

## Département des Sciences de la Terre

### Licence des Sciences et Techniques Eau & Environnement

### Mémoire de projet de fin d'étude

Application de la tomographie de la résistivité électrique à  
la reconnaissance de la zone de Sidi Bouzid (Région de  
Chichaoua, Maroc) : Implications hydrogéologiques

Réalisé par : **Meriem JEBBOURI, Nada RHAZZAOUI et Meriem  
TALEBY**

Soutenu le :19 juin 2023

Devant la commission d'examen composée de :

Encadrant interne	M. Mohammed JAFFAL , FST Marrakech
Encadrant externe	M. Abdelaziz HARROUD, 4GEO Marrakech
Examineur	M. AZZOUZ KCHIKACH, FST Marrakech

**Année universitaire 2022-202**

## Remerciements

Dans un premier temps , on remercie Dieu le Tout Puissant de nous avoir donné la volonté, la santé et le courage pour réaliser ce travail.

En entamant la rédaction de ce rapport, nous présentons nos sincères remerciements et notre profonde gratitude à notre encadrant JAFFAL Mohamed, professeur à la Faculté des Sciences et technique, pour sa disponibilité, sa collaboration, sa modestie ,sa sympathie, pour ses compétences, sa pédagogie et ses directives fructueuses qu'elle n'a jamais cessés de nous prodiguer tout au long de ce travail.

Nous tenons à remercier très vivement Monsieur MOSTADRAF Jalal, professeur et responsable de la filière EAU ET ENVIRONNEMENT, pour son intervention et son précieux soutien, grâce à sa généreuse et sa confiance nous avons eu cette opportunité pour réaliser ce stage. Nous tenons à remercier également tout le personnel de bureau d'étude 4GEO . Et plus particulièrement à notre encadrant externe Monsieur HARROUD Abdelaziz pour nous avoir apporté assistant tout le long de ce travail .

Nous adressons aussi nos plus vives remerciements du fond du cœur à notre professeur Monsieur KCHIKACH pour sa présence, son rôle en tant que jury est d'une importance cruciale, nous sommes honorés d'avoir eu la chance de bénéficier de son évaluation et son soutien .

Et finalement Nous adressons nos sincères remerciements aux membres de nos familles qui n'ont jamais hésité à nous offrir le meilleur d'eux-mêmes, et surtout les parents qui nous supportent.

## Table des matières

INTRODUCTION .....	3
I. CONTEXTE DE L'ETUDE .....	4
I.1- Situation géographique .....	4
I.2- Aperçu sur la géologie régional .....	5
I.3- Géologie local .....	9
I.3- Cadre hydrogéologique .....	10
II. METHODE GEOPHYSIQUE UTILISEE .....	13
II.1. Principe général de la méthode de tomographie électrique .....	13
II.2. Mise en œuvre d'un levé de tomographie électrique .....	18
III. PROSPECTION GEOPHYSIQUE DU SITE DE SIDI BOUZID .....	22
III.1. Acquisition des données .....	22
III.2. Traitement et interprétation .....	23
CONCLUSIONS .....	34
Références bibliographiques .....	35

## INTRODUCTION

Au cours des dernières décennies, le Maroc a été fortement affecté par les effets du changement climatique à l'origine de la succession de plusieurs années et périodes de sécheresse. Cette situation a engendré une raréfaction des ressources en eaux en particulier dans les régions à climat aride et semi-aride. Ainsi, de nos jours, on assiste à une intensification de l'exploitation des eaux souterraines pour subvenir aux besoins de la population que ce soit pour l'usage domestique ou pour l'irrigation. Cependant, la mobilisation de ces ressources nécessite une bonne connaissance des aquifères et réservoirs souterrains. D'où l'intérêt de l'utilisation des méthodes géophysiques qui permettent la reconnaissance indirecte et non destructives du sous-sol et fournissent des informations sur la structure des aquifères. Parmi les techniques géophysiques les plus utilisées en exploration hydrogéologique la tomographie de la résistivité électrique (ERT). C'est une méthode de prospection qui permet d'établir des images précises de la distribution de la résistivité électrique sous forme de modèles sous-sol en coupes verticales qui renseignent sur l'agencement des unités lithologiques et structurales en rapport avec le système aquifère de la zone étudié.

Le bureau d'étude 4GEO et a été sollicité pour appliquer cette méthode sur une propriété agricole situé dans près de la localité de Sidi Bouzid à quelques kilomètres au sud-ouest de la ville de Chichaoua (Fig. I.1), dans le but d'identifier des zones d'implantation de nouveaux forages d'exploitation des eaux souterraines. Lors de cette étude les mesures ERT ont réalisées selon un réseau de neuf profils orientés selon différentes directions. Notre stage de fin d'étude porte sur l'interprétation des résultats de ce levé.

Ce mémoire est structuré en trois sections portant successivement sur (1) la présentation du contexte de l'étude, (2) la présentation de la méthode ERT et (3) l'interprétation et la discussion des résultats de la prospection du site de Sidi Bouzid.

# I. CONTEXTE DE L'ETUDE

## I.1- Situation géographique

Notre zone d'étude se situe au niveau de la commune rurale de Sidi Bouzid dans la province de Chichaoua qui fait partie de la région de Marrakech-Tensift-Al Haouz. La localité de Sidi Bouzid représente une agglomération rurale de 9000 habitants qui se situe à 75 km à vol d'oiseau à l'ouest de la ville de Marrakech. L'accès à la zone d'étude, à partir de Chichaoua, se fait en empruntant la route nationale N8 en direction d'Imintanoute sur 6 km, puis une piste carrossable qui bifurque vers l'Ouest au niveau de Sidi Bouzid sur environ 1 km (Fig. I.1 et I.2)



Figure I.1. Situation générale de la zone d'étude





Figure I.2. Localisation de la zone d'étude par rapport à la ville de Chichaoua

## I.2- Aperçu sur la géologie régional

La plaine d'Ouled Bou Sbaa est une vaste étendue à relief relativement plat où l'altitude est de l'ordre de 300 m à 600 m en allant du nord vers le sud. Elle correspond à un synclinal crétacé-éocène recouvert d'une pellicule quaternaire s'étendant sur une superficie de l'ordre de 1600 Km<sup>2</sup> à l'Ouest de Chichaoua. Cette plaine est séparée de celle de Mejjate par le plateau des M'tougas qui correspond avec l'anticlinal de Marmouta. De point de vue géologique, notre zone d'étude se situe sur la bordure orientale de cette plaine qui fait partie du bassin d'Essaouira. A l'échelle régionale, cette zone est formée par une série stratigraphique méso-cénozoïque qui repose en discordance sur le socle hercynien. Les formations du Crétacé supérieur sont représentées par des marnes, des argiles et des calcaires, tandis que les formations du Paléogène sont constituées de grès, de sables et de calcaires (Fig. I.3).

L'épaisseur des différentes couches géologiques varie d'une zone à l'autre. Les formations géologiques du Tertiaire et Quaternaire peuvent atteindre jusqu'à 600 m d'épaisseur alors que celles du Crétacé atteignent 1800 m

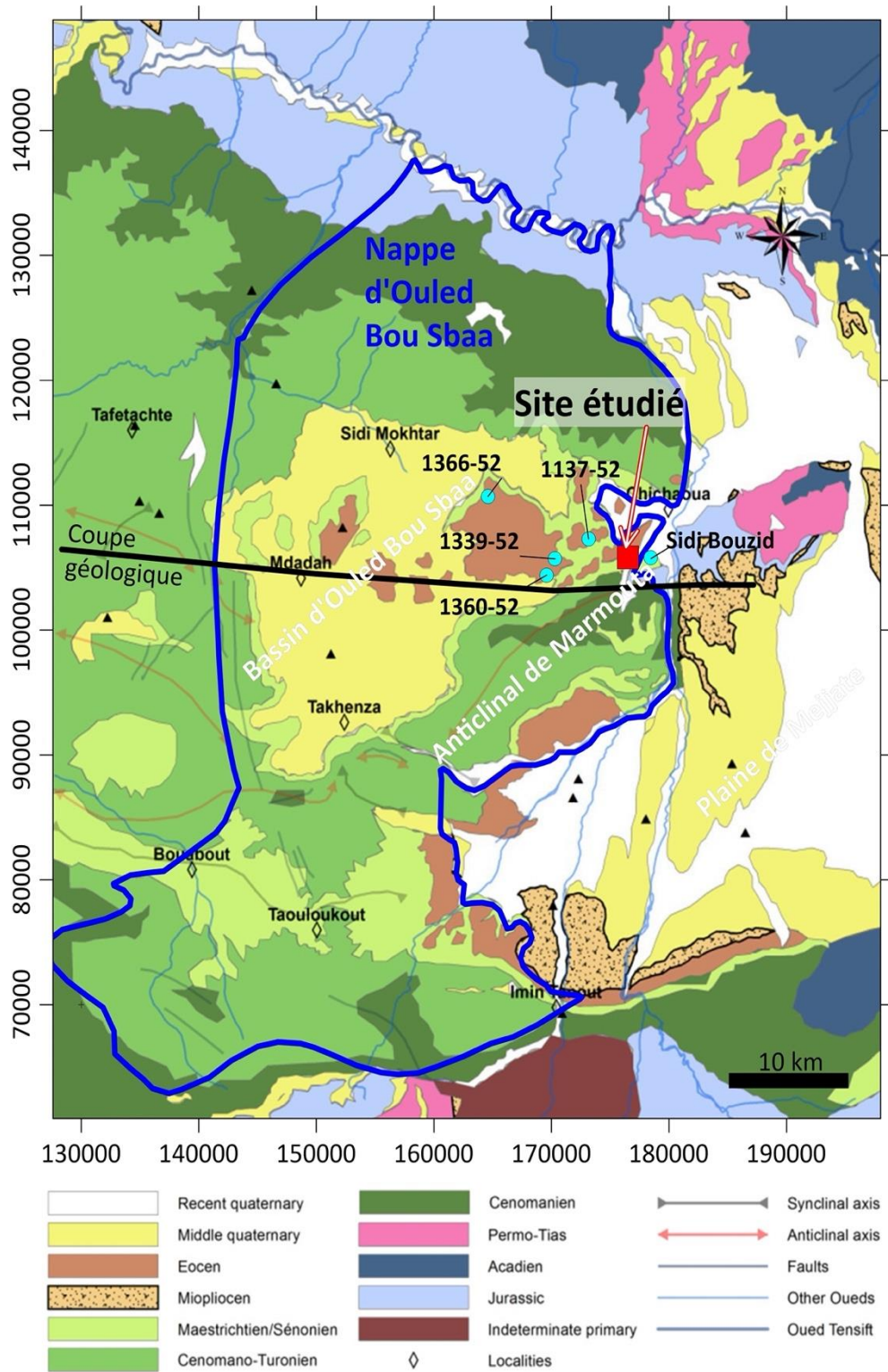


Figure I.3. Carte géologique régionale montrant la situation du site étudié par rapport au bassin d'Ouled Bou Sbaa.

