pompage

L'intrusion saline au sens strict correspond à une déstabilisation de l'équilibre entre eau douce et eau salée causant une invasion de l'aquifère par l'eau de mer ou, plus souvent, à une remontée de l'eau salée en direction d'un ouvrage d'exploitation de nappe.

Le premier phénomène, pouvant affecter de manière importante la position et l'épaisseur de la zone de transition, ne modifie pas fondamentalement la géométrie de l'interface. Au contraire, une intrusion engendrée par un captage crée une déformation locale de la zone de transition modifiant de manière importante sa géométrie. Le développement d'un rabattement autour d'un puits de pompage génère une remontée conique de la zone de transition (Figure 3). Si la base du puits est atteinte par la remontée, la salinité augmente progressivement pendant le mouvement ascendant de la zone de mélange, jusqu'à atteindre sa base, c'est-à-dire l'eau de mer. On peut dire alors que l'on a atteint la limite inférieure de la masse d'eau douce.

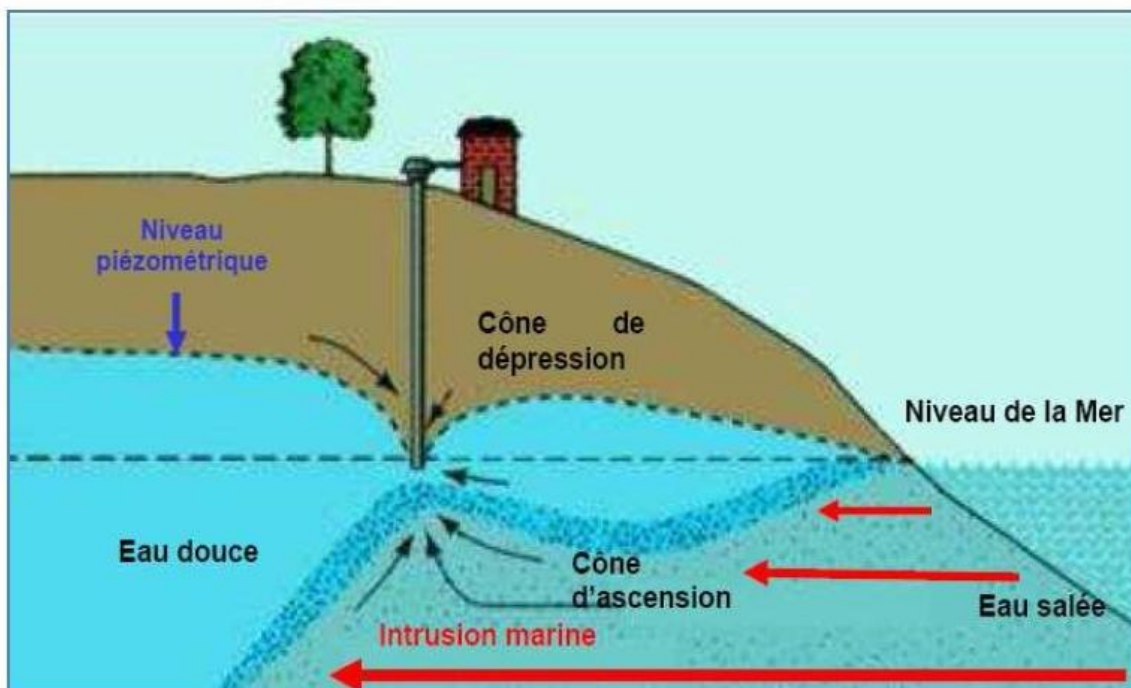


Figure 3 Formation d'une remontée conique d'eau marine causée par un pompage

1.3 Gestion des aquifères côtiers

La gestion des aquifères côtiers met en œuvre la prise en compte qui permet d'optimiser l'exploitation des nappes côtières tout en maintenant un renouvellement continu suffisant pour assurer la qualité de l'eau (c'est à dire contenir l'invasion marine dans un état acceptable) ne remettant pas en cause l'état du milieu naturel et le développement économique, agricole et humain. Cette gestion s'appuie en premier lieu sur une bonne connaissance de la ressource en termes de comportement hydrodynamique et de vulnérabilité à l'intrusion marine.

Les variables extérieures qui engendrent le déséquilibre d'un milieu aquifère sont principalement la variabilité du climat (facteur climatique) et les modalités d'exploitation et de gestion (facteur socio-économique). Sur cette base de compréhension du potentiel-vulnérabilité, une politique de gestion durable doit être poursuivie avec la prise en compte des variables et contraintes affectant la ressource.

La modélisation hydrogéologique est un outil quantitatif permettant une bonne maîtrise sur la gestion de la ressource, elle présente une bonne sensibilité aux variables extérieures.

Les principales méthodes de gestion durable des nappes côtières concernent la maîtrise du facteur socio-économique, vu que le facteur climatique ne se soumet à aucun contrôle direct.

1.3.1 Techniques de gestion

- Optimisation et diversification des prélèvements (en termes de répartition spatiale et de fréquence de ces prélèvements) pour une connaissance meilleure de la qualité des eaux.
- Aménagement du territoire (minimisation des surfaces imperméabilisées, création de zones de recharge améliorée, maîtrise des risques de pollution à partir de la surface).
- Mise en œuvre de techniques de remédiations (recharge artificielle, restructuration des prélèvements, etc.) ou de limitation (barrières physiques à l'intrusion).

1.3.2 Gestion politique

En termes de gestion "politique", les principales techniques permettant une gestion correcte des aquifères côtiers sont :

- Une bonne compréhension du fonctionnement de l'aquifère et la diffusion des connaissances au peuple.
- Un système de suivi public adéquat couplé d'un système d'alerte en cas de danger imminent pour la ressource.
- Une volonté de la population et des autorités pour une utilisation durable de cette eau.
- Des institutions de gestion de la ressource possédant les capacités humaines et les outils nécessaires pour réaliser les différents travaux de cette gestion.

1.4 Méthodes d'étude et de caractérisation

Les méthodes d'investigations hydrogéologiques classiques tel que la piézométrie, les essais de pompage et de traçage permettent l'étude et la caractérisation des nappes côtières ; Cependant, la présence du biseau salé nécessite une caractérisation plus poussée, faisant appel à des méthodes géophysiques.

1.4.1 Approches hydrogéologiques classiques

Les méthodes d'investigation classique employées pour l'étude des eaux souterraines peuvent être utilisées pour la caractérisation des aquifères côtiers. Elles donnent de bons résultats dans les aquifères à eau douce et atteignent leurs limites dans la zone de transition eau douce-eau salée. On peut citer :

- **Les études piézométriques** : elle nous renseigne sur les sens d'écoulements.
- **Les essais de pompage** : cette méthode permet de déterminer les propriétés hydrodynamiques (transmissivité et emmagasinement).
- **Essais de traçage** : sur les paramètres hydrodispersifs (porosité cinématique et dispersivités).

Parmi ces méthodes, seule l'étude piézométrique peut dans certaines conditions donner la profondeur de l'interface saline par application de la relation de Ghijben-Herzberg (la relation de Ghijben-Herzberg est la première solution analytique retrouvée dans le cas d'une interface franche).

1.4.2 Méthodes géophysiques

Les méthodes les plus courantes pour la caractérisation des aquifères côtiers sont les méthodes géophysiques de surface (électriques et électromagnétiques) et répondent d'une manière plus efficace à la problématique de la salinité des eaux souterraines. Elles sont basées sur la mesure des conductivités (ou résistivités) électriques, du fait du contraste important de ce paramètre existant entre l'eau douce et l'eau salée.

Les diagraphies (méthodes géophysiques en forage) partent du même principe que les techniques précédents mais elles exigent l'existence ou la réalisation de forages et sont donc indirectement qualifiées de méthodes destructives et sont très coûteuses.

1.4.2.1 Diagraphies de conductivité électrique de l'eau

C'est une technique de mesure indirecte de la salinité totale par relevé ponctuel de conductivité électrique de l'eau (notée σ) ou log vertical en forage. Les mesures se font par l'utilisation de sondes conductivimètres facilement transportables et d'un coût abordable (figure 4).

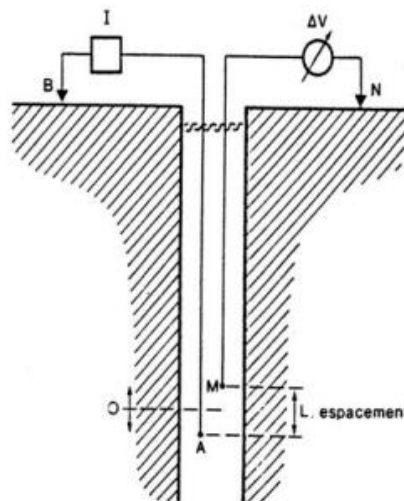


Figure 4 Schéma simplifié d'une sonde conductivimètre

La salinité est déterminée grâce à l'utilisation de courbes de calibration (courbes standards généralement fournies avec le matériel). L'utilisation de telles sondes implique obligatoirement l'existence de forages (dont les coûts de réalisation sont élevés) et reste soumise au problème de mélange d'eaux douces et salées à l'intérieur des forages.

1.4.2.2 Diagraphies de résistivité électrique de l'aquifère

Un log de résistivité totale, qui correspond à la résistivité de la formation (matrice rocheuse) et la résistivité de l'eau des pores, peuvent être utilisés pour mettre en évidence les variations de résistivité de l'aquifère sur une verticale à partir d'un forage, ce qui permet d'identifier la zone de transition (Figure 5).

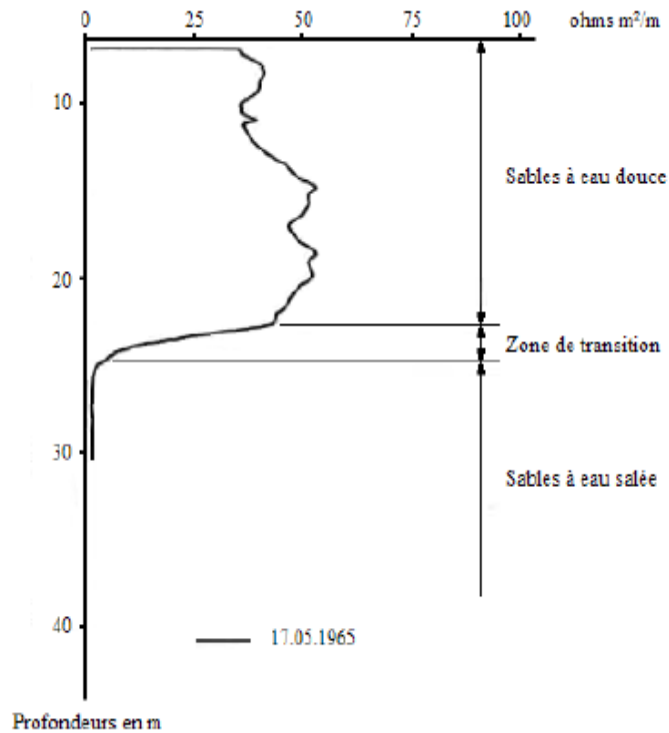


Figure 5 Identification de la zone de transition eau douce-eau salée avec une diagraphie

1.4.2.3 Méthodes électriques de surface

La technique des sondages électriques verticaux (SEV) est un outil pratique pour localiser et suivre la zone de transition eau douce - eau salée. L'interprétation géophysique de ces sondages a été confirmée par les mesures de salinité et de résistivité en forage.

La technique de tomographie de résistivité électrique (TRE) en 2D ou 3D procurent des mesures plus précises que les sondages en 1D verticaux (SEV). Elle est très pertinente pour la localisation du biseau salé ainsi que la caractérisation de la morphologie de la zone de transition eau douce - eau salée (Figure 6).

Ces deux techniques (SEV et TRE) ont deux grands inconvénients, la diminution de la résolution en fonction de la profondeur et le mauvais contact électrique avec le sol. En zone

côtière, ces deux points peuvent être problématiques lorsque l'interface est située à forte profondeur, ou en région aride quand le milieu est fortement résistant du fait de sols très secs sur une importante épaisseur.

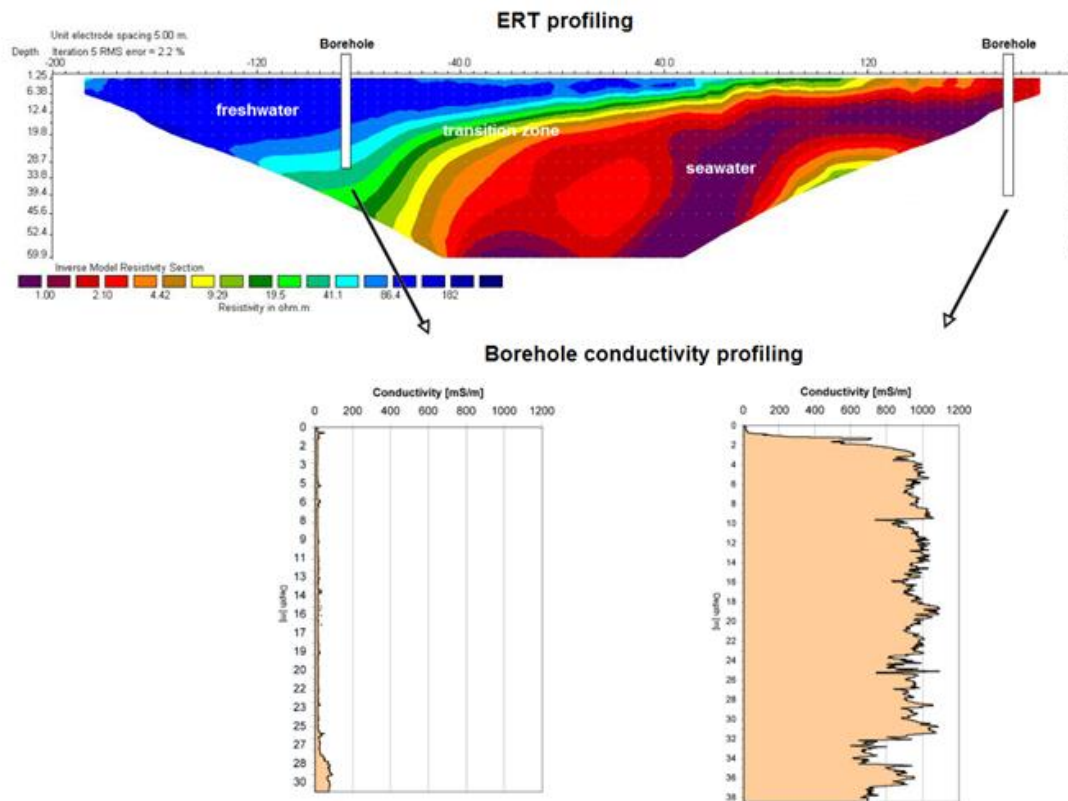


Figure 6 Exemple de profil TRE en 2D d'un aquifère côtier avec une comparaison avec deux profils de conductivité électrique en forage se trouvant dans le continent et un autre près de la côte, Ile de Terschelling, Pays-Bas [d'après Kok, 2008].

1.4.2.4 Méthodes électromagnétiques de surface

Les méthodes électromagnétiques (EM) de même principe que les méthodes électriques, permettent de caractériser la résistivité ou la conductivité du sous-sol et donc différencier l'aquifère à eau douce de l'aquifère à eau salée. A cet effet, la technique EM dans le domaine des temps (Time-Domain Electromagnetics : TDEM), aussi appelée EM transitoire (Transient Electromagnetics : TEM) est particulièrement utilisée. La corrélation latérale entre plusieurs sondages EM nous procure la possibilité d'estimer la morphologie et la localisation de l'interface eau douce – eau salée.

Le TDEM présentent des avantages de ne pas être tributaire des contacts galvaniques avec le sol (ce qui limite l'application des méthodes électriques), de cibler uniquement les anomalies conductrices, et surtout et d'avoir une importante résolution en profondeur.

Cependant, dans le cas de la présence des géométries complexes de l'interface, telles que des remontées coniques ou de forts pendages, le TDEM présente l'inconvénient de difficilement identifier la zone de transition par rapport à la technique de tomographie de résistivité électrique.

1.5 Aperçu sur les aquifères côtiers du Nord de l'Algérie

Les aquifères côtiers algériens sont énormément sollicités pour des usages divers (besoins domestiques, agriculture et industrie), en plus des changements climatiques qui se ressentent de manière croissante où le déficit pluviométrique est évalué à près de 30% ces dernières années. La baisse importante observée (sur la base de la confrontation besoins/ressources) montre que l'état des aquifères côtiers et les évolutions récentes les affectant vont se creuser davantage.

Aux risques d'épuisement, se superpose la dégradation qualitative de la ressource potable, causée par les risques d'intrusion d'eau de mer et les pollutions venants de la surface essentiellement liées aux activités agricoles (92% des échantillons analysés sur l'aquifère de la Mitidja dépassent la concentration maximale en NO₃ admissible pour l'AEP) et domestiques (où 250 000 m³ d'eaux usées sont rejetées quotidiennement dans le cours d'eau de Oued El Harrach par exemple).

Cinquante-neuf aquifères sont recensés sur le littoral (Figure 7), ils permettent une ressource exploitable d'environ 914,5 hm³/an en année pluviométrique moyenne selon l'ANRH. Leur importance et disposition sont très variables selon leurs contextes géographiques et hydrogéologiques. Pour la plupart, il s'agit en général de nappes alluviales à dominante sableuse, argilo sableuse et argilo graveleuse.

Au long du littoral algérien, on distingue deux types de nappes : Les nappes alluviales situées le long des cours d'eau et en liaison hydraulique avec eux, elles sont de dimensions étroites ; et les nappes situées dans les remplissages alluviaux des grandes plaines de

Chapitre 1 : Généralités sur l'intrusion marine

subsidence (la plaine de la Mitidja, la plaine d'Annaba et El Taref) et qui constituent des aquifères plus importants.



Figure 7 Principaux aquifères côtiers d'Algérie

Aquifères	Oran	Mostagane m	Tipaza	Alger	Bejaïa	Jijel	Skikda	Annaba	Bouteldja
K moy. (m/s)	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵	10 ⁻⁴	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵	10 ⁻⁴	10 ⁻⁴	10 ⁻⁶ à 10 ⁻⁴	4.10 ⁻⁴
Profondeur (m)	5 à 80	80	10 à 65	5 à 50	10 à 130	10 à 100	5 à 120	5 à 100	120
Epaisseur moy. (m)	15 - 30	30	5 - 10	3 - 30	15 - 30	20 - 70	20 - 60	15 - 80	10 - 150
Nombre d'ouvrages	13	30	30	202	56	75	118	87	81
Débit extrait (l/s)	230	350	40	1000	1287	1721	1560	1311	1264

Tableau 1 Caractéristiques des principaux aquifères côtiers d'Algérie

L'ouest algérien est représenté par les bassins côtiers oranais, contient 17 aquifères avec un potentiel de 102,87 hm³/an. Le centre du pays, délimité par les bassins côtiers algérois est composée de 26 aquifères dont le potentiel exploitable globale est de 398,25 hm³/an. Enfin, la partie Est, circonscrite dans les bassins côtiers du constantinois, est formée de 16 aquifères et présente un potentiel exploitable de 413,38 hm³/an. L'importance des formations alluviales diminue en allant de l'est vers l'ouest, ainsi que les débits extraits dans la zone Est sont nettement supérieurs à ceux de la zone Ouest. La variation des précipitations annuelles est la cause principale de l'inégalité de la ressource entre ces régions (Tableau 1).

2^{ème} Chapitre :
Présentation de la
zone d'étude

2.1 Situation géographique

La Mitidja est une vaste plaine qui se situe au sud de la capitale Alger, Elle fait partie administrativement de 4 wilayas (Alger, Blida, Boumerdes et Tipaza) sur une surface de 1400 km², de forme allongée suivant une direction Ouest-Sud-Ouest, Est-Nord-Est et elle s'étend sur 100 km de long et de 10 à 20 km de large.

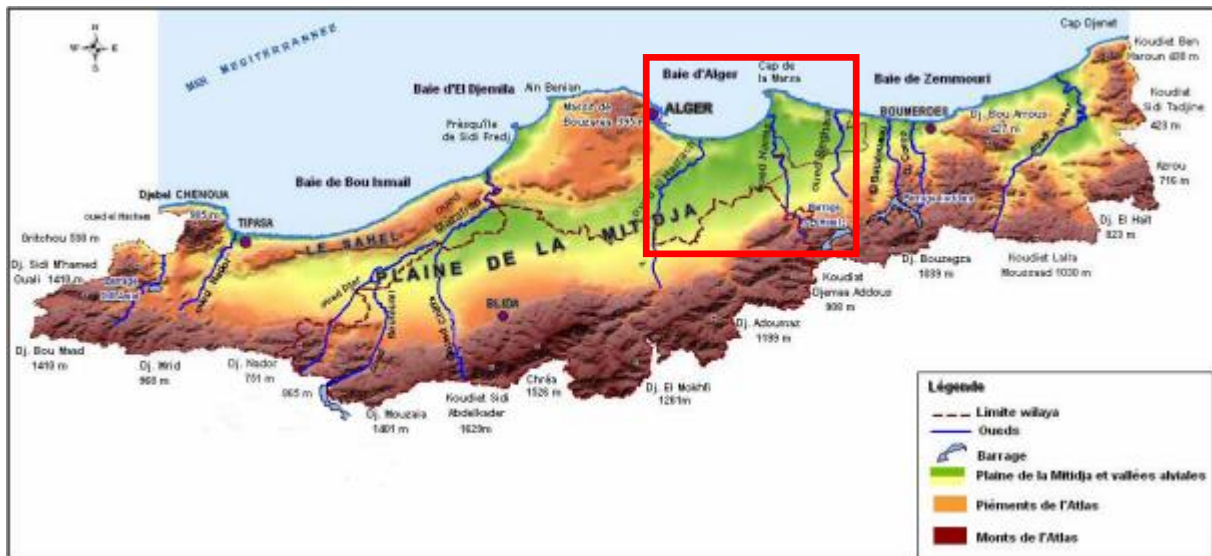


Figure 8 Situation géographique de la Mitidja au Nord de l'Algérie

La zone d'étude (encadrée en rouge sur la figure) sur laquelle nous allons travailler est la Mitidja-Est qui est limitée à l'Ouest par l'Oued El Harrach, à l'Est par l'Oued Boudouaou, au Nord par les collines du Sahel algérois et la mer méditerranée et au Sud par l'Atlas. Elle s'étale sur une superficie de 510 km² (Figure 8).

2.2 Aspects socio-économiques

L'agglomération d'Alger est la plus peuplée du pays, elle compte environ 7.8 millions d'habitants en 2016. La population dans la partie orientale de la plaine de la Mitidja connaît une augmentation continue. Cette masse d'habitants est concentrée dans plusieurs villes notamment à Réghaïa, Rouiba, El Hamiz, Dar El Beida, Bab Ezzouar, El Harrach, Baraki et Les Eucalyptus ; imposant une demande de plus en plus croissante en ressource en eau pour les besoins domestiques.

2.2.1 Agriculture

La plaine de la Mitidja est une zone à vocation agricole, l'agriculture est la principale activité économique de la région depuis plusieurs siècles, elle est concentrée dans la bande côtière. Les activités maraîchères se sont étendues progressivement vers l'intérieur des terres, on y trouve principalement des vignes, des agrumes, les cultures annuelles et saisonnières. Ce secteur est favorisé par les conditions climatiques et un relief plat.

2.2.2 Industrie

La région est l'un des plus importants pôles industriels d'Algérie. La majorité des activités industrielles sont regroupées à Rouiba, El-Harrach, Oued Smar et Reghaia (Figure 9). L'industrie est un secteur qui nécessite de grande quantité d'eau. L'image de cette région se caractérise par le poids des industries :

- Traitement de minerais.
- Industries de transformation de fer et autres matériaux.
- Industries chimiques, des silicates d'alumines.
- Industries alimentaires.
- Industries transformatrices de résidus végétaux et animaux.
- Industries de transformation de combustibles.
- Industries de la cellulose et du papier.
-etc.



