

UNIVERSITÉ KASDI MERBAH OUARGLA
FACULTÉ DES HYDROCARBURES, DES ÉNERGIES RENOUVELABLES,
DES SCIENCES DE LA TERRE ET DE L'UNIVERS
DÉPARTEMENT DES SCIENCES DE LA TERRE ET DE L'UNIVERS



Mémoire de master académique

Domaine : Sciences de la Terre et de l'Univers

Filière : Géologie

Spécialité : Hydrogéologie

Thème :

**Application des méthodes géophysiques pour la
caractérisation du sous-sol dans la région de N'goussa**

Présenté par :

Touati Houssam Eddine

Soutenu publiquement sur : 27/06/2021

Devant le jury :

President: Pr. Mohammed Saleh Belksier Univ. Ouargla

Superviseur : Pr. ZEDDOURI Aziez Univ. Ouargla

Examineur : Dr. Bilal Fenazi Univ. Ouargla

Année Universitaire : 2023/2024

ملخص:

تهدف هذه الدراسة لتحديد خواص مختلف الطبقات المكونة لسطح الأرض وفحصها عن طريق قياس مقاوميتها الكهربائية ودراسة تأثير الملوحة على المقاومة في منطقة نقوسه بولاية ورقلة. حيث اعتمدنا على تقنية التصوير المقطعي للمقاومة الكهربائية (Tomographie de résistivité électrique) في قياس مقاومة عدة أنواع من الصخور بطريقة تجريبية وتحليل نتائج القياسات وملاحظة تأثير الملوحة على نتائج القياس وتحديد مجال تغيراتها. كما قمنا بإجراء مقارنات بين مختلف الترتيبات المستخدمة في التنقيب الكهربائي (فتر ألفا ، ثنائي القطب-ثنائي القطب، فتر-شلمبرجير) باستخدام برنامج ZondRes2D لتحليل انعكاس البيانات ثنائية الأبعاد وتقييم سلوك هذه الترتيبات للكشف عن مختلف الطبقات المكونة لباطن الأرض، على أعماق مختلفة. أشارت نتائج دراسات المسح، أن التصوير الكهربائي المقطعي هي أداة جيوفيزيائية فعالة وأظهرت كفاءتها في الكشف عن طبقات الجبس، الطين، الحصى، الرمل و الرمل الغريني. حيث أعطت القياسات قيم متفاوتة للمقاومة الكهربائية تتراوح بين 3 و 1100 (أوم.م) حسب درجة الملوحة ومحتوى الطبقات من الماء. وتسمح هاته النتائج بدراسة غير مباشرة لطبقات الأرض والمياه الجوفية وتحديد نوعية التربة عند القياس في ارض الواقع.

كلمات مفتاحية: التصوير الكهربائي المقطعي، المقاومة الكهربائية، الملوحة، انقوسة.

Résumé :

Cette étude vise à identifier les propriétés des différentes couches qui composent la surface de la terre et examiner par le biais des mesures de la résistivité électrique et d'étudier l'effet de la salinité sur les résistivités dans la région de N'goussa dans la wilaya de Ouargla. Nous avons adopté la technique de la tomographie de résistivité électrique pour mesurer la résistance de plusieurs types de roches de manière expérimentale, analyser les résultats des mesures, observer l'impact de la salinité sur les résultats de la mesure et leurs variations. Nous avons également réalisé des comparaisons entre les différents dispositifs utilisés (Wenner alpha, dipole-dipole, Wenner-Schlumberger) en utilisant le logiciel ZondRes2D pour l'inversion des données 2D et analyser le comportement de ces dispositifs pour détecter les différentes couches du sous-sol à différentes profondeurs. Les résultats des mesures ont montré que la tomographie électrique était un outil géophysique efficace compétent pour détecter les couches de gypse, d'argile, de graviers, de sable et des alluvions. Les mesures ont donné des valeurs différentes de la résistivité électrique allant de 3 à 1100 (Ohm.m) en fonction de la salinité et de la teneur en eau. Ces résultats permettent d'étudier indirectement les couches et les eaux souterraines et de déterminer la qualité du sous-sol lors des mesures de terrain.

Mots clés : Tomographie de Résistivité électrique, Résistivité à l'électricité, Salinité, N'goussa.

Summary:

This study aims to identify the properties of the different layers of the sub-surface and to examine through measurements of electrical resistivity and to study the effect of salinity on the resistivities in the N'goussa region in the wilaya of Ouargla. We have adopted the technique of electrical resistivity tomography to measure the resistivity of several types of rocks in an experimental manner, analyze the results of measurements, observe the impact of salinity on the measurement results and their variations. We also made comparisons between the different arrays used (Wenner alpha, dipole-dipole, Wenner-Schlumberger) using the ZondRes2D software for the inversion of 2D data and analyzed the behavior of these devices to detect the different layers of the basement at different depths. The results of the measurements showed that electrical tomography was an effective geophysical tool competent to detect layers of gypsum, clay, gravel, sand and alluvium. The measurements gave different values of electrical resistivity ranging from 3 to 1100 (Ohm.m) depending on salinity and water content. These results allow the indirect study of layers and groundwater and the determination of the quality of the subsoil in field measurements.

Key-words : Electrical Resistivity Tomography, Electrical Resistivity, Salinity, N'goussa

Remerciements

Au nom de Dieu, le Très Miséricordieux, le Très Miséricordieux.
Quant à ce qui suit : Ce rêve n'aurait pas pu se réaliser grâce au succès, à la satisfaction, aux prières, au soutien de Dieu de ma mère et de mon père, ainsi qu'aux prières et au soutien de mes frères et au soutien de mes bons amis.

Contents

Résumé

Dévouement

Contenu

Liste des figures

INTRODUCTION GENERALE 2

CHAPITRE I : PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

<i>I. Introduction</i>	<i>5</i>
<i>II. Situation Géographique</i>	<i>6</i>
<i>III. Géomorphologie</i>	<i>7</i>
<i>IV. Géologie</i>	<i>11</i>
<i>V. Géologie Locale</i>	<i>14</i>
<i>V.1. Introduction</i>	<i>14</i>
<i>V.2. Litho-stratigraphie</i>	<i>14</i>

CHAPITRE II : Matériel et Méthodes

<i>I. Tomographie de la résistivité électrique</i>	<i>17</i>
<i>1. Le principe de la mesure</i>	<i>17</i>
<i>2. Procédure</i>	<i>17</i>
<i>2.1. Instruments de mesures</i>	<i>17</i>
<i>2.2. Protocole de mesure</i>	<i>19</i>
<i>3. Les différentes configurations</i>	<i>19</i>
<i>3.1. La configuration Schlumberger</i>	<i>20</i>
<i>3.2. La configuration Wenner</i>	<i>20</i>
<i>3.3. La méthode Wenner-α</i>	<i>21</i>
<i>3.4. La configuration Dipôle - dipôle</i>	<i>21</i>
<i>4. Interprétation des pseudo-sections et modèles de résistivité</i>	<i>22</i>
<i>4.1. Définition d'une pseudo-section</i>	<i>22</i>

4.2. Modélisation par inversion	23
4.3. La pseudo-section calculée	24
5. Software ZondRes2D	25
5.1. Caractéristiques de ZondRes2D	26
5.2. Applications dans différents domaines	29
5.3. Organigramme détaillé du travail experimental	30
5.4. Conclusion	32
6. Étapes d'action et mesure	33
6.1. Planification et conception	33
6.2. Résultats	37

CHAPITRE III : Analyser les résultats de mesure et conclure les résultats

I. Analyser les résultats des mesures de gypse	38
II. Analyser les résultats des mesures de argiles	43
III. Analyser les résultats des mesures de graviers	49
IV. Analyser les résultats des mesures de sables	54
V. Analyser les résultats des mesures d'alluvions	60
VI. Résultats	63
VII. Conclusion Générale	65
 Bibliographie	 66

List des figures

<i>Figures.I.1. La carte de situation géographique de la région de N'GOUSSA</i>	5
<i>Figures.I.2. Situation géographique de la commune de N'GOUSSA</i>	7
<i>Figures.I.3. Coupe géomorphologique schématique de la vallée d'Ouargla (d'après Lelièvre, 1969 in ANRH, 2011).</i>	9
<i>Figures.I.4. Relief de la région d'Ouargla</i>	11
<i>Figures.I.5. Carte géologique du Ouargla</i>	13
<i>Figures.I.6. Colonne stratigraphique synthétique de la région d'Ouargla</i>	16
<i>Figures.II.1. Un câble noir qui relie une électrode a une prise</i>	18
<i>Figures.II.2. La centrale d'acquisiton et la batterie.</i>	18
<i>Figures.II.3. Schéma de la profondeur d'investigation par sondage électrique en fonction de La géométrie du dispositif.</i>	19
<i>Figures.II.4. Configuration Schlumberger.</i>	20
<i>Figures.II.5. Configuration Wenner.</i>	20
<i>Figures.II.6. Configuration Dipôle-dipôle.</i>	22
<i>Figures.II.7. Carte de pseudo-section.</i>	22
<i>Figures.II.8. Principe de construction d'une pseudo-section pour la configuration Wenner.</i>	23
<i>Figures.II.9. Modelé d'inversion.</i>	24
<i>Figures.II.10. Carte de pseudo-section calculée.</i>	25
<i>Figures.II.11. Zond res2d interface.</i>	26
<i>Figures.II.12. Un exemple du fonctionnement du programme.</i>	28
<i>Figures.II.13. Une photo montrant la tranchée réalisée par l'étudiant.</i>	34

<i>Figures.II.14. Une image montrant comment placer les électrodes pour la mesure (gypse).</i>	35
<i>Figures.II.15. Une image montrant comment placer les électrodes pour la mesure (argile).</i>	36
<i>Figures.III.1. Une coupe tomographique d'une couche de gypse utilisant la configuration dipôle-dipôle.</i>	38
<i>Figures.III.2. Une coupe tomographique d'une couche de gypse utilisant la configuration Wenner Alpha1.</i>	40
<i>Figures.III.3. Une coupe tomographique d'une couche de gypse utilisant la configuration Wenner-Schlumberger1.</i>	41
<i>Figures.III.4. Une coupe tomographique d'une couche de argiles utilisant la configuration dipôle-dipôle.</i>	43
<i>Figures.III.5. Une coupe tomographique d'une couche de argiles utilisant la configuration Wenner Alpha.</i>	45
<i>Figures.III.6. Une coupe tomographique d'une couche de argiles utilisant la configuration Wenner-Schlumberger.</i>	47
<i>Figures.III.7. Une coupe tomographique d'une couche de graviers utilisant la configuration dipôle-dipôle.</i>	49
<i>Figures.III.8. Une coupe tomographique d'une couche de graviers utilisant la configuration Wenner Alpha.</i>	51
<i>Figures.III.9. Une coupe tomographique d'une couche de graviers utilisant la configuration Wenner-Schlumberger.</i>	52
<i>Figures.III.10. Une coupe tomographique d'une couche de sables utilisant la configuration dipôle-dipôle.</i>	54
<i>Figures.III.11. Une coupe tomographique d'une couche de sables utilisant la configuration Wenner Alpha.</i>	56
<i>Figures.III.12. Une coupe tomographique d'une couche de sables utilisant la configuration Wenner Schlumberger.</i>	58

Figures.III.13. Une coupe tomographique d'une couche d'alluvions utilisant la configuration dipôle-dipôle. 60

Figures.III.14. Une coupe tomographique d'une couche d'alluvions utilisant la configuration Wenner Alpha. 62

Figures.III.15. Une coupe tomographique d'une couche d'alluvions utilisant la configuration Wenner-Schlumberger. 63

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

La caractérisation du sous-sol est une étape essentielle dans divers domaines tels que la géologie, la géotechnique, l'exploration minière, la construction et même dans la recherche de ressources naturelles. Il s'agit d'étudier et de comprendre les propriétés et la composition des différentes couches de sol et de roches présentes sous la surface de la Terre. Pour y parvenir, il existe plusieurs méthodes qui nous permettent de le faire, et l'une de ces méthodes est : méthodes géophysiques.

Les méthodes géophysiques : sont des techniques utilisées pour étudier la structure, la composition et les processus géologiques de la Terre à l'aide de mesures physiques. Voici quelques-unes des principales méthodes géophysiques :

1. **Sismique** : Cette méthode consiste à envoyer des ondes sismiques à travers le sol ou les couches rocheuses et à analyser les ondes réfléchies pour déterminer la structure géologique, y compris les couches rocheuses et la présence de réservoirs de pétrole ou de gaz.
2. **Gravimétrie** : La gravimétrie mesure les différences de gravité terrestre pour cartographier les changements de densité dans les couches géologiques. Cela peut aider à localiser des structures géologiques telles que des failles, des montagnes ou des bassins sédimentaires.
3. **Magnétométrie** : Cette méthode mesure les changements dans le champ magnétique terrestre pour détecter les différences dans la composition et la structure des roches. Il est souvent utilisé en prospection minière pour identifier des gisements de minéraux magnétiques tels que le fer.
4. **Électromagnétique** : les méthodes électromagnétiques utilisent des mesures de champs électriques et magnétiques pour étudier la conductivité électrique des roches et des fluides souterrains. Cette méthode est souvent utilisée dans la recherche de ressources en eau et en minéraux.
5. **Radar pénétrant dans le sol** : le radar pénétrant dans le sol envoie des ondes électromagnétiques au sol et mesure les signaux réfléchis pour détecter les objets enfouis ou les couches géologiques. Il est largement utilisé dans le génie civil, l'archéologie et l'exploration des ressources.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

6. **Tomographie électrique** : Cette méthode mesure la résistivité électrique des roches pour cartographier les structures géologiques souterraines. Il est souvent utilisé pour rechercher des ressources en eau et pour étudier les mouvements des fluides dans le sol.

Ces méthodes géophysiques peuvent être utilisées individuellement ou en combinaison pour obtenir une image plus complète et détaillée du sous-sol dans une zone donnée. Ils sont souvent utilisés dans les études géologiques, l'exploration de ressources naturelles telles que les eaux souterraines, le pétrole et le gaz, la planification des infrastructures et d'autres applications liées à la caractérisation du sous-sol.

Dans ce contexte, l'ensemble de cette étude consiste à appliquer des méthodes géophysiques pour caractériser le sous-sol de la région de N'goussa, en utilisant : la tomographie électrique.

CHAPITRE I :
PRÉSENTATION DE LA ZONE
D'ÉTUDE

I. Introduction :

L'Algérie est l'un des plus grands pays du monde et le premier du continent africain en termes de superficie, car il contient une grande diversité de réservoirs souterrains de ressources diverses. C'est pourquoi les chercheurs dans ce domaine se concentrent sur la reconnaissance géologique, et Ouargla fait partie des Etats présentant une grande diversité souterraine. Dans ce chapitre, nous nous concentrerons sur la définition de la région et de la situation géographique de la région de N`goussa dans l'État de Ouargla, au sud-est de l'Algérie.



Fig.I.1. La carte de situation géographique de la région de N'goussa

II. Situation Géographique :

La région d'Ouargla de par sa position géographique centrale et de sa proximité avec les bassins pétroliers et gaziers s'installe progressivement comme le centre administratif, technique et industriel du territoire saharien (fig1) ; elle est distante de 850 km de la capitale Alger.

La ville d'Ouargla est située dans une dépression (cuvette) qui inclut les agglomérations : d'Ouargla, N'GOUSSA, Rouissat, Ain El Beida et Sidi Khouiled.

La région de N'GOUSSA est l'une des dix daïras de la wilaya de Ouargla se trouve au Nord de wilaya sur une distance à 22 km. Elle est traversée par la route communale d'Ouargla - El Bour. Elle est peuplée par 22460 habitants, avec une densité de 5,7 hab./km² pour une surface de 2 907 km². [1]

Cette dépression ou cuvette s'étend entre les coordonnées :

X : 32° 08' 27" Nord

Y : 5° 18' 30" Est.

N'GOUSSA est délimitée par les dunes de sable à l'Est et par les palmeraies à l'Ouest. L'extension de N'GOUSSA se fait actuellement vers le Nord par des maisons traditionnelles et vers l'Est par un groupement d'habitations individuelles. À l'Ouest se situe la Casbah constituée de maisons anciennes dont la majorité est ruinées. Le terrain est relativement plat, avec une côte moyenne de l'ordre de 130 m au-dessus de la mer. Elle se limite :

- Au Nord par El Hedjira.
- Au Sud par la wilaya d'Ouargla.
- Au l'Est par Hassi Ben ABDELLAH.
- Au l'Ouest par Zelfana.