De point de vue structural, les formations géologiques du bassin des Ouled Bou Sbaa sont affectées par des failles et des plis qui témoignent d'une activité tectonique dans la région en relation avec la mise en place de la chaîne du Haut-Atlas qui bordent la région. La figure I.4



montre une coupe géologique qui s'étend depuis la terminaison occidentale du bassin d'Ouled Bou Sbaa jusqu'à la plaine de Mejjate qui constitue l'extrême ouest du bassin du Haouz. Cette coupe illustre la structure synclinale faiblement plissée du bassin d'Ouled Bou Sbaa, avec une terminaison en biseau des formations du crétacé supérieur et de l'éocène à l'Est du bassin à l'approche de l'anticlinal de Marmouta qui le sépare du synclinale de Mejjate. La cuvette d'Ouled Bou Sbaa montre des formations éocènes en surface reposant sur des calcaires du Cénomaniens-Turonien. Ces structures recouvrent des marnes vertes et des marno-calcaires du Crétacé inférieur (Fig. I.4).

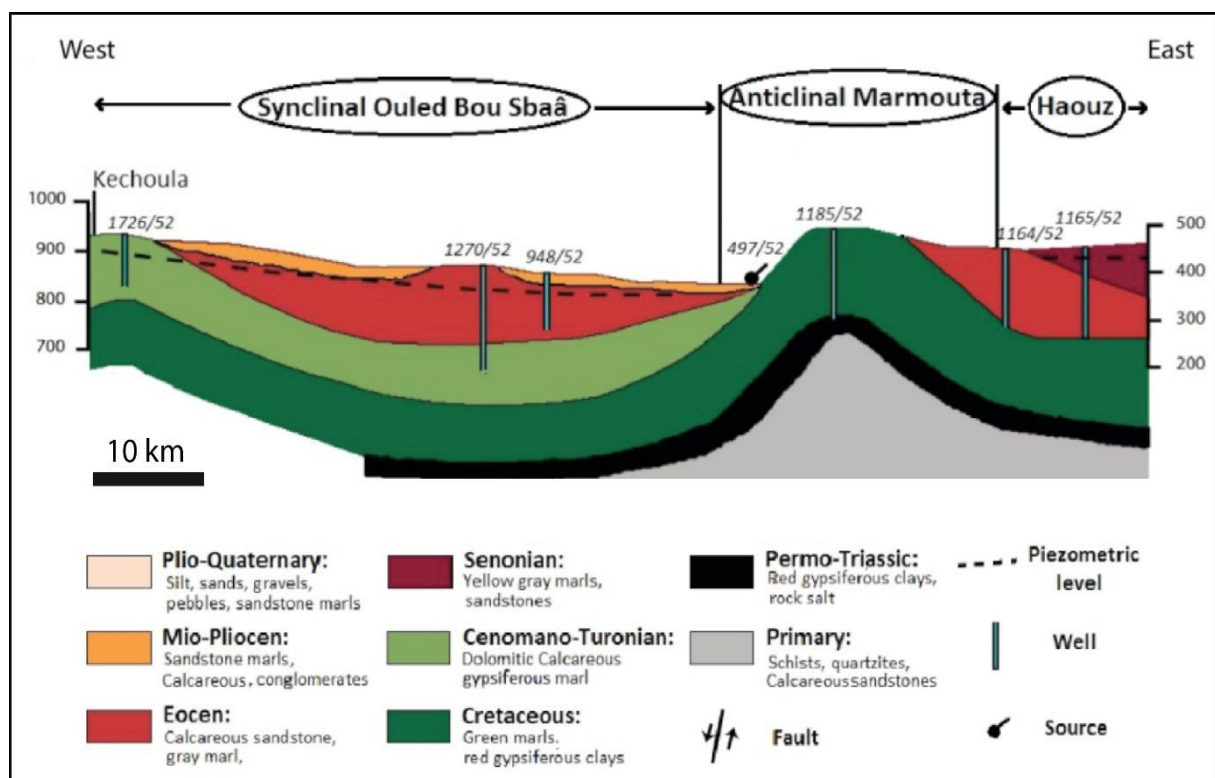


Figure I.4. Coupe géologique à travers le bassin d'Ouled Bou Sbaa (Tijani et al. 2022). La localisation de la coupe est indiquée sur la figure I.3.

A grande échelle, de point de vue tectonique, l'histoire géologique de la région caractérisée par l'individualisation, de l'Ouest vers l'Est et du Sud vers le Nord des unités structurales suivantes :

- Une zone sub-atlasique septentrionale en bordure de l'atlas, constituée par des couvertures secondaire et tertiaire.

- Un sillon Nord atlasique qui correspond au synclinal de Mejjate de direction Est – Ouest, dont son flanc sud est fortement redressé au niveau d'Imintanout.
- L'anticlinal de Marmouta d'axe Sud Ouest - Nord Est, passant à 6 Km environ au sud de Chichaoua.
- Une zone synclinale d'Ouled Bou Sbaâ, avec une couverture plio-quaternaire de 80 mètres d'épaisseur vers le centre masquant les formations Eocène.

L'évolution géodynamique de la plaine est contrôlée par une tectonique de blocs avec :

- Un socle primaire affecté par une orogénèse hercynienne.
- La couverture secondaire et tertiaire contrôlé par une orogénèse alpine, avec une distension permo-triasique et deux phases compressives d'âge tertiaire (Amrhar 1995, Amrhar 2002).

### I.3- Géologie local

A l'échelle locale, le site prospecté se situe au niveau de l'extrémité Est du bassin d'Ouled Bou Sbaa, à l'approche du flanc nord de l'anticlinal de Marmouta, dans une zone dominée par les terrains du Crétacé supérieur et de l'Eocène (Fig. I.3). Les rares sondages dont on dispose, réalisés par l'Agence du Bassin Hydraulique de Tensift (ABHT) aux alentours de notre zone d'étude, atteignent des profondeurs variant de 100 à 250 m (Fig. I.5). Les formations géologiques traversées par ces sondages sont décrites sans aucune indications sur leurs âges (Fig. I.5). Le sondage 1366/52, le plus éloigné, met principalement en évidence une formations marneuse qu'il recoupe sur 150 m. Les trois autres (1360-52, 1339/52 et 1137/52), qui occupent des positions de plus en plus proches du site étudié, révèlent l'existence d'une série sédimentaire formée d'une alternance des couches de marnes dans lesquelles s'intercalent des bancs plus ou moins épais de calcaire. Le banc de calcaire supérieur devient plus épais au niveau du sondage le plus proche de notre zone d'étude. Enfin le sondage de Sidi Bouzid situé à la proximité du site prospecté du côté Est a recoupé, sur 100 m, une série de formations rocheuse (calcaires, grès, etc.).

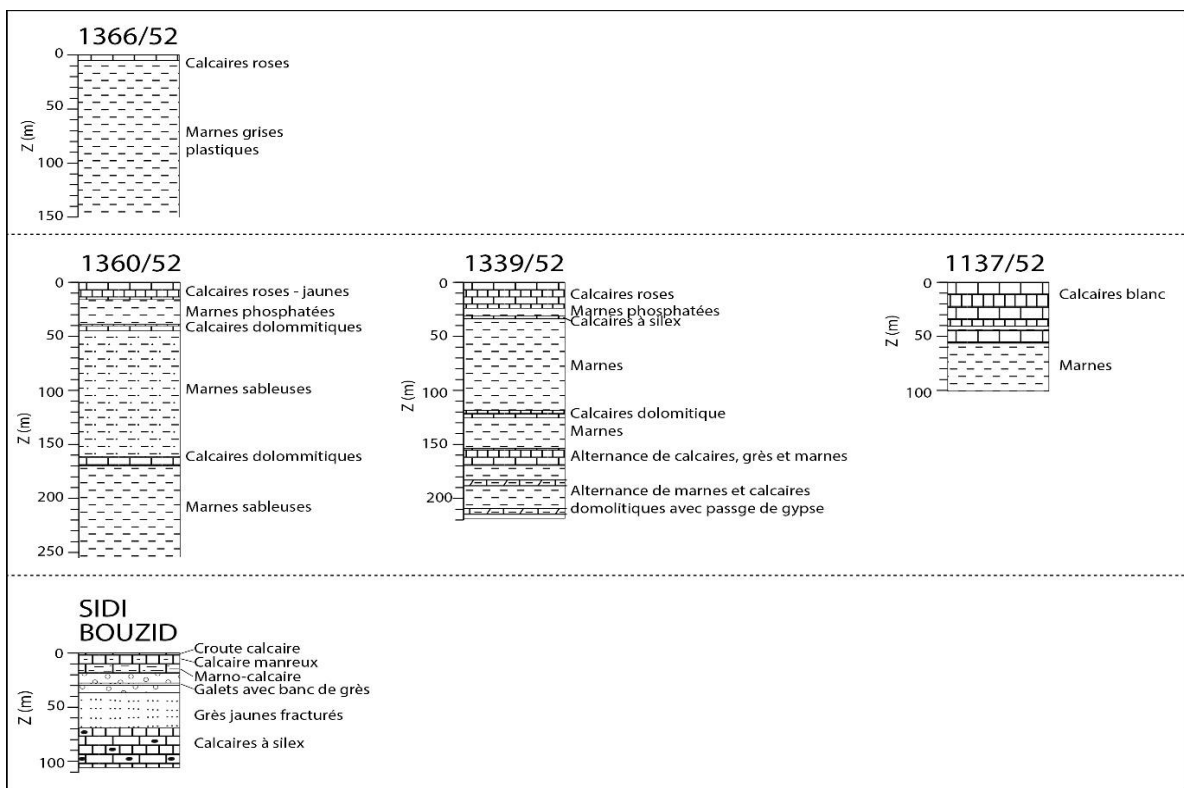


Figure I.5. Log lithologique de quelques sondages réalisés par l'ABHT aux alentours de notre zone étude (Afraou, 2020)

### I.3- Cadre hydrogéologique

Sur le plan hydrogéologique, notre zone d'étude se situe au niveau de la nappe d'Ouled Bou Sbaa qui est localisée dans la cuvette synclinale qui porte le même nom et qui occupe la partie Est du bassin d'Essaouira-Chichaoua (Fig. I.3). Cette nappe est limitée à l'ouest par le bassin de Meskala-Kourimat, à l'est par l'oued Chichaoua, marquant la limite avec la nappe du Haouz Mejjate , au sud par le Haut-Atlas et au nord par l'oued Tensift.