Figure 9 Zone industrielle de Reghaia

2.2.3 Ressources en eaux :

La ressource en eau souterraine de la Mitidja était de 328 Hm³ en 2000 Selon l'ABH d'Alger (Agence des Bassins Hydrographiques), dont les champs captants principaux sont : Mazafran I et II, Chebli, Rouiba, Baraki, et El Hamiz.

Les barrages suivants sont les principales ressources en eau superficielle exploitées actuellement dans la Mitidja-Est :

- le barrage d'El Hamiz
- le barrage de Keddara
- la digue de Reghaia

La rareté de la ressource en eau est un risque majeur qui augmente de façon continue face à l'accroissement démographique et aux besoins du développement socio-économique. L'Algérie qui est considéré comme pays en situation de "pénurie hydrique" avec un ratio de 530 m³/hab/an (situation de 2010), bien inférieur au seuil de rareté de 1000m³/hab/an retenu par la Banque Mondiale, Ce constat général prend toute son importance et oblige les autorités à proposer des solutions pour bien gérer la ressource.

2.3 Aperçu géomorphologique

La Mitidja au sens large peut se distinguer en trois unités du Nord vers le Sud (Figure 10) :

- **Le Sahel** : Correspond à un bombement anticlinal à une pente faible avec une altitude de 200 à 250m et qui sépare la plaine de la mer.
- **La plaine** : Qui est une zone d'affaissement général à remplissage Plio-Quaternaire d'orientation ENE-OSO. Elle a une altitude moyenne de 40 à 50m.
- **L'Atlas Blidéen** : Correspond à un massif montagneux d'orientation NE-SO, limitant au Sud la plaine et atteignant une altitude d'environ 1600m. Cette chaîne montagneuse présente un relief très accidenté, découpé par les gorges profondes des oueds principaux.

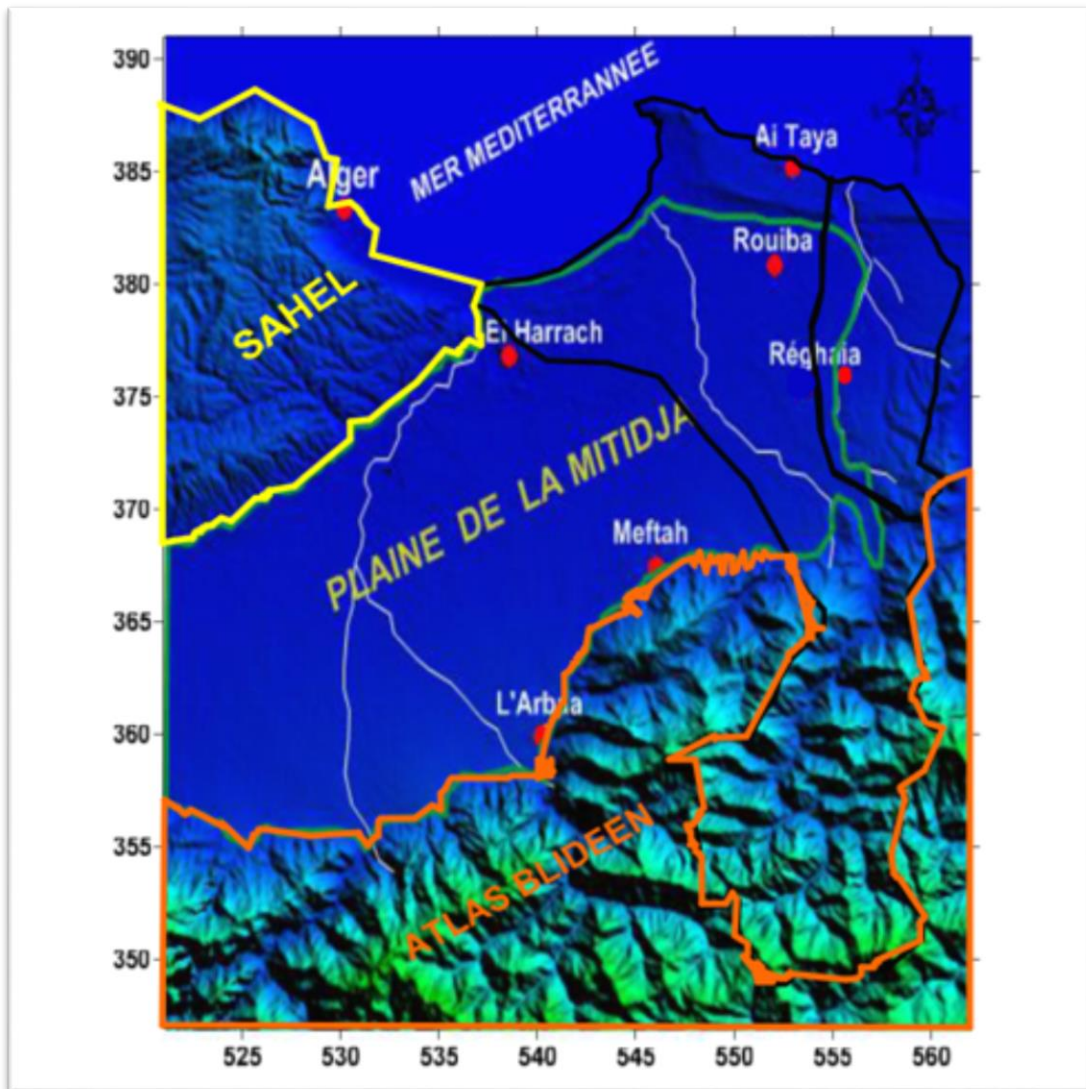


Figure 10 Unités géomorphologiques de la région d'étude

2.4 Réseau Hydrographique

La zone d'étude de la Mitidja-Est s'étale sur trois sous bassins versant : Réghaia, El Hamiz et El Harrach (Figure 11).

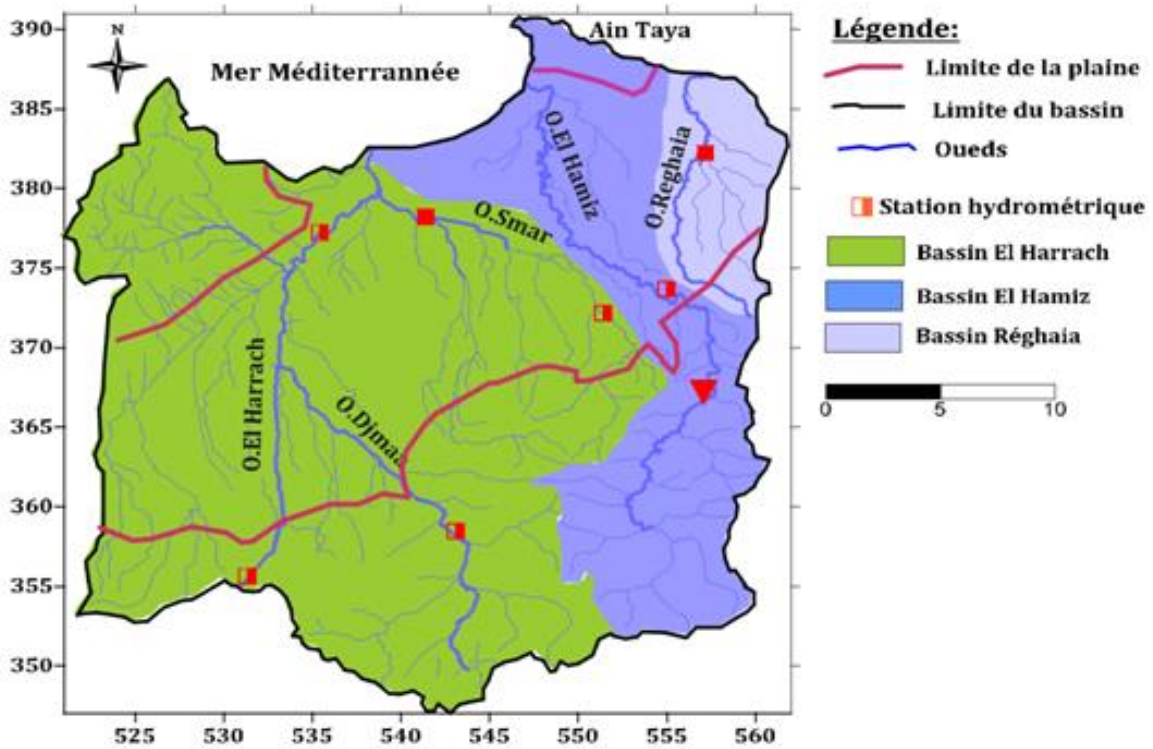


Figure 11 Sous-bassins versants de la Mitidja-Est

Sous-bassins versants	Paramètres géomorphologiques		Paramètres de formes			Paramètres de relief	
	Périmètre (km)	Surface (km ²)	Indice de compacité de Gravelus Kc	Longueur du rectangle équivalent (km)	Largeur du rectangle équivalent (km)	Altitude moyenne (m)	Indice de pente globale Ig (m/km)
Oued Reghaia	87.7	41.2	1.27	16.68	5.25	55	8.27
Oued El Hamiz	283.2	102	1.8	38.45	7.36	325.3	19.5
Oued El Harrach	1236.3	188.2	1.5	78.30	15.8	430	13.8

Tableau 2 Caractéristiques des sous-bassins versants de la Mitidja-Est

L'indice de compacité Kc varie entre 1.27 et 1.8 dans les trois cas ce qui traduit une allure allongée de ces bassins (Tableau 2).

Chapitre 2 : Présentation de la zone d'étude

- **Oued El Harrach** : Prend naissance dans les monts de Tablât. Vers le milieu de la plaine, il reçoit sur sa rive droite oued Djemâa et oued Smar, avant de se jeter dans la mer au centre de la baie d'Alger. Son débit est de 4 m³/s.
- **Oued El Hamiz** : Cet oued prend une direction N-O à partir de Fondouk jusqu'à Hammedi et se redresse jusqu'au Sahel pour se jeter dans la mer au Sud de cap Matifou (Bordj El Bahri) Ses affluents sont oued Larbatache et oued Sekhine. Son débit est de 1.6 m³/s.
- **Oued Reghaia** : Prend naissance à l'aval du barrage de Bouzegza Keddara et forme le lac de Reghaia juste avant de se jeter dans la mer. Son débit moyen est de 4.5 m³/s.

2.5 Aperçu climatologique

Cette étude climatologique est basée sur les données de la station météorologique de Dar El Beida pour l'année 2020.

Code de la station météorologique : 603900 (DAAG)

Latitude: N 36.68 | Longitude: E 3.25 | Altitude: 25 m

2.5.1 Précipitations

2.5.1.1 Précipitations annuelles et mensuelles :

Années	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Précipitations (mm)	564.9	746.21	500.41	606.55	612.13	683.52	836.16	884.92	546.1	438.63	660.15

Tableau 3 Précipitations annuelles durant les années 2006-2016

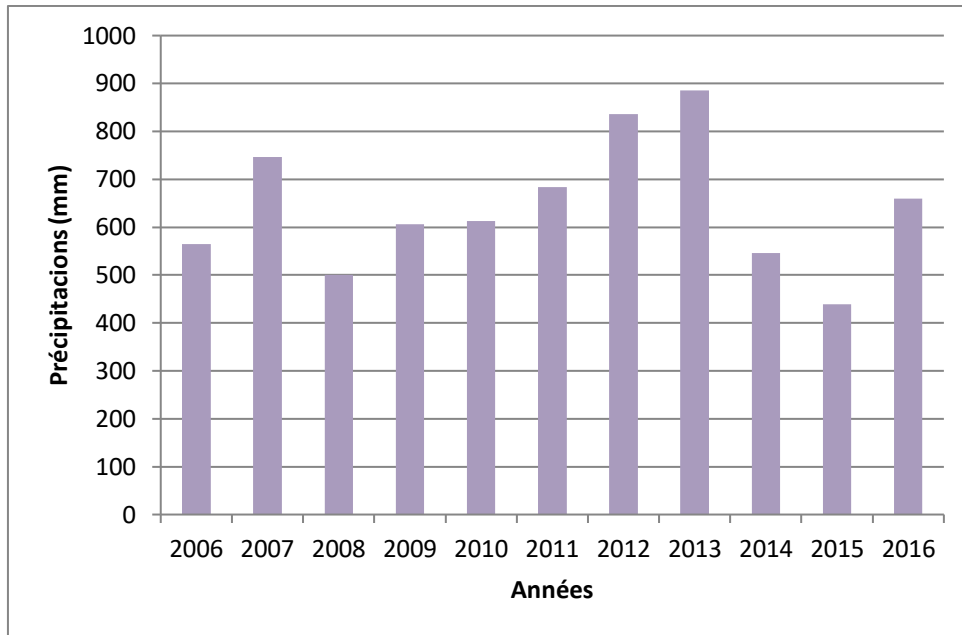


Figure 12 Histogramme des précipitations annuelles 2006-2016

La pluviométrie annuelle dans la région de la Mitidja-Est pendant les années 2006-2016 n'est pas très stable (Figure 12), il y'a de grandes différences des valeurs de précipitations entre un an et le suivant. La valeur la plus importante a été obtenue en 2013 avec 884.92 mm, et la valeur la plus faible a été enregistrée en 2015 avec 438.63mm (Tableau 3).

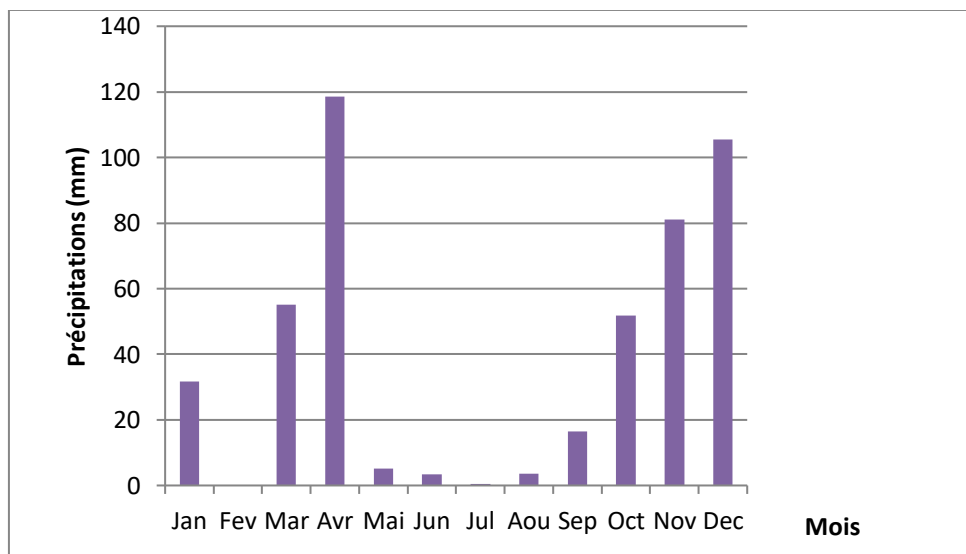


Figure 13 Histogramme représentant les précipitations mensuelles de l'année 2020 à Dar El Beida

Chapitre 2 : Présentation de la zone d'étude

L'année 2020 a connu un grand déficit de précipitations avec seulement 472.68 mm (Figure 13). Le mois de février qui l'un des mois les plus humides n'a connu aucun jour de pluie. Ce manque d'eau aura donc un impacte important sur la recharge des nappes.

2.5.1.2 Détermination de la lame d'eau précipitée (moyenne des années 2006-2016):

La détermination de la lame d'eau précipitée s'est basée sur la méthode arithmétique qui est la plus simple car elle consiste à calculer la moyenne arithmétique des valeurs obtenues dans la station étudiée.

$$L = \sum Pa/n$$



$$L = 7079.68/11$$

On obtient : $L = 643.61$ mm

L : Lame d'eau moyenne (mm)

Pa : Précipitations annuelles (mm)

n : Nombre d'années

2.5.2 Températures

Mois	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
T max (°c)	17.8	20.9	20.6	22.1	27.2	29.6	32.6	33.6	29.4	25.7	23.1	18
T min (°c)	4.7	5.4	9.4	11.5	13.6	15.8	19.3	20.2	17	11.9	11	7.5
T moy (°c)	10.7	13	15	16.7	20.5	23.2	26	27.1	23.3	18.6	16.8	12.6

Tableau 4 Températures moyennes mensuelles en 2020

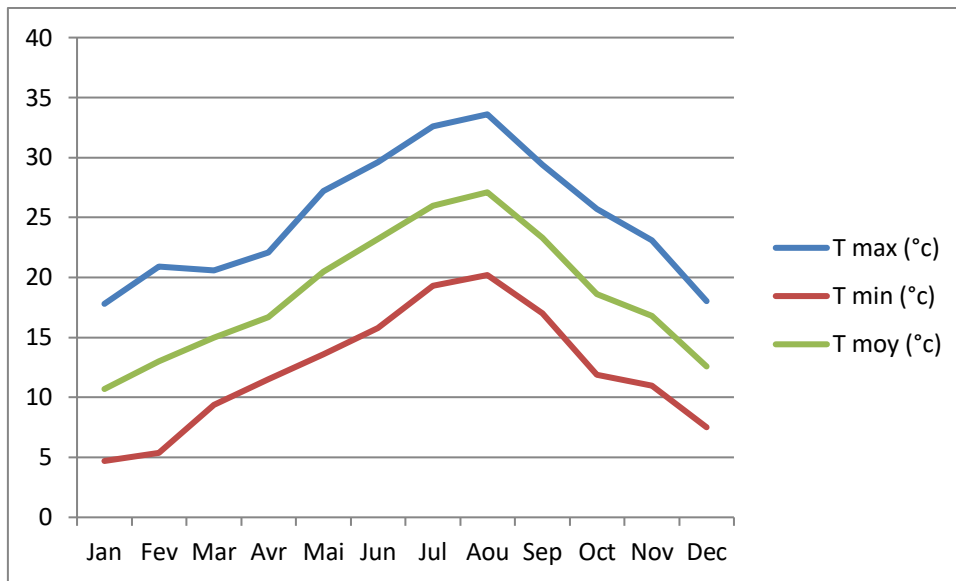


Figure 14 Courbes des températures moyennes mensuelles en 2020

La température moyenne annuelle est 18,62°C, avec un maximum de 27.1°C et un minimum de 10.7°C (Tableau 4). Les moyennes mensuelles les plus élevées, sont enregistrées aux mois de Juin, Juillet et Août. Quant aux moyennes mensuelles les plus faibles, sont enregistrées aux mois de Décembre, Janvier et Février (Figure 14).

2.5.3 Type de climat

L'indice annuel d'aridité de Demartonne permet de classer la région selon son climat, il est déterminé à partir de la formule suivante :

$$I = P / (T+10)$$



$$I = 643.61 / (18,62+10)$$

$$\text{On obtient : } I = 24.49$$

L'indice annuel d'aridité de Dermatonne ($20 < I < 30$) traduit un climat tempéré pour la région de la Mitidja-Est (Figure 15).

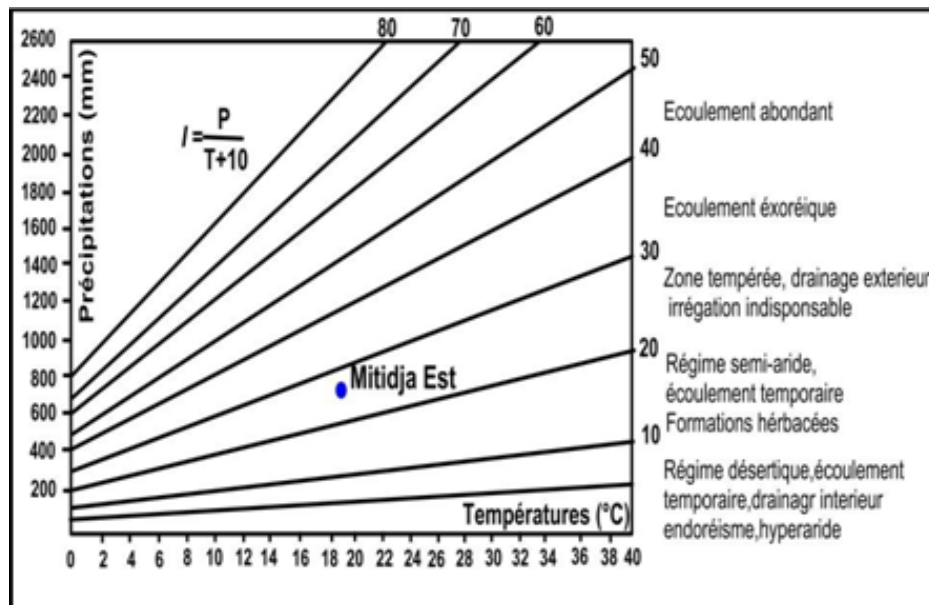


Figure 15 Classement de la zone d'étude selon l'indice de Dermatonne

2.6 Synthèse géologique

La Mitidja s'agit d'une plaine alluviale à remplissage d'âge Plio-quaternaire après la subsidence du socle sur une grande dimension, on distingue dans la région les couches géologiques suivantes (Figure 16) :

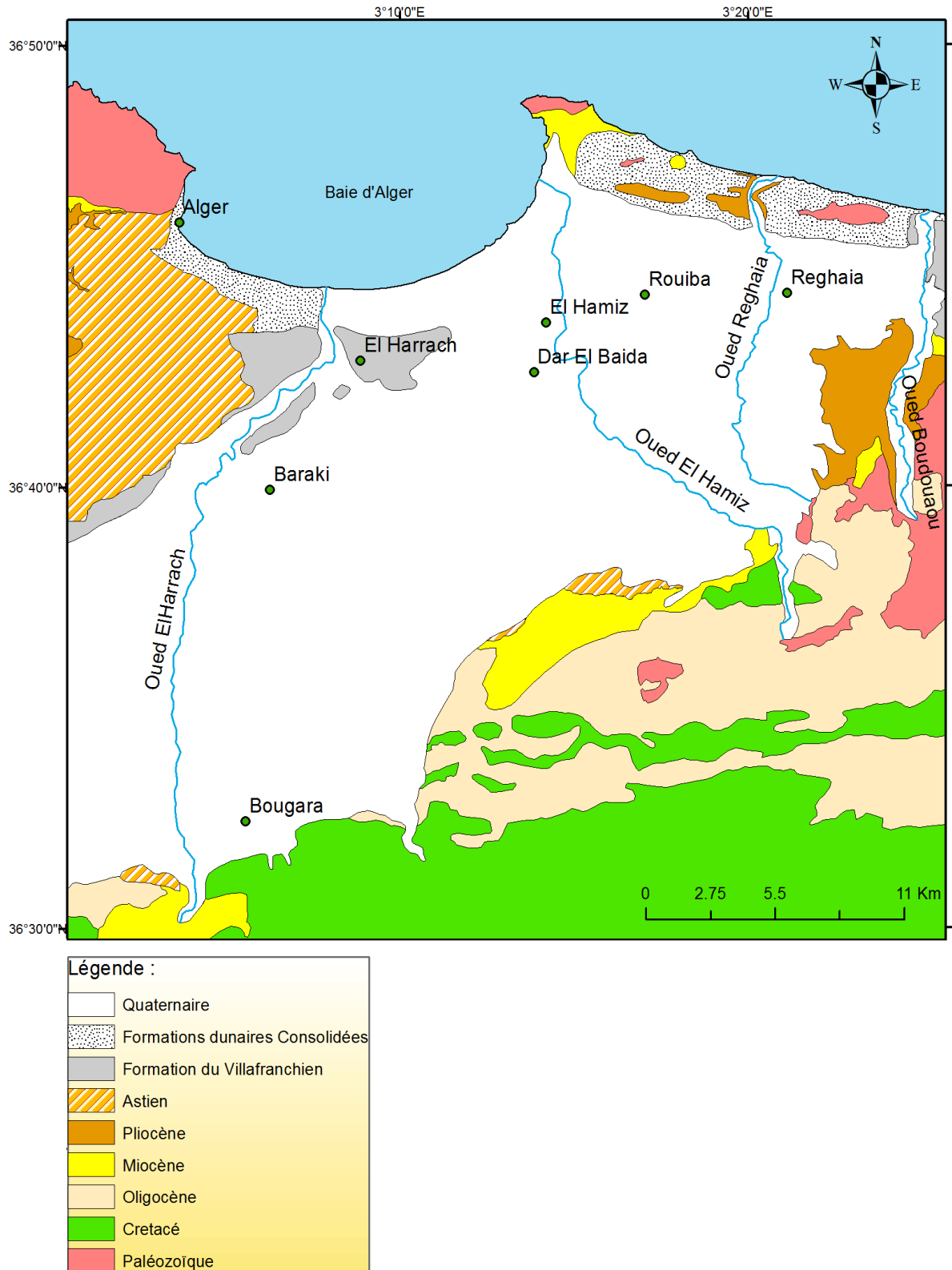


Figure 16 Carte géologique de la Mitidja-Est réalisée sur ArcMap

2.6.1 Le Paléozoïque

Le paléozoïque affleure dans le massif d'Alger, à Bordj-El-Bahri et à Larbatache. Il est formé par des schistes, des calcaires métamorphiques, des micaschistes et des gneiss.