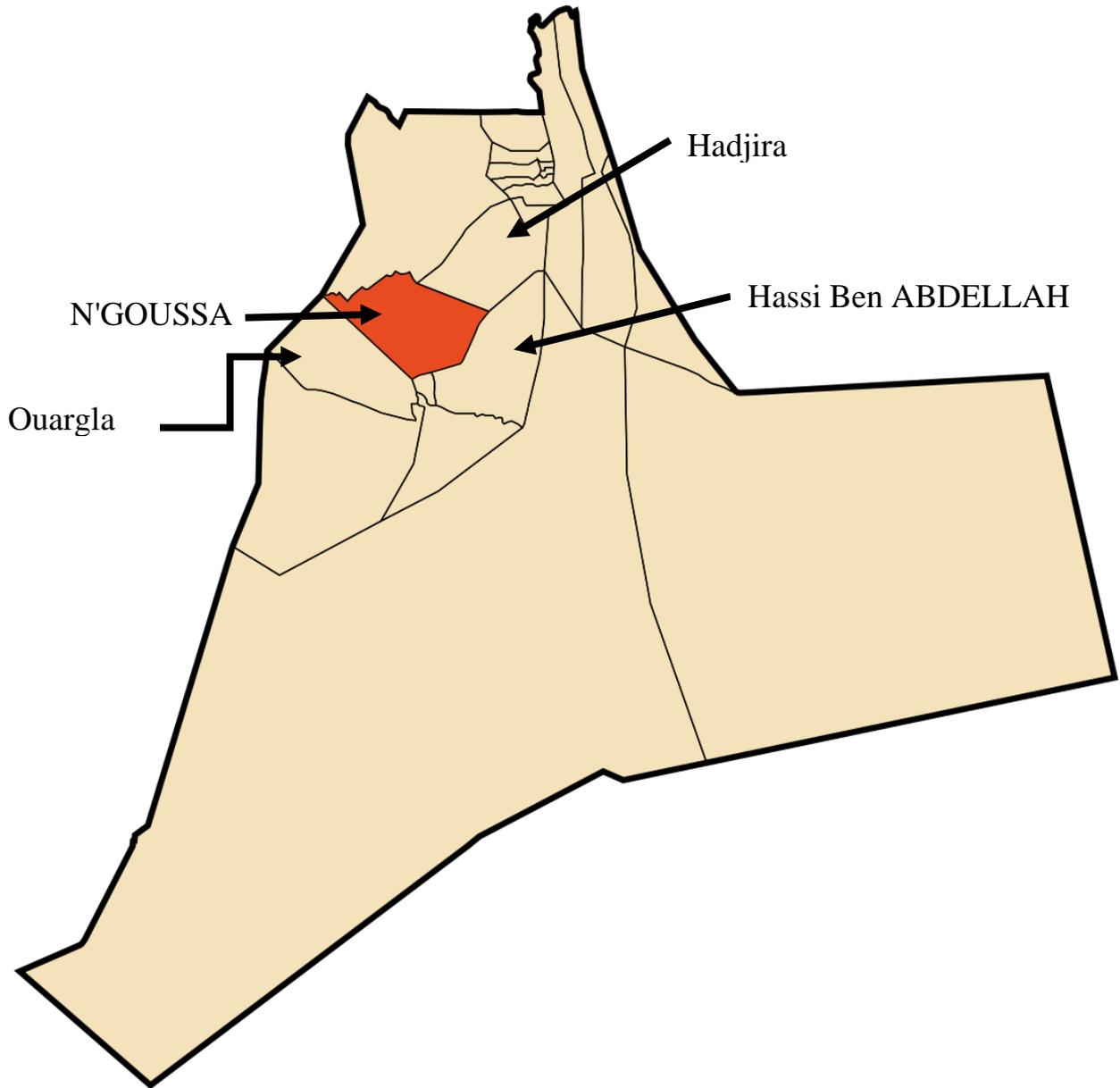


Fig.I.2. Situation géographique de la commune de N'goussa

III. Géomorphologie :

La Mio-plio-quaternaire : (plateau où affleurent de grandes dalles rocheuses) c'est une formation continentale détritique qui forme un plateau dont l'altitude moyenne est de 200

m. Ce plateau s'abaisse légèrement d'Ouest en Est où il est très fortement érodé et ne laisse que quelques buttes témoins appelées "goures".

1. **Les glacis :** Sur les versants ouest de la cuvette s'étend du plus ancien au plus récent, d'Ouest en est sur quatre niveaux de 200 à 140 m d'altitude. Les glacis situés à 180 et 160 m se caractérisent par des affleurements du substrat gréseux du Mio-Pliocène. L'Est de la cuvette est un vaste glacis alluvial à sable grossier situé à 150 m d'altitude.
2. **Les sebkhas :** Marécages salés, le plus souvent asséchés, occupant le fond d'une dépression. Le chott (ou sebkha) constitue le point le plus bas, il est constitué de sable siliceux et/ou gypseux à croute gypseuse de surface et de surface. Le bas fond se caractérise par une nappe phréatique permanente très peu profonde de 1 à 5 m. En aval d'Ouargla, diverses sebkhas alternent avec des massifs dunaires jusqu'à Sebkhet Safioune qui est à 103 m d'altitude point le plus bas de la région. Le sous-sol est formé de sables dunaires reposant sur des alluvions de l'oued avec localement des formations gréseuses indurées. Dans la région d'Ouargla seuls les terrains du Mio-Pliocène affleurent recouverts par endroits par des dépôts Quaternaires composés des ergs et des dunes. La cuvette est dans les formations continentales du Mio-Pliocène. Il s'agit de sables rouges et de grés tendres à stratifications entrecroisées, avec des nodules calcaires, entrecoupés de niveaux calcaires ou gypseux que l'on voit affleurer sur ses bords est-ouest. Après son creusement, la cuvette a été occupée par un lac au fond duquel se sont déposés des sédiments fins argileux ou d'origine chimique, craies, calcédoine et évaporites. Des oueds, descendant de la dorsale "mozabite" à l'Ouest (oued M'Zab, N'Sa et Z'Gag) ou du Tademaït (Oued Mya) au Sud, se déversaient dans ce lac en abandonnant leurs alluvions en larges cônes (Ank Djemel pour l'Oued M'Zab) ou barrant la vallée (Oued N'Sa et Z'Gag au Nord de Sebkhet Safioune).

Avec la fin de la dernière grande période pluviale, le lac s'est retiré. L'Oued Mya n'a pu qu'épisodiquement couler de sebkha en sebkha sans beaucoup de vigueur, son cours étant complètement coupé par les reliefs situés à l'aval de Sebkhet Safioune ou un lac se formait à nouveau à chaque période un peu pluvieuse.

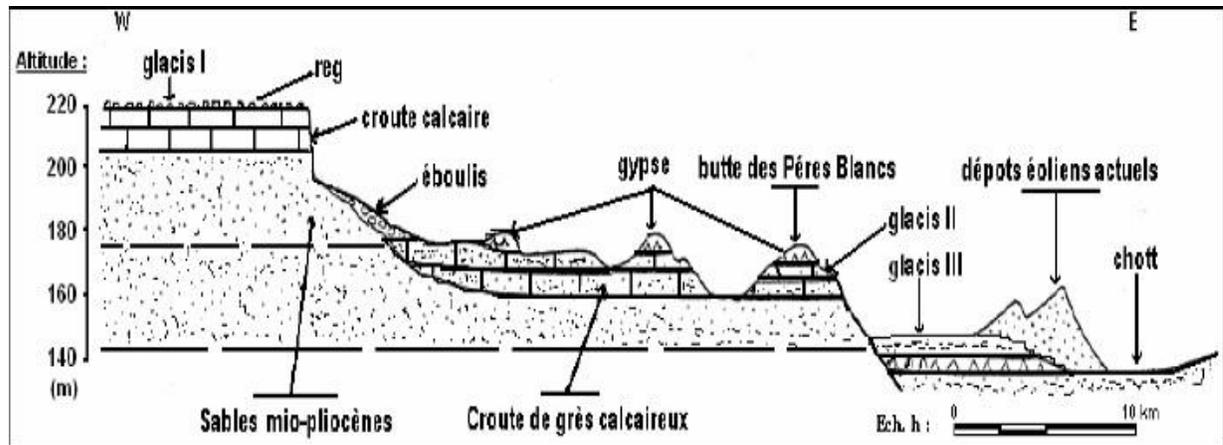


Fig.I.3. Coupe géomorphologique schématique de la vallée d'Ouargla.[2]

Le sous-sol est constitué de sables dunaires reposant sur des alluvions de l'oued, avec localement des formations gréseuses indurées. Dans la région d'Ouargla, seuls les terrains du Mio-Pliocène affleurent. Ils sont par endroits recouverts de dépôts datant du Quaternaire, composés d'ergs et de dunes.

La cuvette est creusée dans les formations continentales du Mio-Pliocène, principalement des sables rouges et des grès tendres à stratifications croisées, avec des nodules calcaires. On observe également des niveaux calcaires ou gypseux affleurant sur ses bords est et ouest.

Après son creusement, la cuvette a été occupée par un lac où se sont déposés des sédiments fins argileux ou d'origine chimique, tels que la craie, la calcédoine et les évaporites. Des oueds, descendant de la dorsale "mzabite" à l'ouest (oueds M'Zab, N'Sa et Z'Gag) ou du Tademaït au sud (Oued Mya), se déversaient dans ce lac en abandonnant leurs alluvions sous forme de larges cônes (Ank Djemel pour l'Oued M'Zab) ou en obstruant la vallée (Oued N'Sa et Z'Gag au nord de Sebket Safioune).

Avec la fin de la dernière grande période pluviale, le lac s'est retiré. L'Oued Mya n'a pu qu'épisodiquement couler de sebkha en sebkha sans beaucoup de vigueur, son cours étant

complètement coupé par les reliefs situés à l'aval de Sebkhet Safioune où un lac se formait à nouveau à chaque période un peu pluvieuse.

Les alluvions de l'Oued N'Sa ferment la vallée au nord de Sebkhet Safioune, empêchant un écoulement vers l'aval.

Cette fermeture s'est rompue dans sa partie est et les eaux du lac ont pu s'échapper vers le nord-est, en direction de Touggourt et du Chott Melrhir. Actuellement, les plus grandes crues de l'Oued Mya s'arrêtent à 200 km en amont de Ouargla. Celles de l'Oued M'Zab atteignent Sebkhet Safioune deux fois par siècle, alors que celles de l'Oued N'Sa semblent plus fréquentes.

Les recherches des archéologues confirment que la dépression de l'Oued Mya n'a été traversée par des cours d'eau qu'à une période très ancienne du Quaternaire, et que les sebkhas n'étaient pas opérationnelles pendant l'époque néolithique car certains sites archéologiques reposent sur elles.

Les sebkhas se sont formées lors d'une période humide antérieure, probablement lors du dernier grand pluvial contemporain de la glaciation de Würm.

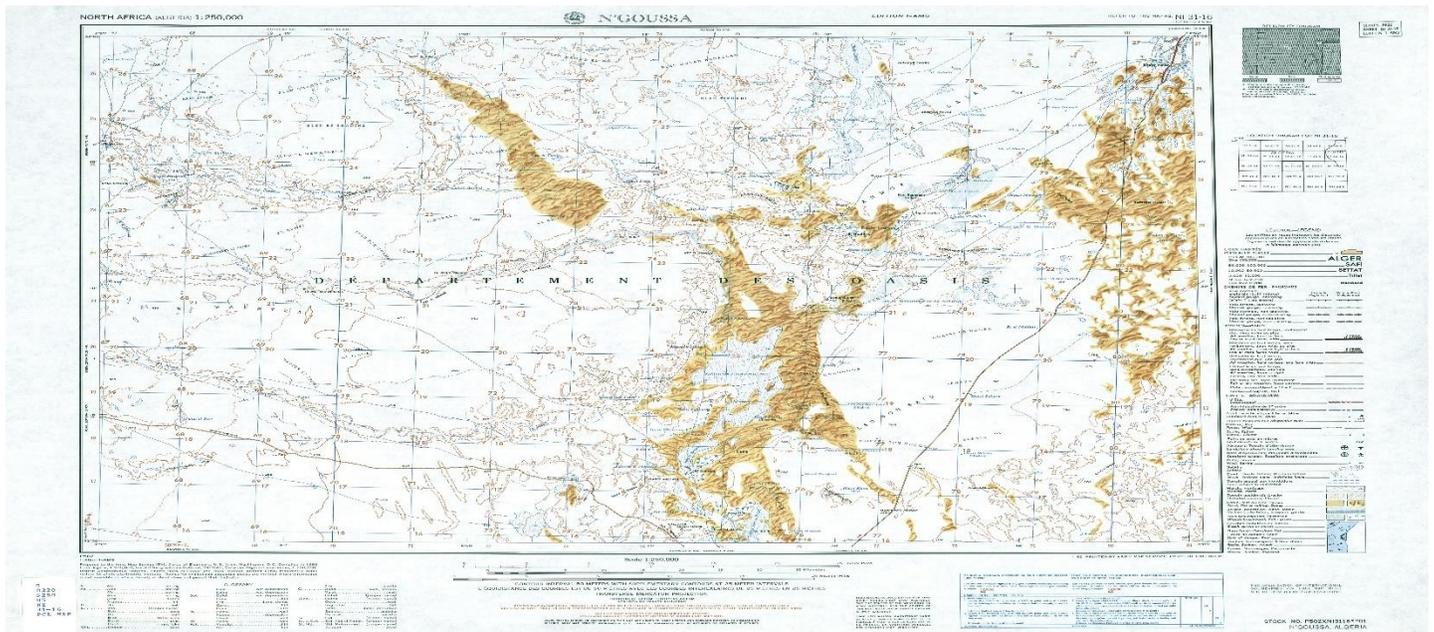


Fig.I.4. Relief de la région d'Ouargla.[3]

IV. Géologie :

1. Cadre géologique et tectonique régional :

De nombreux chercheurs ont étudié et publié des articles et des ouvrages sur la géologie du bassin sédimentaire du Sahara Septentrional, aussi bien dans le cadre de la géologie pétrolière que dans le domaine académique. Parmi eux, on peut citer les auteurs les plus connus : G. Busson en 1970, G. Conrad en 1969 et Dubief en 1959. La région d'Ouargla fait partie du bassin sédimentaire du Sahara Nord-Est Septentrional, dont les principales caractéristiques géologiques sont les suivantes :

- a) Au sud de l'accident Sud atlasique qui sépare la zone mobile maghrébine du reste de l'Afrique occidentale, le bouclier rigide est composé de terrains sédimentaires et éruptifs, plissés et métamorphisés.
- b) **Le Paléozoïque** : du Sahara correspond à des dépôts provenant d'un climat désertique périglaciaire. Autour des affleurements du socle, on trouve des couches gréseuses et schisteuses des Tassilis. Les mouvements hercyniens du Permo-Carbonifère ont entraîné l'érosion du bouclier. Ensuite, une longue période continentale s'est installée avec une pénéplanation post-hercynienne pendant le Trias et le Jurassique, entraînant la formation d'un manteau de grès, de sable et d'argile, qui constitue le "Continental Intercalaire".
- c) **Le Trias** : D'après Busson (1970), le Trias se caractérise par une grande variabilité de faciès et d'épaisseur. Il est subdivisé en de vastes unités lithologiques distinctes qui peuvent être salifères, argileuses, argilo-gréseuses ou carbonatées. L'épaisseur de ces différentes formations varie principalement là où des bancs salifères s'intercalent. L'épaisseur du Trias argilo-gréseux inférieur augmente en direction du Nord-Ouest (150 à 180 m). Elle diminue dans les zones de haut-fond (comme Hassi Messaoud et R. El Baguel). Le Trias salifère présente une grande épaisseur, atteignant 700 m au nord-est de Ghadamès et jusqu'à 1300 m à Hassi Messaoud.
- d) **Le Jurassique**:
 - Le Jurassique inférieur et moyen (Lias-Dogger) est principalement composé de couches évaporitiques constituées principalement de sel, d'anhydrite et

d'argiles, surmontées de couches nettement marines qui se présentent sous forme de calcaires et d'argiles avec des bancs d'anhydrite.

- Le Jurassique moyen se caractérise par une transgression couvrant l'ensemble du bassin du Grand Erg Oriental, avec des dépôts épais.
- Le Jurassique supérieur est marqué par une relative permanence du régime marin avec des sédiments provenant de milieux confinés. Dans la partie occidentale du bassin, on observe une légère régression du régime marin, similaire à ce qui se passe plus à l'ouest et vers le sud.

- Le passage du Jurassique supérieur au Crétacé inférieur est caractérisé par des apports terrigènes provenant des reliefs alimentaires situés au sud du bassin saharien (Hoggar) (Busson, 1970).