Trois aquifères principaux sont reconnus dans cette zone (Tijani et al. 2022). Il s'agit d'aquifères du Quaternaire, du Turonien et du Vraconien (Crétacé inférieur) représentant un système aquifère complexe.

- La nappe du Quaternaire est limitée par les marnes vertes du Coniacien. L'épaisseur de l'aquifère est variable mais augmente en allant vers le centre de la plaine.
- L'aquifère profond des calcaires turoniens, limité par les marnes grises cénomaniennes, s'étend à presque tous les bassins sauf dans les zones des structures anticlinales où les formations vraconiennes et cénomaniennes. L'épaisseur de cet aquifère varie de 20 m dans la cuvette de Sidi Mokhrtar à 200 m vers l'Est et le Sud.
- L'aquifère profond du calcaire vraconien limité par les marnes vertes de l'Aptien couvre la quasi-totalité du bassin sauf dans les zones anticlinales. La hauteur du mur vraconien varie de 850 à 1400 m par rapport au niveau de la mer.

On ajoutant à ces aquifères des autres secondaires tel que l'aquifère éocène qui représente la série des phosphates

Le système hydrologique de la zone d'étude a montré l'existence des séries imperméables et perméables qui peuvent permettre l'écoulement d'eaux souterraines interstitielles ou fissurées. La circulation des eaux souterraines est principalement longitudinale mais peut être transversale dans les relais anticlinaux et les failles. La profondeur des eaux souterraines varie de 22 à 240 m sous le niveau du sol.

L'existence de plusieurs niveaux aquifères superposés et l'absence de captages d'eau dans des nombreux secteurs, rendent difficiles la réalisation d'une carte piézométrique précise dans la plaine de Bou Sbaâ. Cependant, les données collectées nous ont permis d'établir la carte du niveau piézométrique illustrée sur la figure I.6 ci-dessous. Ce document montre que la nappe d'Ouled Bou Sbaa est caractérisée par un écoulement des eaux souterraines qui se fait du sud



vers le nord en direction de l'Oued Tensift qui en constitue la limite septentrionale (Soukrate et Zahir, 2019). Les gradients hydrauliques sont plus élevés en amont.

Dans la commune de Sid El Mokhtar, on observe une zone à piézométrie déprimée due à l'activité de pompage concentrée autour de cette localité, liée principalement à l'activité agricole.

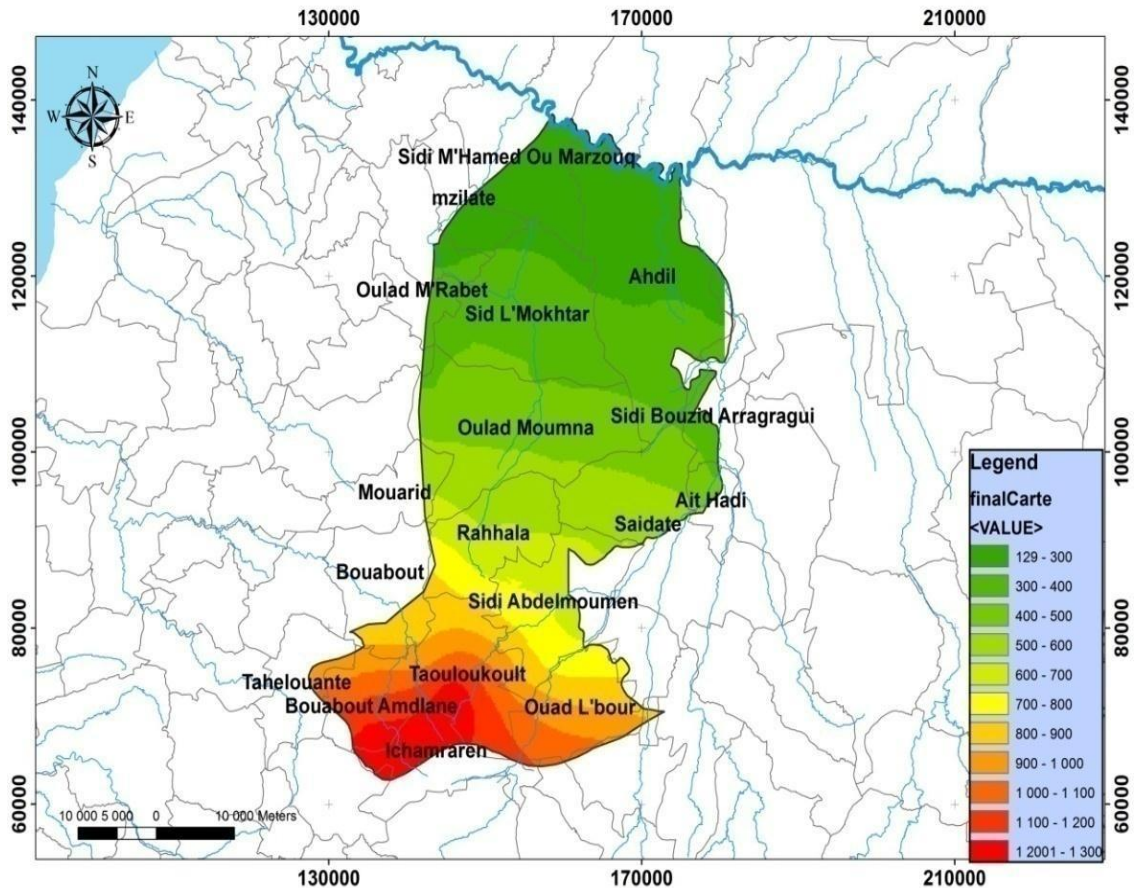


Figure I.6. Carte piézométrique de la nappe d'Ouled Bou Sbaa (Soukrate et Zahir, 2019)

L'analyse de l'évolution de la profondeur de la nappe d'Ouled Bou Sbaa permet de constater une diminution progressive de l'ordre de 20 m du niveau piézométrique au cours de la période allant de 2012 à 2018 (Fig. I.7). On observe aussi la présence des pics qui surviennent de temps à autre et qui correspondent à des variations saisonnières. Cette baisse du niveau piézométrique observée à l'échelle de la nappe de Bou Sbaa est due essentiellement à la surexploitation des eaux souterraines pour subvenir aux besoins de l'activité agricole.

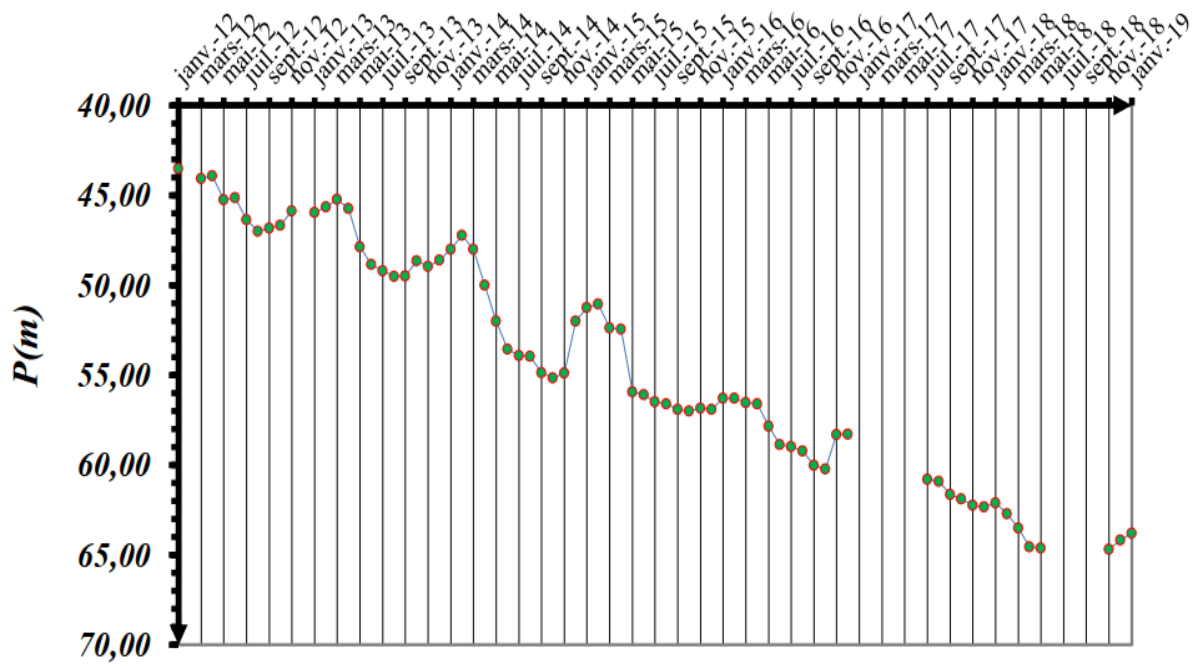


Fig. I.7. Evolution de la profondeur de la nappe d'Ouled Bou Sbaa entre 2012 et 2019 (Forage 2096/52) (Soukrate et Zahir, 2019)

## II. METHODE GEOPHYSIQUE UTILISEE

Les méthodes géophysiques permettent de cartographier les variations spatiales des propriétés physiques du sous-sol. Le géophysicien mesure certains paramètres physiques du sous-sol afin d'en obtenir une image qu'il essaie ensuite de traduire en terme géologique. Quand la prospection géophysique vise à définir des paramètres qui sont en liaison directe ou indirecte avec les ressources en eau souterraine, il s'agit de l'hydrogéophysique (Guérin, 2004). De nos jours, la tomographie de la résistivité électrique est l'une des techniques les plus employée dans les reconnaissances hydrogéologiques du sous-sol. Cette méthode n'est pas sensible directement à la présence de l'eau souterraine. Sa présence est supposée de façon indirecte car la résistivité électrique qui représente le paramètre physique étudié est influencé par la nature des roches mais également par la quantité et la qualité d'eau d'imbibition (McNeill and Labson, 1991, Guérin, 2005).