2.6.2 Le Crétacé

Le Crétacé est formé par des schistes, quartzites, calcaires en bancs massifs et des marnes. Il affleure à l'Atlas blidéen et aux environs de Larbatache.

2.6.3 Le Miocène

Le Miocène est représenté par des schistes, des micaschistes, des gneiss, des marnes bleues, des conglomérats et des grès. Il affleure au niveau du massif d'Alger, à l'Est de la plaine et dans l'Atlas blidéen sur la bordure sud du bassin de la Mitidja.

2.6.4 Pliocène

Constitué de marnes grises et bleues, parfois sableuses, son épaisseur est de l'ordre de 100 m sous le Sahel algérois et décroît vers le sud.

- **Dont : L'Astien** : Composé de calcaire ou calcaire gréseux, de faciès gréseux, d'argiles, de calcaires jaunes, de calcaires récifaux, de marnes jaunes et de sables. L'épaisseur moyenne de cette série varie de 100 à 150 m et elle diminue fortement vers le Sud-est pour atteindre 15 m.

2.6.5 Quaternaire

- **Formation du Villafranchien (marnes jaunes d'El Harrach)** : Son épaisseur maximale est d'ordre de 200 m à l'Ouest et une épaisseur moyenne d'ordre de 100 m se trouve au centre de bassin. Dans la région de Rouiba à l'Est cette formation est complètement érodée. Cette formation est représentée par des argiles jaunâtres ou grises avec des cailloutis et des lentilles de graviers de 2 à 6 m.
- **Formation de la Mitidja** : Constituée essentiellement de matériaux alluvionnaires : graviers et sables avec des intercalations de niveaux argileux, graviers et galets

Chapitre 2 : Présentation de la zone d'étude

gréseux souvent argileux ou limoneux. Son épaisseur est d'ordre de 100 à 150 m, elle décroît vers les bordures de l'Atlas au sud et la Baie d'Alger au nord. L'analyse granulométrique des forages étudiés montre les dépôts de la formation de la Mitidja tendent à devenir de plus en plus grossiers en profondeur.

- **Formation du Mazafran (Rharbien) :** Constituée de limons gris et d'argiles limoneuses, d'une épaisseur moyenne de 10m en aval des oueds. Cette formation est absente au niveau de la Mitidja Est.

2.6.6 Dépôts récents :

Les dépôts récents englobent les dépôts de lits d'oueds, les dépôts du piémont de l'Atlas et les dépôts de sable dunaire.

- **Les dépôts de lits d'oueds :** Alluvions constitués de graviers, de sables graveleux et limoneux, leurs épaisseurs est inférieures à 10 m.
- **Les dépôts de piémont de l'Atlas :** Eléments grossiers hétérométriques liés par une matrice limono-argileuse, leurs épaisseurs varient de quelques mètres à quelques dizaines de mètres.
- **Les dépôts de sables dunaires :** Leurs épaisseurs varient de 20 à 40 m. Ils sont généralement composés de sables fins à moyens et de couches fossilifères consolidées.

2.7 Synthèse hydrogéologique

Le système aquifère de la Mitidja Est compte deux aquifères importants : l'aquifère des alluvions du Quaternaire et l'aquifère de l'Astien (Figure 17).

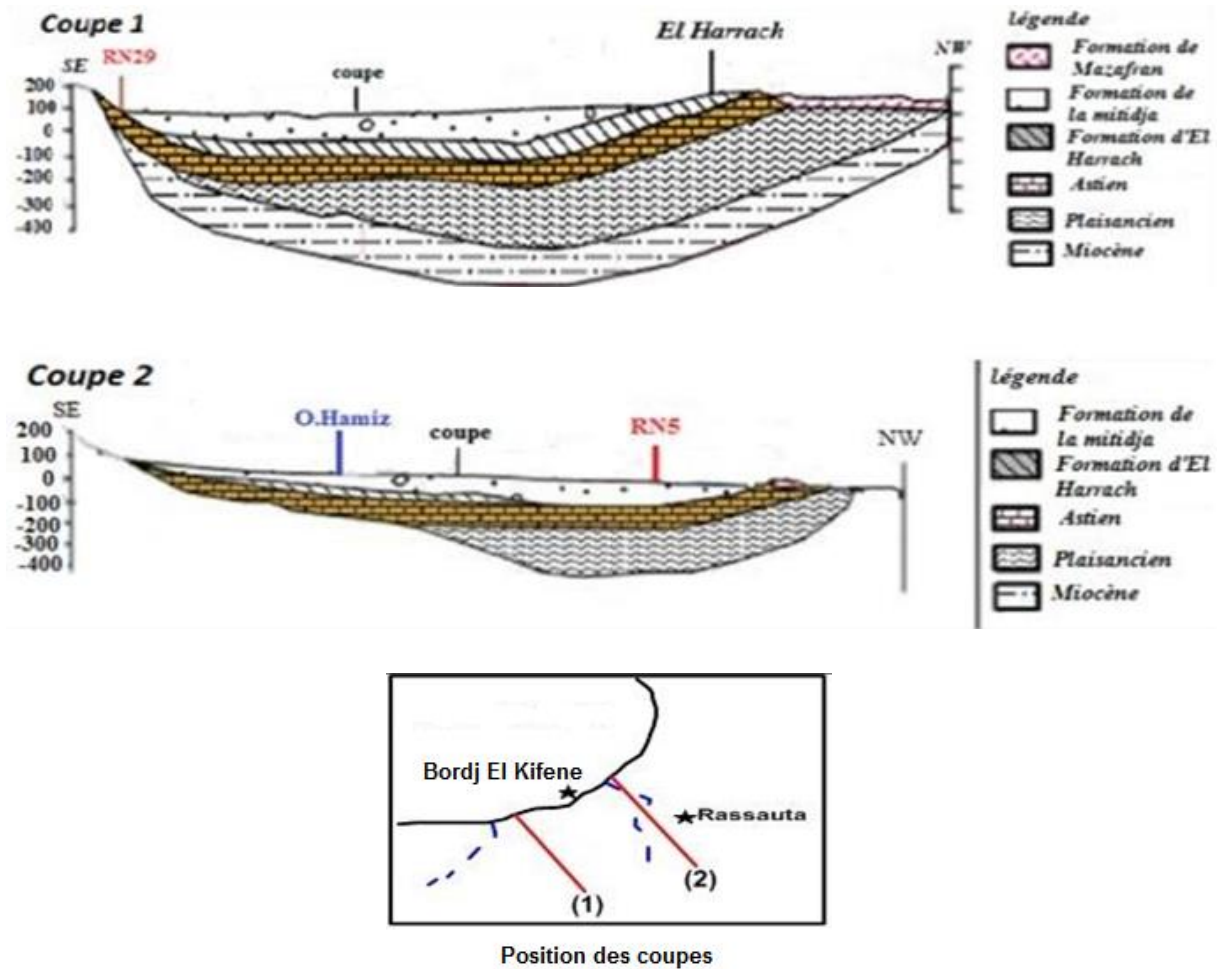


Figure 17 Coupes géologiques des formations aquifères de la Mitidja-Est

2.7.1 L'aquifère des alluvions du Quaternaire

Il s'agit d'un aquifère à nappe libre (en contact avec la surface et l'atmosphère) et occupe toute la surface du bassin de la Mitidja. Essentiellement constitué de galets, de graviers et de sables, plus ou moins consolidés, avec des limons et des argiles intercalés. Son substratum est représenté par les marnes jaunes d'El Harrach avec une exception à l'Est d'El Hamiz où il est en contact direct avec l'aquifère de l'Astien. Cet aquifère est très sollicité pour l'alimentation en eau potable, l'irrigation et les besoins industriels. Son épaisseur moyenne est de l'ordre de 100 m et elle diminue progressivement vers les bordures de la plaine.

L'alimentation de cet aquifère est dépendante des précipitations et des eaux de ruissellement des oueds. Il est également alimenté par l'Astien, grâce au phénomène de

drainance, à travers les marnes d'El Harrach et par la réinfiltration partielle des eaux d'irrigation en excès dans les champs agricoles.

2.7.2 L'aquifère de l'Astien

L'aquifère de l'Astien s'étend sous toute la plaine de la Mitidja, il affleure sur les collines du Sahel et dans quelques endroits dans les piémonts de l'Atlas au Sud. Son substratum est représenté par les marnes bleues du Plaisancien et son toit est formé par les argiles jaunes de la formation d'El Harrach, exception faite dans la région Est à partir d'El Hamiz où les deux aquifères sont en contact direct. Il est formé par des grès et des calcaires gréseux avec des intercalations d'argiles. Son épaisseur varie entre 100 et 130 m et son toit se trouve généralement à une profondeur de 250 à 300 m.

L'alimentation de cette nappe est directement liée à l'infiltration des précipitations sur le Sahel dans les zones d'affleurements (cet aquifère est captif au centre de la plaine et libre au niveau des affleurements situés dans le versant Sud du bombement du Sahel Algérois). Il est alimenté également par la nappe de la Mitidja, par drainance, à travers la formation d'El Harrach.

2.8 Caractéristiques hydrodynamiques des aquifères

Pour l'aquifère des alluvions du Quaternaire, les transmissivités les plus élevées se trouvent au niveau des champs de captage d'El Hamiz, de Rouiba et d'El Harrach. Elles sont de l'ordre de $2 \cdot 10^{-2}$ à $3 \cdot 10^{-2}$ m²/s. Les faibles transmissivités sont observées au niveau des Piémonts de l'Atlas et prennent des valeurs allant de $5 \cdot 10^{-3}$ à 10^{-4} m²/s. Le coefficient d'emménagement est de l'ordre de 15% à l'Est, de 3% à l'Ouest et présente une moyenne de 6 à 7% sur l'ensemble de la plaine (Figure 18).

Vu la rareté des forages réalisés à de grandes profondeurs, pour l'aquifère de l'Astien, les caractéristiques hydrodynamiques sont méconnues. Cependant, dans le peu de forages profonds existants, les essais ont révélé des valeurs de transmissivité variant de $1,85 \cdot 10^{-3}$ à $30 \cdot 10^{-3}$ m²/s et un coefficient d'emménagement de l'ordre de $5 \cdot 10^{-6}$ à $5 \cdot 10^{-3}$.

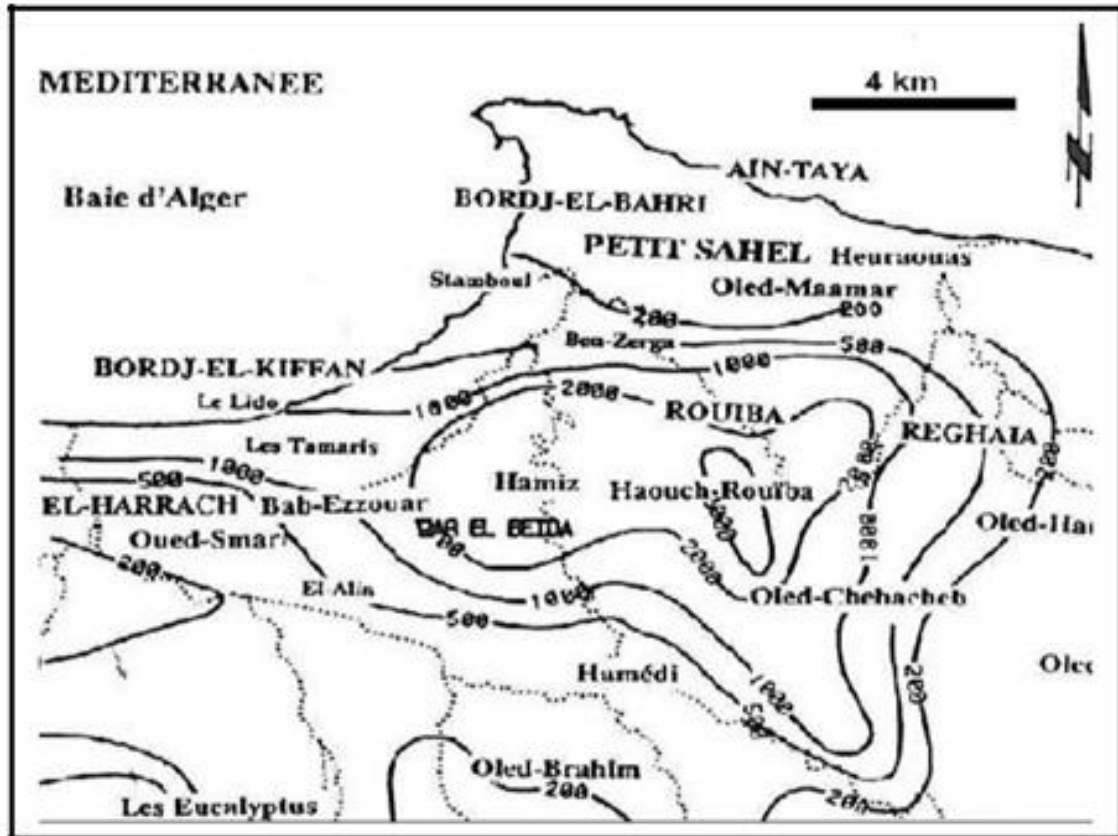


Figure 18 Valeurs des transmissivités dans la Mitidja-Est

2.9 Piézométrie

Les services de l'ANRH organisent annuellement deux campagnes piézométriques ; une en période des hautes eaux et l'autre en période des basses eaux.

Ces campagnes montrent dans l'ensemble des eaux souterraines qui s'écoulent du Sud vers le Nord. Cependant, à l'Est de la baie d'Alger, on constate une inversion du sens de l'écoulement souterrain, causée par la surexploitation de la nappe (la zone a une grande densité d'ouvrages de captage). Les champs de captage de Dar El Baida, El Hamiz, Rouiba et Baraki ont engendré la formation de cônes de dépression majeurs qui ont perturbé les écoulements initiaux. Les isopièzes dans cette zone convergent vers ces champs d'exploitation ; les courbes dans cette zone sont très espacées (faible gradient hydraulique) caractérisant ainsi une zone assez perméable de l'aquifère.

Au Sud de la plaine, une zone d'alimentation et un enfoncement rapide de l'aquifère à plus de 60 m de profondeur sont indiqués par les isopièzes parallèles à l'Atlas blidéen et elles se resserrent au fur et à mesure de se rapprocher aux reliefs. En partant du centre de la plaine

Chapitre 2 : Présentation de la zone d'étude

vers les piémonts de l'Atlas, on observe des courbes piézométriques uniformes et un gradient hydraulique élevé (Figure 19).

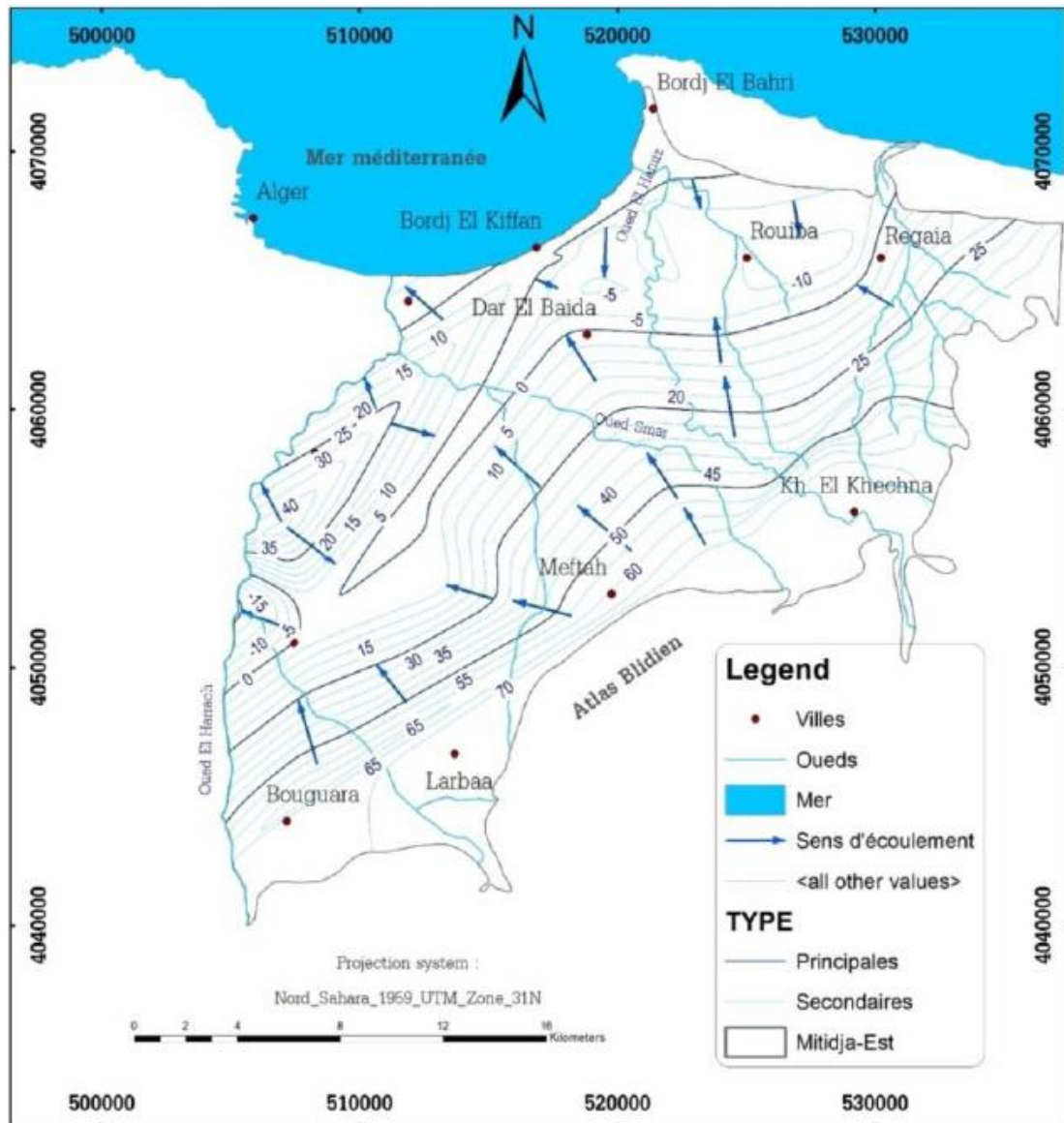


Figure 19 Carte piézométrique de la Mitidja-Est (année 2015)

Les terrains de la région sont relativement perméables, de l'ordre de 10-4 m/s sont au niveau du champ captant du Hamiz, Rouiba et Baraki caractéristiques d'une nappe libre (Figure 20). Ces zones correspondent aux matériaux grossiers relativement résistants déposés par les grands oueds.

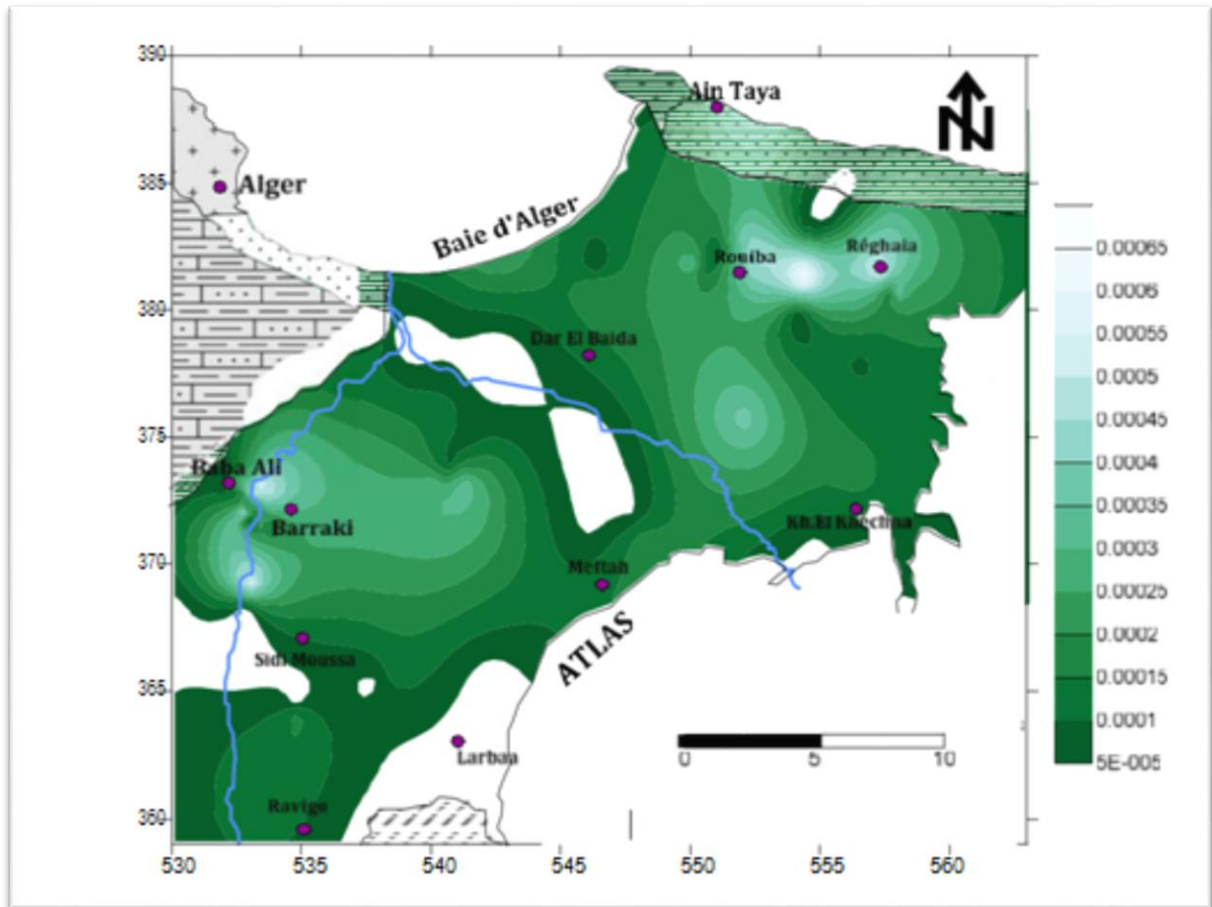


Figure 20 Carte des valeurs de perméabilité de l'aquifère des alluvions de la Mitidja Est

La production d'eau des champs de captage principaux dans la Mitidja Est à savoir :

- Champ de captage d'El Hamiz
- Champ de captage de Rouiba
- Champ de captage Dar El Beida
- Champ de captage Bouréah
- Champ de captage de Réghaia

Chapitre 2 : Présentation de la zone d'étude

La production du champ de captage d'El Hamiz est supérieure à celle des autres avec des valeurs dépassants les 8 millions de m³/an, il atteint le pic en 2006 avec presque 18 millions de m³ exploités. Les autres champs de captages produisent dans la moyenne 3 millions de m³/an d'eau (Figure 21).