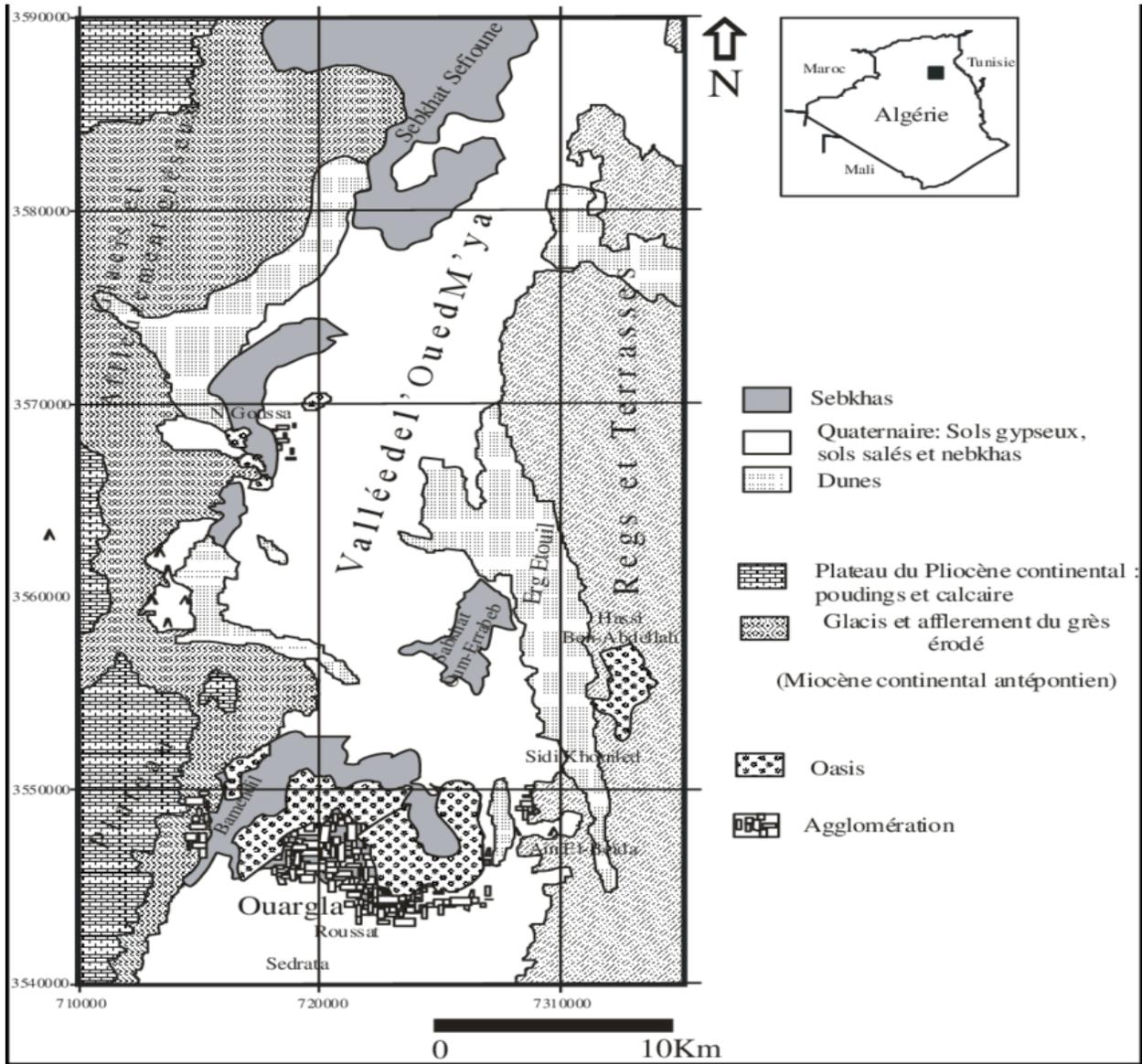


Fig.I.5. Carte géologique du Ouargla.[4]

V. Géologie Locale :

1. Introduction :

Dans la région de Ouargla, seuls les terrains du Mio-Pliocène sont visibles en surface, recouverts par une mince couche de dépôts quaternaires (Ergs et Dunes).

2. Litho-stratigraphie :

- a) **Le Barrémien** : Observé à partir de 1500 mètres de profondeur. Il se caractérise par une alternance de grès et d'argiles, avec des intercalations calcaro-dolomitiques.
- b) **L'Aptien** : La "barre aptienne" dans la région d'Ouargla est principalement constituée de marnes dolomitiques, de teintes grises, vertes, brunes ou blanches, ainsi que de dolomies cristallines. Son épaisseur varie généralement, mais reste inférieure à 50 mètres.
- c) **L'Albien** : Correspondant à la série lithologique supérieure du Continental Intercalaire, il est composé de grès, d'argiles et de sables. L'épaisseur de ces formations est variable, dépassant souvent les 400 mètres. Les éléments détritiques (non argileux) sont prédominants (70 à 90 %) et se présentent sous forme de grès fins, avec des passages de grès moyens et parfois des intercalations de sables grossiers à limons argileux ou carbonatés. Des couches d'argiles brun-rougeâtres sont également observées, parfois pélitiques et sableuses dans les puits les plus septentrionaux.
- d) **Le Vraconien** : Une intercalation albo-cénomaniennne marque un épisode dolomitique distinct entre les grès de l'Albien et les argiles du Cénomaniennne. Elle se compose de :
 - Dolomies et parfois de calcaires dolomitiques, parfois argileux, contenant occasionnellement des débris de mollusques. Leur épaisseur varie de 50 à 100 mètres.
 - Argiles, marnes dolomitiques et éléments détritiques.

- e) **Le Cénomaniens** : Il se divise en deux séries (inférieure et supérieure) :
- La série inférieure est constituée d'argiles dolomitiques et de marnes grises, avec parfois des argiles brunes-rougeâtres ou gris verdâtres. Son épaisseur varie de 60 à 80 mètres. On y observe également quelques bancs de calcaires dolomitiques, en particulier au niveau de la partie médiane de la série.
 - La série supérieure est caractérisée par une alternance d'argiles et de marnes dolomitiques grises, parfois avec des argiles salifères, des bancs d'anhydrite et quelques intercalations dolomitiques. Son épaisseur est d'environ 70 mètres.
- f) **Le Turonien** : Il se manifeste par une dalle connue sous le nom de "barre Turonienne" d'une épaisseur régulière d'environ 70 mètres. Cette formation est principalement composée de calcaire, présentant des variations de couleur telles que du calcaire poreux blanc parfois grisâtre, pulvérulent, parfois dolomitique, ainsi que du calcaire beige dolomitique et du calcaire fin légèrement dolomitique.
- g) **Le Sénonien** : Il se compose de deux formations lithologiques superposées:
- Le Sénonien lagunaire à la base, caractérisé par une alternance irrégulière de bancs d'anhydrite, de dolomie, d'argile et de sel. Les proportions de ces formations varient selon les endroits :
 - Les bancs d'anhydrite peuvent atteindre jusqu'à 250 mètres d'épaisseur.
 - La dolomie forme parfois des barres plus épaisses, d'environ 60 mètres.
 - Les niveaux d'argile et de marne ne dépassent généralement pas les 120 mètres d'épaisseur.

Le Sénonien carbonaté au sommet, d'une épaisseur d'environ 200 mètres : Il est composé de calcaire blanc, de texture tendre à moyennement dure, parfois crayeux à vacuolaire, avec des passages de marne gris tendre à pâteuse dolomitique.

- h) **Le Sénono-Eocène** : Principalement constitué de carbonates, avec une épaisseur variante entre 150 et 200 mètres. Cette formation est composée de calcaires

dolomitiques, parfois cristallins ou microcristallins, pouvant être vacuolaires, crayeux ou même argileux.

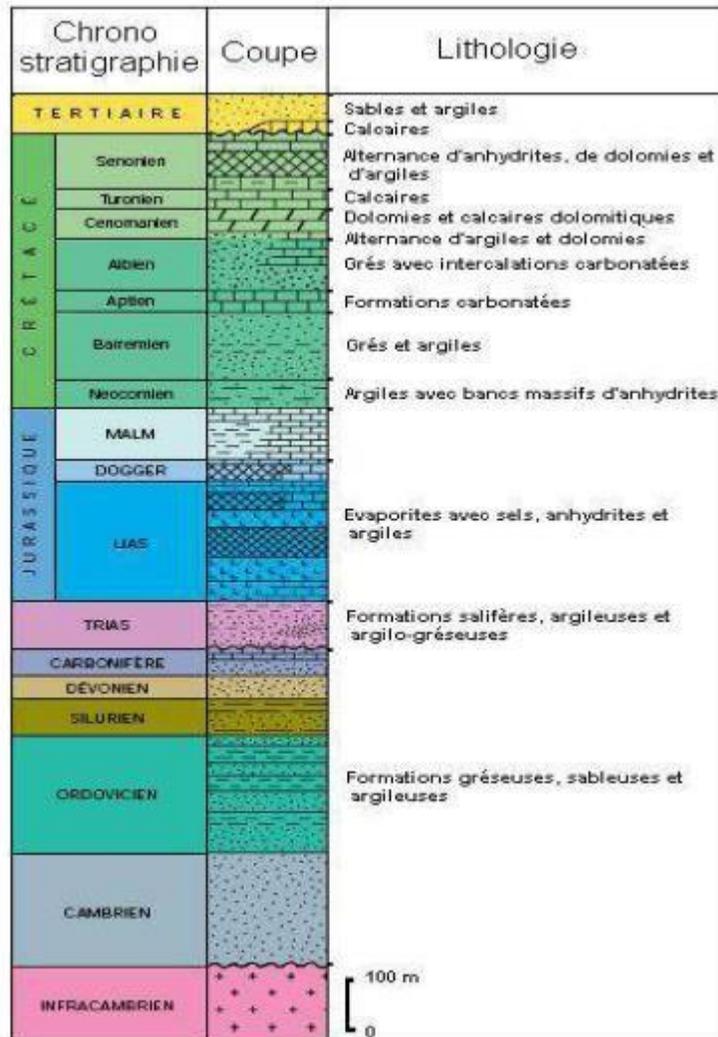


Fig.I.6. Colonne stratigraphique synthétique de la région d'Ouargla.[5]

CHAPITRE II :
Matériel et Méthodes

I. Tomographie de la résistivité électrique :

1. Le principe de la mesure :

La méthode de sondage électrique est utilisée pour explorer le sous-sol en mesurant sa résistivité électrique (exprimée en Ωm). Cette résistivité caractérise la capacité du courant électrique à se propager à travers le milieu naturel, ce qui permet d'appréhender sa structure et sa lithologie. En injectant un courant d'intensité connue et en mesurant la distribution du potentiel électrique, nous pouvons estimer la résistivité apparente (ρ_a) du sous-sol.[1]

2. Procédure:

2.1. Instruments de mesures:

- Un système d'acquisition : MAE X612, incluant les protocoles de mesure,
- Un résistivimètre MAE pour mesurer la résistivité apparente du milieu,
- Une batterie chargée de 12V,
- 64 électrodes en acier inoxydable,
- 4 câbles jaunes pour relier les électrodes au système d'acquisition, avec leurs bobines (il est important de bien ranger les câbles pour faciliter le déroulement sur le terrain et veiller à ne pas laisser traîner les embouts),
- Deux connecteurs de câbles,
- Un câble noir pour relier le résistivimètre à la centrale d'acquisition. Il convient de noter que les tensions utilisées peuvent atteindre plusieurs centaines de volts et que l'intensité du courant peut aller jusqu'à 500mA, donc une grande vigilance est nécessaire pour éviter les risques d'électrocution mortelle.



Fig.II.1. Un câble noir qui relie une électrode a une prise



Fig.II.2. L'unité d'acquisition et la batterie.

2.2. Protocole de mesure :

L'installation des câbles et des électrodes le long d'un profil (voir Figure 1) se réalise après une observation minutieuse du terrain et une réflexion pour essayer de mieux appréhender les caractéristiques géologiques. Ensuite, tous les câbles doivent être connectés à l'entrée du résistivimètre MAE, lui-même relié à la centrale d'acquisition qui enregistre les résistivités apparentes mesurées (voir Figure 2). Cet appareil, alimenté par une batterie de 12V, injecte le courant électrique entre les électrodes A et B, et mesure le potentiel électrique entre les électrodes M et N. La centrale d'acquisition permet de sélectionner l'un des dispositifs (Schlumberger, Wenner, Dipôle-dipôle...). Elle contrôle la matrice de relais sur laquelle les câbles sont connectés, et toutes les électrodes peuvent successivement remplir les rôles A, B, M ou N."

3. Les différentes configurations :

Le courant est injecté via deux électrodes d'injection : les électrodes A (pôle +) et B (pôle -), et la différence de potentiel est mesurée entre deux électrodes de mesure : les électrodes M et N. Les électrodes sont toujours séparées par la même distance, choisie judicieusement pour obtenir un minimum de profondeur d'investigation et une résolution adéquate pour l'étude du milieu. Selon le type de configuration, le volume de la zone sondée varie, mais la profondeur de pénétration interprétable est toujours d'environ $L/8$ pour un profil de longueur L (voir Figure 3).

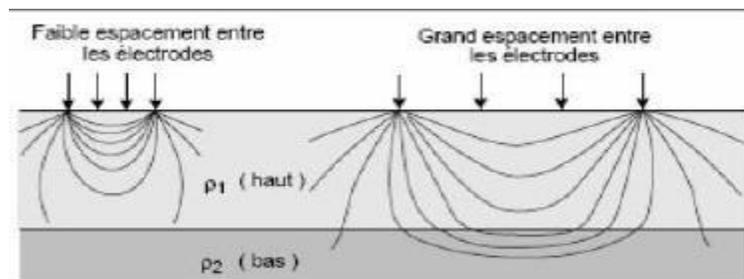


Fig.II.3. Schéma de la profondeur d'investigation par sondage électrique en fonction de La géométrie du dispositif.[2]

3.1. La configuration Schlumberger :

$L = \frac{\overline{AB}}{2}$ et $l = \frac{\overline{MN}}{2}$ La géométrie du dispositif est illustrée sur la fig.4.

$$1. \rho_a = \pi \frac{L^2 - l^2}{2l} \frac{V}{I}$$

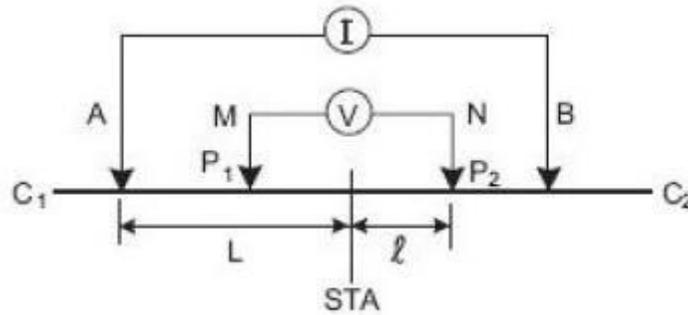


Fig.II.4. Configuration Schlumberger.[3]

3.2. La configuration Wenner :

$a = \overline{AM} = \overline{MN} = \overline{NB}$ La géométrie du dispositif est illustrée sur la fig.5.

$$2. \rho_a = 2\pi a \frac{V}{I}$$

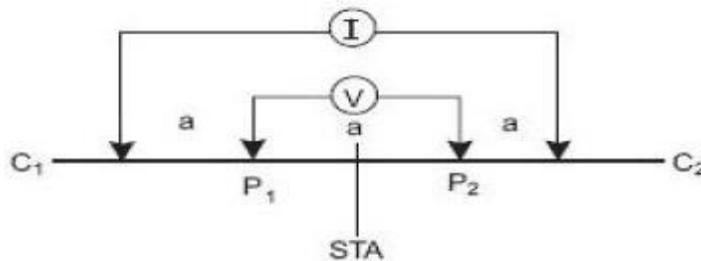


Fig.II.5. Configuration Wenner.[4]

3.3. La méthode Wenner- α :

La méthode Wenner- α représente l'une des approches les plus précises pour évaluer la résistivité électrique des sols ou des minéraux, et elle est couramment utilisée dans divers domaines tels que la géophysique, l'exploration minière et l'exploration pétrolière. Son utilisation est particulièrement efficace pour mesurer la résistance électrique sur une petite surface.

Cette méthode implique la disposition de quatre électrodes (A, B, M, N) disposées dans un schéma rectangulaire. Les électrodes A et B sont placées horizontalement sur la même ligne, tandis que les électrodes M et N sont également disposées horizontalement et alignées sur une ligne parallèle. Les électrodes M et N, servant de points de mesure, sont positionnées entre les électrodes A et B, qui agissent comme points d'injection.

Lors des mesures, un courant électrique est introduit entre les électrodes A et B, et la tension résultante est mesurée entre les électrodes M et N. En appliquant la loi fondamentale de la résistance électrique (tension = courant \times résistance), la résistivité électrique peut être calculée avec une grande précision.

Cette méthode offre une mesure fiable de la résistance électrique sur une petite superficie de sol ou de minerai. Sa précision dépend de divers facteurs tels que l'environnement géologique, la structure du sol et la qualité du matériau étudié.

Un avantage significatif de la méthode Wenner- α réside dans la disposition uniforme des électrodes, garantissant une distribution homogène du courant électrique dans le sol. Cela permet d'obtenir des lectures précises de la résistance électrique, facilitant ainsi une interprétation plus précise des données géophysiques collectées.

3.4. La configuration Dipôle - dipôle :

$a = \frac{\overline{AB}}{2} = \frac{\overline{MN}}{2} = \frac{\overline{B}}{2}$. La géométrie du dispositif est illustrée sur la fig.6.

$$3. \rho_a = \frac{V}{I} \pi a n (n + 1) (n + \frac{1}{2})$$

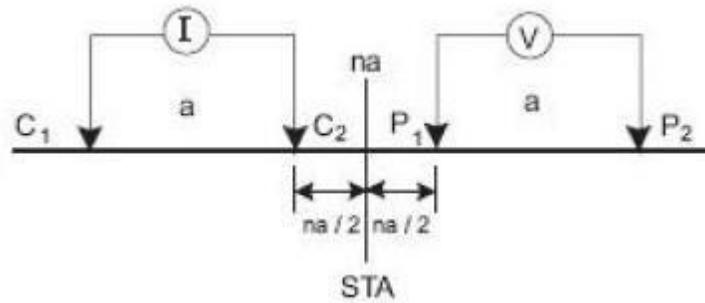


Fig.II.6. Configuration Dipôle-dipôle.[5]

4. Interprétation des pseudo-sections et modèles de résistivité :

4.1.Définition d'une pseudo-section :

Dans le processus d'interprétation des données en tomographie électrique, la première étape consiste à générer une pseudo-section. Une pseudo-section est une représentation cartographique des résultats, indiquant les valeurs des résistivités apparentes calculées à partir de la différence de potentiel mesurée entre deux électrodes de mesure, ainsi que de la valeur du courant injecté entre les deux électrodes d'injection. Chaque point de la pseudo-section est coloré en fonction de la valeur de la résistivité apparente à cet emplacement.