### II.1. Principe général de la méthode de tomographie électrique

La technique d'imagerie (ou tomographie) électrique est une méthode d'investigation qui permet d'obtenir une image du sous-sol dans le but d'identifier sa structure interne incluant les hétérogénéités géologiques, les failles, la profondeur et l'épaisseur d'une couche économiquement exploitable, etc. Cette technique est apparue à la fin des années 1980, elle dérive des méthodes classiques du sondage et du traîné électrique sauf qu'elle utilise un dispositif multi-électrodes qui offre la possibilité d'acquérir un grand nombre de mesures correspondant aux différentes combinaisons de quatre électrodes (Edwards, 1977). On peut ainsi réaliser une imagerie continue 2D ou 3D des variations de résistivité (Dahlin, 2001). Cela permet d'obtenir une image de la résistivité du sous-sol en particulier dans les régions à géologie complexe caractérisée par des variations latérales qui rendent l'utilisation des sondages électriques inadéquate. Grâce au développement récent d'outils performants d'acquisition automatisée et d'inversion mathématique (Loke et Barker, 1996), cette technique est devenue relativement facile à mettre en œuvre et largement utilisée.

La prospection électrique consiste à injecter dans le sol un courant électrique d'intensité ( $I$ ) entre deux électrodes A et B et de mesurer la différence de potentiel ( $\Delta V$ ) induite entre une autre paire d'électrodes M et N (Fig. II.1). A partir des valeurs de ( $I$ ) et de ( $\Delta V$ ), on peut calculer

les résistivités apparentes du sous-sol. On peut également en déterminer les résistivités intrinsèques moyennant l'application de méthode d'inversions appropriées.

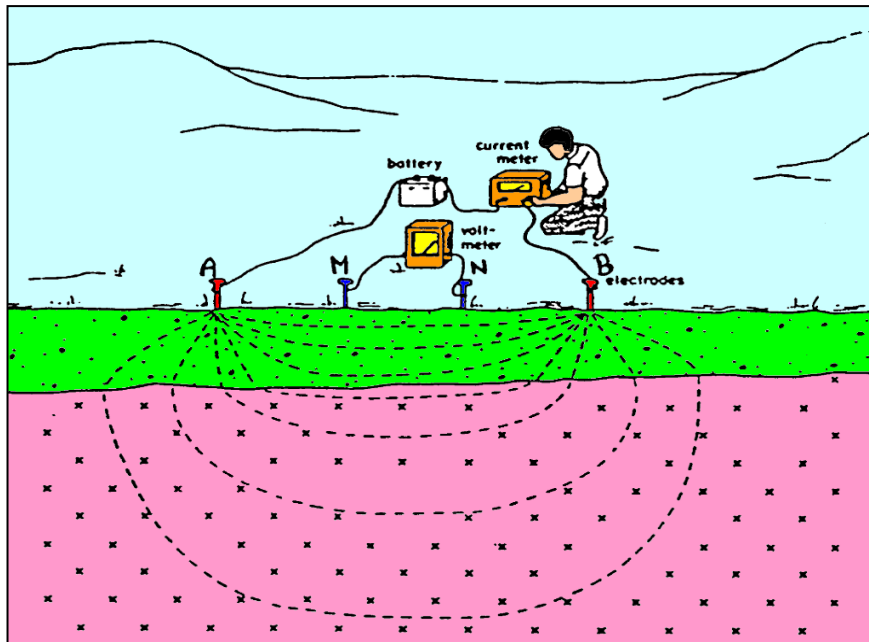


Figure II.1. Illustration du principe général de la prospection électrique

Considérons un dispositif quadripôle quelconque constitués de deux pôles de courant (A, B) et de deux pôles de potentiels (M,N) (Fig. II.2). Le calcul de la résistivité apparente du sous-sol déterminée à partir de ce dispositif se base sur la loi d'Ohm :

$$\rho_{app} = K * \frac{\Delta V}{I}$$

Avec

I : Courant injecté aux bornes A et B.

$\Delta V$  : Différence de potentiel mesurée entre les bornes M et N.

K : Facteur dépendant de la géométrie du dispositif de mesure tel que

$$K = 2\pi * \left[ \frac{1}{r_{11}} - \frac{1}{r_{12}} - \frac{1}{r_{21}} + \frac{1}{r_{22}} \right]$$



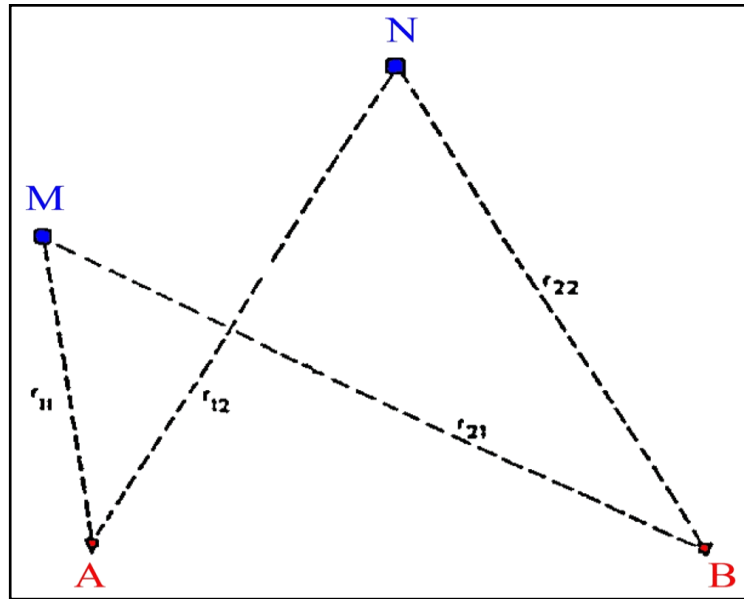


Figure II.2. Disposition générale des électrodes de courant A et B et de potentiel M et N.

Les failles et les fractures correspondent à des zones de faiblesse qui sont généralement remplies d'eaux interstitielles souvent chargées d'ions en solutions qui facilitent la circulation des courants électriques. Ainsi, dans un environnement relativement résistif, les failles se présentent sous forme de zones conductrices qu'on peut facilement mettre en évidence par des levés de résistivité électrique.

Utilisée en mode « Sondage électrique » cette technique consiste à aligner quatre électrodes (A M N et B) selon le dispositif Schlumberger où les électrodes de courant (A et B) et de potentiel (M et N) sont placées de façon symétrique par rapport au point central qui correspond à la position du sondage électrique vertical. La distance MN est inférieure à AB (généralement  $MN < AB/5$ ). L'augmentation progressive de la taille de ce dispositif permet d'investiguer des profondeurs de plus en plus grandes et d'obtenir après interprétation une courbe de variation verticale de la résistivité à l'approche du point central (Fig. II.3).

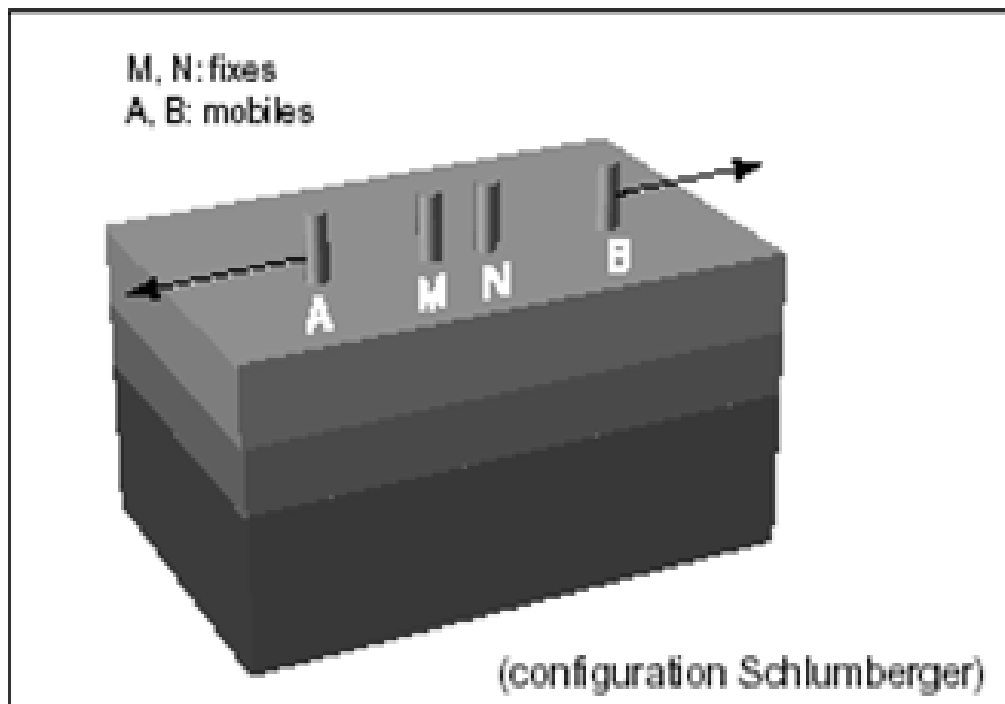


Figure II.3. Mise en œuvre d'un sondage électrique (Dispositif Schlumberger)

Plusieurs dispositifs sont disponibles pour déterminer la répartition des résistivités dans le sous-sol. La figure II.4 illustre les configurations des électrodes les plus utilisées pour la prospection électrique ; le coefficient géométrique est également donné.