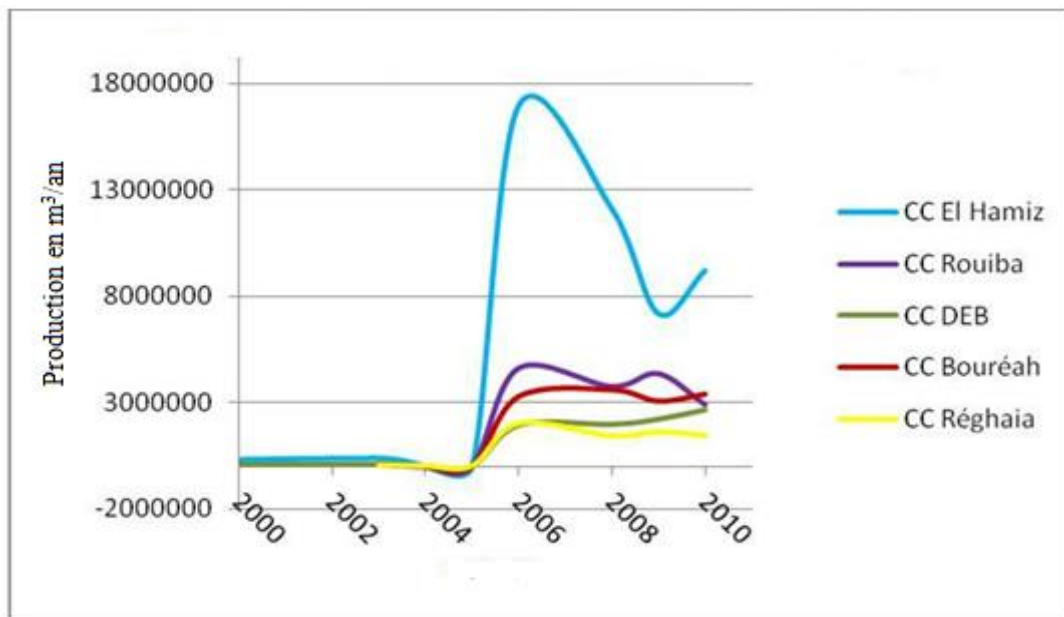


Figure 21 Productions d'eau par les champs de captages de la région

3^{ème} Chapitre :
Méthode
d'investigation
géo-électrique

3.1 Résistivité électrique

La résistivité ρ d'un milieu est la propriété physique qui définit la capacité de ce milieu à s'opposer à un courant électrique qui le traverse. La loi d'Ohm de 1827 détermine pour un matériau de dimensions connues la propriété de résistance R (en ohm) à un courant électrique d'intensité I (en ampères):

$$\Delta V = R \times I$$

ΔV (en volts) étant la différence de potentiel aux limites du matériau par lequel passe le courant. Cependant, la résistance dépend des dimensions du matériau puisqu'il ne s'agit pas d'une propriété intrinsèque, donc pour un objet de forme cylindrique de longueur L (en m) et de section A (en m²), la résistance R (Figure 22) est fonction de sa résistivité ρ (en ohm.m):

$$R = \rho \cdot \frac{L}{A}$$

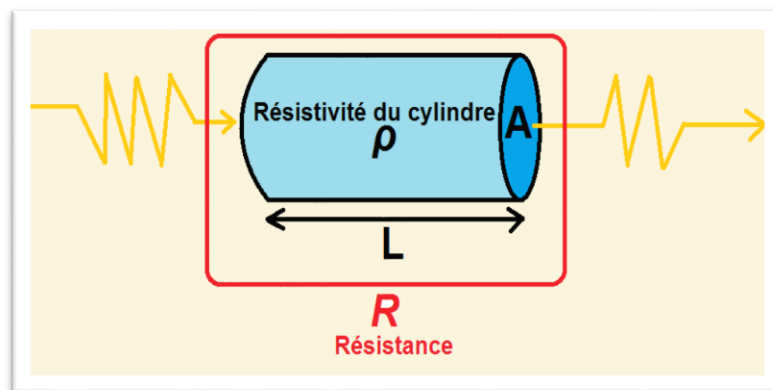


Figure 22 Schéma explicatif de la résistance R en fonction de la résistivité ρ

La résistivité ρ par contre est une propriété intrinsèque d'un matériau et ne dépend ni de sa géométrie, ni de ses dimensions. La conductivité (conductibilité) électrique σ est l'inverse de la résistivité électrique $\sigma = 1/\rho$, exprimée en mho/m ou siemens/m (mho = 1/ohm = siemens).

3.2 Facteurs affectant la résistivité électrique

Dans un corps conducteur, le courant électrique peut s'écouler selon deux modes distincts : la conductibilité solide et la conductibilité liquide électrolytique.

3.2.1 Conductibilité solide

On parle ici de conductibilité électronique ou métallique car c'est une conductibilité correspondante à celle des métaux. Le fonctionnement du courant électrique se fait par déplacement des électrons. La conductibilité solide dans le sous-sol n'est importante que pour certains gisements minéraux tels que :

- certains sulfures (pyrite, galène)
- certains oxydes (magnétite, hématite)
- le graphite, l'or, l'argent, le platine ...

3.2.2 Conductibilité liquide électrolytique

La conductibilité est presque uniquement de type électrolytique pour la majorité des roches. Cela veut dire que le courant électrique passe à travers la roche grâce à l'eau qu'elle contient, ce sont les ions dissous qui transportent des charges sous l'effet du champ électrique. La résistivité d'une roche va dépendre de:

- La qualité de l'électrolyte, c'est à dire la quantité de sels dissous dans l'eau.
- La quantité d'électrolyte contenu dans l'unité de volume de la roche.
- Le mode de distribution de l'électrolyte.
- La température.

3.2.2.1 Qualité de l'électrolyte

Quand un sel se dissout dans l'eau, il se divise en ions chargés positivement et ions chargés négativement. Lorsque l'on applique un champ électrique dans cette eau, les ions vont se déplacer.

La conductibilité d'un électrolyte dépend en fait de la teneur en sels dissous et de la mobilité des différents ions en solution et du degré de dissociation, ainsi que la viscosité de

l'eau. D'un point de vue chimique, on le définit comme résidu sec, qui représente le total des matières dissoutes. On l'exprime en g/litre.

La qualité d'une eau dans une roche dépend généralement de :

- La nature des eaux originelles
- La solubilité des minéraux de la roche
- L'hydrodynamisme souterrain
- L'âge de la roche

Dans la plupart des cas, les roches à granulométrie fine et à pores fins renferment des eaux plus salines, donc plus conductrices, en effet l'eau ne circule pas et se charge en ions. Ainsi, de l'argile renferme une eau en général beaucoup plus conductrice que celle des graviers par exemple. Les roches les plus vieilles contiennent des eaux plus chargées en sels en dépits de leur longue durée de séjour dans le sous-sol.

3.2.2.2 Quantité d'électrolyte

La porosité totale \emptyset détermine la quantité d'eau qui peut être contenue dans une roche. La porosité totale (absolue) est le rapport entre le volume des vides et le volume total de la roche. C'est un nombre sans unité exprimé en %.

$$\emptyset_t = V_{\text{vides}} / V_{\text{total de la roche}}$$

On distingue deux genres de porosités : la porosité primaire et la porosité secondaire.

- La porosité primaire se forme pendant le dépôt des sédiments, elle est intergranulaire ; son importance varie selon le degré de classement des grains et de leur forme, elle ne dépend pas de leur taille, ces vides diminuent généralement avec le temps sous l'effet de la compaction.
- La porosité secondaire englobe les porosités de fracture, les porosités dues à l'altération, ainsi que les vides vacuolaires acquis par dissolution dans les roches de genèse chimique ou biochimique.

3.2.2.3 Mode de distribution de l'électrolyte

L'interconnexion des pores est nécessaire, pour permettre le passage d'un fluide, la résistivité électrique d'un milieu géologique va donc dépendre de la distribution de ces vides dans les roches. On définit alors la porosité efficace (effective) \emptyset_e :

$$\emptyset_e = V_{\text{vides interconnectés}} / V_{\text{total de la roche}}$$

La porosité efficace est souvent inférieure voir même très inférieure à la porosité totale. Dans certains cas les dimensions des pores sont très petites telle que le fluide ne peut pas circuler, ou encore certaines roches sont très poreuses mais absorbent l'eau et ne permettent pas son écoulement (argile).

3.2.2.4 Température

La température est un facteur important qui atteint la valeur de la résistivité d'un milieu ; un croisement de la température aura pour effet de diminuer la viscosité, ceci engendre une plus grande mobilité des ions, et donc diminuer la résistivité ou inversement d'augmenter la conductivité.

3.3 Principes de la méthode

Dans le domaine de la prospection électrique à courant continu, les variations de résistivité ρ (ohm.m) dans l'espace sont mesurées avec un dispositif de quatre électrodes (Figure 23) plantées dans le sol reliées d'une manière à ce que deux d'entre elles (généralement nommées A et B) servent à générer un champ électrique dans le sous-sol, on les appelle les électrodes d'injection et les deux autres (généralement nommées M et N) qu'on appelle électrodes de mesure seront utilisées pour mesurer la différence de potentiel obtenue entre deux points de la surface (Figure 24).



Figure 23 Résistivimètre, câbles et électrodes (matériel utilisé en prospection électrique)

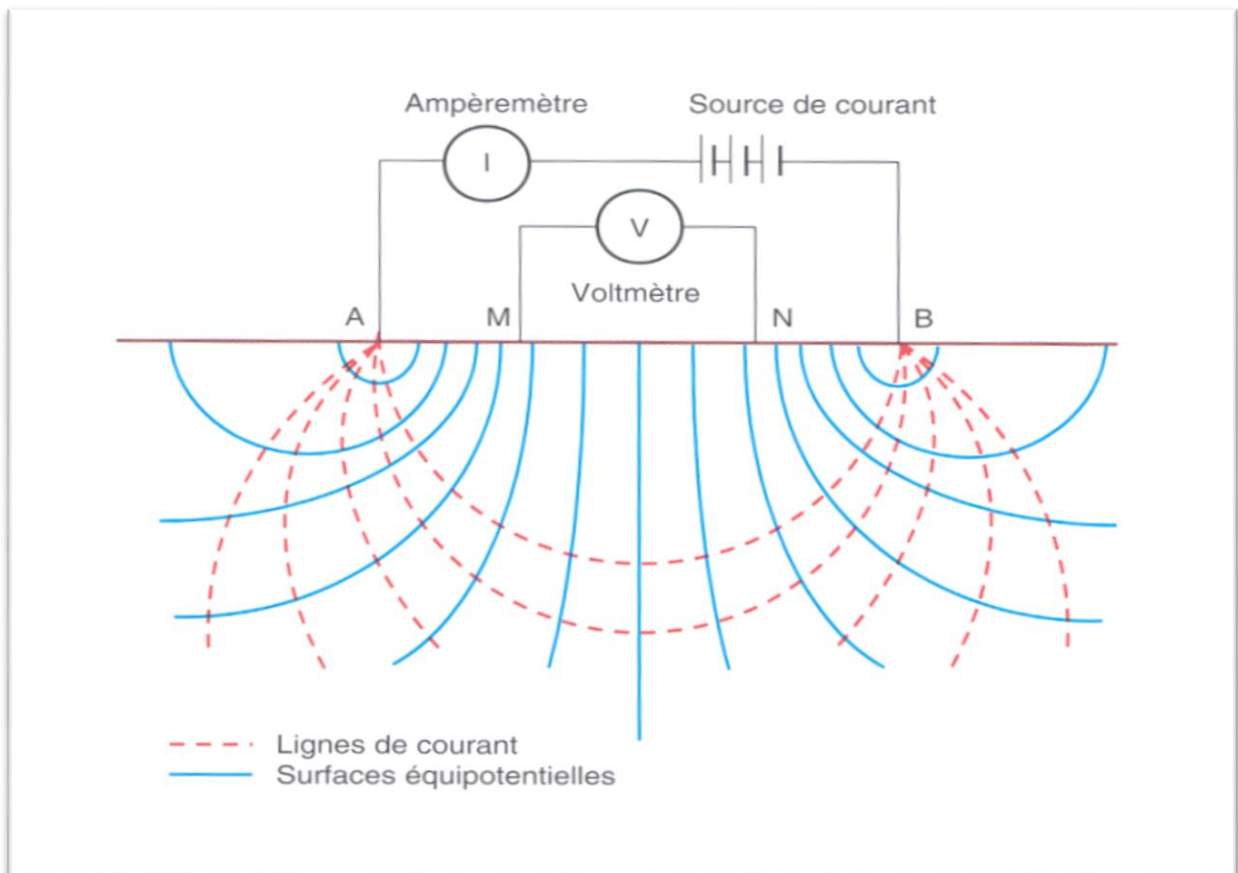


Figure 24 Schéma expliquant l'injection du champ électrique et la mesure de la résistivité par les électrodes AMNB

Chapitre 3 : Méthode d'investigation géo-électrique

Dans un terrain homogène avec une électrode placée à surface du sol, la propagation du courant sera limitée sur une demi-sphère et la distribution des potentiels électriques est exprimée par l'équation suivante :

$$V(r) = \frac{\rho I}{2\pi r}$$

Pour un quadripôle géo-électrique AB-MN de géométrie quelconque, le principe d'additivité des potentiels sera :

$$\Delta V_{MN} = \frac{\rho I_{AB}}{2\pi} \cdot \left(\frac{1}{r_{AM}} - \frac{1}{r_{AN}} - \frac{1}{r_{BM}} + \frac{1}{r_{BN}} \right)$$

On définit la résistivité apparente ρ_a (ohm.m) comme la résistivité équivalente à un milieu homogène et isotrope lors d'une application réelle sur le terrain, puisque les conditions présentent en générale des distributions hétérogènes et anisotropes de la résistivité.

$$\rho_a = K \cdot \frac{\Delta V_{MN}}{I_{AB}}$$

$$\text{avec : } K = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{r_{AM}} - \frac{1}{r_{AN}} - \frac{1}{r_{BM}} + \frac{1}{r_{BN}} \right)}$$

K : Facteur géométrique dépendant de la configuration du quadripôle uniquement.

Les données mesurées sur un terrain réel doivent être déconvoluées par modélisation de manière à reconstituer la distribution réelle des résistivités électriques puisque la résistivité apparente ne traduit pas directement les résistivités réelles ni les profondeurs des matériaux du sous-sol.

Remarque : La résistivité apparente est la variable mesurée sur le terrain en prospection électrique, que ce soit en sondage, en trainé ou en tomographie.

3.4 Méthodes de prospection électrique à courant continue

Les travaux consistant à injecter un courant électrique continu dans le sol pour but de prospection géologique ont débutés il y a plus d'un siècle. Au tout début, la technique consistait à déplacer une électrode de mesure par rapport à un dipôle d'injection fixe pour

localiser les zones conductrices du sous-sol. Trois méthodes de mesure sont apparues depuis :

- Le sondage électrique vertical (VES) a vu le jour dans les années 1920.
- Le trainé électrique qui a été établi dans cette même période.
- La tomographie de résistivité électrique a été développée au début des années 1980.

3.4.1 Sondage électrique vertical (SEV)

Le sondage électrique vertical consiste à nous informer sur la variation verticale dans le sous-sol de la résistivité apparente, à partir d'un point donné à la surface. Pour cette raison, le domaine d'application idéal des SEV est généralement l'étude des formations géologiques stratifiées horizontales et subhorizontales (pendage des couches ne dépassant guère 15°) dont les propriétés géologiques ne montrent pas de variations latérales brusques (latéralement homogènes) et qui s'étendent sur une certaine distance.

La réalisation d'un SEV s'effectue à partir d'un même point, avec une série de mesures en augmentant progressivement les distances entre les électrodes A et B du dispositif de mesure, en gardant le même point central et la direction (La profondeur d'investigation augmente en fonction de l'espacement AB). Dans la pratique, cette profondeur d'investigation est proportionnelle à la longueur du dispositif dans le rapport approximatif de 1/4 à 1/10. Généralement, on continue les mesures jusqu'à atteindre la formation géologique recherchée (Figure 25).

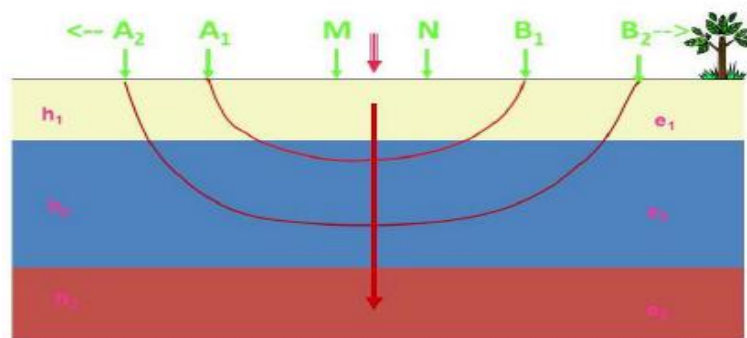


Figure 25 Augmentation de la profondeur d'investigation en fonction de l'espacement AB dans un SEV

Au début de la pratique de cette méthode, l'interprétation des courbes verticales de résistivité mesurées restait qualitative. A partir des années 1930, des abaques ont été développées et ont permis la conversion d'un milieu en séquences de couches de résistivités. Dans les années 1970, les outils numériques ont permis la création de modèles de simulation, d'abord en 1D, puis 2D et 3D qui seront pour la suite utilisés pour l'interprétation des SEV et des autres méthodes.

3.4.2 Trainé électrique

Le traîné électrique est une méthode de prospection géophysique qui permet de déterminer les propriétés du sous-sol par une interprétation de la résistivité apparente d'un terrain à une profondeur fixée (mesure des résistivités à l'horizontale) et de dresser des cartes horizontales de résistivités à cette profondeur sur une certaine superficie.

La réalisation d'un traîné électrique se fait en implantant des électrodes à un point donné en effectuant la mesure de la résistivité apparente, puis on déplace l'ensemble du dispositif au point de mesure suivant et ainsi de suite jusqu'à avoir couvert la surface voulue (Figure 26).

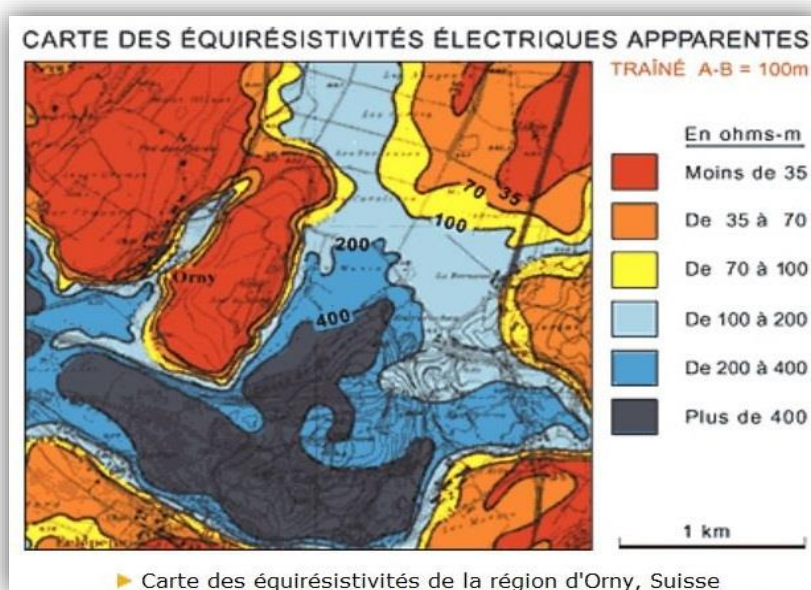


Figure 26 Exemple de carte de résistivités électriques apparentes réalisée à l'aide de traîné électrique

3.4.3 Tomographie de résistivité électrique

La tomographie de résistivité électrique (TRE) est une méthode de prospection géo-électrique issue du sondage électrique et du traîné électrique (Figure 27).

Cette technique est caractérisée par une bonne sensibilité verticale ainsi qu'horizontale. Elle connaît une importante progression grâce au développement récent de nouveaux appareils d'acquisitions et la progression numérique des codes d'inversion.

La tomographie nous permet d'obtenir des modèles de résistivité du sous-sol avec un système à plusieurs électrodes où la distribution de la résistivité varie verticalement, et horizontalement le long d'un profil (en 2D), et parfois transversalement (en 3D).

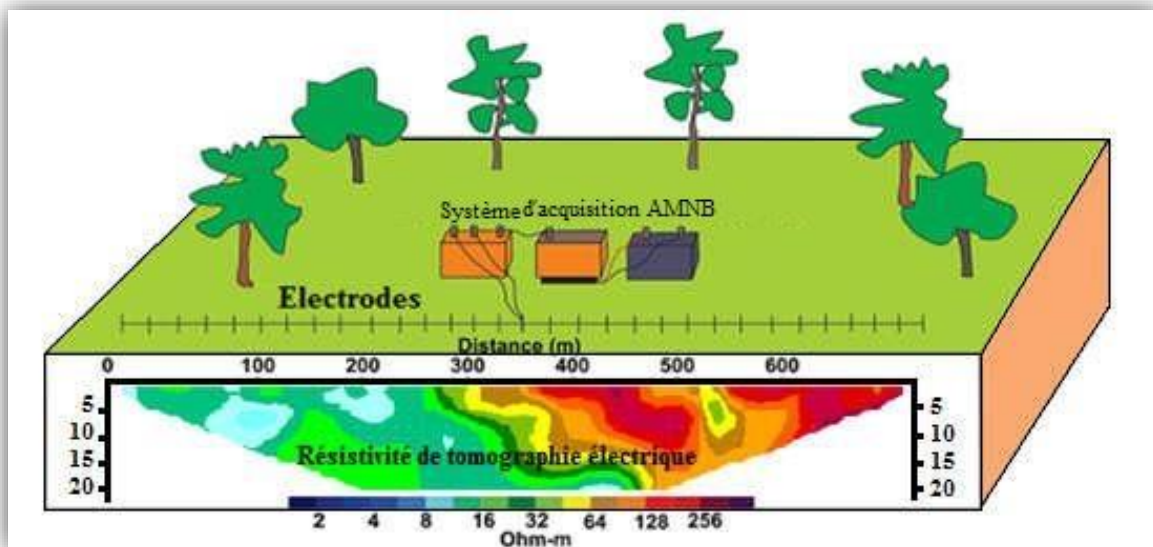


Figure 27 Exemple de tomographie de résistivité électrique en 2D

L'application de la tomographie en 3D est encore à ses premiers pas, du fait des difficultés de mise en œuvre sur le terrain et de la lourdeur informatique des modèles d'inversion 3D. La TRE en 2D est largement utilisée en hydrogéologie de nos jours.

3.4.3.1 Principe d'acquisition

Un dispositif multi-électrodes est utilisé pour effectuer les mesures de résistivités, chacune d'entre elles reliée au centre du quadripôle AMNB ($MN/2$ ou $AB/2$), pour déterminer des niveaux d'enregistrements (Figure 28). On appelle pseudo-section un ensemble de

mesures représentant un profil de résistivités apparentes en 2D. Cette dernière ne peut être interprétée directement vu les hétérogénéités de terrain. Pour reconstituer la répartition des résistivités réelles dans le sous-sol à partir des résistivités apparentes, on doit passer par le processus de l'inversion.