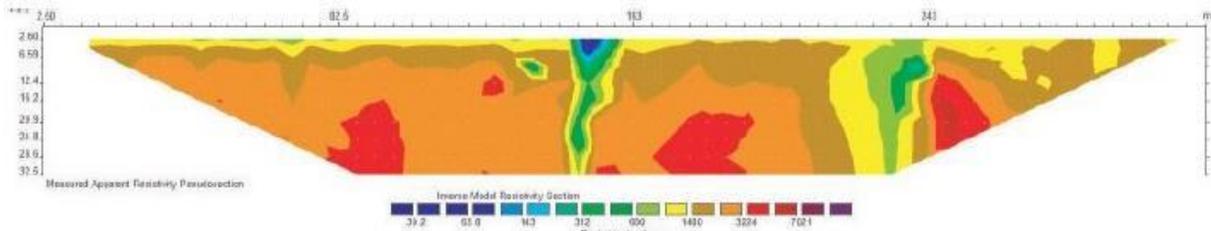


Fig.II.7. Carte de pseudo-section.[6]

Pour mieux comprendre la signification de ces points, prenons l'exemple de mesures réalisées dans la configuration Wenner et concentrons-nous sur le quadripôle (1,2,3,4) de la figure 8. Le courant est injecté entre les électrodes d'injection (1 et 4), puis la différence de potentiel est mesurée entre les électrodes de mesure (2 et 3). La résistivité

apparente est calculée automatiquement dans l'appareil d'acquisition (voir équation 2 pour la configuration Wenner). La position de la résistivité apparente du quadrupôle (1,2,3,4) est déterminée à l'intersection des lignes passant par les électrodes 2 et 3, formant respectivement un angle de - et $+\pi/4$ avec l'horizontale. De manière similaire pour le quadrupôle (1,3,5,7), la résistivité apparente est positionnée à l'intersection des lignes passant par les électrodes de mesure (3,5), formant un angle de - et $+\pi/4$ avec l'horizontale. Ainsi, chaque point représente les valeurs mesurées pour chaque quadrupôle. Leur profondeur augmente avec l'écartement entre les électrodes de mesure, et leur emplacement indique le quadrupôle de mesure le long du profil. Avec 16 électrodes, il existe 35 combinaisons possibles de quadrupôles.

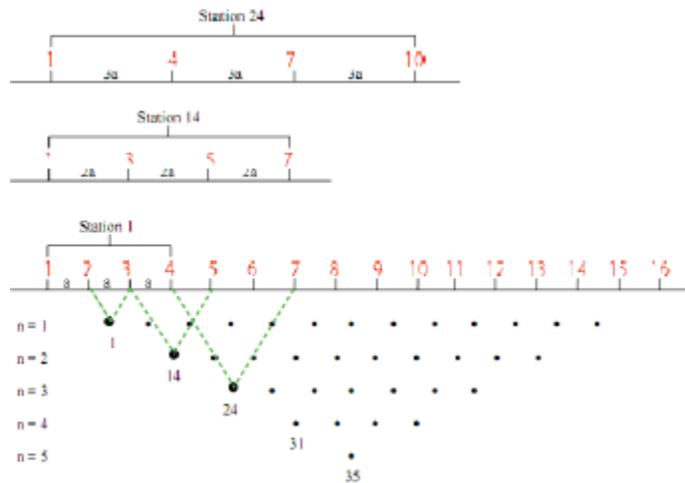


Fig.II.8. Principe de construction d'une pseudo-section pour la configuration Wenner.[7]

4.2. Modélisation par inversion :

Toutes les méthodes d'inversion cherchent principalement à déterminer un modèle de la subsurface qui s'ajuste au mieux aux données mesurées. Un modèle représente de façon mathématique idéalisée une portion de la Terre. Pour passer de l'espace des mesures (la résistivité apparente) à l'espace des paramètres physiques du modèle à estimer (la valeur

de la résistivité en chaque point de la section), on utilise des méthodes mathématiques comme la méthode des éléments finis ou des différences finies.

Nous avons utilisé le logiciel res2dinv pour générer des modèles à partir de nos données (la pseudo-section). Ce programme d'inversion peut être adapté à différentes configurations d'électrodes, telles que celles décrites dans le paragraphe 3 (Wenner, Schlumberger, Dipôle-Dipôle). Chaque configuration présente ses avantages et inconvénients. Ainsi, le choix de la meilleure configuration se fera en fonction des structures géologiques que l'on souhaite mettre en évidence, grâce au logiciel d'inversion.

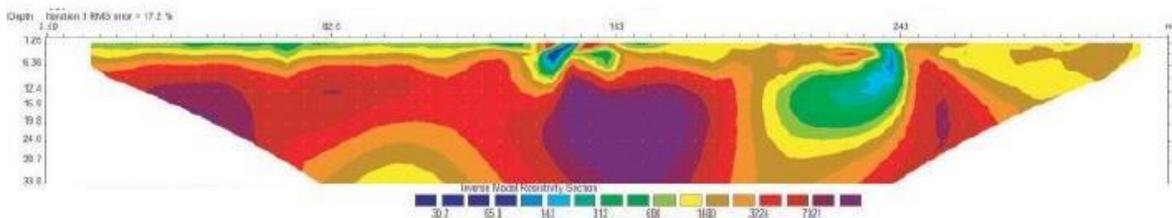


Fig.II.9. Modelé d'inversion.[8]

Le logiciel propose plusieurs méthodes d'inversion (robuste, moindres carrés, simple...), et il est recommandé d'en tester plusieurs pour choisir celle qui convient le mieux au terrain. Il permet également d'éliminer les mesures "mauvaises" afin qu'elles n'affectent pas le calcul du modèle. Ces mesures peuvent être affectées par deux types d'erreurs : les erreurs systématiques, qui surviennent lors de l'acquisition des données (problèmes de câbles, mauvais contact avec le sol), et les erreurs aléatoires, liées à des facteurs incontrôlables tels que les variations diurnes ou les tempêtes magnétiques, plus difficiles à identifier.

4.3. La pseudo-section calculée:

Illustrée dans la figure 10, est générée en utilisant la distribution des résistivités calculées à partir du modèle. Elle représente la résistivité apparente qui serait mesurée si la distribution des résistivités du sous-sol correspondait exactement au modèle calculé.

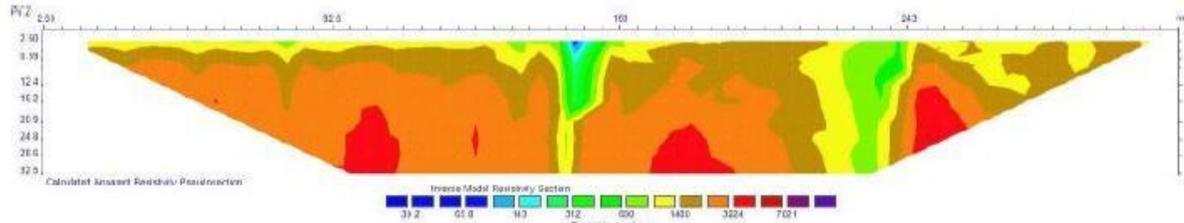


Fig.II.10. Carte de pseudo-section calculée.[9]

En résumé, nous réalisons des mesures de résistivité apparente, puis nous utilisons l'inversion des données pour obtenir une carte de résistivité, c'est-à-dire un modèle. En se basant sur ce modèle, nous calculons les résistivités apparentes pour générer une pseudo-section calculée. Le logiciel compare ensuite cette pseudo-section calculée à celle mesurée, fournissant ainsi un pourcentage d'erreur entre les deux. L'objectif est de sélectionner le modèle de résistivité qui minimise cet écart entre la pseudo-section mesurée et celle calculée.

Le problème des méthodes d'inversion en géophysique réside dans le fait qu'elles ne garantissent pas une solution unique : pour un ensemble de mesures, représenté par une pseudo-section (voir Figure 7), il existe de multiples modèles d'inversion (voir Figure 9) qui peuvent tous s'ajuster aux valeurs de résistivité apparente mesurées.

5. Software ZondRes2D :

ZondRes2D est un logiciel spécialisé dans le traitement et l'interprétation des données de tomographie par résistivité électrique (ERT) en deux dimensions (2D). L'ERT est une technique géophysique employée pour obtenir des images du sous-sol en mesurant la distribution de la résistivité électrique, permettant ainsi de recueillir des informations sur la structure géologique, les nappes phréatiques et diverses autres caractéristiques souterraines.

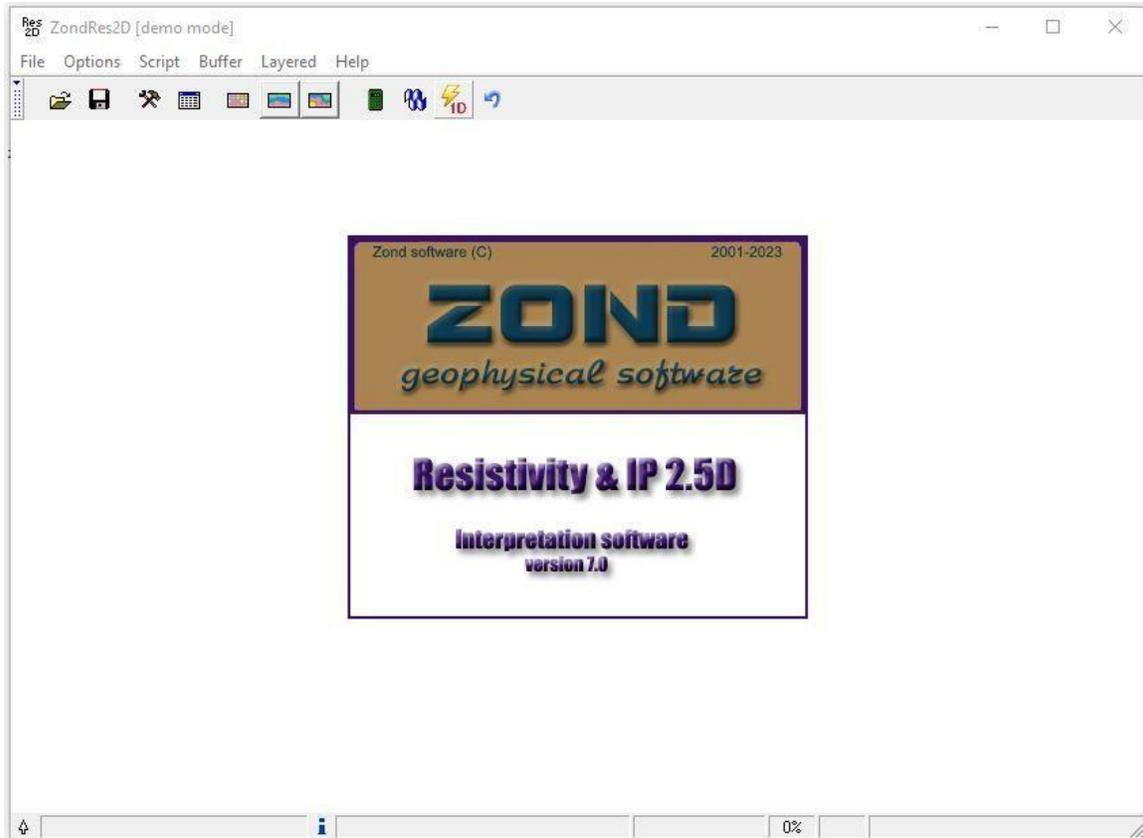


Fig.II.11. Zond res2d interface

5.1. Caractéristiques de ZondRes2D :

5.1.1. Le traitement des données :

- **Formats de données :** prend en charge une variété de formats de données, y compris .dat, .txt et d'autres formats géophysiques couramment utilisés.
- **Types d'enquête :** capable de gérer différentes configurations d'enquête telles que les réseaux Wenner, Schlumberger, dipôle-dipôle, pôle-dipôle et pôle-pôle.
- **Importation et exportation de données :** permet une importation facile des données brutes et l'exportation des résultats traités dans divers formats pour une analyse ou un rapport approfondi.

5.1.2. Techniques d'inversion:

- **Inversion robuste** : utilise des techniques avancées pour produire des modèles de résistivité fiables, même lorsque les données sont bruitées.
- **Inversion avec contrainte de douceur** : applique des contraintes de douceur pour générer des distributions de résistivité homogènes, cruciales dans certaines conditions géologiques.
- **Inversion en blocs** : permet de réaliser une inversion en blocs, idéale pour les environnements présentant des contrastes de résistivité marqués.
- **Méthodes de régularisation** : propose diverses méthodes de régularisation pour stabiliser le processus d'inversion et améliorer la fiabilité du modèle.

5.1.3. Outils de visualisation:

- **Sections de résistivité** : produit des sections 2D détaillées illustrant les variations de résistivité souterraine.
- **Pseudosections** : génère des pseudosections pour une première analyse des données de résistivité.
- **Tracés de contour** : permet de créer des tracés de contour pour la résistivité et d'autres paramètres, facilitant une interprétation détaillée.
- **Visualisation 3D** : principalement un outil 2D, il propose néanmoins des effets de visualisation 3D en combinant plusieurs sections 2D.
- **Géoréférencement** : permet l'intégration de données GPS pour obtenir des modèles de résistivité géoréférencés.

5.1.4. Modélisation et simulation directe:

- **Modélisation directe** : Simule comment la structure de résistivité souterraine serait observée dans une étude de résistivité.
- **Conception d'enquête** : Propose des outils pour planifier des réseaux d'électrodes optimaux et des stratégies d'enquête afin d'optimiser la qualité et la résolution des données.

5.1.5. Contrôle de la qualité des données :

- **Filtrage du bruit** : comprend des fonctionnalités permettant de filtrer le bruit afin d'améliorer la qualité du signal.
- **Analyse des erreurs** : fournit des outils statistiques pour examiner et minimiser les erreurs présentes dans les données.
- **Traçage croisé** : autorise la comparaison de différentes séries de données afin d'identifier les anomalies et de déceler les corrélations éventuelles.

5.1.6. Interface utilisateur:

- **GUI** : propose une interface utilisateur graphique intuitive qui simplifie les étapes d'importation, de traitement, d'inversion et de visualisation des données.
- **Personnalisation** : offre différentes options pour personnaliser la sortie visuelle, telles que les échelles de couleurs, les paramètres des axes et les outils d'annotation.

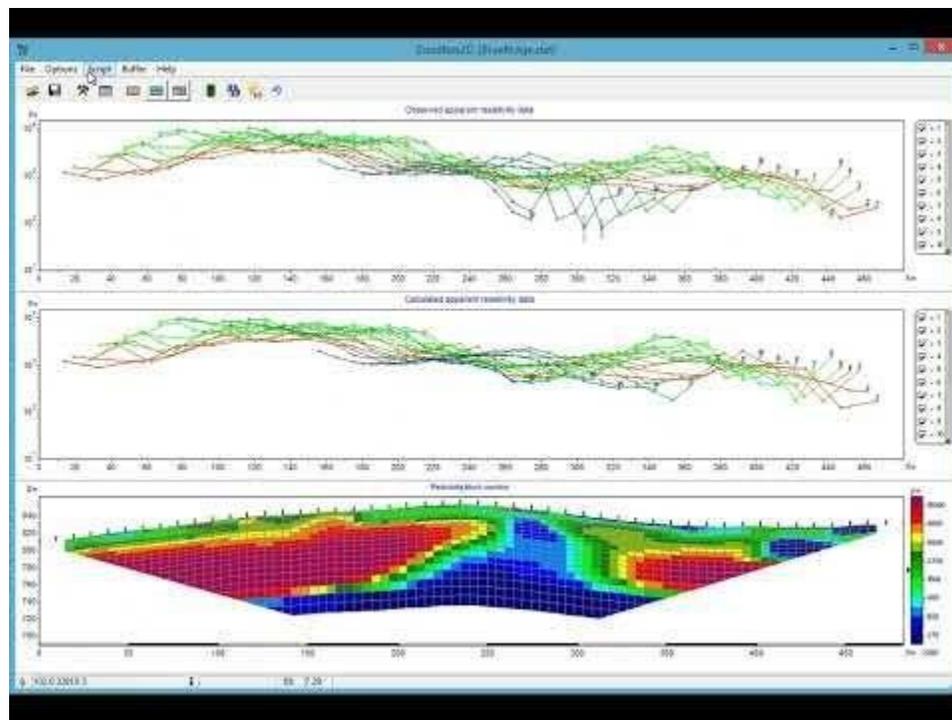


Fig.II.12. Un exemple du fonctionnement du programme

5.2. Applications dans différents domaines :

5.2.1. Études environnementales :

- **Détection et délimitation des panaches de contamination** : Identifie et cartographie les zones de contamination pour évaluer leur étendue et leur impact.
- **Surveillance des changements de salinité des eaux souterraines** : Surveille les fluctuations de salinité dans les eaux souterraines pour évaluer leur qualité et leur adaptation à différents usages.
- **Localisation et caractérisation des décharges et déversements** : Permet de repérer et de caractériser les décharges et déversements, facilitant ainsi leur gestion et leur remédiation.