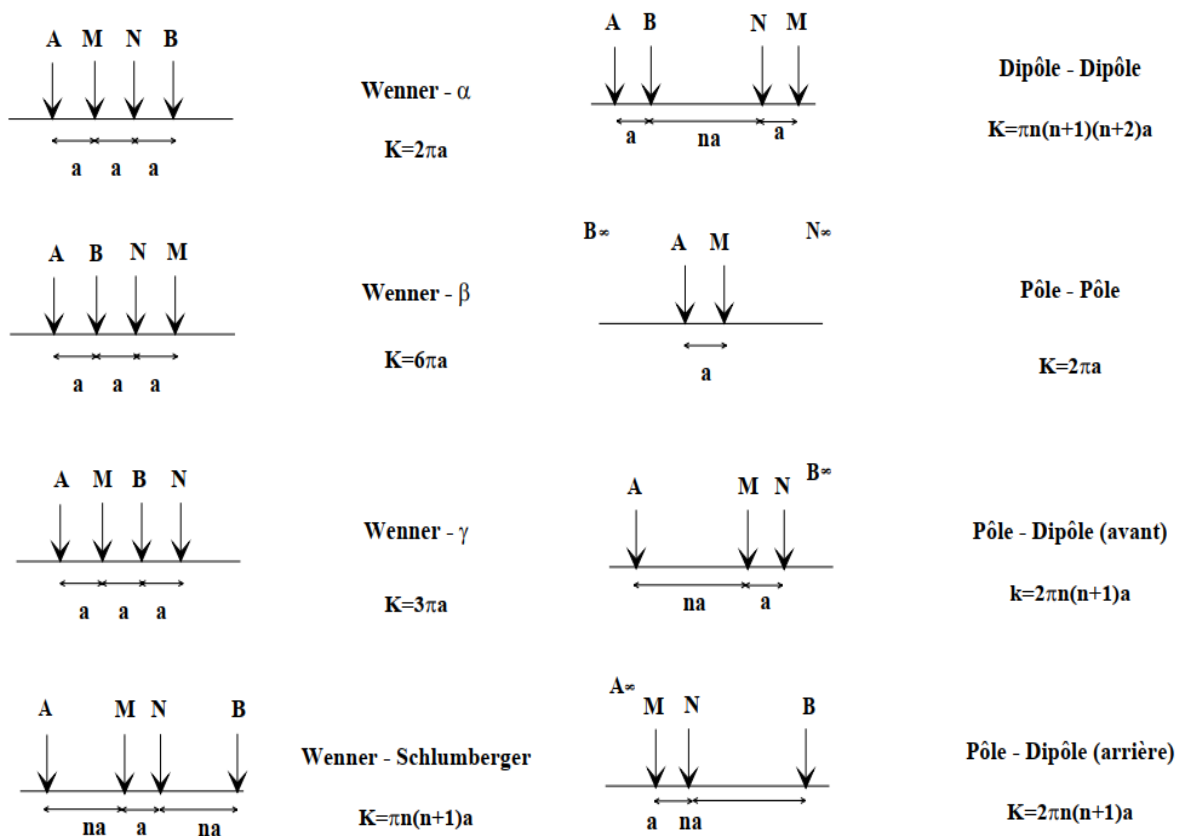


Figure II.4. Différents dispositif quadripôle utilisés en prospection électrique et leur facteur géométrique  $K$  (Parasnis, 1986)

Lorsqu'on mesure dans un sol qui n'est pas homogène et anisotrope, la résistivité mesurée n'est pas une résistivité réelle (vraie) du sol. La différence du potentiel mesurée sur le terrain, donne une grandeur en  $\Omega.m$  qu'on appelle *résistivité apparente* notée  $\rho_a$  qui dépend donc de la nature du sous-sol et de l'arrangement des électrodes (Bertrand, 1967). Le tableau ci-dessous présente quelques ordres de grandeurs des valeurs de la résistivité électrique qui contribuent aux mesures de la résistivité apparente en prospection hydrogéophysique.

<b>Eaux ou roches</b>	<b>Résistivité (<math>\Omega.m</math>)</b>
Eau de la mer	0,2
Eau de nappes alluviales	10-30
Eau de sources <b>karstiques</b>	10-100
Sable et graviers secs	1000-10000
Sable et graviers imbibés d'eau douce	50-500
Sable et graviers imbibés d'eau salée	0,5-5
Argiles	0,2-20
Marnes	20-100
<b>Calcaires</b>	300-1000

Tableau II.1 : Ordres de grandeurs des résistivité électriques (Astier, 1971)

## II.2. Mise en œuvre d'un levé de tomographie électrique

En imagerie électrique, on utilise un dispositif multi-électrodes qui correspond à l'association d'une multitude de quadripôles. Ce dispositif offre la possibilité d'acquérir un grand nombre des mesures, moyennant la combinaison de différents dipôles de courant et de potentiel. Ceci permet d'avoir une image de la résistivité apparente du sous-sol en particulier dans les régions à géologie complexe caractérisée par des variations latérales qui rendent l'utilisation des sondages électriques inadéquate. La tomographie électrique consiste à réaliser simultanément des profils multiples de résistivité correspondant à des espacements d'électrodes de plus en plus grands. Plusieurs configurations d'électrodes se prêtent à ce type de mesures. Dans le cas d'une configuration classique de type Wenner, on procède à une augmentation progressive de la longueur du dispositif, ce qui permet d'augmenter la profondeur d'investigation et par conséquent d'inclure des terrains de plus en plus profonds dans le volume de roches investigué (Fig. II. 5).



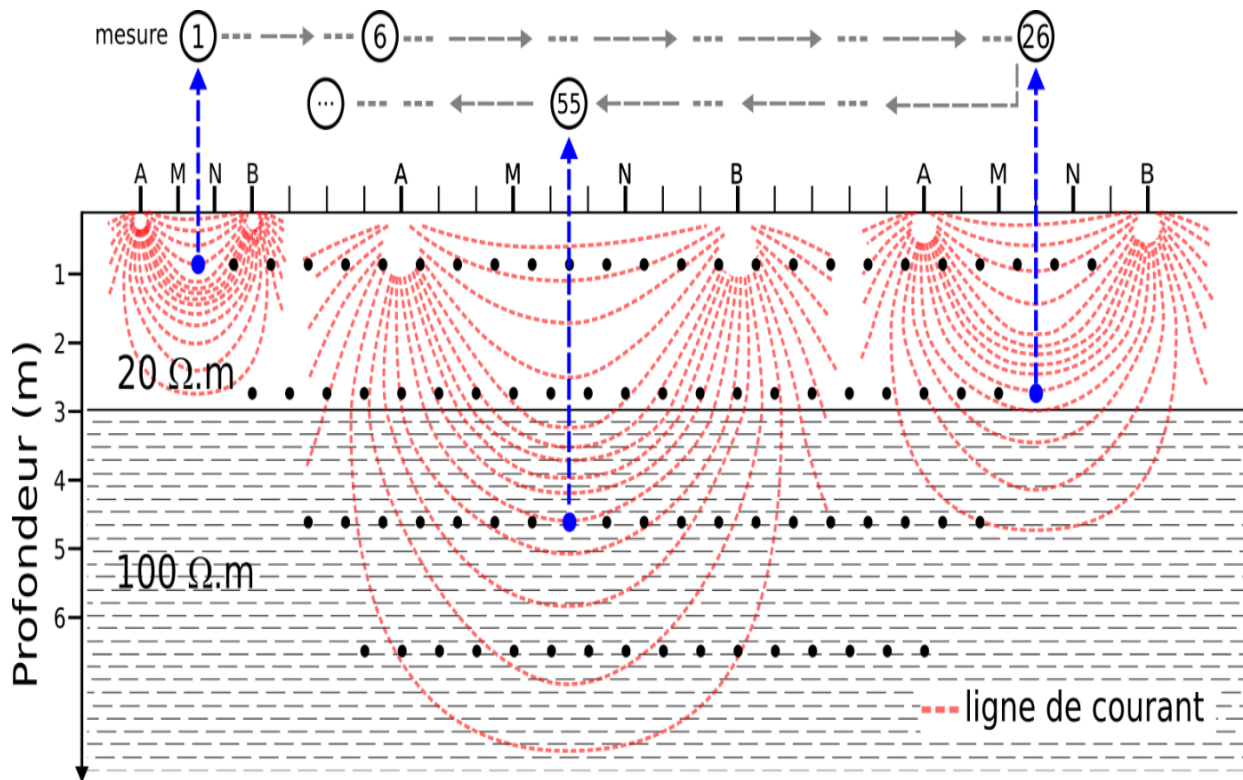


Figure II.5. Schéma d'un dispositif Wenner

Les valeurs mesurées de la résistivité sont reportées au milieu du dispositif à une pseudo-profondeur proportionnelle à sa longueur (Fig. II. 5). Ceci conduit à l'établissement d'une pseudosection (Fig. II.6).

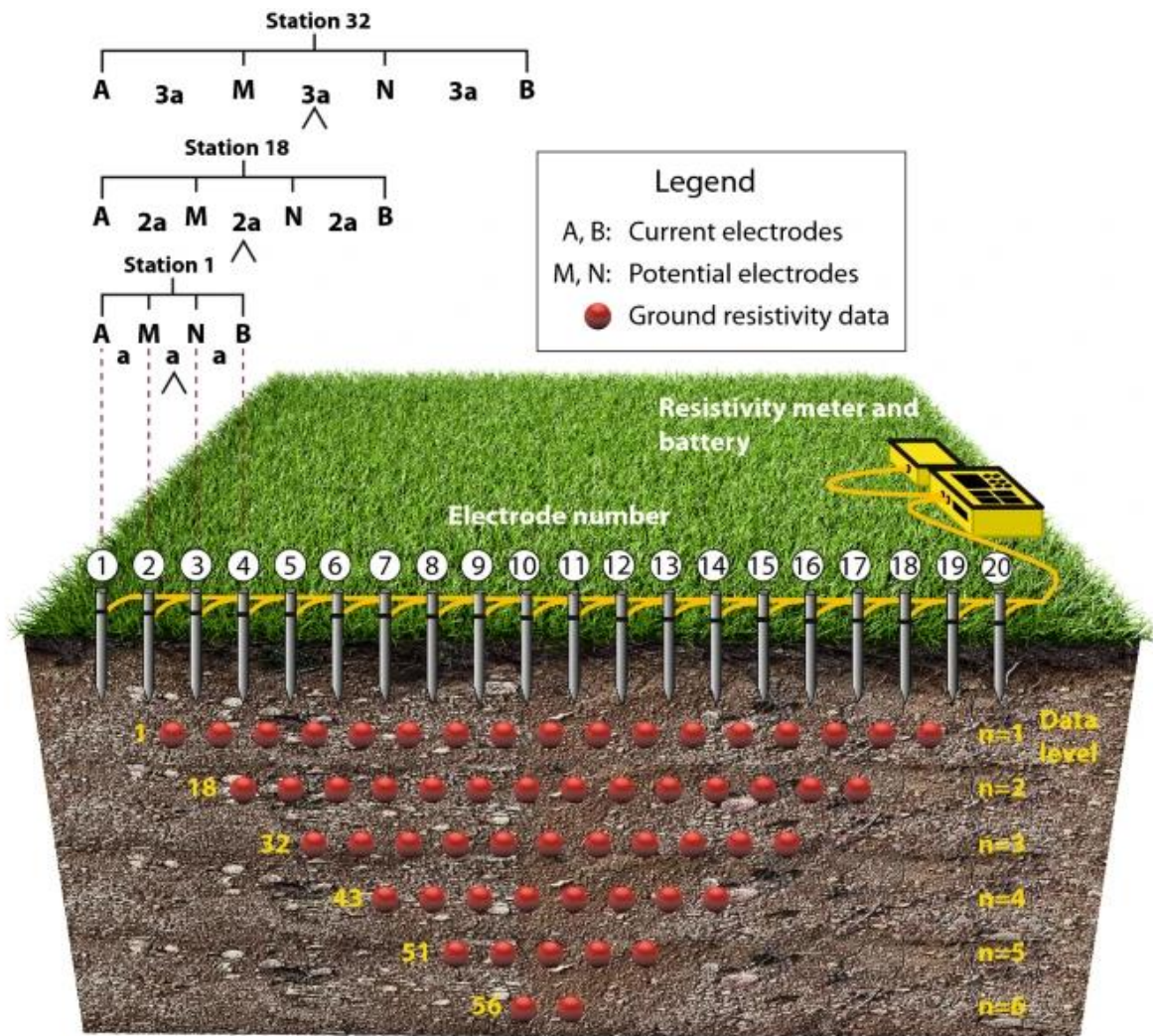


Figure II.6. Etablissement d'une pseudosection dans le cas d'un dispositif multi-électrodes mis en œuvre en configuration Wenner.