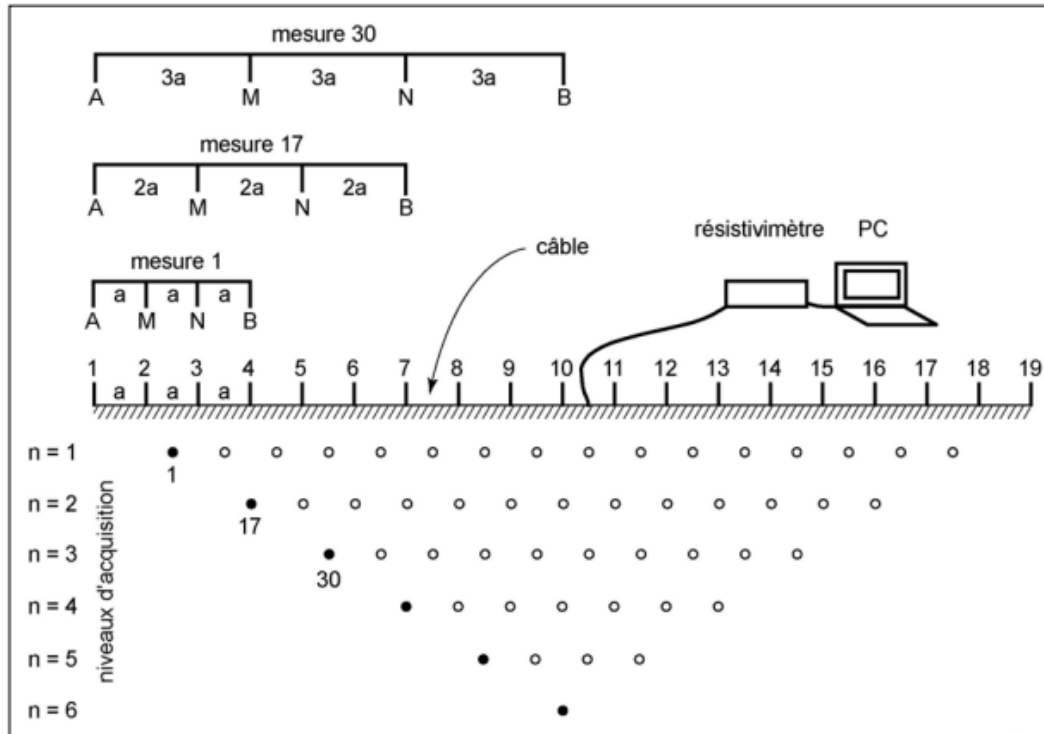


Figure 28 Principe d'acquisition d'une TRE

3.4.3.2 Dispositifs d'acquisition les plus utilisés

Dispositif Wenner α ($W\alpha$) : Il est particulièrement bien adapté à l'imagerie des structures horizontales, telles que les milieux sédimentaires. Le $W\alpha$ possède cependant une assez faible résolution spatiale des structures mais une relativement bonne définition en profondeur en comparaison avec d'autres dispositifs. Sa couverture 2D est parfaitement homogène et sa profondeur d'investigation est moyenne. C'est le dispositif le plus utilisé en TRE.

Le dispositif est réalisé tel que les quatre électrodes sont disposées à équidistance avec le dipôle de mesure situé à l'intérieur du dipôle d'injection $AB = 3MN$, il produit donc un bon rapport signal/bruit.

Chapitre 3 : Méthode d'investigation géo-électrique

Dispositif Wenner Schlumberger (WSC) : Le WSC est beaucoup utilisé en hydrogéologie dans les milieux complexes.

Il correspond à un $W\alpha$ modifié où l'écartement du dipôle d'injection est de taille supérieure ou égale à celui du $W\alpha$ (c'est-à-dire que $AB \geq 3 MN$). Ses caractéristiques sont proches de celles du $W\alpha$ avec toutefois un moins bon rapport signal/bruit, une couverture spatiale moins homogène, mais une profondeur d'investigation et une résolution plus importantes ainsi qu'une meilleure sensibilité aux structures obliques ou verticales.

Dispositif Dipôle-Dipôle (DD) : Le DD est particulièrement adapté à l'imagerie des structures verticales ou obliques (ex : les milieux fracturés) et des structures 3D. Il possède un rapport signal/bruit assez faible mais il a une résolution spatiale très satisfaisante et une très grande profondeur d'investigation.

Il est caractérisé par un écartement identique entre les électrodes d'injection A et B et les électrodes de mesures M et N ($AB = MN = a$). L'écartement entre les centres des deux dipôles est un multiple de la taille de ces deux derniers.

Dispositif Pôle-Pôle (PP) : Le PP est plutôt adapté pour la prospection profonde et pour les structures 3D. Malgré une couverture homogène, sa résolution spatiale des structures est assez faible, il a un rapport signal/bruit assez moyen mais une profondeur d'investigation élevée.

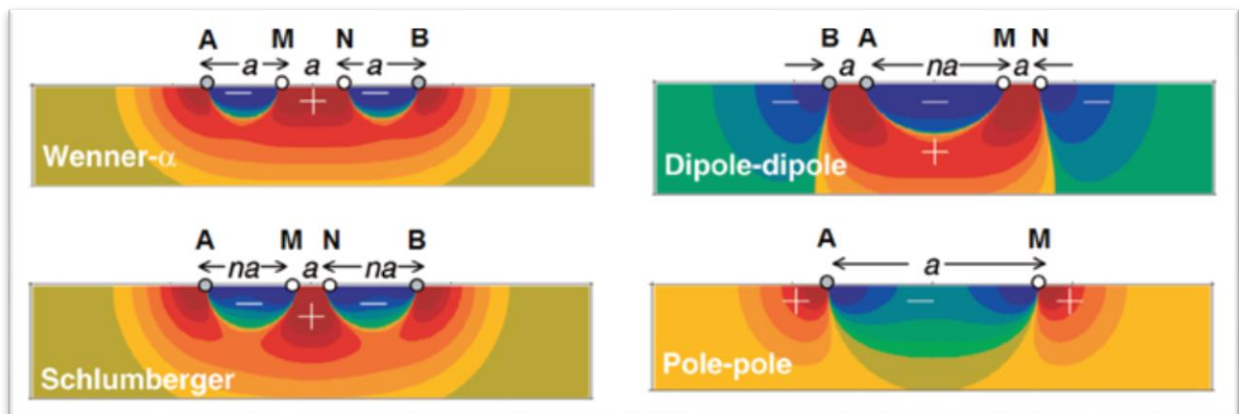
Il possède deux électrodes disposées à l'infini (injection B et mesure N). Seules les électrodes A et M sont déplacées sur le site lors de l'acquisition.

Chapitre 3 : Méthode d'investigation géo-électrique

Dispositifs		Prof. d'investigation		Pouvoir de résolution
		Roy (1971)	Barker (1989)	
Wenner		0.11L	0.17L	1/2.25
Schlumberger		0.125L	0.19L	1/2.45
Dipôle-Dipôle		0.195L	0.25L	1/3.45
Pôle-Pôle		0.35L		1/8.4

Tableau 5 Distance entre les électrodes, Profondeur d'investigation et résolution des dispositifs

On remarque que pouvoir de résolution et profondeur d'investigation varient en sens inverse.



Rouge (+) : les zones auxquelles le dispositif est le plus sensible Bleu (-) : Les zones auxquelles le dispositif est le moins sensible

Figure 29 Comparaison de la sensibilité des dispositifs

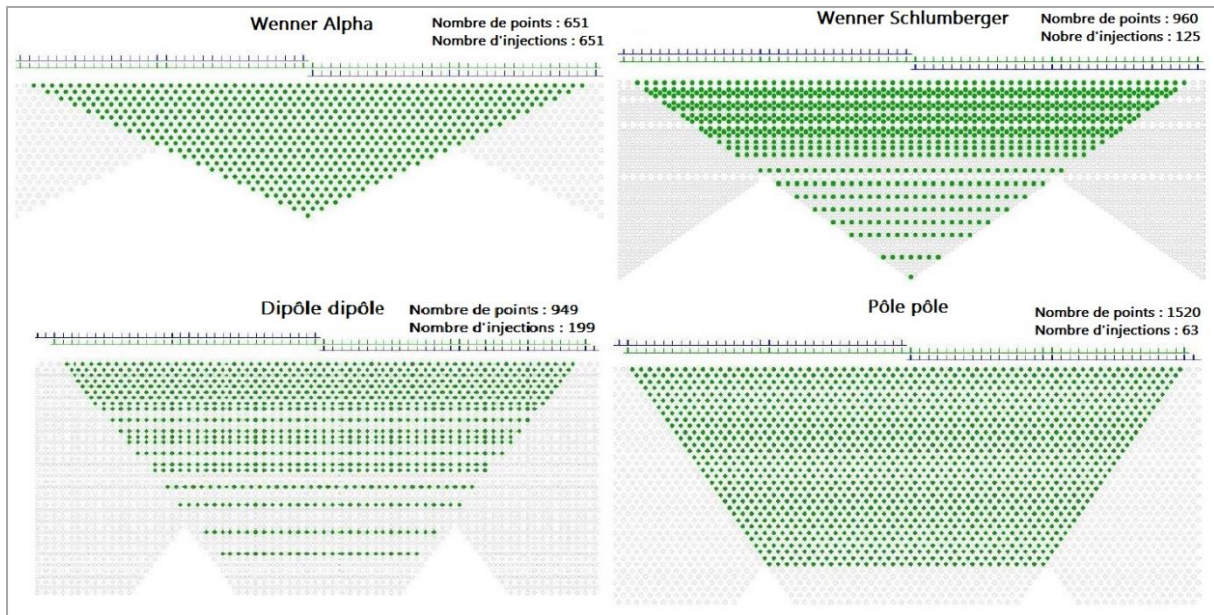


Figure 30 Fenêtre d'investigation et densité des points de mesures des dispositifs

3.5 Profondeur d'investigation

Le concept de profondeur d'investigation dans la prospection électrique fut introduit par les frères Schlumberger, initiateurs des méthodes électriques, en 1932. Puis Evjen en 1938 l'a défini comme la profondeur maximale d'un dispositif jusqu'à laquelle les mesures peuvent fournir des informations.

Roy en 1972, a calculé les contributions d'un milieu homogène et isotrope au signal mesuré à partir d'une solution de la fonction de sensibilité pour plusieurs dispositifs. Il a fini par représenter des courbes en fonction de la profondeur s'appelant « courbe de la profondeur d'investigation caractéristique (DIC) ». Cette courbe est normalisée par rapport à la géométrie du type du dispositif et donne une courbe (NDIC) où la profondeur Z sera fonction de la distance L entre le deux électrodes extrêmes du dispositif.

La profondeur effective (Z_e) fut proposée de façon intuitive à partir des résultats obtenus par Roy. Cette profondeur est celle à laquelle la portion de terrain située au dessus de cette limite possède la même influence que la portion de terrain située au dessous. La profondeur médiane (effective) semble être la manière la plus robuste d'estimer une valeur de la profondeur d'investigation (Figure 31). Elle fut introduite par Edwards en 1977.

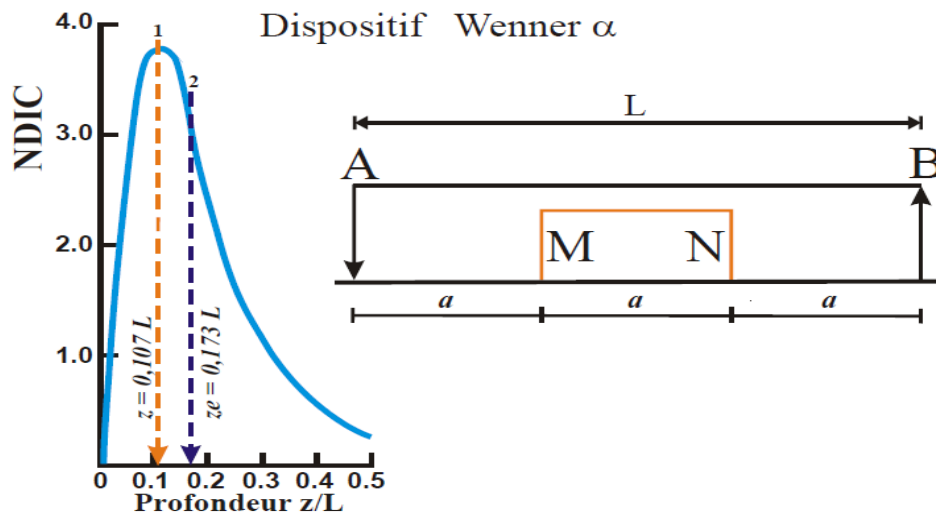


Figure 31 Exemple de courbe de profondeur d'investigation caractéristique (NDIC) pour le dispositif Wenner α

- 1- profondeur d'investigation Z d'après Roy
- 2- profondeur d'investigation effective Z_e d'après Edwards

3.6 Problèmes direct et inverse

La méthode de tomographie de résistivité électrique se fait en deux parties :

1. Les mesures de résistivité électrique apparente en utilisant un ou plusieurs dispositifs selon le problème posé.
2. L'interprétation de ces données acquises à l'aide de logiciels.

Dans la pratique, on peut dire que lors de l'acquisition des données, il n'existe pas de difficultés autres que la bonne manipulation des appareils qu'on utilise. En revanche, les difficultés les plus importantes concernent l'interprétation des données enregistrées. L'interprétation de ces données consiste à donner la solution la plus vraisemblable du modèle géologique (structure du sous-sol la plus proche de la réalité) qui a généré les résistivités apparentes mesurées.

3.6.1 Modélisation géo-électrique (problème direct)

L'interprétation des valeurs mesurées de résistivités apparentes, passe par le procédé de déconvolution du signal mesuré, c'est-à-dire de reconstituer la distribution des résistivités vraies dans le sous-sol correspondant aux résistivités apparentes mesurées en surface. Les

modèles géo-électriques directs permettent de simuler, dans un milieu de résistivité $\rho(x,y,z)$, la distribution des potentiels électriques $V(x,y,z)$ induite par une source de courant I en surface, grâce à la résolution de l'équation de Poisson:

$$\nabla \cdot \left(\frac{1}{\rho} \nabla V \right) = -I\delta$$

En développant sous l'écriture en dérivées partielles on obtient :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial V}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial V}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial V}{\partial z} \right) = -I\delta(x)\delta(y)\delta(z)$$

Connaissant alors la distribution 3D des potentiels, et donc leur distribution en surface du sol, les équations précédentes permettent ensuite de calculer les résistivités apparentes enregistrées par un dispositif quadripôle, quelle que soit sa configuration.

RES2DMOD pour la TRE 2D et RES3DMOD pour la TRE 3D sont les logiciels de modélisation directe les plus utilisés de nos jours. Le modèle 2D peut être divisé en un grand nombre de mailles rectangulaires auxquelles sont associées des valeurs de résistivités. En 3D, le maillage est tridimensionnel et les résistivités apparentes sont représentées en séries de pseudo-sections verticales ou horizontales.

3.6.2 Inversion géo-électrique (problème inverse)

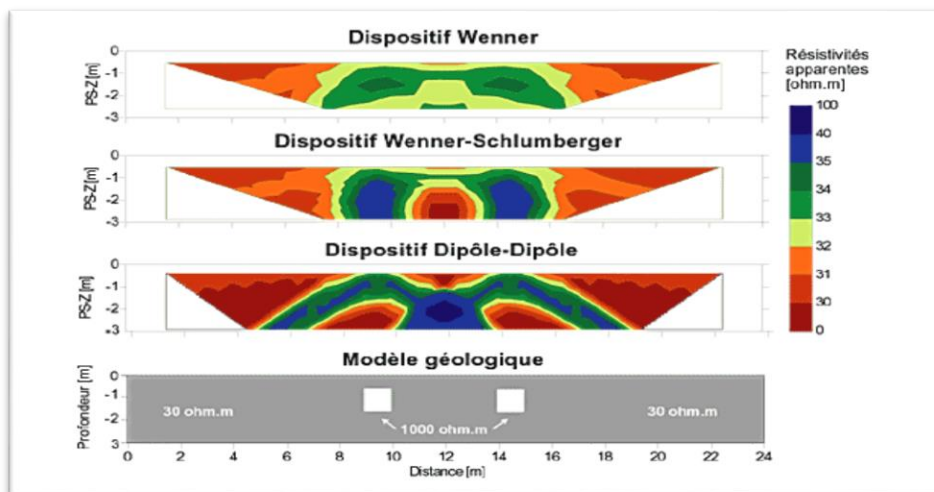


Figure 32 Résistivités apparentes (avant l'inversion) d'un même modèle géologique avec des dispositifs différents

Chapitre 3 : Méthode d'investigation géo-électrique

La figure 32 montre qu'il est impossible d'avoir une interprétation correcte d'une tomographie qui n'est pas passée par le processus d'inversion, les résistivités apparentes engendrées par un objet identique sont différentes par dispositif utilisé.

Dans les modèles d'inversion, une routine d'inversion automatique à partir des données mesurées assure le travail de déconvolution. Cette routine d'inversion détermine par processus itératif convergent, la distribution des résistivités dont la réponse s'accorde avec les mesures. En réalité les modèles d'inversion incluent à la fois le problème inverse (données mesurées → modèle) et le problème direct (modèle → données calculées).

RES2DINV pour la TRE 2D et RES3DINV pour la TRE 3D sont les logiciels d'inversion géo-électrique les plus utilisés. Ils se portent garants de l'inversion par la méthode d'optimisation par moindres-carrés Gauss-Newton ou quasi-Newton. Les simulations du modèle direct sont réalisées par la méthode des éléments finis ou des différences finies. Le maillage du modèle est généré automatiquement en fonction de la densité des points de mesures. Ces codes déterminent aussi les modifications dans les paramètres du modèle qui réduisent la somme des erreurs au carré entre la réponse du modèle et les données observées.

4^{ème} Chapitre :

Application

4.1 Modélisation géo-électrique synthétique

Avant de procéder à l'acquisition des données réelles sur le terrain, on est passés par la modélisation géo-électrique synthétique à l'aide du logiciel RES2DMOD. Dans cette étape on a réalisé deux modèles d'intrusion marine : un cas d'intrusion simple sans l'existence d'ouvrage de captage, et un deuxième cas avec la présence d'un forage en activité. Ces modèles ont été effectués à base des théories sur les écoulements densitaires, ils nous serviront à illustrer la supposée forme géométrique de l'interface eau douce – eau salée ainsi que les cônes de dépression à travers un aquifère côtier.

Des valeurs de résistivités apparentes approximatives ont été attribuées à ces modèles : 2 ohm.m pour l'eau salée ; 30 ohm.m pour la zone de transition ; 100 ohm.m pour l'eau douce ; 200 ohm.m pour la zone non-saturées.

En suite, vient l'étape de l'inversion à l'aide du logiciel RES2DINV. Les modèles de résistivités apparentes obtenus subiront plusieurs itérations d'inversion en changeant les dispositifs à chaque fois afin d'avoir des TRE avec des valeurs de résistivités réelles.

1^{er} cas : Absence d'ouvrages de captage

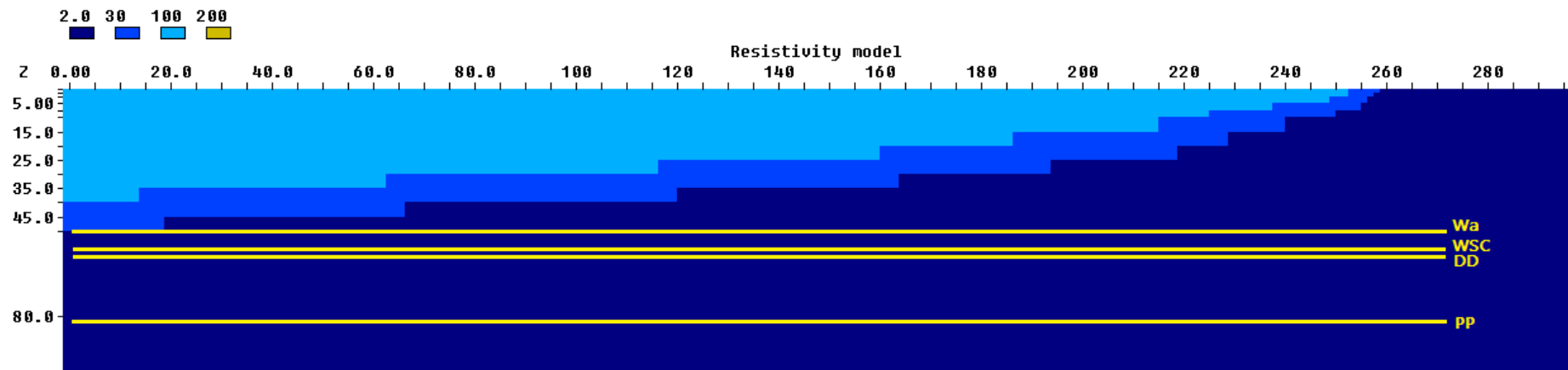


Figure 33 Model géo-synthétique d'intrusion marine dans le cas d'absence d'ouvrages de captage

2^{ème} cas : Présence d'un forage en activité

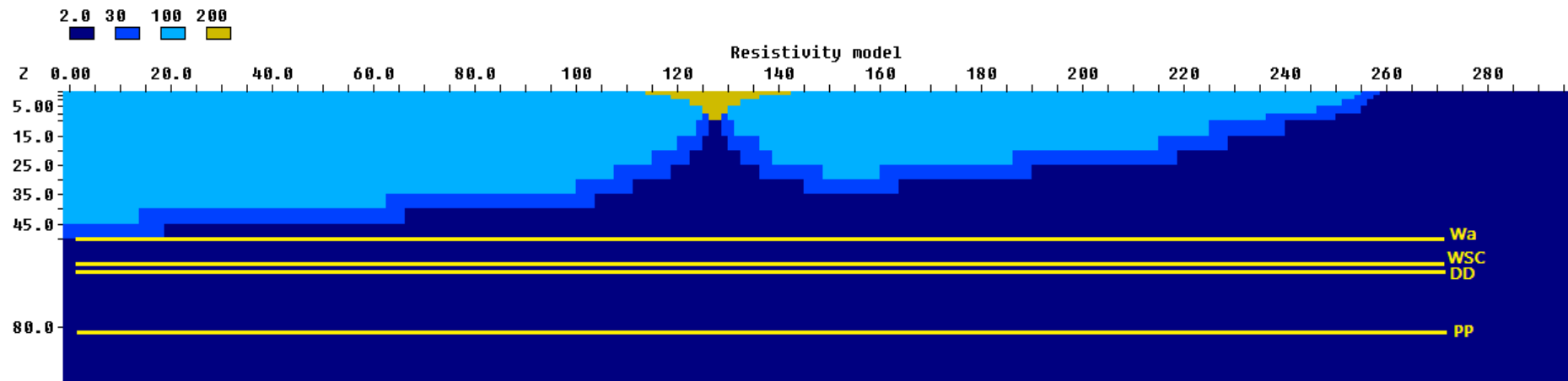


Figure 34 Model géo-synthétique d'intrusion marine avec la présence d'un forage en activité