5.2.2. Ingénierie géotechnique:

- **Profilage du sous-sol pour les projets de construction** : Analyse la structure et les propriétés du sous-sol afin de planifier efficacement les projets de construction.
- **Identification des zones de faiblesse des fondations et des talus** : Localise les zones présentant des risques de stabilité pour les fondations et les talus, assurant ainsi la sécurité des structures.
- **Évaluation des conditions du terrain pour le développement des infrastructures** : Évalue les caractéristiques géotechniques du terrain pour évaluer la faisabilité et la durabilité des projets d'infrastructures.

5.2.3. Hydrogéologie:

- **Cartographie des aquifères souterrains et des zones de recharge** : Élaboration de cartes détaillées des formations aquifères souterraines et des zones de recharge, fournissant des données essentielles pour la gestion des ressources en eau.
- **Surveillance des changements dans les niveaux des eaux souterraines et les modèles d'écoulement** : Suivi des variations des niveaux des eaux souterraines et

analyse des schémas d'écoulement pour mieux comprendre les systèmes hydrologiques et détecter les tendances à long terme.

- **Identification des interfaces eau douce-eau salée dans les zones côtières :** Repérage des zones où les eaux souterraines douces rencontrent les eaux salées dans les régions côtières, une information cruciale pour une gestion efficace et durable des ressources en eau.

5.2.4. Enquêtes archéologiques:

- **Localisation des structures, des murs et des artefacts enterrés :** Repère les structures anciennes, les murs et les artefacts enfouis, facilitant ainsi la planification des fouilles archéologiques.
- **Cartographie des sites historiques sans fouille :** Établit des cartes détaillées des sites historiques sans nécessiter de fouilles, offrant ainsi une représentation visuelle de l'emplacement et de la disposition des sites archéologiques.

5.2.5. Exploration minière:

- **Identification des corps minéralisés et des gisements minéraux :** Repérage et identification des zones contenant des minéraux et des gisements minéraux, facilitant ainsi la localisation des ressources exploitables.
- **Évaluation de l'étendue et de la continuité des zones minéralisées :** Évaluation de la taille et de la continuité des zones contenant des minéraux pour déterminer leur potentiel économique et leur faisabilité pour l'extraction minière.

5.3. Organigramme détaillé du travail expérimental

5.3.1. Acquisition de données sur le terrain :

- **Réalisation d'enquêtes sur le terrain à l'aide d'un réseau d'électrodes configurées de manière spécifique :** Effectue des investigations sur le terrain en déployant un arrangement précis d'électrodes pour collecter des données géophysiques.

- **Mesure de la résistivité apparente du sous-sol à différents points et profondeurs** : Effectue des mesures de la résistivité électrique du sous-sol à différentes positions et à des profondeurs variables pour évaluer les variations de la résistivité dans le sol.

5.3.2. *Importation de données:*

- **Chargement des données brutes du terrain dans ZondRes2D à l'aide de ses fonctionnalités d'importation** : Importe les données non traitées directement depuis le terrain dans ZondRes2D en utilisant ses outils d'importation dédiés.
- **Organisation des données en fonction de la configuration d'enquête** : Structure les données en accord avec la configuration spécifique de l'enquête géophysique utilisée, assurant ainsi une analyse précise et une interprétation adéquate.

5.3.3. *Prétraitement des données:*

- **Application de filtres pour éliminer le bruit et corriger les incohérences des données** : Utilisation de filtres pour éliminer les perturbations indésirables et rectifier toute irrégularité présente dans les données, assurant ainsi leur fiabilité.
- **Réalisation de contrôles et de visualisations préliminaires pour garantir la qualité des données** : Exécution de vérifications et de visualisations initiales afin d'évaluer la qualité des données et de repérer d'éventuels problèmes ou anomalies nécessitant une correction.

5.3.4. *Processus d'inversion:*

- **Configuration des paramètres d'inversion** : Réglage des paramètres d'inversion, y compris la régularisation, la méthode d'inversion (lisse, en blocs) et le modèle initial, pour préparer l'inversion.
- **Exécution de l'inversion** : Lancement du processus d'inversion pour transformer les données de résistivité apparente en un modèle de résistivité du sous-sol,

permettant ainsi la reconstruction de la distribution des propriétés électriques souterraines.

5.3.5. Visualisation et analyse du modèle :

- **Visualisation du modèle de résistivité obtenu :** Utilisation des fonctionnalités de traçage et de contour du logiciel pour observer le modèle de résistivité résultant de l'inversion, offrant ainsi une représentation visuelle des propriétés électriques du sous-sol.
- **Intégration d'autres données géologiques ou géophysiques :** Incorporation de données supplémentaires telles que des informations géologiques ou géophysiques afin d'enrichir l'analyse et l'interprétation du modèle de résistivité, améliorant ainsi la compréhension de la structure et des caractéristiques du sous-sol.

5.3.6. Interprétation et rapport:

- **Analyse des sections de résistivité :** Examiner les sections de résistivité afin de repérer les caractéristiques géologiques et les anomalies significatives.
- **Génération de rapports complets :** Produire des rapports détaillés comprenant des visualisations, des interprétations et des conclusions basées sur l'analyse des données de résistivité.
- **Exportation des résultats :** Exporter les résultats pour une analyse ou une présentation plus approfondie, offrant ainsi la possibilité d'utiliser les données de manière flexible pour différentes applications.

5.4. Conclusion :

ZondRes2D se positionne comme un outil complet et polyvalent pour la tomographie par résistivité électrique, offrant des fonctionnalités robustes pour le traitement, l'inversion et l'interprétation des données. Ses applications s'étendent à divers domaines, dont les études environnementales, l'ingénierie géotechnique, l'hydrogéologie, l'archéologie et l'exploration minière. Grâce à sa capacité à

générer des images souterraines détaillées, ZondRes2D facilite la prise de décisions éclairées, alimentées par des données géophysiques de haute qualité.

6. Étapes d'action et mesure:

Dans notre étude portant sur l'effet de la salinité sur les propriétés du sol de surface, nous avons utilisé une technique géophysique, la tomographie électrique (ERT). Cette technique repose sur la mesure de la résistivité électrique des matériaux terrestres, ce qui aide à déterminer les propriétés des sols et des roches, ainsi qu'à détecter les eaux souterraines.

Nous avons procédé selon les étapes suivantes :

6.1. Planification et conception :

Nous avons commencé par déterminer la zone d'étude, située devant l'incubateur universitaire du nouveau pôle universitaire 3. Nous avons creusé une tranchée de 3 mètres de long, 1 mètre de large et 60 cm de profondeur, en réunissant différents types de sol tels que le gypse (gypse), l'argile (argile), les graviers (graviers), le sable (sable) et les alluvions (alluvion). Cette étape a pris trois jours.



Fig.II.13. La tranchée réalisée .

Premier jour :

- Nous avons mesuré la résistivité électrique du gypse présent dans la zone de fouille.
- Nous avons placé 16 électrodes dans la tranchée, espacées de 20 cm chacune.
- Nous avons connecté les électrodes à un appareil de mesure de résistivité électrique, qui envoie un courant électrique à travers les électrodes et mesure la tension et la résistivité résultantes.
- Nous avons activé l'appareil de mesure et collecté les données électriques en utilisant des configurations spécialisées (dipôle-dipôle, Wenner-Schlumberger, Wenner-alpha).

- Nous avons créé une image tomographique en trois dimensions de la distribution de la résistivité sous la surface, ce qui aide les géologues à comprendre les caractéristiques de la zone étudiée.



Fig.II.14. Placement des électrodes pour la mesure (gypse)

Deuxième jour :

- Nous avons ajouté une couche d'argile (argile) d'environ 15 cm d'épaisseur, provenant des carrières d'argile de Touggourt.



Fig.II.15. Placement des électrodes pour la mesure (argile)

- Nous avons mesuré la résistivité électrique en suivant les mêmes étapes et configurations que le premier jour.
- Nous avons ajouté une couche de graviers (graviers) d'environ 15 cm d'épaisseur, et répété le même processus.

Troisième jour :

- Nous avons ajouté une couche de sable (sable) d'environ 20 cm d'épaisseur, provenant du même endroit que l'expérience.

- Nous avons répété les mêmes étapes de mesure en utilisant les mêmes configurations.
- Nous avons ajouté une couche d'alluvions (alluvion) d'environ 10 cm d'épaisseur, provenant de la sebkha en face de la route menant au quartier El Nasr (Al-Khafji).
- Nous avons utilisé la même méthode de travail pour collecter les données.

6.2. Résultats :

Les images tomographiques en trois dimensions créées à partir de ces données aident à identifier les variations dans les formations du sol, fournissant aux géophysiciens et géologues une compréhension approfondie des caractéristiques de la zone étudiée. Cette étude aide à gérer les ressources naturelles et à développer des stratégies pour la conservation des sols et des eaux.

CHAPITRE III :

Résultats et interprétations

I. Analyser les résultats des mesures de gypse :

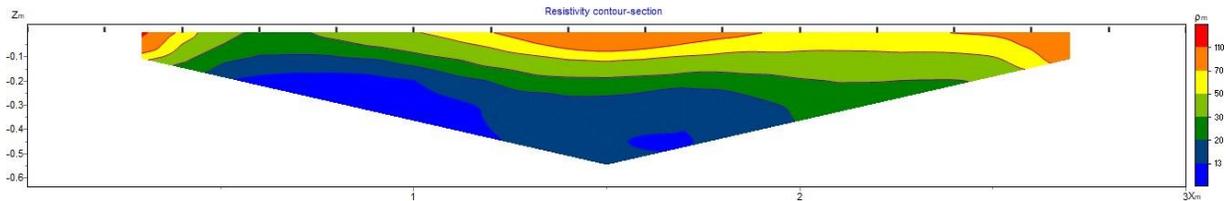


Fig.III.1. Modèle d'inversion de gypse en utilisant la configuration dipôle-dipôle.

L'image montre une coupe tomographique des mesures de résistivité électrique utilisant la configuration dipôle-dipôle pour une couche de gypse. Voici une explication de l'image basée sur ce qui peut être observé :

Axes et échelle :

- 1. L'axe horizontal (X) :** représente la distance horizontale en mètres le long du site où les mesures ont été effectuées.
- 2. L'axe vertical (Z) :** représente la profondeur sous la surface en mètres. Il montre comment la résistivité est distribuée en fonction de la profondeur.
- 3. L'échelle de couleurs :** indique les valeurs de la résistivité électrique en ohm-mètre ($\Omega \cdot m$). Les différentes couleurs représentent différents niveaux de résistivité:

- **Bleu foncé :** valeurs de résistivité faibles (environ $13 \Omega \cdot m$), ce qui indique des matériaux à haute conductivité électrique, comme de l'argile saturée en eau ou du gypse humide.
- **Vert à jaune :** valeurs de résistivité moyennes (environ $30-70 \Omega \cdot m$), ce qui indique des matériaux à conductivité moyenne, comme du gypse ou du sable avec une certaine humidité.
- **Orange à rouge :** valeurs de résistivité élevées (environ $110 \Omega \cdot m$), ce qui indique des matériaux à faible conductivité électrique, comme des roches sèches ou du gypse sec.

L'analyse géologique :

- **La couche superficielle (haut de la coupe) :** montre des zones à haute résistivité (couleurs orange et rouge), ce qui indique la présence de couches de gypse sec ou de roches sèches.
- **Les couches plus profondes :** montrent des zones à faible résistivité (couleurs bleues), ce qui peut indiquer la présence de couches saturées en eau ou de matériaux argileux sous le gypse.

L'interprétation géologique :**1. Couche superficielle (0 à -0,1 mètre) :**

- Les couleurs orange et rouge indiquent une résistivité élevée ($\sim 110 \Omega \cdot m$), ce qui suggère une couche de gypse sec ou de matériaux similaires à faible conductivité électrique.

2. Couche intermédiaire (environ -0,1 à -0,3 mètre) :

- Les couleurs vertes et jaunes indiquent une résistivité moyenne ($30-70 \Omega \cdot m$), ce qui indique des matériaux modérément humides comme du gypse ou du sable avec une certaine humidité.

3. Couche profonde (environ -0,3 mètre et au-delà) :

- Les couleurs bleu foncé indiquent une résistivité faible ($\sim 13 \Omega \cdot m$), ce qui indique la présence de matériaux très conducteurs comme de l'argile saturée en eau ou du gypse humide.

Conclusion :

Cette image donne une vue détaillée de la distribution de la résistivité électrique dans une couche de gypse, reflétant les changements dans la composition du sol et la présence d'eau. Ces informations peuvent être utilisées pour évaluer les conditions géologiques et hydrologiques du site.

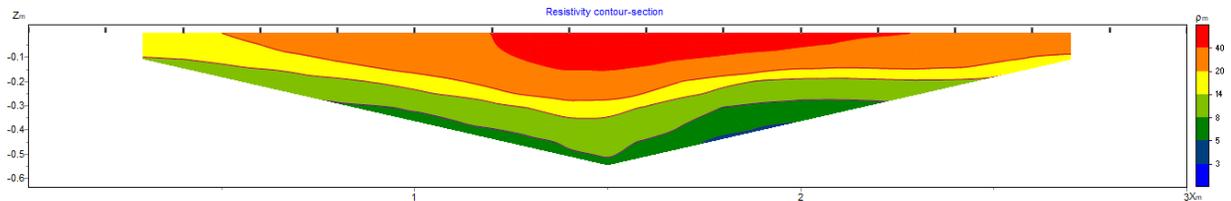


Fig.III.2. Modèle d'inversion de gypse en utilisant la configuration Wenner Alpha.

L'image montre une coupe tomographique des mesures de résistivité électrique utilisant la configuration Wenner Alpha1 pour une couche de gypse. Voici une explication de l'image basée sur ce qui peut être observé :

1. Échelle de couleurs : Indique les valeurs de résistivité électrique en ohm-mètre ($\Omega \cdot m$). Les différentes couleurs représentent différents niveaux de résistivité:

- **Bleu à vert foncé :** Valeurs de résistivité faibles (environ $3-8 \Omega \cdot m$), ce qui indique des matériaux à haute conductivité électrique, comme de l'argile saturée en eau ou du gypse humide.
- **Jaune à vert clair :** Valeurs moyennes de résistivité (environ $14-20 \Omega \cdot m$), ce qui indique des matériaux à conductivité moyenne, comme du gypse ou du sable avec une certaine humidité.
- **Orange à rouge :** Valeurs élevées de résistivité (environ $40 \Omega \cdot m$), ce qui indique des matériaux à faible conductivité électrique, comme des roches sèches ou du gypse sec.

Analyse géologique :

1. Couche superficielle (0 à -0,1 mètre) :

- Les couleurs orange et rouge indiquent une résistivité élevée ($\sim 40 \Omega \cdot m$), ce qui suggère une couche de gypse sec ou de matériaux similaires à faible conductivité électrique.

2. Couche intermédiaire (environ -0,1 à -0,3 mètre) :

- Les couleurs jaunes indiquent une résistivité moyenne (environ $20 \Omega \cdot m$), ce qui indique des matériaux moyennement humides comme du gypse ou du sable avec une certaine humidité.

3. Couche profonde (environ -0,3 à -0,5 mètre et au-delà) :

- Les couleurs vertes à bleu foncé indiquent une résistivité faible (environ 3-8 $\Omega \cdot m$), ce qui indique la présence de matériaux très conducteurs comme de l'argile saturée en eau ou du gypse humide.

Interprétation géologique :

1. Couche superficielle (0 à -0,1 mètre) :

- Les couleurs orange et rouge indiquent une couche sèche avec une résistivité élevée, suggérant la présence de matériaux tels que le gypse sec ou les roches sèches.

2. Couche intermédiaire (environ -0,1 à -0,3 mètre) :

- Les couleurs jaunes et vertes indiquent des matériaux avec une résistivité moyenne, suggérant la présence de matériaux moyennement humides comme le gypse ou le sable avec une certaine humidité.

3. Couche profonde (environ -0,3 à -0,5 mètre et au-delà) :

- Les couleurs vertes à bleu foncé indiquent des matériaux avec une résistivité faible, suggérant la présence de matériaux saturés en eau comme de l'argile ou du gypse humide.

Conclusion :

Cette image reflète la distribution de la résistivité électrique dans une couche de gypse, donnant un aperçu des variations de la composition du sol et de la présence d'eau sur le site. Ces informations peuvent être utilisées pour évaluer les conditions géologiques et hydrologiques du site.