Afin d'obtenir une image quantitative représentant les variations de la résistivité réelle du sous-sol en fonction de la vraie profondeur, il est nécessaire d'inverser la pseudosection. Cette inversion des données est réalisée suivant un processus itératif qui tente de minimiser l'écart entre la pseudosection mesurée et une pseudosection recalculée à partir d'un modèle. Ce modèle est modifié à chaque itération jusqu'à ce que les données mesurées et calculées atteignent une concordance acceptable ou jusqu'à ce qu'aucune nouvelle amélioration ne soit possible. Dans le cas de la présente étude, l'inversion a été effectuée à l'aide du logiciel RES2DINV (Loke et Barker, 1996) (Fig. II.7).

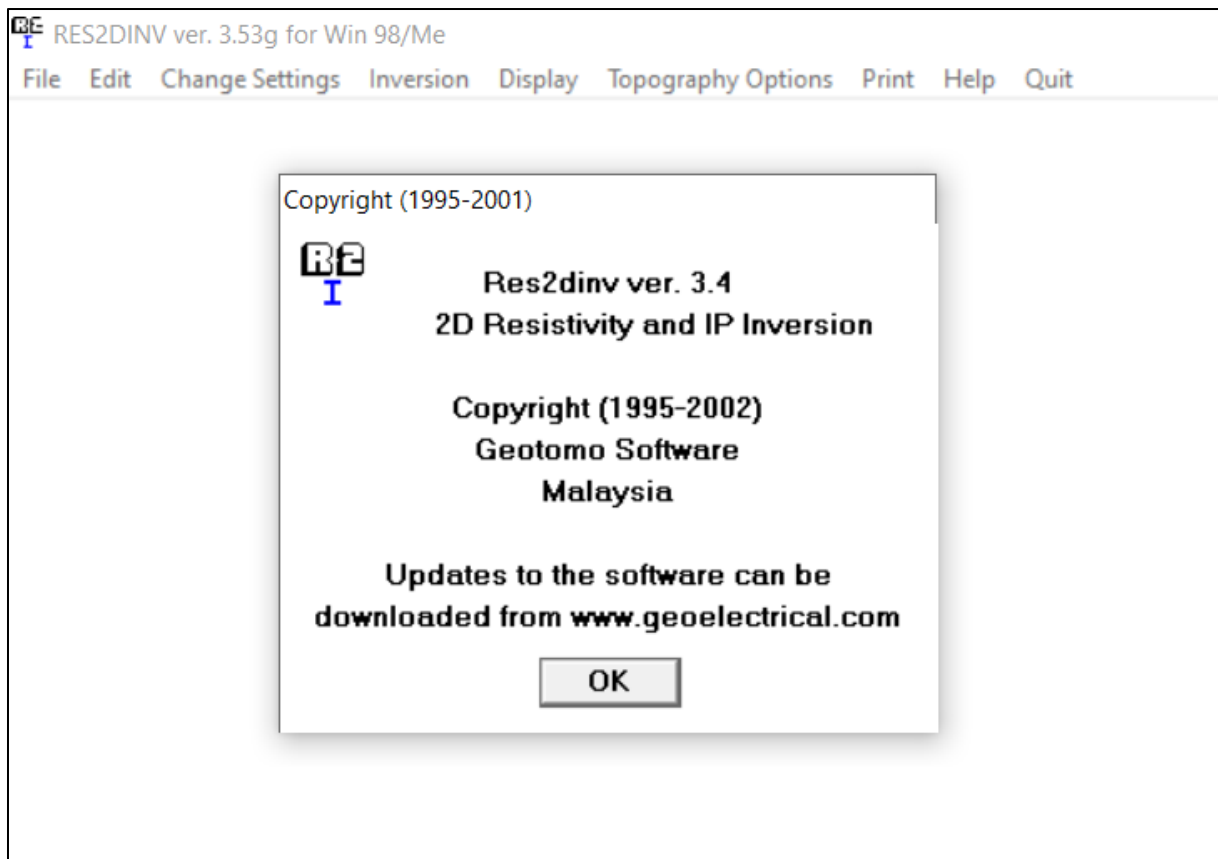


Figure II.7. Logiciel RES2DINV utilisé pour l'inversion des données ERT.

# III. PROSPECTION GEOPHYSIQUE DU SITE DE SIDI BOUZID

## III.1. Acquisition des données

La prospection par tomographie électrique du site de Sidi Bouzid a été exécutée selon une grille de neuf profils orientés selon différentes directions (N-S, E-W et NW-SE) (Fig. III.1). Les mesures ont été effectuées à l'aide d'un résistivimètre *Mangusta MC 96*, fabriqué par la société italienne AMBROGEO (Fig. III.2). Cet appareil a été paramétré pour prendre les mesures automatiquement en configuration Wenner-Schlumberger en utilisant un dispositif de 96 électrodes espacées de 5 m. L'envergure totale du dispositif a permis d'atteindre une profondeur d'investigation maximale avoisinant les 100 m.

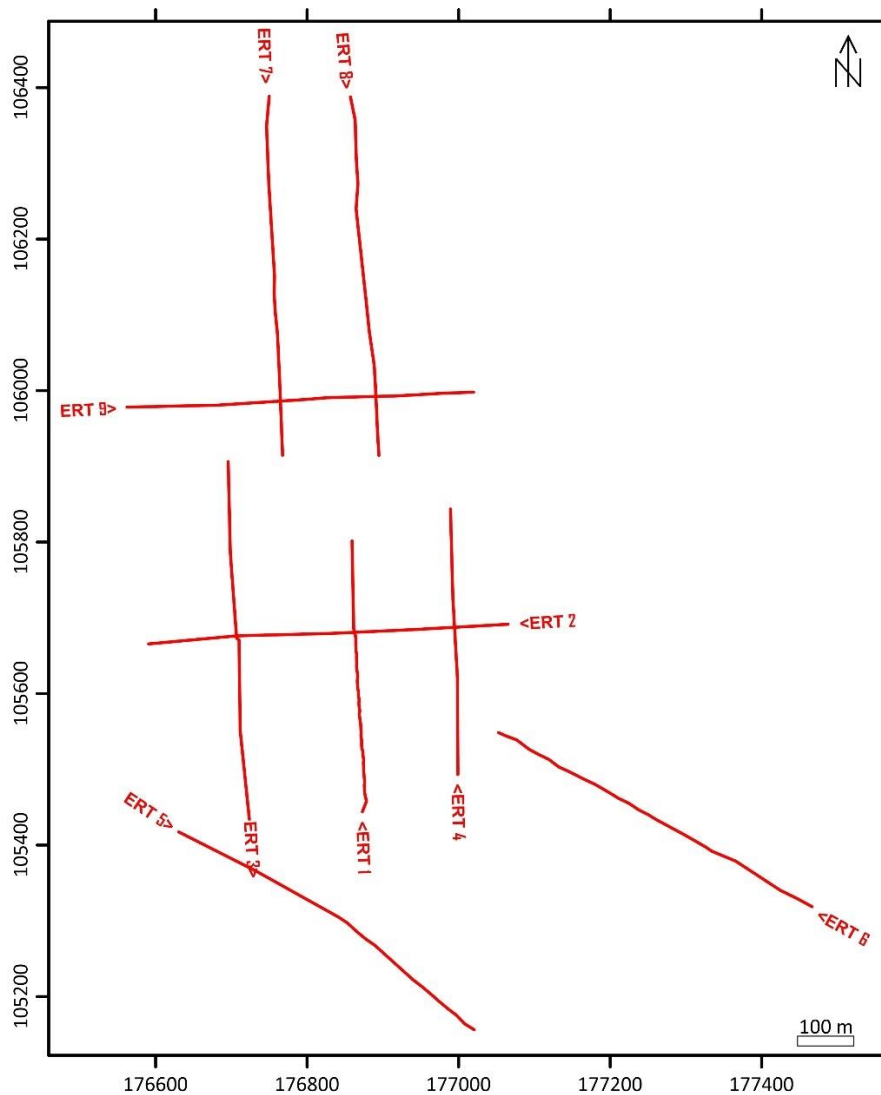


Figure III.1. Localisation des profils utilisés pour la mise en œuvre du levé ERT au niveau du site de Sidi Bouzid.





Figure III.2. Système Mangusta MC 96 utilisé pour la mise en œuvre du levé ERT au niveau du site de Sidi Bouzid.

### III.2. Traitement et interprétation

Après leur inversion à l'aide du logiciel RES2DINV, les données de tomographie électrique ont été représentées sous forme de pseudosections des valeurs de la résistivité apparentes observées et de modèle du sous-sol qui montrent la distribution de la résistivité réelle le long de la ligne de mesures en fonction de la profondeur (Fig. III3). Le modèle calculé montre que le dispositif utilisé permet d'atteindre une profondeur d'investigation qui avoisine les 100 m.