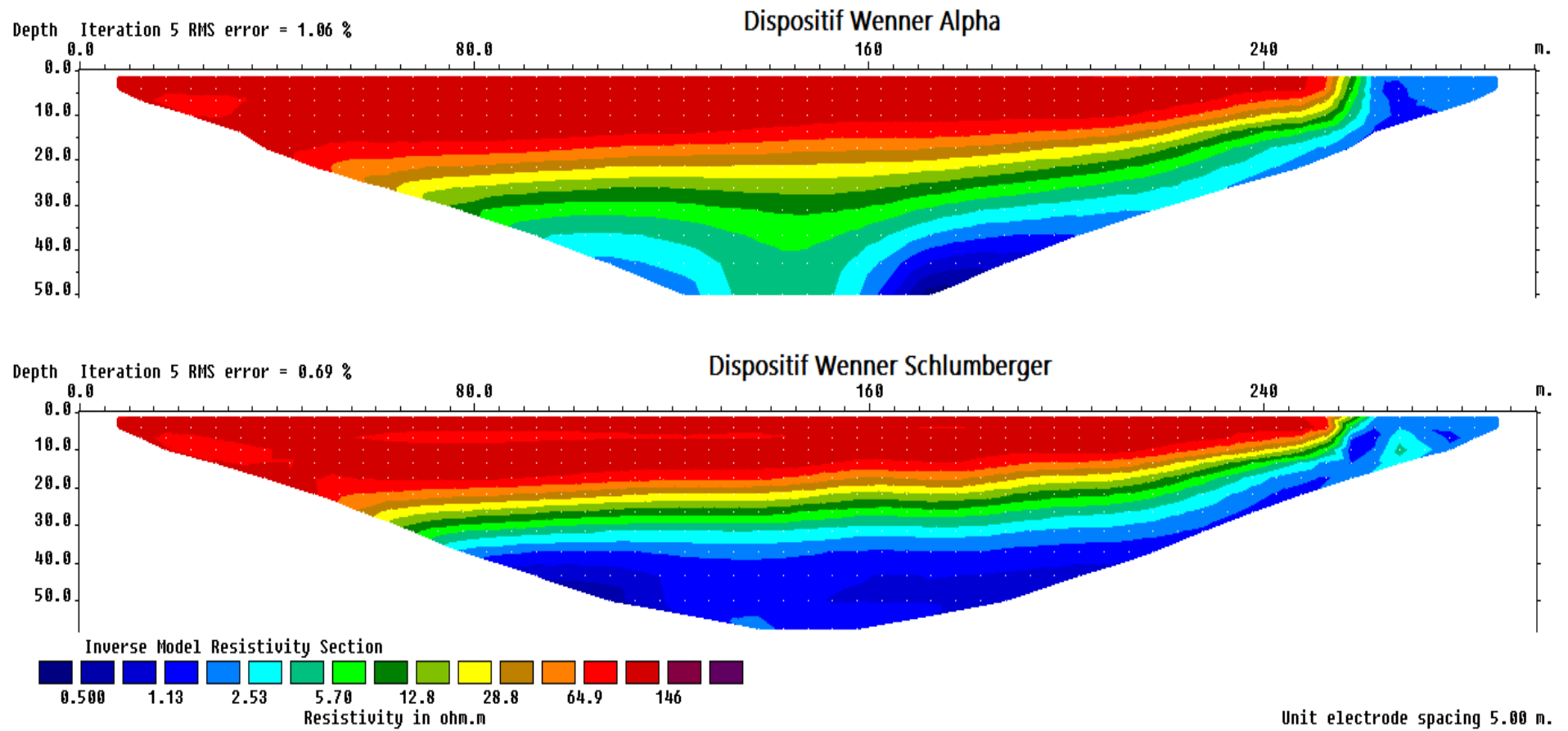


Figure 35 Résultats d'inversion du modèle sans forage avec les dispositifs Wenner α et Wenner Schlumberger

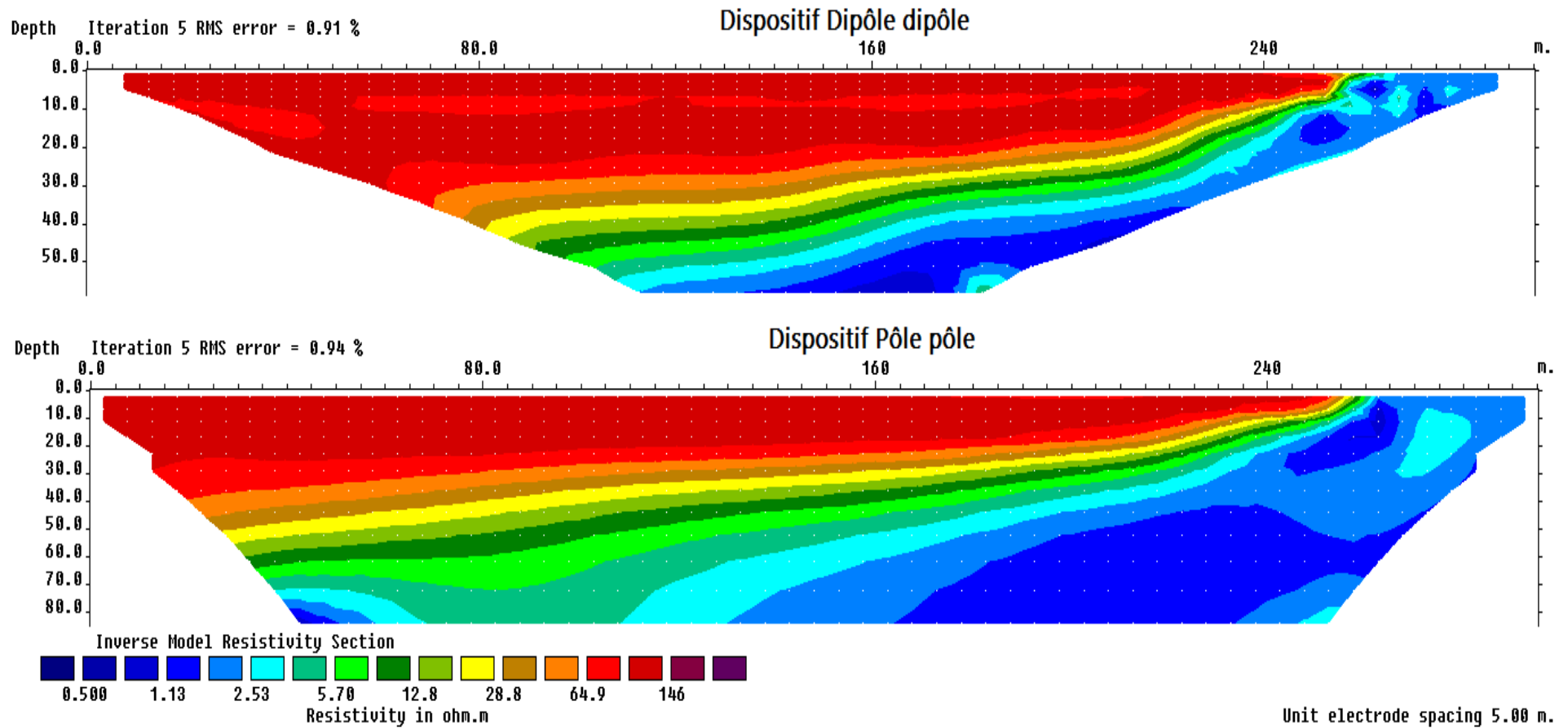


Figure 36 Résultats d'inversion du modèle sans forage avec les dispositifs Dipôle dipôle et Pôle Pôle

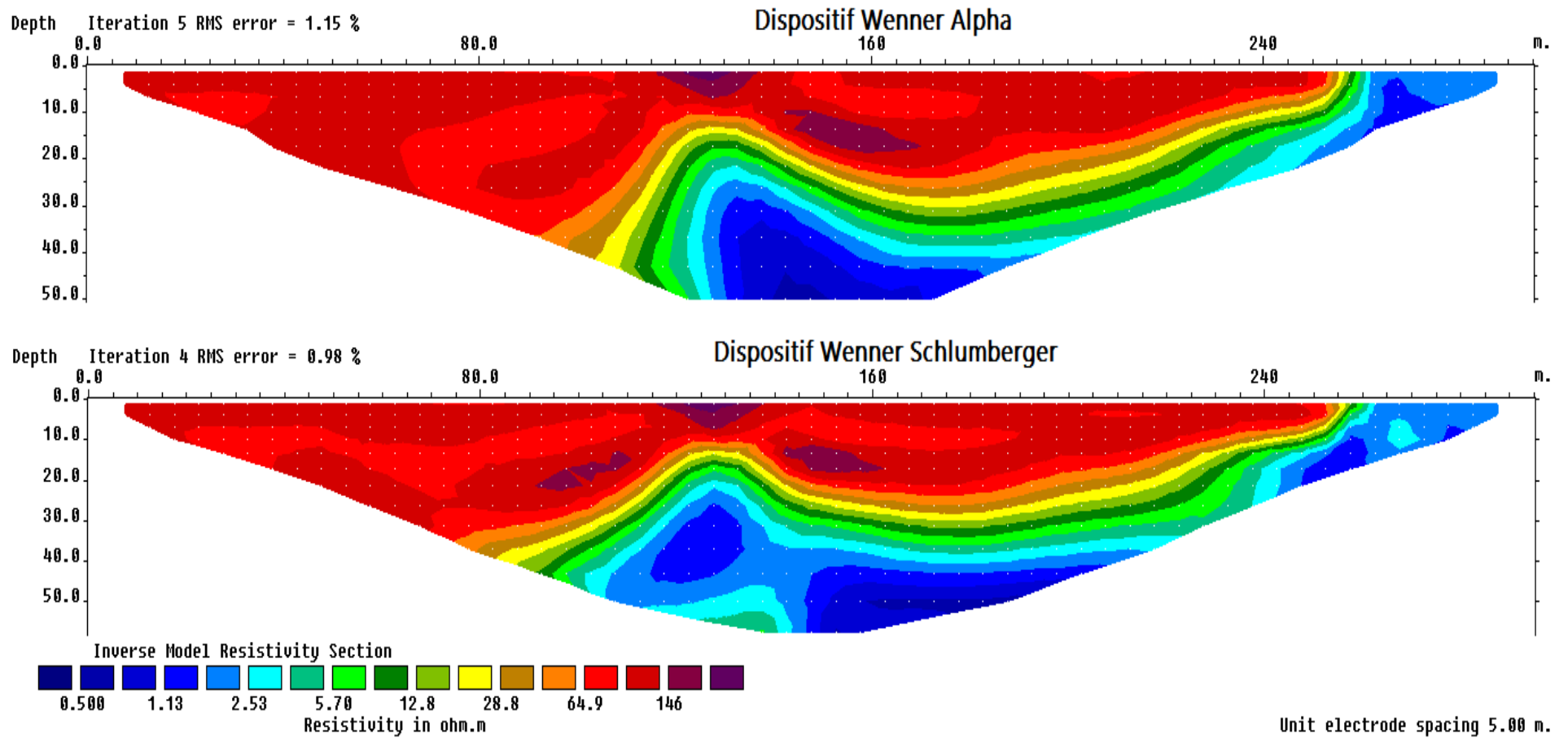


Figure 37 Résultats d'inversion du modèle avec un forage en activité avec les dispositifs Wenner α et Wenner Schlumberger

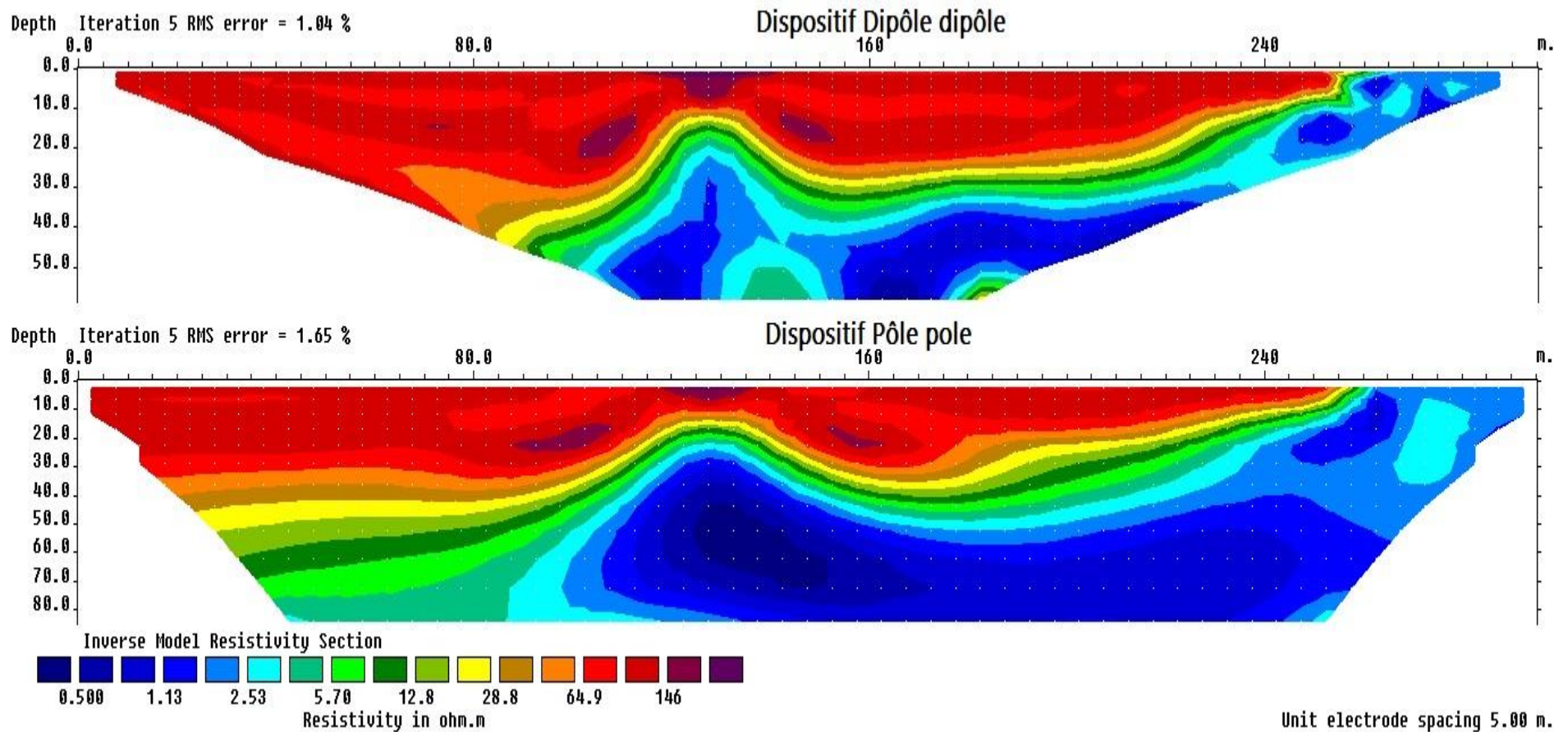


Figure 38 Résultats d'inversion du modèle avec un forage en activité avec les dispositifs Dipôle dipôle et Pôle pôle

On peut observer les différences des résultats entre les dispositifs dans les tomographies obtenues dans les deux cas. Les TRE qui illustrent l'interface eau douce – eau salée le mieux et qui sont proche de modèles géo-synthétiques réalisés avec ou sans forage sont celles où l'ont a utilisé le dispositif Wenner Schlumberger. Le dispositif Wenner Alpha a apporté une modification à la géométrie de l'interface ; le dispositif Dipôle dipôle présente certaines anomalies en profondeur ; et le dispositif Pôle pôle qui a une grande profondeur d'investigation nous a donné une zone de diffusion avec des dimensions exagérées.

D'après cette pratique, on juge que le dispositif Wenner Schlumberger est le mieux adapté pour l'investigation géo-électrique pour les contextes hydrogéologiques d'intrusion marine.

4.2 Acquisition des données sur le terrain

On a réalisé 4 profils de tomographies (Tableau 6), de manière à les croiser dans 2 points sur les deux rives de oued El Hamiz, 2 d'entre elles (TRE1 et TRE3) sont parallèles à la côte et les 2 autres (TRE2 et TRE4) sont perpendiculaires à cette dernière. La localisation de ces TRE a été choisie à une courte distance de la mer, dans une zone probablement affectée par l'intrusion marine de façon à observer l'état du biseau salé une fois les résultats obtenus (Figure 39).

Tomographies		Coordonnées		
		X	Y	Z (m)
TRE1	Premier point	521888	4067691	18
	Dernier point	521716	4067435	14
TRE2	Premier point	521929	4067481	23
	Dernier point	521683	4067672	19
TRE3	Premier point	520530	4066530	17
	Dernier point	520308	4066308	16.7
TRE4	Premier point	520479	4066273	17.1
	Dernier point	520359	4066565	16.5

Tableau 6 Coordonnées GPS des profils TRE réalisés

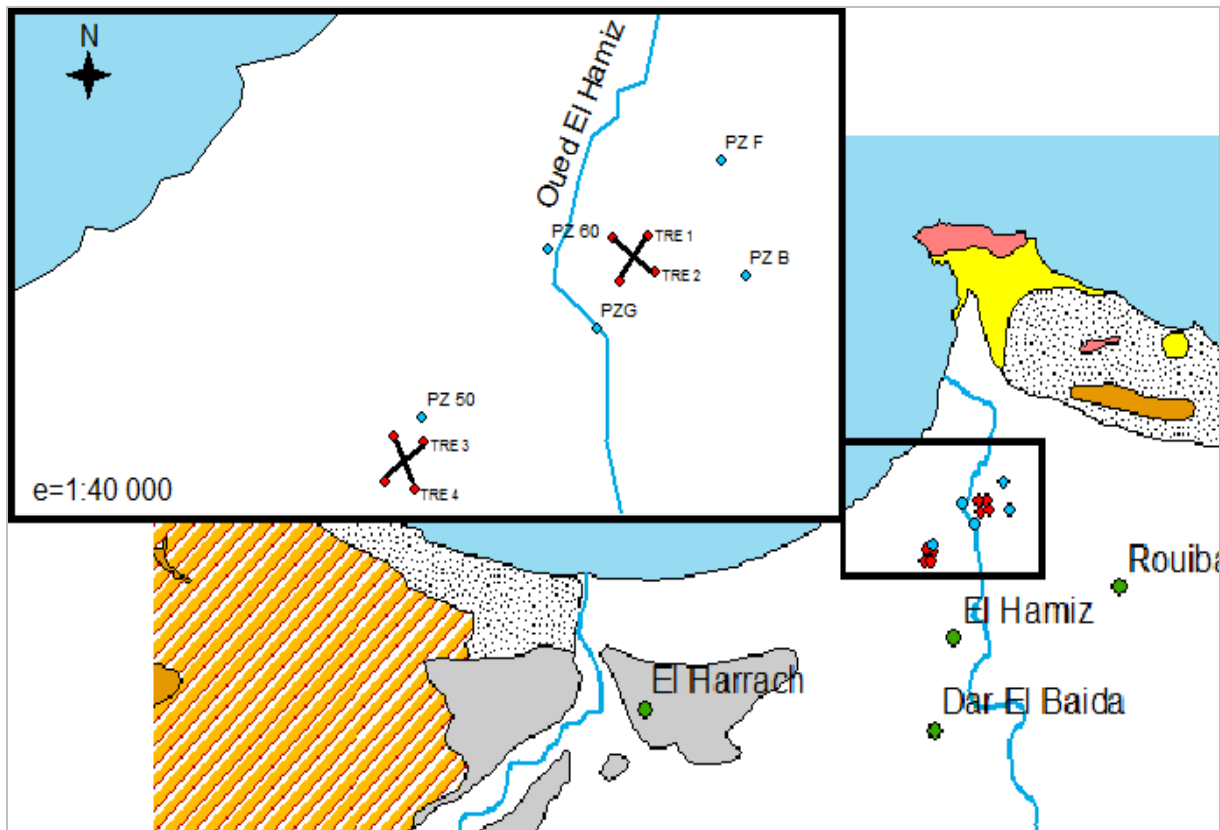


Figure 39 Localisation des profils TRE réalisés et de piézomètres à proximité

Le long de ces profils, 64 électrodes ont été plantées à des intervalles réguliers de 5m, donnant ainsi une longueur de 315m. Chaque TRE compte 24 niveaux (en profondeur) d'enregistrement correspondant à 978 mesures de résistivité apparente.

Le dispositif d'acquisition employé est le dispositif Wenner Schlumberger (le plus fréquemment sollicité en hydrogéologie). Le matériel utilisé s'agit d'un résistivimètre de marque ABEM, modèle Terrameter LS. C'est un instrument possédant un système de multiprocesseurs avec un accumulateur de 600V, il nous permet de générer un courant continu atteignant une valeur jusqu'à 2,5A.

4.3 Traitement des données électriques

Lors de l'acquisition, certaines valeurs de résistivité sont de temps en temps largement supérieures ou inférieures à la tendance moyenne des résistivités apparentes voisines. Ces fortes ou faibles valeurs sont généralement associées à un défaut de contact entre le quadripôle de mesure et le terrain, on les appelle données bruitées (ou bruits). L'élimination de ces données électriques bruitées est essentielle pour avoir des tomographies de qualité fiable.

Le logiciel RES2DINV permet d'illustrer la répartition des points de mesures et détecter les valeurs les plus éloignés de la moyenne des résistivités apparentes (Figure 40).

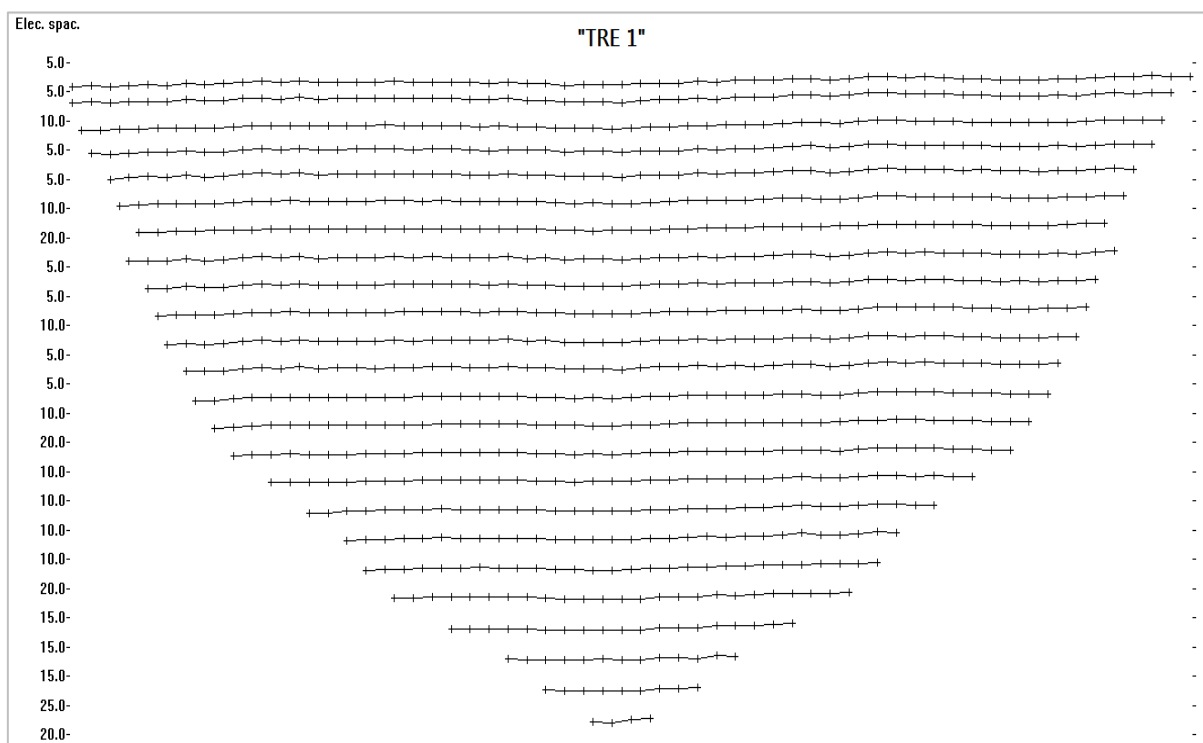


Figure 40 Répartition des points de mesures de la TRE 1

La répartition homogène et quasi-alignée des points de mesures sur le profil de la TRE1 ainsi que sur les autres profils reflète une bonne qualité des mesures.