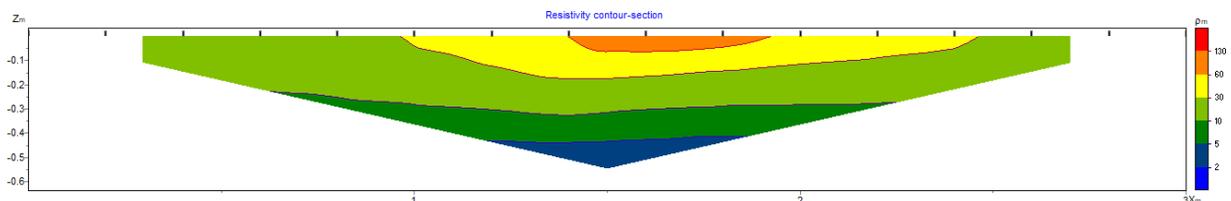


Fig.III.3. Modèle d'inversion de gypse en utilisant la configuration Wenner-Schlumberger.

L'image montre une coupe tomographique des mesures de résistivité électrique utilisant la configuration Wenner-Schlumberger1 pour une couche de gypse. Voici une explication de l'image basée sur ce qui peut être observé :

1. Échelle de couleurs : Indique les valeurs de résistivité électrique en ohm-mètre ($\Omega \cdot m$). Les différentes couleurs représentent différents niveaux de résistivité :

- **Bleu foncé :** Valeurs de résistivité très faibles ($\sim 2 \Omega \cdot m$), ce qui indique des matériaux très conducteurs comme des argiles saturées en eau.
- **Vert clair à vert foncé :** Valeurs de résistivité faibles à moyennes ($\sim 10-30 \Omega \cdot m$), ce qui indique des matériaux modérément conducteurs comme des sols humides ou du gypse légèrement humide.
- **Jaune :** Valeurs de résistivité moyennes ($\sim 60 \Omega \cdot m$), ce qui indique des matériaux moins conducteurs, comme du gypse avec moins d'humidité.
- **Orange à rouge :** Valeurs de résistivité élevées ($\sim 130 \Omega \cdot m$), ce qui indique des matériaux très résistants comme du gypse sec ou des roches très sèches.

Analyse géologique :

1. Couche superficielle (0 à -0,1 mètre) :

- Les couleurs vertes et jaunes indiquent une résistivité faible à moyenne ($\sim 10-60 \Omega \cdot m$), ce qui suggère une couche de gypse avec une conductivité modérée, possiblement due à une humidité variable.

2. Couche intermédiaire (environ -0,1 à -0,3 mètre) :

- Les couleurs vertes indiquent des matériaux avec une résistivité faible à moyenne ($\sim 10-30 \Omega \cdot m$), ce qui pourrait indiquer une couche de gypse avec une certaine humidité.

3. Couche profonde (environ -0,3 à -0,5 mètre et au-delà) :

- Les couleurs bleues à vert foncé indiquent une résistivité faible ($\sim 2-10 \Omega \cdot m$), ce qui suggère des matériaux très conducteurs comme des argiles saturées en eau ou du gypse très humide.

Interprétation géologique :

1. Couche superficielle (0 à -0,1 mètre) :

- Les couleurs vertes et jaunes suggèrent une couche de gypse avec une conductivité modérée, probablement due à une variabilité dans l'humidité.

2. Couche intermédiaire (environ -0,1 à -0,3 mètre) :

- Les couleurs vertes indiquent une couche de gypse modérément humide, avec une résistivité faible à moyenne.

3. Couche profonde (environ -0,3 à -0,5 mètre et au-delà) :

- Les couleurs bleues à vert foncé indiquent des matériaux très conducteurs, probablement des argiles saturées en eau ou du gypse très humide.

Conclusion :

Cette image reflète la distribution de la résistivité électrique dans une couche de gypse, montrant des variations dans la composition et l'humidité du sol à différentes profondeurs. Les valeurs de résistivité plus faibles en profondeur suggèrent la présence de matériaux plus conducteurs, comme des argiles saturées en eau ou du gypse humide, tandis que les valeurs plus élevées en surface et dans les couches intermédiaires indiquent la présence de gypse avec moins d'humidité. Ces informations sont essentielles pour évaluer les conditions géologiques et hydrologiques du site.

II. Analyser les résultats des mesures de argiles :

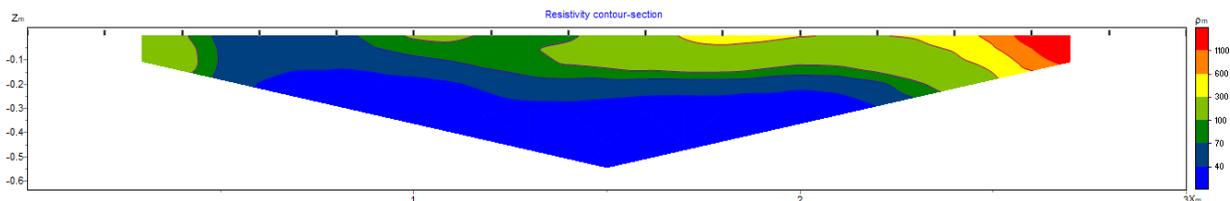


Fig.III.4. Modèle d'inversion des argiles en utilisant la configuration dipôle-dipôle.

L'image montre une coupe tomographique des mesures de résistivité électrique utilisant la configuration dipôle-dipôle pour une couche de argiles. Voici une explication de l'image basée sur ce qui peut être observé :

1. Échelle de couleurs (ρ_m) : représente les valeurs de résistivité électrique en ohm-mètre ($\Omega \cdot m$), avec la gradation de couleurs suivante :

- **Bleu foncé :** valeurs de résistivité très faibles ($\sim 40 \Omega \cdot m$).
- **Bleu clair :** valeurs de résistivité faibles ($\sim 70 \Omega \cdot m$).
- **Vert :** valeurs de résistivité moyennes ($\sim 300 \Omega \cdot m$).
- **Jaune :** valeurs de résistivité élevées ($\sim 600 \Omega \cdot m$).
- **Rouge :** valeurs de résistivité très élevées ($\sim 1100 \Omega \cdot m$).

Analyse géologique :

- **Côté gauche de la section :** La zone de couleur verte indique des valeurs de résistivité moyennes, ce qui pourrait correspondre à des argiles moins saturées ou à des sols mixtes.
- **Côté droit de la section :** On observe un gradient de résistivité augmentant vers le rouge, indiquant des couches plus résistantes, probablement des formations rocheuses solides ou des matériaux secs.

Interprétation géologique :

1. Couche de surface (0 à -0,1 m) :

- La couleur vert clair à jaune indique des valeurs de résistivité moyennes ($\sim 300-600 \Omega \cdot m$).
- Cela suggère la présence de matériaux moins conducteurs, tels que des argiles partiellement saturées ou des sols mixtes avec des graviers.

2. Couche sous la surface (-0,1 à -0,3 m) :

- On observe une large zone de couleur bleue foncée à bleu clair ($\sim 40-70 \Omega \cdot m$).
- Cela indique des valeurs de résistivité très faibles, typiques des argiles saturées en eau, ce qui est cohérent avec la nature conductrice de l'argile humide.

3. Profondeur intermédiaire (-0,3 à -0,4 m) :

- Des zones vertes à jaunes apparaissent ($\sim 300-600 \Omega \cdot m$).
- Cela indique des matériaux à résistivité plus élevée, ce qui peut indiquer la présence de couches argileuses moins saturées ou de sols mixtes avec une teneur en eau variable.

4. Couche plus profonde (-0,4 à -0,5 m) :

- La résistivité augmente considérablement vers le côté droit de l'image, avec des zones de couleur jaune à rouge ($\sim 600-1100 \Omega \cdot m$).
- Cela suggère la présence de matériaux très résistants, tels que des formations rocheuses solides ou des couches de gravier sec.

Conclusions :

- **Gradient de résistivité** : Le gradient de résistivité de la surface à la profondeur reflète les variations des propriétés des argiles et des matériaux sous la surface.
- **Zones de faible résistivité** : La présence de zones de faible résistivité en profondeur peut indiquer des couches argileuses saturées en eau, typiques des environnements argileux humides.
- **Zones de haute résistivité** : La présence de zones à haute résistivité peut indiquer des couches rocheuses solides ou des matériaux peu poreux, ce qui est important pour comprendre la structure géologique et pour les applications de forage ou de construction.

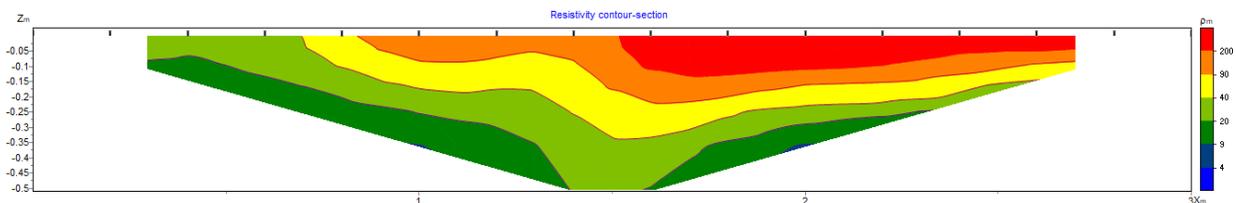


Fig.III.5. Modèle d'inversion des argiles en utilisant la configuration Wenner Alpha.

L'image montre une coupe tomographique des mesures de résistivité électrique utilisant la configuration Wenner Alpha pour une couche des argiles. Voici une explication de l'image basée sur ce qui peut être observé :

. **Échelle des couleurs (ρ_m)** : représente les valeurs de résistivité en ohm-mètre ($\Omega \cdot m$), avec le gradient de couleur suivant :

- **Bleu foncé** : valeurs de résistivité très faibles ($\sim 4 \Omega \cdot m$).
- **Bleu clair** : valeurs de résistivité faibles ($\sim 9 \Omega \cdot m$).
- **Vert** : valeurs de résistivité moyennes ($\sim 20 \Omega \cdot m$).
- **Jaune** : valeurs de résistivité élevées ($\sim 40-90 \Omega \cdot m$).
- **Orange à rouge** : valeurs de résistivité très élevées ($\sim 200 \Omega \cdot m$).

Analyse géologique :

- **Côté gauche de la section** : nous observons un gradient de couleurs du vert au bleu foncé, indiquant la présence de couches d'argile saturées d'eau.
- **Côté droit de la section** : Le gradient de couleurs du jaune à l'orange et au rouge indique des matériaux plus résistants, probablement en raison de sols secs ou de roches.

Interprétation géologique :

1. Couche de surface (0 à -0,05 m) :

- La couleur orange à rouge indique des valeurs de résistivité très élevées ($\sim 90-200 \Omega \cdot m$).
- Cela suggère la présence de matériaux peu conducteurs, probablement en raison de sols secs ou de roches.

2. Couche sous la surface (-0,05 à -0,15 m) :

- La couleur jaune à vert ($\sim 20-40 \Omega \cdot m$) indique des valeurs de résistivité moyennes.
- Cela pourrait refléter la présence d'argile partiellement saturée d'eau ou de sols mixtes.

3. Profondeur moyenne (-0,15 à -0,35 m) :

- Nous observons des zones de couleur verte ($\sim 20 \Omega \cdot m$) à bleu clair ($\sim 9 \Omega \cdot m$).
- Cela suggère la présence de couches d'argile saturées d'eau, reflétant une conductivité plus élevée due à la présence d'eau.

4. Couche la plus profonde (-0,35 à -0,5 m) :

- Dans certaines zones, nous observons l'apparition de la couleur bleu foncé ($\sim 4 \Omega \cdot m$).
- Cela indique des valeurs de résistivité très faibles, reflétant la présence de couches d'argile complètement saturées d'eau.

Conclusions :

- **Gradient de résistivité :** Il y a un gradient de résistivité de la surface à la profondeur, reflétant les changements dans les propriétés de l'argile et des matériaux sous la surface.
- **Zones de faible résistivité :** La présence de zones à faible résistivité en profondeur indique des couches d'argile saturées d'eau, courantes dans les environnements argileux humides.
- **Zones de haute résistivité :** La présence de zones à haute résistivité suggère des couches plus sèches ou rocheuses, important pour comprendre la composition géologique et pour les travaux de forage ou de construction.

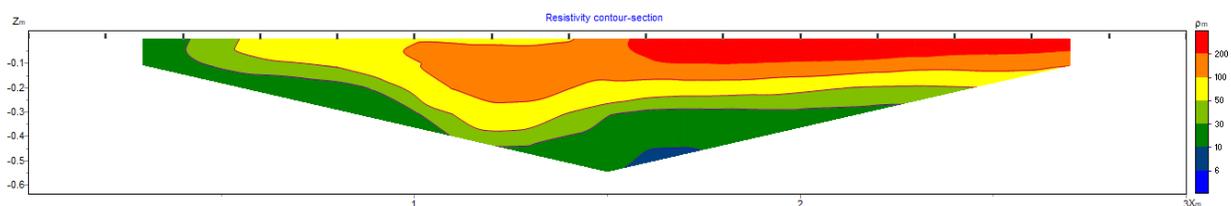


Fig.III.6. Modèle d'inversion des argiles utilisant la configuration Wenner-Schlumberger.

L'image montre une coupe tomographique des mesures de résistivité électrique utilisant la configuration Wenner-Schlumberger pour une couche des argiles. Voici une explication de l'image basée sur ce qui peut être observé :

1. Échelle des couleurs (ρ_m) : représente les valeurs de résistivité en ohm-mètre ($\Omega \cdot m$), avec le gradient de couleur suivant :

- **Bleu foncé :** valeurs de résistivité très faibles ($\sim 6 \Omega \cdot m$).
- **Bleu clair :** valeurs de résistivité faibles ($\sim 10 \Omega \cdot m$).
- **Vert :** valeurs de résistivité moyennes ($\sim 30-50 \Omega \cdot m$).
- **Jaune :** valeurs de résistivité élevées ($\sim 100 \Omega \cdot m$).

- **Orange à rouge** : valeurs de résistivité très élevées ($\sim 200 \Omega \cdot m$).

Interprétation géologique :

1. Couche de surface (0 à -0,1 m) :

- La couleur rouge à orange indique des valeurs de résistivité très élevées ($\sim 100-200 \Omega \cdot m$).
- Cela suggère la présence de matériaux peu conducteurs, probablement en raison de sols secs ou de roches.

2. Couche sous la surface (-0,1 à -0,2 m) :

- La couleur jaune ($\sim 50-100 \Omega \cdot m$) indique des valeurs de résistivité élevées.
- Cela pourrait refléter la présence d'argile partiellement saturée d'eau ou de sols mixtes.

3. Profondeur moyenne (-0,2 à -0,4 m) :

- Nous observons des zones de couleur verte ($\sim 30-50 \Omega \cdot m$).
- Cela suggère la présence de couches d'argile saturées d'eau, reflétant une conductivité plus élevée due à la présence d'eau.

4. Couche la plus profonde (-0,4 à -0,5 m) :

- Dans certaines zones, nous observons l'apparition de la couleur bleu foncé ($\sim 6-10 \Omega \cdot m$).
- Cela indique des valeurs de résistivité très faibles, reflétant la présence de couches d'argile complètement saturées d'eau.

Analyse géologique :

- **Côté gauche de la section** : Nous observons un gradient de couleurs du vert au bleu foncé, indiquant la présence de couches d'argile saturées d'eau.
- **Côté droit de la section** : Le gradient de couleurs du jaune à l'orange et au rouge indique des matériaux plus résistants, probablement en raison de sols secs ou de roches.

Conclusions :

- **Gradient de résistivité** : Il y a un gradient de résistivité de la surface à la profondeur, reflétant les changements dans les propriétés de l'argile et des matériaux sous la surface.

- **Zones de faible résistivité** : La présence de zones à faible résistivité en profondeur indique des couches d'argile saturées d'eau, courantes dans les environnements argileux humides.
- **Zones de haute résistivité** : La présence de zones à haute résistivité suggère des couches plus sèches ou rocheuses, important pour comprendre la composition géologique et pour les travaux de forage ou de construction.

III. Analyser les résultats des mesures de graviers :

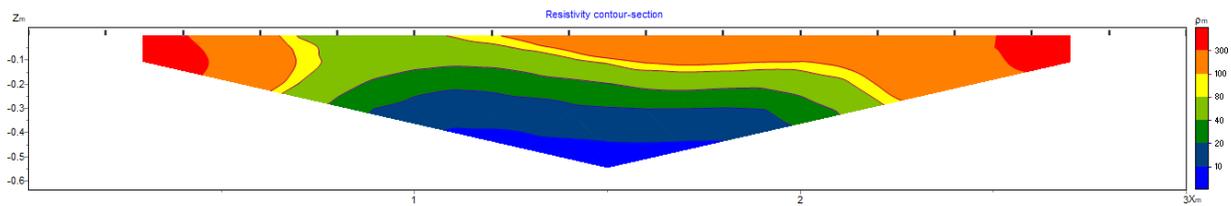


Fig.III.7. Modèle d'inversion des graviers utilisant la configuration dipôle-dipôle.

L'image montre une coupe tomographique des mesures de résistivité électrique utilisant la configuration dipôle-dipôle pour une couche de graviers. Voici une explication de l'image basée sur ce qui peut être observé :

1. L'échelle de couleurs : indique les valeurs de la résistivité électrique en ohm-mètre ($\Omega \cdot m$). Les différentes couleurs représentent différents niveaux de résistivité :

- **Bleu** : valeurs de résistivité faibles (environ $10 \Omega \cdot m$), ce qui indique généralement des matériaux à haute conductivité électrique, comme de l'argile saturée en eau.
- **Vert à jaune** : valeurs de résistivité moyennes (environ $40-80 \Omega \cdot m$), ce qui indique des matériaux à conductivité moyenne, comme du sable ou des graviers avec une certaine humidité.
- **Rouge** : valeurs de résistivité élevées (plus de $300 \Omega \cdot m$), ce qui indique des matériaux à faible conductivité électrique, comme des roches sèches ou des graviers secs.