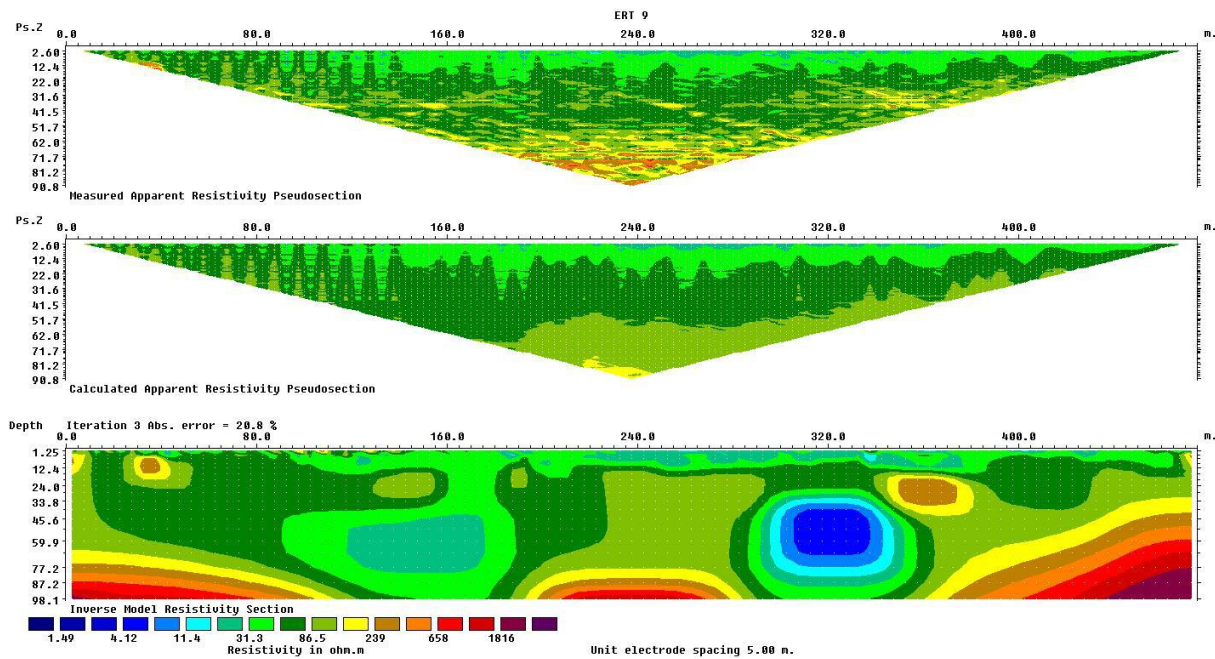


Figure III.3. Exemple de résultat ERT obtenu sur le site de Sidi Bouzid.

La figure III.4A ci-dessous montre le modèle de résistivité du sous-sol obtenu pour le profil 7 qui est orienté en direction N-S (Fig. III.1). Ce modèle montre d'importantes hétérogénéités du sous-sol avec des valeurs de la résistivité qui varient de quelques Ohm.m à plus de 2000 Ohm.m. L'analyse détaillée de cette section du sous-sol permet d'observer un premier horizon résistif superficiel (R1), assez hétérogène qui pourrait correspondre à des encrustements calcaires. Cet horizon est suivi en profondeur par une couche conductrice d'épaisseur variable qui peut correspondre à des marnes selon les logs des sondages situés autour du site étudié (Fig. I.5). Cette dernière surmonte une zone très hétérogène qui occupe une proportion importante du modèle ERT et qui est marqué par la succession du nord vers le sud des plages résistives R2, R3, R4 et R5 qui alternent avec les conducteurs C2 et C3 (Fig. III.4A). Ces différentes zones sont séparées par des contacts qui pourraient correspondre à des failles sub-verticales qui recoupent la série sédimentaire et provoquent un affaissement des zones conductrices, de nature probablement marneuse par rapport à des blocs fortement résistifs qui pourraient correspondre à des calcaires.

Le modèle du profil 3 qui constitue le prolongement méridional du ERT 7 montre une image assez similaire avec comme première différence l'absence de l'horizon résistif superficiel (Fig. III.4B). La section commence en surface par le conducteur C1 puis évolue en profondeur vers des terrains dominés par des larges plages conductrices (C2, C3) qui alternent avec des zones résistives de différentes tailles dont les plus importantes sont le R5 et le R6 (Calcaires).



Le profil 5 qui prolonge les deux premiers vers le sud-est est particulièrement marqué par une hausse significative de la résistivité soulignée par la prédominance de la couleur rouge à mauve-violet (Fig III.4C). On y observe l'horizon résistif R1 presque sur l'ensemble du profil, suivi en profondeur par la couche conductrice C1 (marnes) qui est également continu le long de tous le modèle de résistivité du sous-sol. L'évolution en profondeur sous cette couche révèle une structuration similaire à celle observée sur le profil 7, c.-à-d. l'individualisation des grands blocs très résistifs séparés par des zones conductrices « effondrées » probablement constituées de marnes.

Parmi les zones conductrices identifiées sur l'alignement des profils 7, 3 et 5, certaines, les plus étroites peuvent correspondre à des couloirs de failles qui affecteraient la série sédimentaire selon une direction.

Le profil ERT 2 de direction E-W, perpendiculaires aux trois autres, commence en surface par le conducteur C1 tout comme le profil ERT 3 qu'il recoupe en milieu. Cet horizon surmonte une épaisse zone moyennement conductrice (C2) qui surmonte des zones résistives (R1, R2 et R3) qui pourraient représenter des formations calcaires. Cependant, les deux conducteurs C1 et C2 peuvent correspondre à des couches de marnes.

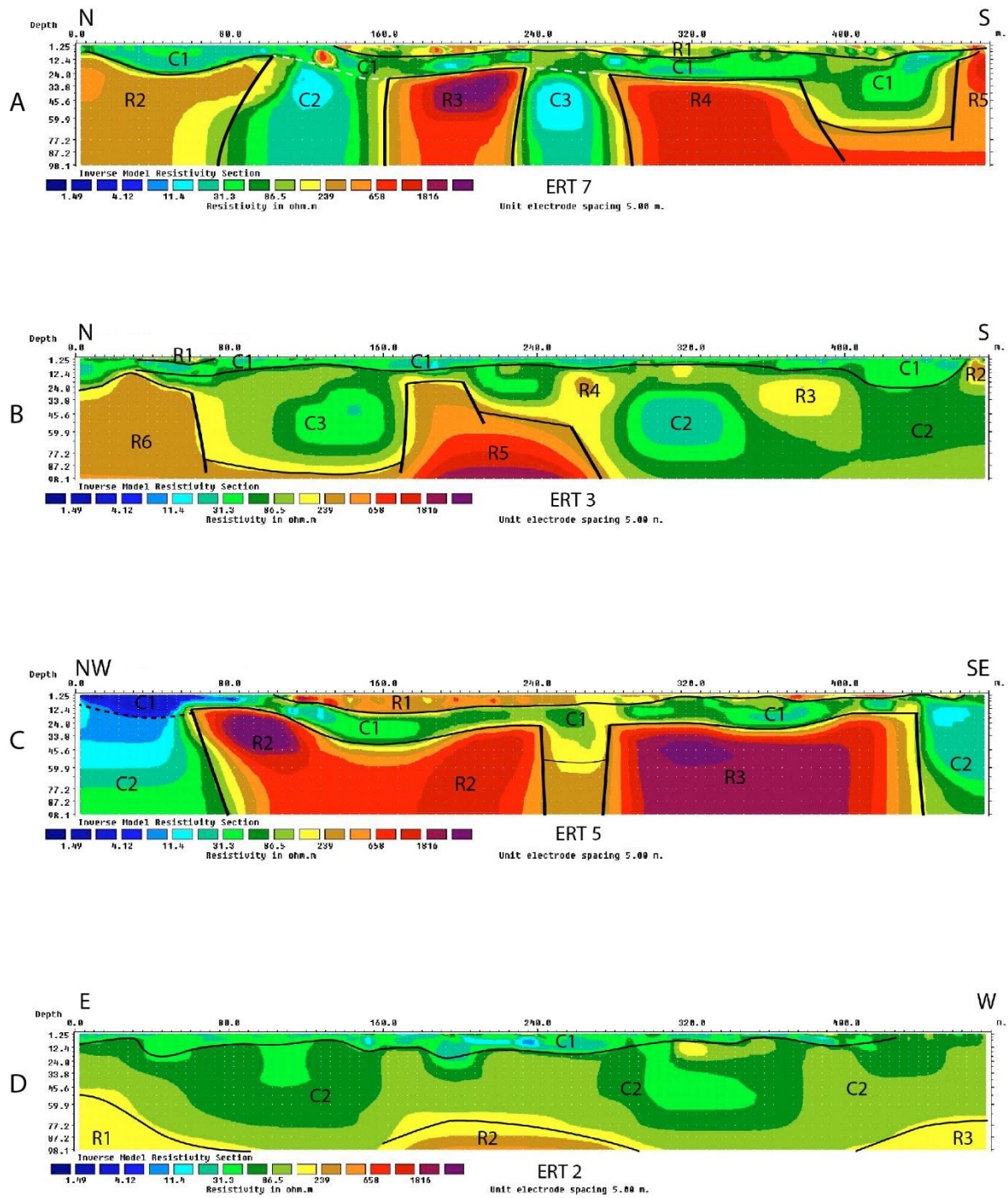


Figure III.4. Résultats des mesures ERT réalisées le long des profils 2, 3, 5 et 7.

La représentation en perspective 3D des résultats de cette étude fournit une vue globale sur les modèles de résistivité du sous-sol obtenus sur la totalité de la grille de mesure. On peut noter que l'évolution du nord vers le sud est marquée en profondeur par l'alternance des zones résistives et conductrices. La terminaison sud-est de la grille de mesure est dominée par la présence des zones très résistives en se rapprochant du village de Sidi Bouzid où a été réalisé un forage qui n'a recoupé sur une profondeur de 100 m que des formations à caractère très résistifs correspondant notamment à des grès et des calcaires.