4.4 Inversion 2D des données électriques

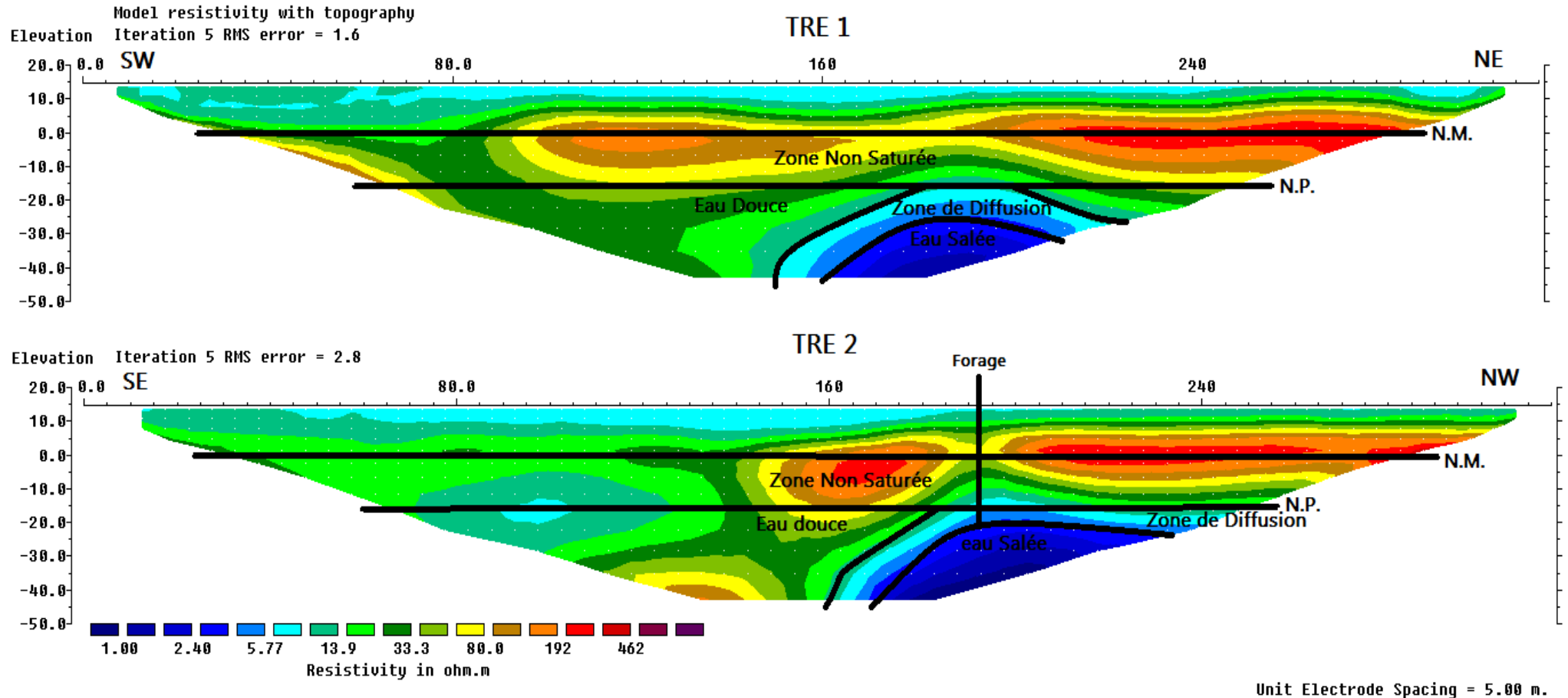


Figure 41 Tomographies de résistivités électriques obtenues après l'inversion des mesures des profils TRE 1 et TRE 2

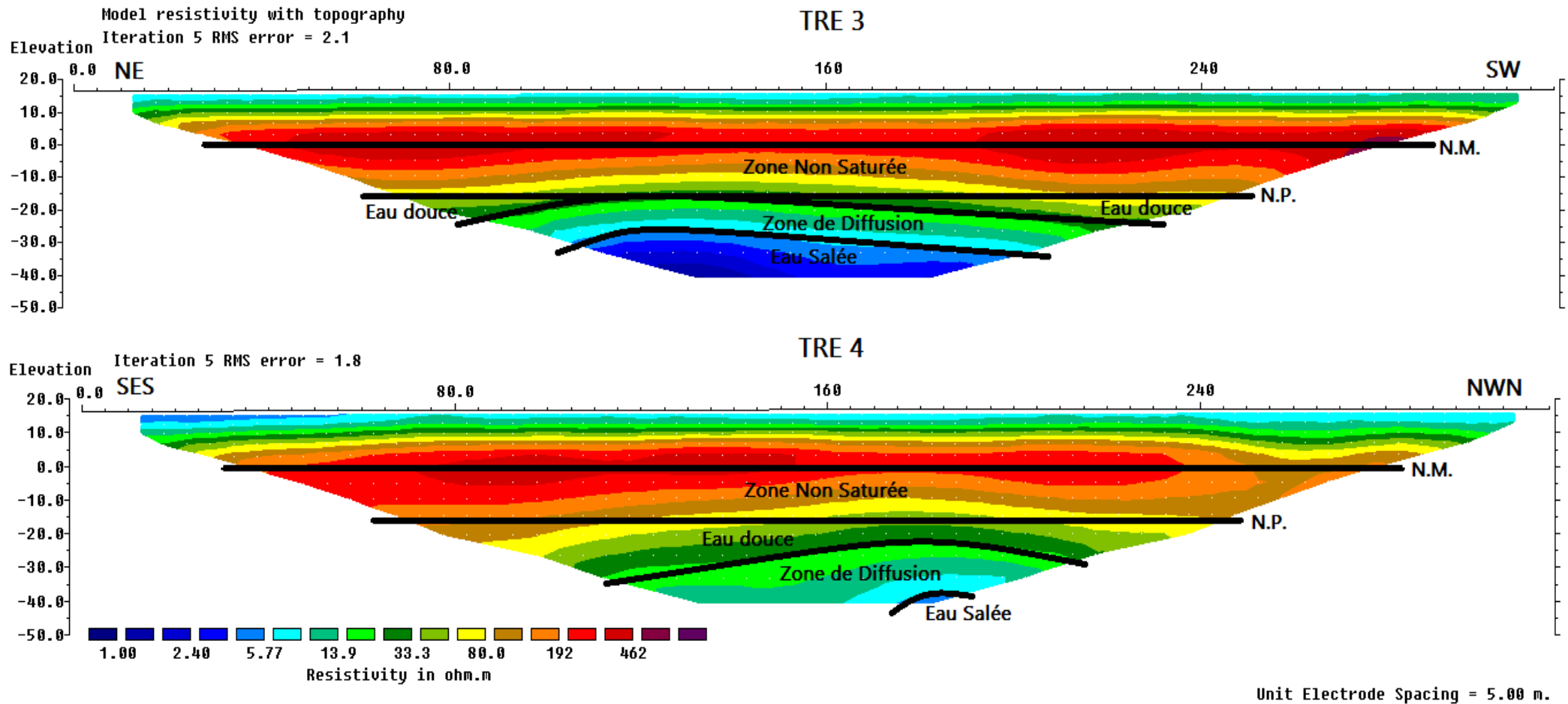


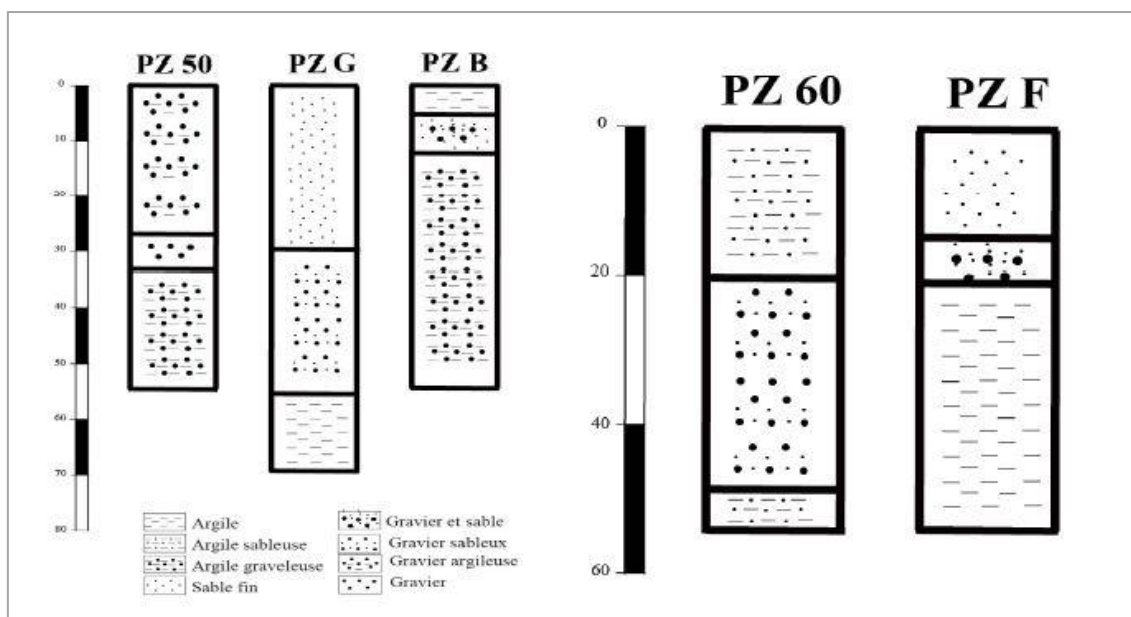
Figure 42 Tomographies de résistivités électriques obtenues après l'inversion des mesures des profils TRE 3 et TRE 4

Les résistivités réelles obtenues après l'inversion font apparaître sur les quatre profils, dans l'ensemble, trois zones de résistivités très contrastées ; une faible résistivité de 5 à 10 $\Omega.m$ de la surface jusqu'à une profondeur de 5 (sur les TRE 3 et 4) à 10 m (sur les TRE 1 et 2), suivie d'une zone à forte résistivité proche des 100 $\Omega.m$ jusqu'à peu près 25 m de profondeur pour l'ensemble des TRE. À la base, les modèles montrent de très faibles résistivités jusqu'à 1 $\Omega.m$ pour les TRE 1, 2 et 3, excepté pour la TRE 4.

On constate au croisement des profils TRE 1 et 2 ainsi que TRE 3 et 4 que les valeurs de résistivité ne sont pas les mêmes indiquant un milieu électriquement anisotrope, ceci est dû aux fortes hétérogénéités lithologiques de la région.

4.4.1 Comparaison des résultats

L'analyse des formations géologiques recoupées par les piézomètres PZ 50, PZ G, PZ B, PZ 60 et PZ F (Figure 43) montrent des hétérogénéités latérales et verticales des formations constituant la nappe alluvionnaire du Quaternaire. Ceci nous permet de calibrer l'information issue de l'investigation géophysique et de comprendre le rôle des hétérogénéités spatiales sur la mise en place des écoulements souterrains.



Une comparaison avec les coupes géologiques des piézomètres précédents permet d'identifier verticalement la nature lithologique de la couche à forte résistivité avec du gravier sableux, les faibles valeurs 10 à 21 $\Omega.m$ avec de l'argile. Les très faibles valeurs de résistivité de l'ordre de 1 $\Omega.m$ interprétées à partir de 15 à 25 m de profondeur dans les profils TRE 1, 2 et 3 sont trop basses pour une argile et mettent en évidence la présence de couches saturées en eau fortement salée.

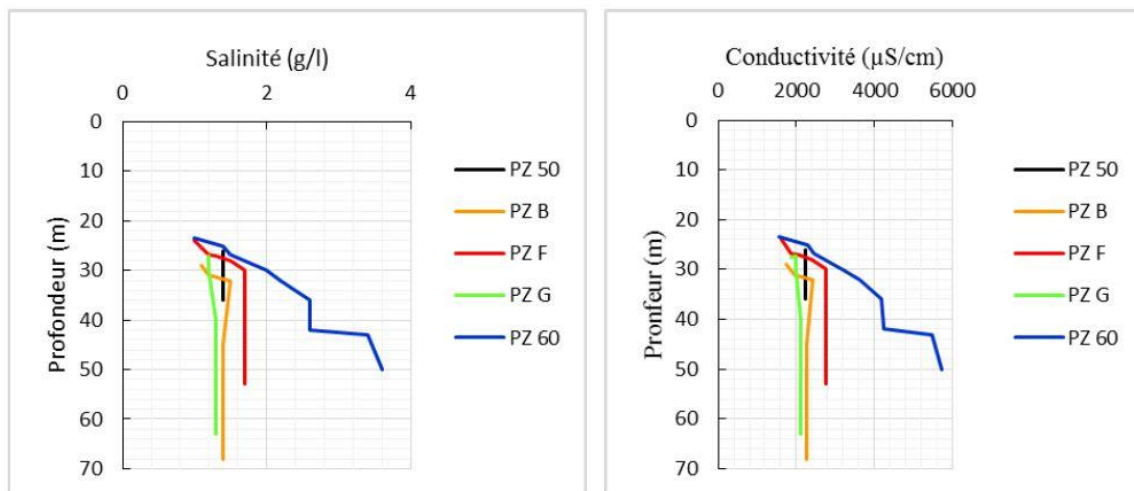


Figure 44 Variation de salinité et de conductivité en fonction de la profondeur dans les piézomètres

Les valeurs de salinité et de conductivité mesurées dans les différents piézomètres sont très fortes (Figure 44), ce que nous permet d'appuyer notre interprétation précédente, en d'autre terme ces fortes valeurs de salinité et de conductivité confirme que les très faibles valeurs de résistivité de l'ordre de 1 $\Omega.m$ sont des formations saturées en eau salée.

4.5 Qualité des modèles de résistivités obtenus

L'erreur RMS (Root Mean Square) ou l'erreur quadratique moyenne est une fonction qui calcule la différence mathématique entre les résistivités apparentes mesurées et calculées. C'est un indice de fiabilité des modèles obtenus par un processus d'inversion. Elle est exprimée en pourcentage et est défini par la formule :

$$RMS(\%) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(x_{data,i} - x_{model,i})^2}{x_{data,i}^2} \cdot \frac{1}{N}}$$

Le logiciel RES2DINV nous permet de suivre l'évolution de l'erreur RMS au fur et à mesure des itérations. On remarque que les valeurs d'erreurs sont élevées aux premières étapes, mais elles diminuent de manière exponentielle au cours du processus d'inversion. L'analyse de l'évolution de l'erreur RMS (Figure 45), montre que ses valeurs se stabilisent vers la 5^{ème} itération. Dans notre cas, l'erreur finale varie de 1,6% à 2,8% (inférieur à 5%) indiquant une bonne qualité des résultats.

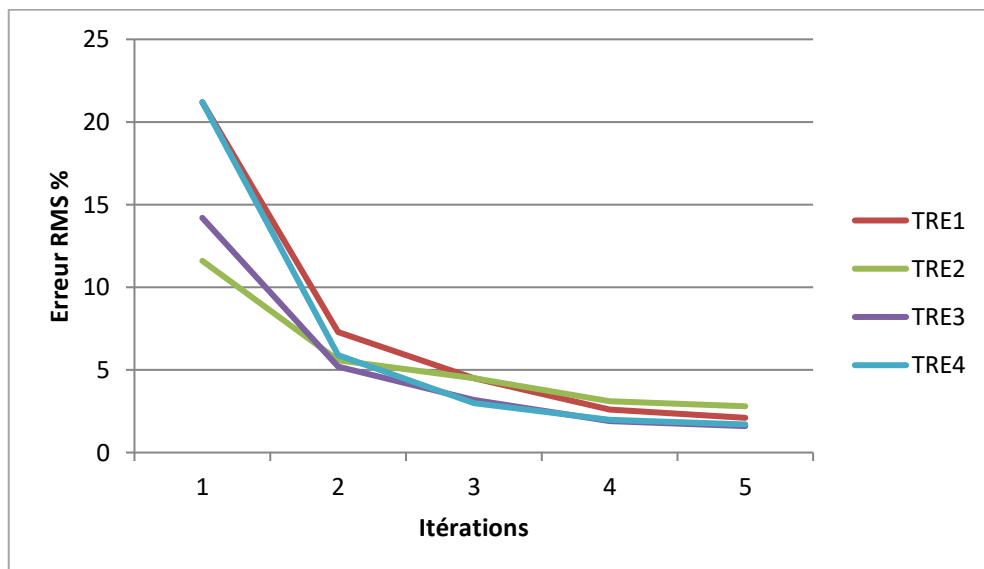


Figure 45 Décroissement de l'erreur RMS aux cours des inversions des tomographies

4.6 Conclusion

Les profils de la tomographie de résistivité électrique ont permis d'identifier la structure géologique de l'aquifère côtier alluvionnaire (limites imperméables) ainsi que les hétérogénéités latérales et verticales et enfin, la distribution des salinités au sein de l'aquifère (zone de transition eau douce - eau salée). La profondeur du Niveau piézométrique s'accorde avec la zone de diffusion eau douce-eau salée. L'interface est située à des profondeurs de 15, 20 et 25 m aux profils TRE 1, 2 et 3 respectivement.

On observe aussi que la forme de la zone d'eau salée tend vers la surface, ceci est dû à l'appel des forages en activité qui sont à proximité. L'eau douce, affectée par la salinité de l'eau de mer est désormais saumâtre avec des valeurs de résistivité comprises entre 35 et 75 $\Omega.m$ selon la quantité de sels dans le mélange.

Conclusion générale

L'intrusion marine est un phénomène hydrogéologique qui touche les aquifères côtiers. Il se produit lorsque l'on exploite des débits d'eau supérieurs au pouvoir de recharge des nappes. Dans le cas où ce phénomène est causé par l'appel des ouvrages de captages des eaux souterraines, la remontée de l'eau de mer modifie la géométrie de l'interface de diffusion entre l'eau douce et l'eau salée. Ainsi la salinité de l'eau extraite augmente peu à peu et peut atteindre des valeurs qui la rendent inconsommable.

La pénétration de l'eau de mer vers des aquifères côtiers est conditionnée par deux facteurs : le facteur climatique et le facteur socio-économique. La protection de cette ressource repose sur la bonne gestion du facteur socio-économique puisque le facteur climatique ne peut être contrôlé de manière directe.

Afin d'assurer la qualité des eaux souterraines, de nombreuses méthodes de surveillance ont été employées : les essais de pompages, les campagnes piézométriques, hydrochimiques, et les essais de traçages qui sont des approches hydrogéologiques classiques. Cependant, l'avancée technologique a permis le développement de nouvelles techniques qui sont plus simples à réaliser et apportent de meilleurs résultats, il s'agit des méthodes géophysiques. Celles-ci sont les diagraphies, qui nécessitent l'existence de forages dans lesquelles on introduit les sondes de mesures, et les méthodes de prospection de surface qui sont effectuées à l'aide de dispositifs reliés à des électrodes qui servent à injecter un courant électrique ou électromagnétique dans le sol et à capter les potentiels obtenus.

La région Est de la wilaya d'Alger qui se situe dans le littoral est une zone densément peuplée dans laquelle se développe l'agriculture et l'industrie, provoquant une importante demande en ressource en eau pour la consommation domestique, l'irrigation et l'utilisation dans les usines. Elle est alimentée par plusieurs retenues d'eau de surface et des stations de dessalement d'eau de mer ainsi que par des champs d'exploitation des eaux souterraines afin de satisfaire le besoin des habitants.

La Mitidja-Est est une plaine alluviale formée sur une subsidence du substratum marneux du Plaisancien sur lequel reposent des remplissages d'âges plio-quadernaires, formant deux systèmes aquifères majeurs : L'aquifère libre des alluvions quadernaires constitué généralement de graviers et sables avec des intercalations de niveaux argileux qui est le plus exploité, et l'aquifère semi-captif de l'Astien qui se trouve en profondeur constitué

principalement de sables et de grès plus ou moins calcaires ; séparés par la formation semi-perméable des marnes d'El Harrach sur la majorité de leur surface.

Cette région possède un climat tempéré, avec des hivers relativement froids et pluvieux (précipitation annuelle moyenne de l'ordre de 640 mm) et des étés chauds et secs. La présence de périodes de sécheresses à travers les années cause des déficits de quantités d'eaux dans les réservoirs de surface et souterrains, cela engendre la dégradation des ressources en eau par l'absence d'alimentation. L'exploitation intensive des nappes côtières a provoqué une baisse remarquable du niveau piézométrique de la nappe, accompagnée du phénomène de l'intrusion marine.

Dans notre travail qui a consisté à caractériser l'état de la nappe côtière de la Mitidja orientale, et afin de maintenir la qualité et la durabilité de cette ressource, on s'est appuyé sur la tomographie de résistivité électrique (TRE) qui est un outil d'imagerie souterraine efficace. Les modèles d'inversion dépendent des dispositifs d'acquisition géo-électrique utilisés sur le terrain. Une modélisation géo-synthétique à l'aide de logiciel RES2DMOD a été nécessaire afin de déterminer le dispositif le plus adapté à détecter l'interface eau douce / eau salée.

Le traitement et l'inversion des données mesurées sur le terrain ont été réalisés à l'aide de logiciel RES2DINV. La qualité de ces modèles a été évaluée grâce à l'analyse de l'erreur quadratique moyenne (RMS), leurs valeurs sont inférieures à 5% indiquant une bonne qualité des résultats.

Les 4 profils de TRE obtenus témoignent de l'état de la nappe fortement dégradée. La profondeur piézométrique dans l'ensemble est de 15 m, tandis que la profondeur du biseau salé est de l'ordre de 15 à 25 m, cela est accentué par l'action des forages. L'eau douce se mélangeant progressivement avec l'eau de mer se charge en sels minéraux et risque de dépasser les normes de potabilité, ce qui va causer des problèmes considérables à l'approvisionnement en eau dans les réseaux domestiques. De fortes hétérogénéités latérales ainsi que les valeurs de salinités et de conductivités qui sont observées dans les coupes lithologiques confirment l'interprétation des profils TRE indiquant l'existence d'eau salée dans les profondeurs indiquées.

La région de la Mitidja-Est est donc fortement touchée par le phénomène d'intrusion marine, la situation risque d'empirer au cas où des actions de protection ne sont pas mises en place et le résultat sera la pollution quasi-complète de la ressource souterraine par l'eau de

mer. Certaines actions peuvent être proposées afin de mettre en place un dispositif de surveillance et de protection pour limiter l'invasion des eaux marines :

- Effectuer des bilans des points d'eau chaque année afin d'avoir une idée sur les quantités d'eau exploitées, et établir une politique de gestion pour l'irrigation.
- Arrêt imminent des implantations de nouveaux puits ou forages dans le secteur côtiers où l'intrusion marine est déjà signalé et réduire les débits d'exploitation dans les points d'eau déjà existants.
- Installation de nouveaux piézomètres dans des zones clés pour surveiller la remontée du biseau d'eau salée vers les terres.
- Bannir l'arrosage et compter sur des techniques d'irrigations plus économiques comme le goutte à goutte.
- Le traitement (épuration) et la réutilisation des eaux usées pour des fins moins importantes (lavages de véhicules, nettoyage des voiries) et essayer la possibilité de les orienter vers une recharge artificielle de la nappe.

Bibliographie

Agence Nationale des Ressources Hydrauliques. Carte géologique interprétative Alger, Feuille NJ-31-IV. 2008

AISSAOUI Roza. *Contribution de l'anisotropie électrique à l'étude des hétérogénéités dans la Mitidja Est*. 2020. Thèse de doctorat. USTHB.

BOURHANE, Anli. *Méthodes d'investigation de l'intrusion marine dans les aquifères volcaniques (La Réunion et La Grande Comore)*. 2014. Thèse de doctorat. Université de la Réunion.

BOUTIRAME, Ikram, BOUKDIR, Ahmed, ELISSAMI, A., *et al.* CONTRIBUTION DES OUTILS DE SIG ET GEOPHYSIQUE DANS L'IDENTIFICATION DE L'AQUIFERE LIASIQUE. CAS DE LA REGION DE MRIRT, CAUSSE DU MOYEN ATLAS (MAROC). *Journal of Water and Environmental Sciences*, 2017, vol. 1, no 2, p. 175-189.

CHAPELLIER, Dominique et MARI, Jean-Luc. Principes de base. *Cours [online] de géophysique, université de Lausanne & Institut français du pétrole*, 2000.

CHAPELLIER Dominique. Prospection électrique de surface. *Cours [online] de géophysique, université de Lausanne & Institut français du pétrole*, 2000.

COMTE, Jean-Christophe. *Apport de la tomographie électrique à la modélisation des écoulements densitaires dans les aquifères côtiers-Application à trois contextes climatiques contrastés (Canada, Nouvelle-Calédonie, Sénégal)*. 2008. Thèse de doctorat. Université d'Avignon.