L'analyse géologique :

- **La couche superficielle (haut de la coupe) :** montre des zones à haute résistivité (couleurs rouges), ce qui indique la présence de couches de graviers secs.
- **Les couches plus profondes :** montrent des zones à faible résistivité (couleurs bleues), ce qui peut indiquer la présence de couches saturées en eau ou de matériaux argileux sous les graviers.

L'interprétation géologique :

1. Couche superficielle (profondeur ~0 à -0,1 m) :

- Les couleurs rouges et orange indiquent des valeurs de résistivité élevées ($> 300 \Omega \cdot m$). Cela suggère que la couche superficielle est composée de graviers secs ou de matériaux similaires ayant une faible teneur en eau.

2. Couche intermédiaire (profondeur ~ -0,1 m à -0,3 m) :

- Les couleurs passent du jaune au vert, avec des valeurs de résistivité modérées (40-80 $\Omega \cdot m$). Cela pourrait indiquer des graviers ou des sédiments mélangés avec une certaine humidité, mais pas complètement saturés en eau.

3. Couche profonde (profondeur ~ -0,3 m à -0,5 m et au-delà) :

- Les couleurs varient du vert au bleu foncé, avec des valeurs de résistivité faibles (10-40 $\Omega \cdot m$). Ces faibles valeurs de résistivité suggèrent la présence de matériaux très conducteurs, probablement des argiles saturées en eau ou d'autres sédiments fins et humides.

Conclusions :

Cette coupe de résistivité révèle une stratification distincte des matériaux géologiques sous la surface :

- **Surface :** Dominée par des graviers secs ou légèrement humides.
- **Intermédiaire :** Matériaux modérément humides, peut-être des graviers mélangés avec du sable ou d'autres sédiments.

- **Profondeur** : Présence d'une couche conductrice, probablement saturée en eau, indiquant des matériaux argileux ou des aquifères.

Cette analyse aide à comprendre la structure géologique et les conditions hydrologiques du site étudié, ce qui est crucial pour des applications comme la gestion de l'eau souterraine, l'ingénierie géotechnique, ou les études environnementales.

En résumé, cette coupe nous donne un aperçu de la distribution géologique de la couche de graviers, avec des variations de résistivité électrique indiquant des changements dans la teneur en eau et les propriétés des matériaux sous la surface.

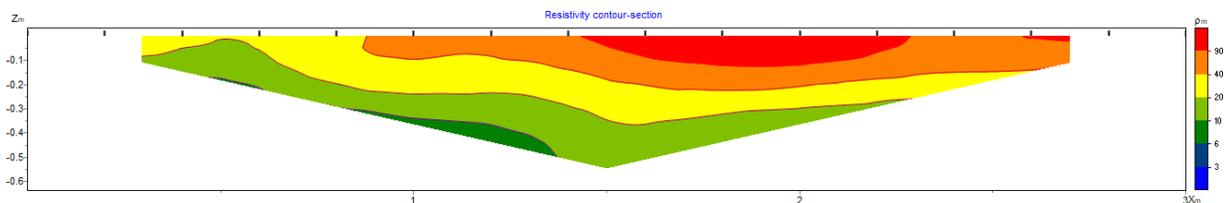


Fig.III.8. Modèle d'inversion des graviers utilisant la configuration Wenner Alpha.

L'image montre une coupe tomographique des mesures utilisant la configuration Wenner Alpha pour une couche de graviers. Voici une explication de l'image basée sur ce qui peut être observé :

1. L'échelle de couleurs : indique les valeurs de la résistivité électrique en ohm-mètre ($\Omega \cdot m$). Les différentes couleurs représentent différents niveaux de résistivité:

- **Bleu à vert foncé** : valeurs de résistivité faibles (3-20 $\Omega \cdot m$), ce qui indique des matériaux à haute conductivité électrique, comme de l'argile saturée en eau.
- **Jaune** : valeurs de résistivité moyennes (20-40 $\Omega \cdot m$), ce qui indique des matériaux à conductivité moyenne, comme du sable ou des graviers avec une certaine humidité.
- **Orange à rouge** : valeurs de résistivité élevées (80-90 $\Omega \cdot m$), ce qui indique des matériaux à faible conductivité électrique, comme des roches sèches ou des graviers secs.

L'analyse géologique :

- **La couche superficielle (haut de la coupe)** : montre des zones à haute résistivité (couleurs orange et rouge), ce qui indique la présence de couches de graviers secs.

- **Les couches plus profondes** : montrent des zones de résistivité faible à moyenne (couleurs vertes et jaunes), ce qui peut indiquer la présence de couches saturées en eau ou de matériaux argileux sous les graviers.

L'interprétation géologique :

1. Couche superficielle (0 à -0,1 mètre) :

- Les couleurs orange et rouge indiquent une résistivité élevée (80-90 $\Omega \cdot m$), ce qui suggère une couche de graviers secs ou de matériaux similaires.

2. Couche intermédiaire (environ -0,1 à -0,3 mètre) :

- Les couleurs jaunes indiquent une résistivité moyenne (20-40 $\Omega \cdot m$), ce qui indique des matériaux modérément humides comme du sable ou des graviers avec une certaine humidité.

3. Couche profonde (environ -0,3 à -0,5 mètre et au-delà) :

- Les couleurs vertes et foncées indiquent une résistivité faible (3-20 $\Omega \cdot m$), ce qui indique la présence de matériaux très conducteurs comme de l'argile saturée en eau ou des couches saturées en eau sous les graviers.

Conclusions :

cette image donne une vue détaillée de la distribution de la résistivité électrique dans une couche de graviers, reflétant les changements dans la composition du sol et la présence d'eau. Ces informations peuvent être utilisées pour évaluer les conditions géologiques et hydrologiques du site.

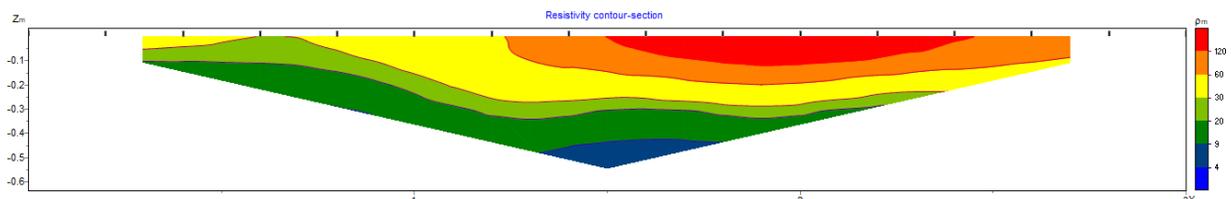


Fig.III.9. Modèle d'inversion des graviers en utilisant la configuration Wenner-Schlumberger.

L'image montre une coupe tomographique des mesures utilisant la configuration Wenner-Schlumberger pour une couche de graviers. Voici une explication de l'image basée sur ce qui peut être observé :

1. Échelle des couleurs (ρ_m) : représente les valeurs de résistivité électrique en ohm-mètre ($\Omega \cdot m$), avec le dégradé de couleurs comme suit :

- **Bleu foncé :** valeurs de résistivité très faibles ($\sim 4 \Omega \cdot m$).
- **Bleu clair :** valeurs de résistivité faibles ($\sim 9 \Omega \cdot m$).
- **Vert :** valeurs de résistivité moyennes ($\sim 20-30 \Omega \cdot m$).
- **Jaune :** valeurs de résistivité élevées ($\sim 40-60 \Omega \cdot m$).
- **Orange à rouge :** valeurs de résistivité très élevées ($\sim 80-120 \Omega \cdot m$).

L'analyse géologique :

- **Côté gauche de la section :** On observe un dégradé de vert à bleu foncé, indiquant la présence de couches de graviers saturés en eau.
- **Côté droit de la section :** Le dégradé de couleurs de jaune à orange et rouge indique la présence de matériaux plus résistants, peut-être en raison de sol sec ou de graviers denses.

Interprétation géologique :

1. Couche superficielle (0 à -0,1 m) :

- La couleur rouge à orange indique des valeurs de résistivité très élevées ($\sim 80-120 \Omega \cdot m$).
- Cela peut indiquer la présence de matériaux peu conducteurs, peut-être en raison de la présence de sol sec ou de graviers denses.

2. Couche sous-superficielle (-0,1 à -0,2 m) :

- La couleur jaune ($\sim 40-60 \Omega \cdot m$) indique des valeurs de résistivité élevées.
- Cela pourrait refléter la présence d'une couche de graviers secs ou mélangés avec d'autres matériaux.

3. Profondeur moyenne (-0,2 à -0,4 m) :

- La couleur verte ($\sim 20-30 \Omega \cdot m$) indique des valeurs de résistivité moyennes.

- Cela pourrait indiquer la présence de graviers humides ou mélangés avec un sol plus conducteur.

4. Couche plus profonde (-0,4 à -0,5 m) :

- On observe l'apparition de la couleur bleu foncé ($\sim 4-9 \Omega \cdot m$).
- Cela indique des valeurs de résistivité très faibles, reflétant la présence de couches de graviers saturés en eau ou de sol très conducteur.

Conclusions :

- **Gradient de résistivité** : Il existe un gradient de résistivité de la surface à la profondeur, reflétant les changements dans les propriétés des graviers et des matériaux sous-jacents.
- **Zones de faible résistivité** : La présence de zones à faible résistivité en profondeur indique la présence de couches de graviers saturés en eau, courantes dans les environnements humides.
- **Zones de haute résistivité** : La présence de zones à haute résistivité indique des couches plus sèches ou rocheuses, ce qui est important pour comprendre la composition géologique et pour toute activité de forage ou de construction potentielle.

IV. Analyser les résultats des mesures de sables:

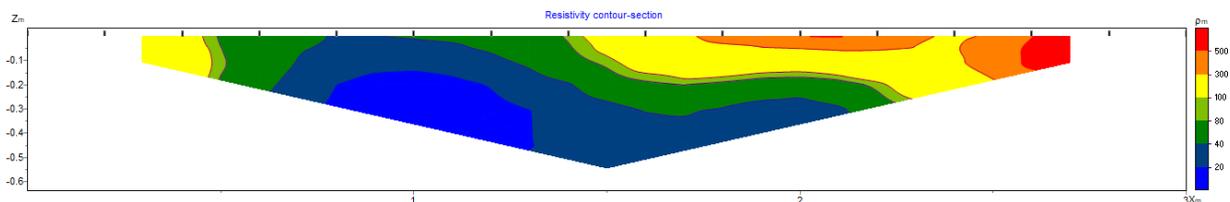


Fig.III.10. Modèle d'inversion des sables utilisant la configuration dipôle-dipôle.

L'image montre une coupe tomographique des mesures utilisant la configuration dipôle-dipôle pour une couche de sables. Voici une explication de l'image basée sur ce qui peut être observé :

1. Échelle des couleurs (ρ_m) : représente les valeurs de résistivité électrique en ohm-mètre ($\Omega \cdot m$), avec un dégradé de couleurs comme suit :

- **Bleu foncé** : valeurs de résistivité très faibles ($\sim 20 \Omega \cdot m$).
- **Bleu clair** : valeurs de résistivité faibles ($\sim 40 \Omega \cdot m$).
- **Vert** : valeurs de résistivité moyennes ($\sim 80 \Omega \cdot m$).
- **Jaune** : valeurs de résistivité élevées ($\sim 100-200 \Omega \cdot m$).
- **Orange à rouge** : valeurs de résistivité très élevées ($\sim 300-500 \Omega \cdot m$).

L'analyse géologique :

- **Côté gauche de la section** : montre un dégradé du jaune au vert, ce qui indique une transition de matériaux plus résistants (sable sec) à des matériaux moins résistants (sable humide ou saturé en eau).
- **Côté droit de la section** : montre un dégradé du jaune au rouge, ce qui indique la présence de matériaux plus résistants, peut-être en raison de la présence de couches sableuses sèches ou de matériaux rocheux.

Interprétation géologique :

1. Couche de surface (0 à -0,1 mètre) :

- La couleur jaune à orange indique des valeurs de résistivité élevées ($\sim 100-200 \Omega \cdot m$).
- Cela pourrait indiquer la présence de sable sec ou une couche de sol de surface sèche.

2. Couche sous-surface (-0,1 à -0,3 mètre) :

- La couleur verte à bleu clair ($\sim 40-80 \Omega \cdot m$) indique des valeurs de résistivité faibles à moyennes.
- Cela pourrait refléter la présence de sable humide ou de matériaux moins résistants comme des sables saturés en eau.

3. Couche plus profonde (-0,3 à -0,5 mètre) :

- La couleur bleu foncé ($\sim 20 \Omega \cdot m$) indique des valeurs de résistivité très faibles.
- Cela pourrait indiquer la présence de couches de sable saturées en eau ou de couches d'argile humide.

Conclusions :

- **Gradient de résistivité électrique** : il existe un gradient de résistivité électrique de la surface à la profondeur, reflétant les changements dans les propriétés des matériaux sableux sous la surface.
- **Zones de faible résistivité** : la présence de zones de faible résistivité en profondeur indique la présence de couches de sable saturées en eau, ce qui est courant dans les environnements humides.
- **Zones de haute résistivité** : la présence de zones de haute résistivité indique des couches plus sèches ou rocheuses, ce qui est important pour comprendre la structure géologique et toute activité potentielle de forage ou de construction.

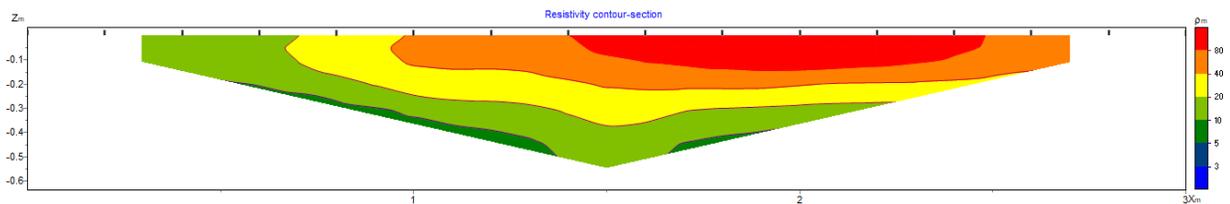


Fig.III.11. Modèle d'inversion des sables utilisant la configuration Wenner Alpha.

L'image montre une coupe tomographique des mesures utilisant la configuration Wenner Alpha pour une couche de sables. Voici une explication de l'image basée sur ce qui peut être observé :

1. Échelle des couleurs (ρ_m) : représente les valeurs de résistivité électrique en ohm-mètre ($\Omega \cdot m$), avec un dégradé de couleurs comme suit :

- **Bleu foncé à bleu clair** : valeurs de résistivité très faibles ($\sim 3-10 \Omega \cdot m$).
- **Vert** : valeurs de résistivité faibles ($\sim 20-30 \Omega \cdot m$).
- **Jaune** : valeurs de résistivité moyennes ($\sim 40-50 \Omega \cdot m$).
- **Orange à rouge** : valeurs de résistivité élevées à très élevées ($\sim 60-80 \Omega \cdot m$ et plus).

L'analyse géologique :

- **Côté gauche de la section :** montre un dégradé du vert au jaune, ce qui indique une transition de matériaux moins résistants (sable humide ou légèrement saturé) à des matériaux plus résistants (sable sec).
- **Centre de la section :** montre un dégradé du vert au bleu, indiquant une zone de faible résistivité potentiellement due à la saturation en eau.
- **Côté droit de la section :** montre un dégradé du jaune à l'orange et au rouge, indiquant la présence de matériaux plus résistants, probablement du sable sec.

Interprétation géologique :**1. Couche de surface (0 à -0,1 mètre) :**

- La couleur jaune à rouge indique des valeurs de résistivité élevées (~40-80 $\Omega \cdot m$ et plus).
- Cela pourrait indiquer la présence de sable sec ou d'une couche de sol de surface sèche.

2. Couche sous-surface (-0,1 à -0,3 mètre) :

- La couleur verte à jaune (~20-50 $\Omega \cdot m$) indique des valeurs de résistivité faibles à moyennes.
- Cela pourrait refléter la présence de sable humide ou de matériaux moins résistants comme des sables légèrement saturés en eau.

3. Couche plus profonde (-0,3 à -0,5 mètre) :

- La couleur vert clair à bleu (~3-30 $\Omega \cdot m$) indique des valeurs de résistivité très faibles à faibles.
- Cela pourrait indiquer la présence de couches de sable saturées en eau ou de couches d'argile humide.

Conclusions :

- **Gradient de résistivité électrique :** il existe un gradient de résistivité électrique de la surface à la profondeur, reflétant les changements dans les propriétés des matériaux sableux sous la surface.

- **Zones de faible résistivité** : la présence de zones de faible résistivité en profondeur indique la présence de couches de sable saturées en eau, ce qui est courant dans les environnements humides.
- **Zones de haute résistivité** : la présence de zones de haute résistivité indique des couches plus sèches, ce qui est important pour comprendre la structure géologique et toute activité potentielle de forage ou de **construction**.

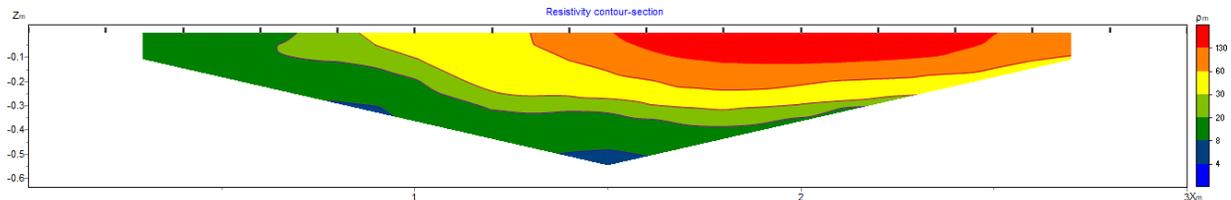


Fig.III.12. Modèle d'inversion des sables utilisant la configuration Wenner Schlumberger.

L'image montre une coupe tomographique des mesures utilisant la configuration Wenner Schlumberger pour une couche de sables. Voici une explication de l'image basée sur ce qui peut être observé :

1. Échelle des couleurs (pm) : représente les valeurs de résistivité électrique en ohm-mètre ($\Omega \cdot m$), avec un dégradé de couleurs comme suit :

- **Bleu foncé à bleu clair** : valeurs de résistivité très faibles ($\sim 4-10 \Omega \cdot m$).
- **Vert** : valeurs de résistivité faibles ($\sim 20-30 \Omega \cdot m$).
- **Jaune** : valeurs de résistivité moyennes ($\sim 40-50 \Omega \cdot m$).
- **Orange à rouge** : valeurs de résistivité élevées à très élevées ($\sim 60-130 \Omega \cdot m$ et plus).

L'analyse géologique :

- **Côté gauche de la section** : montre un dégradé du vert au jaune, ce qui indique une transition de matériaux moins résistants (sable humide ou légèrement saturé) à des matériaux plus résistants (sable sec).
- **Centre de la section** : montre un dégradé du vert au bleu, indiquant une zone de faible résistivité potentiellement due à la saturation en eau.

- **Côté droit de la section** : montre un dégradé du jaune à l'orange et au rouge, indiquant la présence de matériaux plus résistants, probablement du sable sec.

Interprétation géologique :

1. Couche de surface (0 à -0,1 mètre) :

- La couleur rouge à orange indique des valeurs de résistivité élevées (~60-130 $\Omega \cdot m$ et plus).
- Cela pourrait indiquer la présence de sable sec ou d'une couche de sol de surface sèche.

2. Couche sous-surface (-0,1 à -0,3 mètre) :

- La couleur jaune à vert (~20-50 $\Omega \cdot m$) indique des valeurs de résistivité faibles à moyennes.
- Cela pourrait refléter la présence de sable humide ou de matériaux moins résistants comme des sables légèrement saturés en eau.

3. Couche plus profonde (-0,3 à -0,5 mètre) :

- La couleur verte à bleu (~4-30 $\Omega \cdot m$) indique des valeurs de résistivité très faibles à faibles.
- Cela pourrait indiquer la présence de couches de sable saturées en eau ou de couches d'argile humide.

Conclusions :

- **Gradient de résistivité électrique** : il existe un gradient de résistivité électrique de la surface à la profondeur, reflétant les changements dans les propriétés des matériaux sableux sous la surface.
- **Zones de faible résistivité** : la présence de zones de faible résistivité en profondeur indique la présence de couches de sable saturées en eau, ce qui est courant dans les environnements humides.
- **Zones de haute résistivité** : la présence de zones de haute résistivité indique des couches plus sèches, ce qui est important pour comprendre la structure géologique et toute activité potentielle de forage ou de construction.

V. Analyser les résultats des mesures d'alluvions :

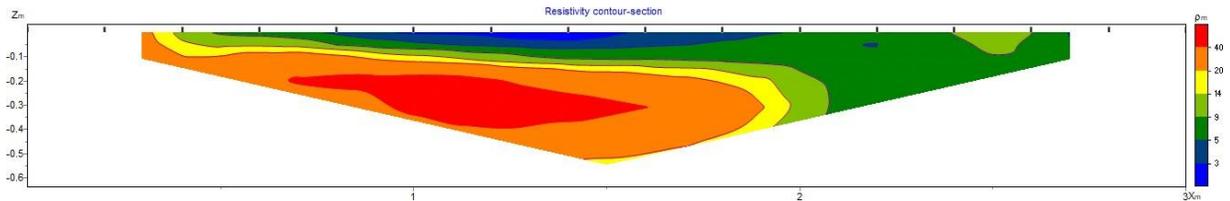


Fig.III.13. Modèle d'inversion des alluvions utilisant la configuration dipôle-dipôle.

L'image montre une coupe tomographique des mesures utilisant la configuration dipôle-dipôle pour une couche d'alluvions. Voici une explication de l'image basée sur ce qui peut être observé:

1. Échelle de couleurs (ρ_m) : représente les valeurs de résistivité électrique en ohm-mètre ($\Omega \cdot m$), avec la gradation de couleurs suivante :

- **Bleu :** valeurs de résistivité très faibles ($\sim 3 \Omega \cdot m$).
- **Vert :** valeurs de résistivité moyennes ($\sim 9 \Omega \cdot m$).
- **Jaune :** valeurs de résistivité élevées ($\sim 20 \Omega \cdot m$).
- **Orange/Rouge :** valeurs de résistivité très élevées ($\sim 40 \Omega \cdot m$).

L'analyse géologique :

- **Côté gauche de la section :** On observe une large zone de haute résistivité (rouge) s'étendant de la profondeur intermédiaire à la profondeur, ce qui suggère la présence possible de roches solides ou de matériaux secs.
- **Côté droit de la section :** On observe des dégradés de résistivité du vert au jaune, indiquant des variations dans le type de sol ou les matériaux sous la surface, pouvant être dues à une structure géologique complexe ou à des variations d'humidité.

Interprétation géologique :

1. Couche de surface (0 à -0,1 m) :

- La couleur bleue et verte indique des valeurs de résistivité faibles à moyennes ($\sim 3-9 \Omega \cdot m$).

- Cela suggère la présence de matériaux conducteurs, tels que des sols humides ou argileux, courants dans les zones alluvionnaires proches des rivières ou des nappes phréatiques.

2. Couche proche de la surface (-0,1 à -0,2 m) :

- On observe une légère augmentation de la résistivité avec une transition vers le vert et le jaune ($\sim 9-20 \Omega \cdot m$).
- Cela pourrait indiquer la présence de matériaux moins conducteurs, tels que du sable ou du gravier partiellement saturé en eau.

3. Profondeur intermédiaire (-0,2 à -0,3 m) :

- Des zones en jaune à orange apparaissent ($\sim 20-40 \Omega \cdot m$).
- Cela indique des matériaux à résistivité plus élevée, tels que du sable sec, du gravier ou des roches altérées contenant moins d'humidité.

4. Couche plus profonde (-0,3 à -0,5 m) :

- La résistivité augmente considérablement, avec une couleur rouge apparaissant ($\sim 40 \Omega \cdot m$).
- Cela indique la présence de matériaux à très haute résistivité, tels que des roches solides ou très sèches ou des matériaux peu poreux comme des roches volcaniques.

Conclusions :

- **Gradient de résistivité :** Le gradient clair de résistivité de la surface à la profondeur reflète les variations des propriétés des sols et des matériaux sous la surface.
- **Zones de haute résistivité :** La présence de zones à haute résistivité en profondeur peut indiquer des couches rocheuses solides ou des matériaux peu poreux, ce qui est important pour comprendre la structure géologique et pour les applications de forage ou de construction.
- **Distribution des matériaux alluvionnaires :** La distribution des couleurs reflète les changements dans la composition des alluvions, allant des sols argileux humides aux sables et graviers, et enfin aux roches solides.

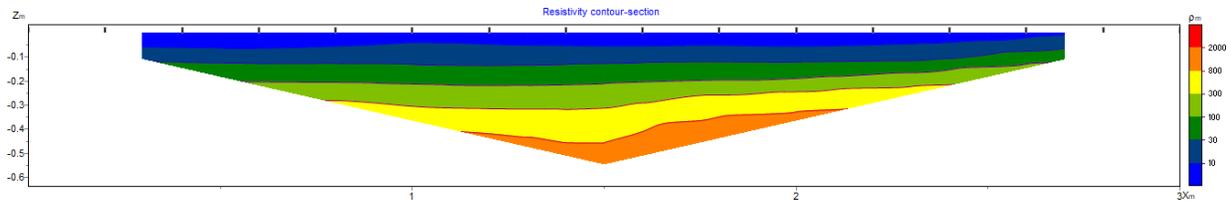


Fig.III.14. Modèle d'inversion des alluvions utilisant la configuration Wenner Alpha.

L'image montre une coupe tomographique des mesures utilisant la configuration Wenner Alpha pour une couche d'alluvions. Voici une explication de l'image basée sur ce qui peut être observé:

1. Échelle de couleurs (ρ_m) : représente les valeurs de résistivité électrique en ohm-mètre ($\Omega \cdot m$), avec la gradation de couleurs suivante :

- **Bleu foncé :** représente des zones de faible résistivité (10 Ohm-mètre), ce qui indique la présence de matériaux comme l'argile ou le sol saturé d'eau.
- **Bleu clair à vert :** représente des zones de résistivité moyenne (30-100 Ohm-mètre), pouvant indiquer des matériaux comme le sable ou le limon.
- **Jaune à orange :** représente des zones de résistivité plus élevée (200-800 Ohm-mètre), ce qui indique la présence de matériaux comme le gravier ou les roches.
- **Rouge :** représente des zones de très haute résistivité (2000 Ohm-mètre), ce qui peut indiquer la présence de roches solides ou complètement sèches.

Conclusions :

L'image représente une coupe transversale de la distribution de la résistivité électrique dans la couche alluviale, aidant à comprendre la composition de la couche géologique étudiée et à identifier les composants du sol et des roches présents.

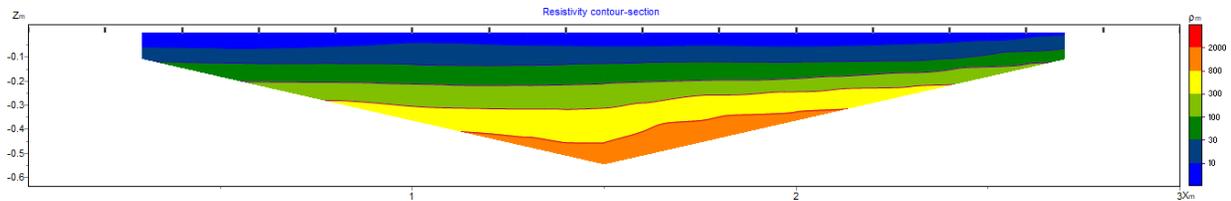


Fig.III.15. Modèle d'inversion des alluvions utilisant la configuration Wenner-Schlumberger.

L'image montre une coupe tomographique des mesures utilisant la configuration Wenner-Schlumberger pour une couche d'alluvions. Voici une explication de l'image basée sur ce qui peut être observé :

1. Échelle de couleurs (ρm) : représente les valeurs de résistivité électrique en ohm-mètre ($\Omega \cdot m$), avec la gradation de couleurs suivante :

- **Bleu foncé :** représente des zones de faible résistivité (10 Ohm-mètre), ce qui indique la présence de matériaux comme l'argile ou le sol saturé d'eau.
- **Bleu clair à vert :** représente des zones de résistivité moyenne (30-100 Ohm-mètre), pouvant indiquer des matériaux comme le sable ou le limon.
- **Jaune à orange :** représente des zones de résistivité plus élevée (200-800 Ohm-mètre), ce qui indique la présence de matériaux comme le gravier ou les roches.
- **Rouge :** représente des zones de très haute résistivité (2000 Ohm-mètre), ce qui peut indiquer la présence de roches solides ou complètement sèches.

Conclusions :

L'image représente une coupe transversale de la distribution de la résistivité électrique dans la couche alluviale, aidant à comprendre la composition de la couche géologique étudiée et à identifier les composants du sol et des roches présents.

VI. Résultats :

1. Résultats des mesures pour une couche de gypse :

- **Distribution de la résistivité électrique :**

- Des valeurs élevées en surface et dans les couches intermédiaires indiquent la présence de gypse sec.
- Des valeurs faibles en profondeur suggèrent des zones saturées en eau ou de l'argile.

2. Résultats des mesures pour une couche d'argile :

- **Distribution de la résistivité électrique :**
 - Un gradient de résistivité de la surface à la profondeur reflète les variations des propriétés de l'argile.
 - Les zones de faible résistivité en profondeur indiquent des couches d'argile saturées d'eau.
 - Les zones de haute résistivité suggèrent des couches rocheuses ou des matériaux peu poreux.

3. Résultats des mesures pour une couche de graviers :

- **Distribution de la résistivité électrique :**
 - Couches sèches ou légèrement humides en surface.
 - Matériaux modérément humides dans les couches intermédiaires.
 - Présence d'une couche conductrice en profondeur, probablement saturée en eau, indiquant des matériaux argileux ou des aquifères.

4. Résultats des mesures pour une couche de sable :

- **Distribution de la résistivité électrique :**
 - Un gradient de résistivité de la surface à la profondeur reflète les changements dans les propriétés du sable.
 - Les zones de faible résistivité en profondeur indiquent des couches de sable saturées en eau.
 - Les zones de haute résistivité indiquent des couches sèches ou rocheuses.

5. Résultats des mesures pour une couche d'alluvions :

- **Distribution de la résistivité électrique :**
 - Un gradient clair de résistivité de la surface à la profondeur reflète les variations des propriétés des sols alluvionnaires.
 - Les zones de haute résistivité en profondeur indiquent des couches rocheuses solides ou des matériaux peu poreux.

- La distribution des couleurs reflète les changements dans la composition des alluvions, allant des sols argileux humides aux sables et graviers, et enfin aux roches solides.

Conclusion Générale

- L'Algérie est l'un des plus grands pays du monde et du continent africain, car il contient une grande diversité de réservoirs souterrains de ressources diverses. C'est pourquoi les chercheurs dans ce domaine se concentrent sur la reconnaissance géologique, et Ouargla fait partie des Etats présentant une grande diversité souterraine. Dans ce chapitre, nous nous concentrerons sur la définition de la région et de la situation géographique de la région de N'goussa dans l'État de Ouargla, au sud-est de l'Algérie.
- Les images tomographiques en trois dimensions créées à partir de ces données aident à identifier les variations dans les formations du sol, fournissant aux géophysiciens et géologues une compréhension approfondie des caractéristiques de la zone étudiée. Cette étude aide à gérer les ressources naturelles et à développer des stratégies pour la conservation des sols et des eaux.
- Les différentes configurations de résistivité électrique permettent de détailler la composition et la présence d'eau dans diverses couches géologiques. Les résultats obtenus aident à évaluer les conditions géologiques et hydrologiques des sites étudiés, fournissant des informations cruciales pour des applications telles que la gestion de l'eau souterraine, l'ingénierie géotechnique, le forage, et les études environnementales. Les valeurs de résistivité varient en fonction de la saturation en eau, de la composition du sol, et de la présence de matériaux conducteurs ou résistifs, fournissant une image complète des sous-sols analysés.

Bibliographie

- [1] Abderrazak khadraoui, *Soils and agricultural hydraulics in the Algerian Oases _ P163*.
- [2] Lelièvre, 1969 in ANRH, 2011.
- [3] “Carte topographique Algérie, altitude, relief.” Accessed: Jun. 24, 2024. [Online]. Available: <https://fr-fr.topographic-map.com/map-nd3q/Alg%C3%A9rie/?center=32.77172%2C4.51311&zoom=16&base=5>
- [4] “Carte géologique de la cuvette de Ouargla | Download Scientific Diagram.” Accessed: Jun. 15, 2024. [Online]. Available : https://www.researchgate.net/figure/Carte-geologique-de-la-cuvette-de-Ouargla-18_fig1_279155240
- [5] ANRH, 2004.- Data from technical sheets of drilling in the Wilaya of Ouargla. National Agency for Hydraulic Resources, South Regional Directorate, Ouargla, scanned documents. Google earth.”
- [6] “Tomographie de la résistivité électrique _ FicheERT”.
- [7] “Identique à la référence précédente :Tomographie de la résistivité électrique _ FicheERT 1”.
- [8] “Identique à la référence précédente :Tomographie de la résistivité électrique _ FicheERT 2”.
- [9] “Identique à la référence précédente :Tomographie de la résistivité électrique _ FicheERT 3”.
- [10] “Identique à la référence précédente :Tomographie de la résistivité électrique _ FicheERT 5”.
- [11] “Identique à la référence précédente :Tomographie de la résistivité électrique _ FicheERT 6”.
- [12] “Identique à la référence précédente :Tomographie de la résistivité électrique _ FicheERT 7”.
- [13] “Identique à la référence précédente :Tomographie de la résistivité électrique _ FicheERT 8”.

[14] “Identique à la référence précédente :Tomographie de la résistivité électrique _
FicheERT 9”.