COMTE, Jean-Christophe et BANTON, Olivier. Apport de la tomographie électrique à la modélisation des intrusions salines dans les aquifères côtiers, Exemple des aquifères gréseux des Îles-de-la-Madeleine (Québec, Canada). In : *Proc. 5e Colloque GEOFCAN, Orléans, France*. 2005. p. 20-21.

COMTE, J. C. et BANTON, O. Comparaison de dispositifs d'acquisition ERT pour l'imagerie géo-électrique des intrusions salines dans les aquifères côtiers, paper presented at 6th Coll. *GEOFCAN Géophysique des Sols et des Formations Superficielles, IRD, Bondy, France*, 2007, p. 25-26.

DJLOUDAR, Dahbia, TOUBAL, AhmedChérif, *et al.* ETAT ACTUEL DE L'INVASION MARINE DANS LA BAIE D'ALGER/A ETAT ACTUEL DE L'INVASION MARINE DANS LA BAIE D'ALGER. *Production scientifique-Communications*, 2014, vol. 1.

DROUCHE, Abdelmadjid. Contribution à l'étude de la vulnérabilité spécifique à la pollution par les éléments en traces métalliques et les hydrocarbures. Cas de la nappe d'eau souterraine de la Mitidja-Est. 2012.

Edmundo Placencia Gomez, M. Roger Guérin. Equivalence et profondeur d'investigation en panneau électrique 2D : Bibliographie et analyse des outils existants. Septembre 2004. Université Pierre & Marie Curie (Paris 6).

Farida. Berdja, Mouloud. Belaidi, D, Mekideche. Note sur la lutte contre l'intrusion marine dans la baie d'Alger. Rapport Ministère des ressources en eau. ANRH. 2010

FRISSANT, N., RENÉ-CORAIL, C., BONNIER, J., *et al.* *Le phénomène d'intrusion saline à la Réunion : état des connaissances et synthèse des données disponibles*. Rapport BRGM/RP-54330-FR, 2005.

GOMEZ, Edmundo PLACENCIA. DEA Hydrologie, Hydrogéologie, Géostatistique et Géochimie. 2004.

GUERIN, R. Profondeur d'investigation en imagerie de résistivité électrique.

Hallal, Dahbia & Mohamed El Amine, Khelfi & Zahouani, Sadek. (2020). Approche géostatistique de l'étude de la vulnérabilité des eaux souterraines de la Mitidja Orientale : Application de trois modèles DRASTIC, PRAST et GALDIT.

HAOUCHINE, A. al, HAOUCHINE, F. Z., et LABADI, A. Changements Climatiques Et Activités Anthropiques : impacts Sur Les Aquifères côtiers En Algérie. *LARHYSS Journal P-ISSN 1112-3680/E-ISSN 2521-9782*, 2015, no 24, p. 227-241.

HEBBACHE, Kamel. *Contribution à la reconnaissance du sol par tomographie électrique*. 2017. Thèse de doctorat. Université Mohamed Khider-Biskra.

IMACHE, A., LE GOULVEN, Patrick, BOUARFA, Sami, et al. Evolutions de la demande en eau agricole dans la plaine irriguée de la Mitidja, Algérie. In : *Troisième atelier régional du projet Sirma*. Cirad, 2007. p. 10 p.

Kaben Ourdia. Identification Hydrodynamique d'un système aquifère hétérogène : exemple de la Mitidja orientale. 2012. Mémoire de Magister. USTHB

KHEDIDJA Abdelhamid. *Cours de géophysique de Master 1 Hydrogéologie*. Université de Batna 2.

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

MAKHLOUF, Nouara. *Gestion et protection de la ressource en eau, application à la nappe alluviale de la Mitidja Est*. Thèse de doctorat. Université des Sciences et de la Technologie d'Alger, Houari Boumediène.

MORSLI, Boutkhil, HABI, Mohamed, et BOUCHEKARA, Badreddine. Intrusion Marine et mise en évidence du risque de la salinisation d'une nappe phréatique à Alger Est. *HOMMES, TERRE ET EAUX*, p. 50.

Mouloud, B. (2013). Note sur l'évolution de la piézométrie de la nappe de la Mitidja, ANRH.

PONTON, Julien. Caractérisation hydro-géophysique par tomographie électrique d'un glissement de terrain argileux de type " coulée " al'échelle de la parcelle et du versant. *Rapport de stage, Université de Louis Pasteur, Strasbourg*, 2008, vol. 1.

RABEHI, Walid, GUERFI, Mokhtar, et HABIB, M. A. H. I. La baie d'Alger, un espace côtier prisé, entre pressions d'urbanisation et gouvernance territoriale. *Geo-Eco-Marina*, 2020, vol. 25, p. 113-130.

Slimani Abdenour. Contribution à l'étude du phénomène de l'intrusion marine par différentes approches méthodologiques dans la plaine de la Mitidja-Est. 2015. Mémoire de Master. USTHB.

TOUBALA, C., et al. *Aquifère cotier en zone fortement urbanisée. Evolution du comportement hydrodynamique et hydrochimique*. 2011. Thèse de doctorat.

Webographie :

https://www.researchgate.net/figure/Intrusion-deau-de-mer-due-a-la-surexploitation-de-la-nappe-cotiere_fig22_350328013

<http://pentestunnels.eu/didact/didactu/tunnel/reconnaissances/essaisinsitu/MethGeophys/Electromagnetismedescription.php>

<https://fr.wikipedia.org/wiki/Alger>

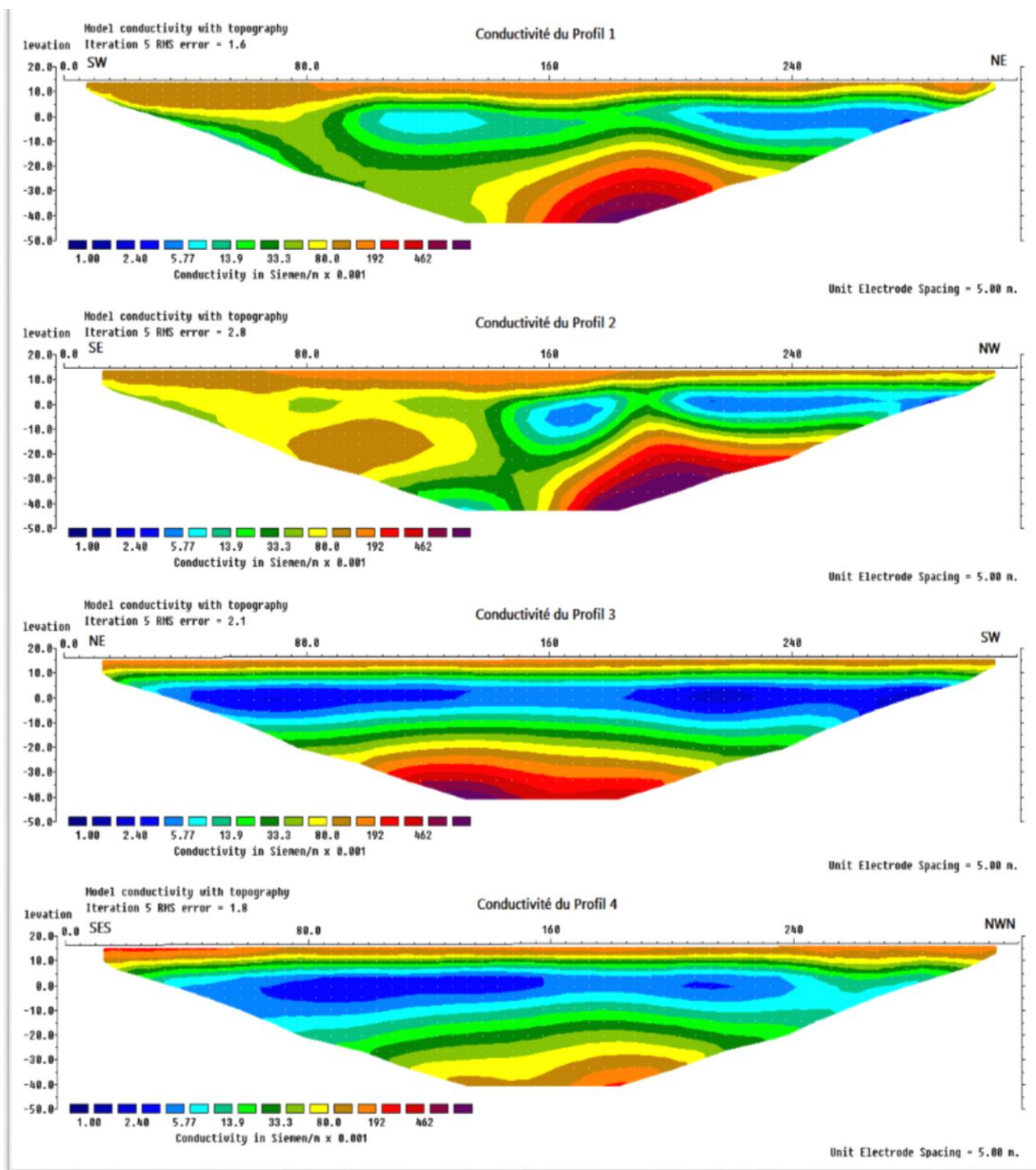
<https://fr.tutempo.net/climat/01-2020/ws-603900.html>

<https://slideplayer.fr/slide/1655061/>

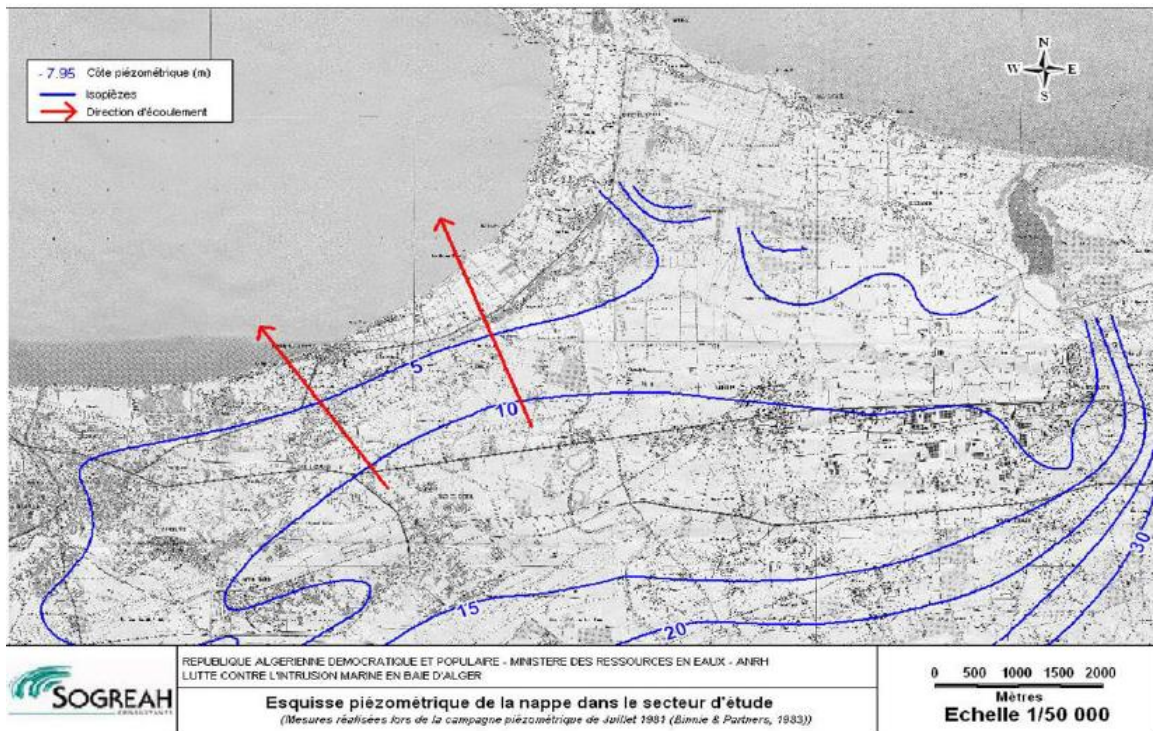
<https://www.gexplore.fr/fr/tomographie-electrique/>

https://www-ig.unil.ch/c_diaf.htm

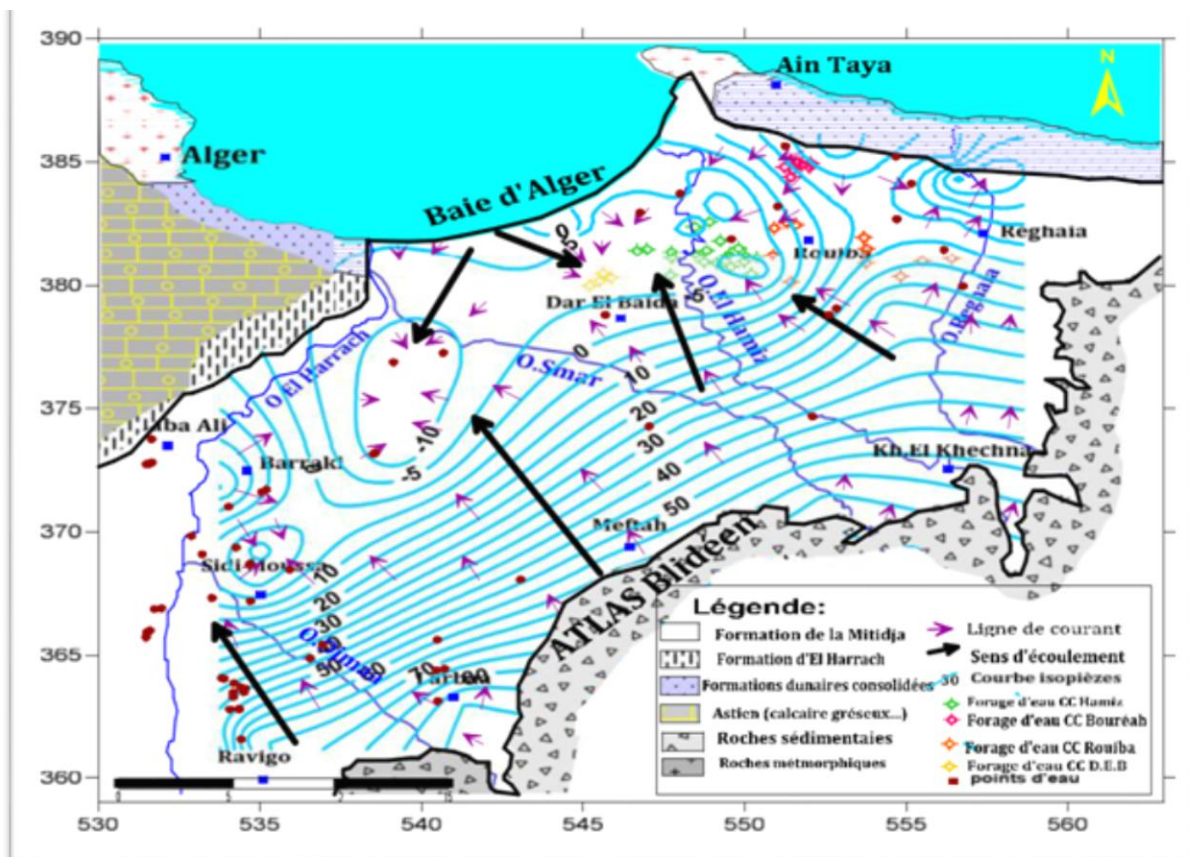
Annexes



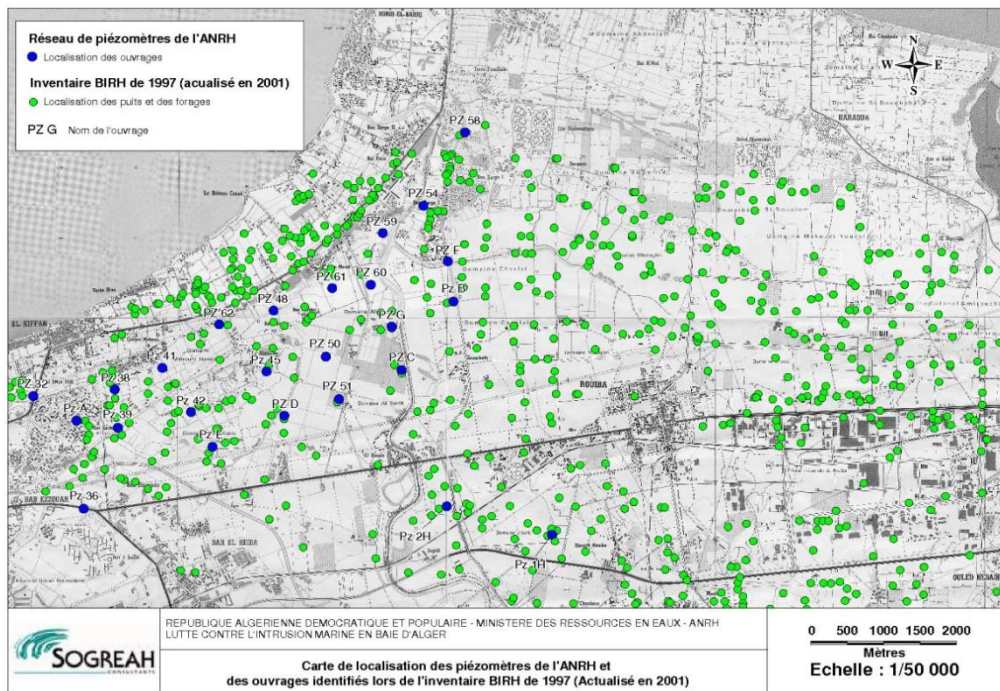
Annexe 1 : Modèles de conductivités obtenus



Annexe 2 : Carte piézométrique de la Mitidja-Est (année 1983)



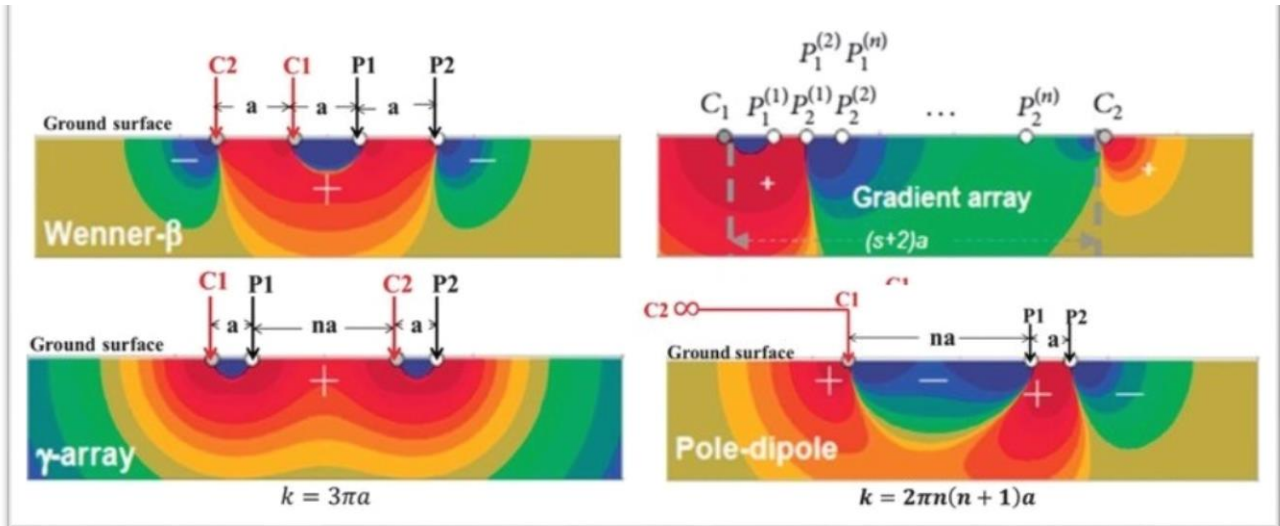
Annexe 3 : Carte piézométrique de la Mitidja-Est (année 2005)



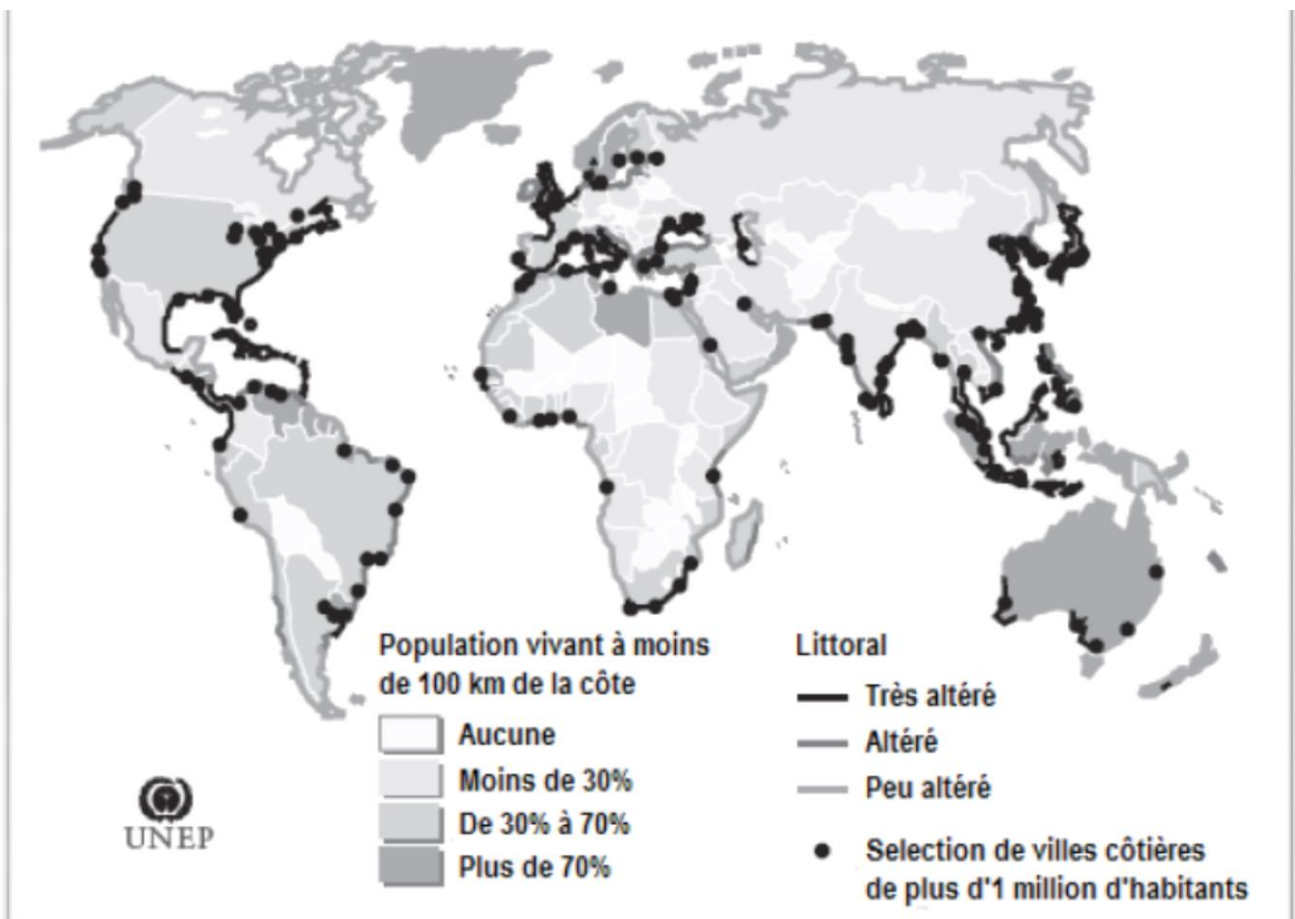
Annexe 4 : Carte de localisation des ouvrages de captages déclarés et des piézomètres de l'ANRH (année 2001)

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

Annexe 5 : Lithostratigraphie de la plaine de la Mitidja



Annexe 6 : Comparaison de la sensibilité d'autres dispositifs d'acquisition



Annexe 7 : Carte représentant l'état de dégradation des littoraux et de la population côtière mondiale (année 2001)