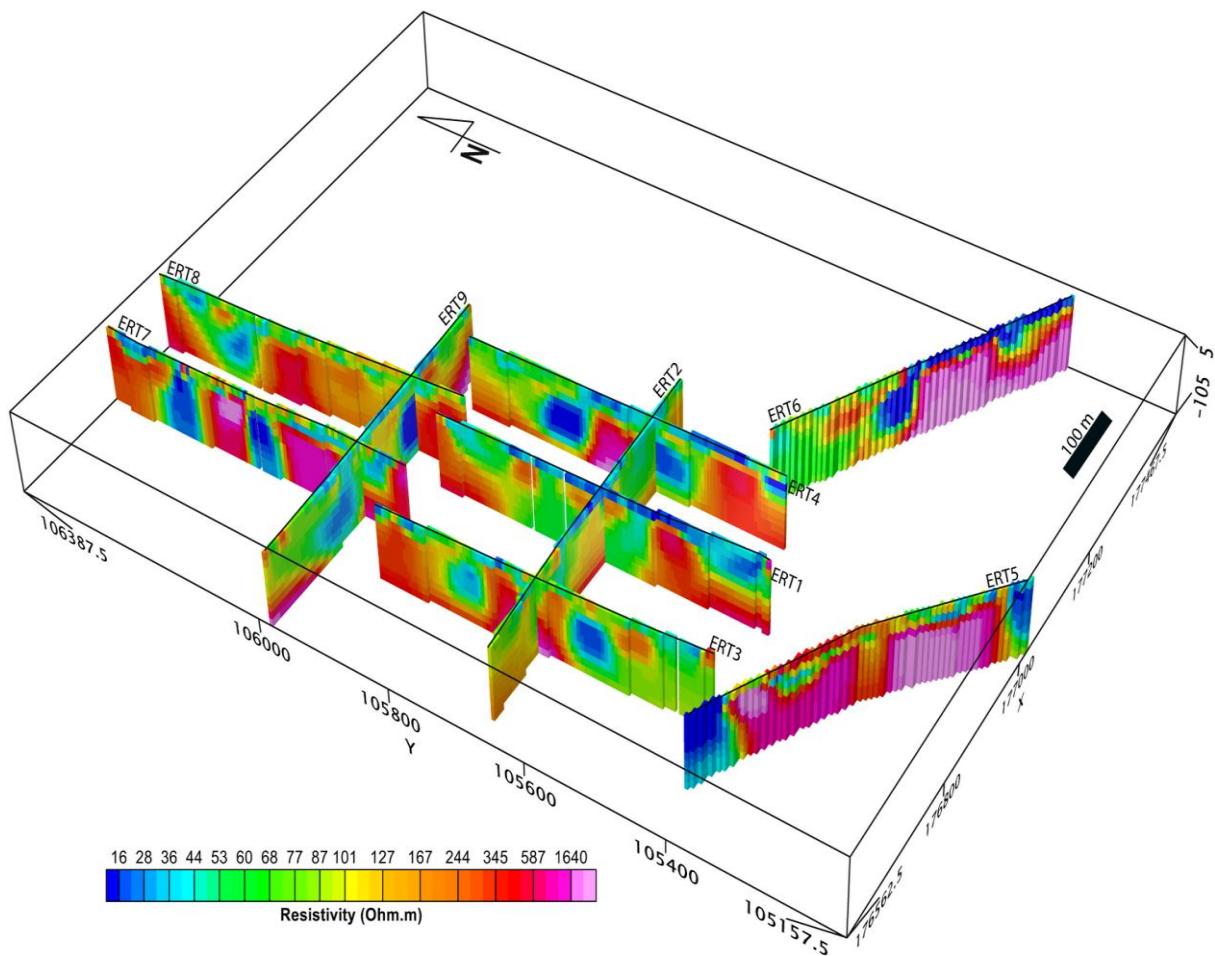


Figure III.5. Vue en perspective 3D montrant l'ensemble des modèles ERT obtenus au niveau de la zone d'étude.

L'interpolation latérales entre les 9 sections de résistivité a permis d'établir un modèle 3D de la zone prospectée (Fig. III.6), à partir duquel ont été extraites les cartes illustrées sur les figures III.7, III.8 et III.9. Ces trois cartes montrent la variation de la résistivité réelle du sous-sol aux profondeurs -10 m, -50 m et -100 m respectivement. L'examen de la première carte qui

correspond au niveau -10 m (Fig. III.7) et du modèle 3D (Fig. III.6) montre que la zone d'étude est dominée en surface par un terrain conducteur représentée par la couleur bleu (Résistivité < 50 Ohm.m) qui occupe la partie centrale de la grille où il forme une bande de direction NE-SW bordée par des formations plus résistives au nord et au sud de la grille de mesure. Ce terrain conducteur superficiel correspond à la couche désignée « C1 » sur les pseudosections qui affleure sur les deux profils perpendiculaires ERT2 et ERT3.

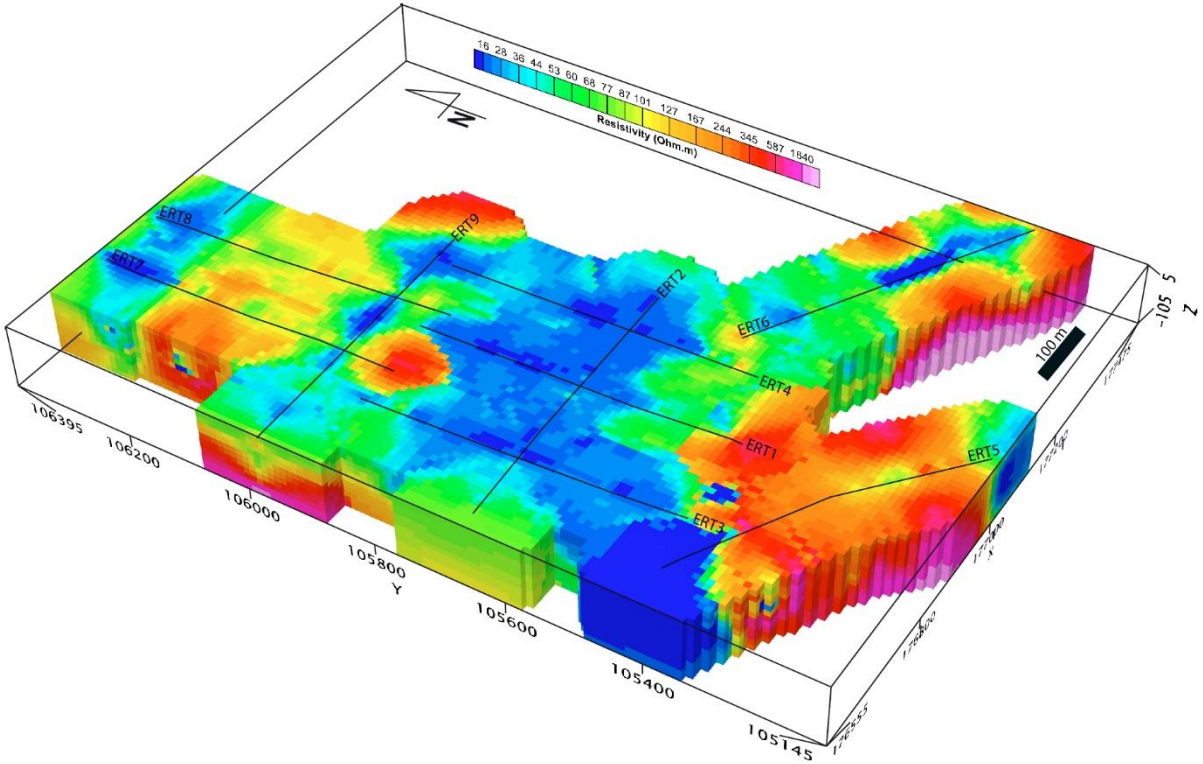


Figure III.6. Représentation en perspective 3D du modèle de la résistivité du sous-sol du site de Sidi Bouzid



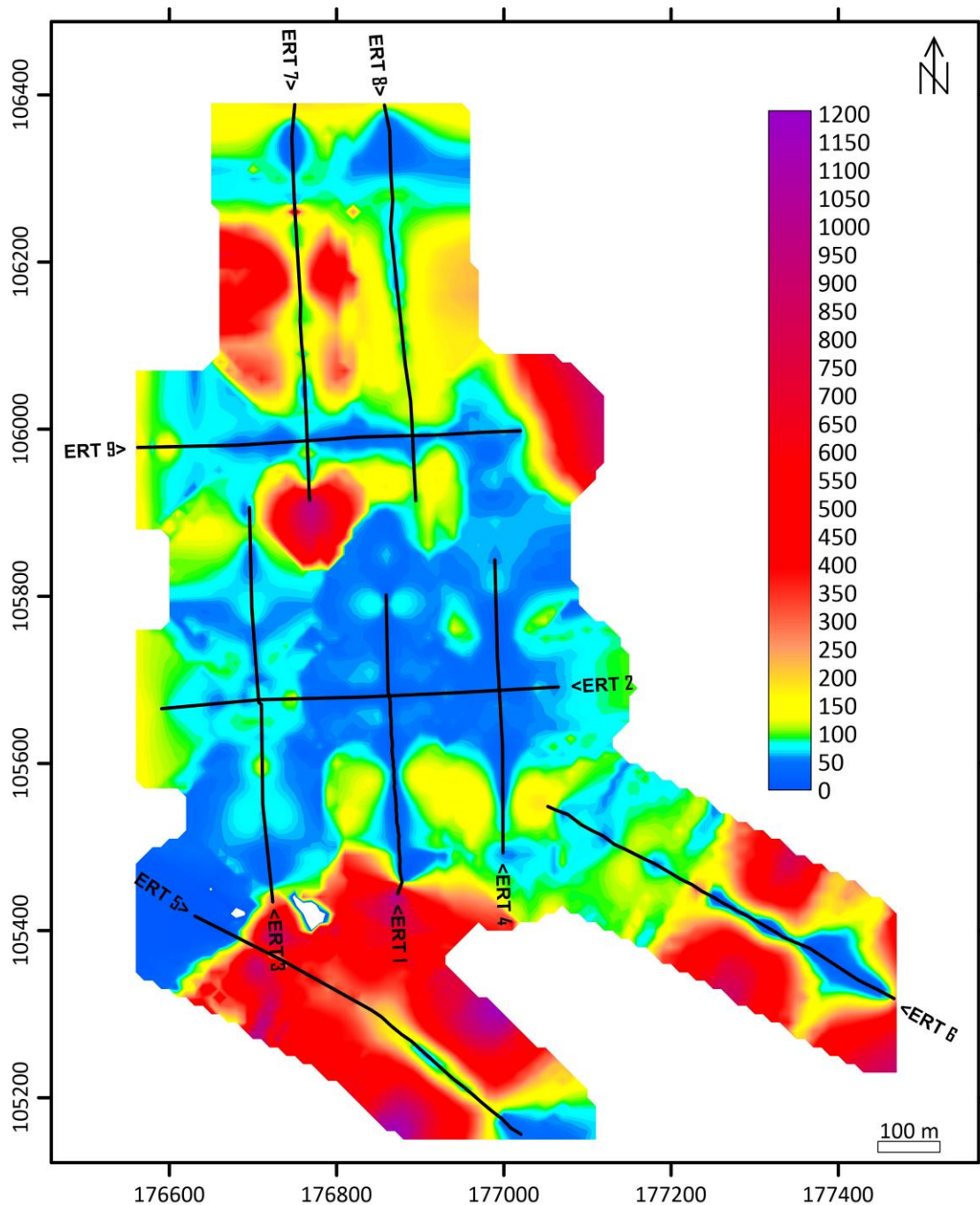


Figure III.7. Carte montrant une section horizontale du modèle global de la résistivité du sous-sol établie au niveau -10 m

La carte illustrée sur la figure III.8 montre que l'évolution en profondeur vers le niveau -50 m est marquée par une augmentation généralisée des valeurs de la résistivité par rapport au niveau -10 m. On note notamment l'apparition des zones très résistives représentées par la couleur mauve. Celles-ci présentent un caractère ponctuel et assez localisé dans la partie nord de la zone d'étude mais apparaissent plus large et vraisemblablement continue dans sa partie sud.

La zone conductrice centrale de direction NE-SW et toujours présente mais de façon moins continu.

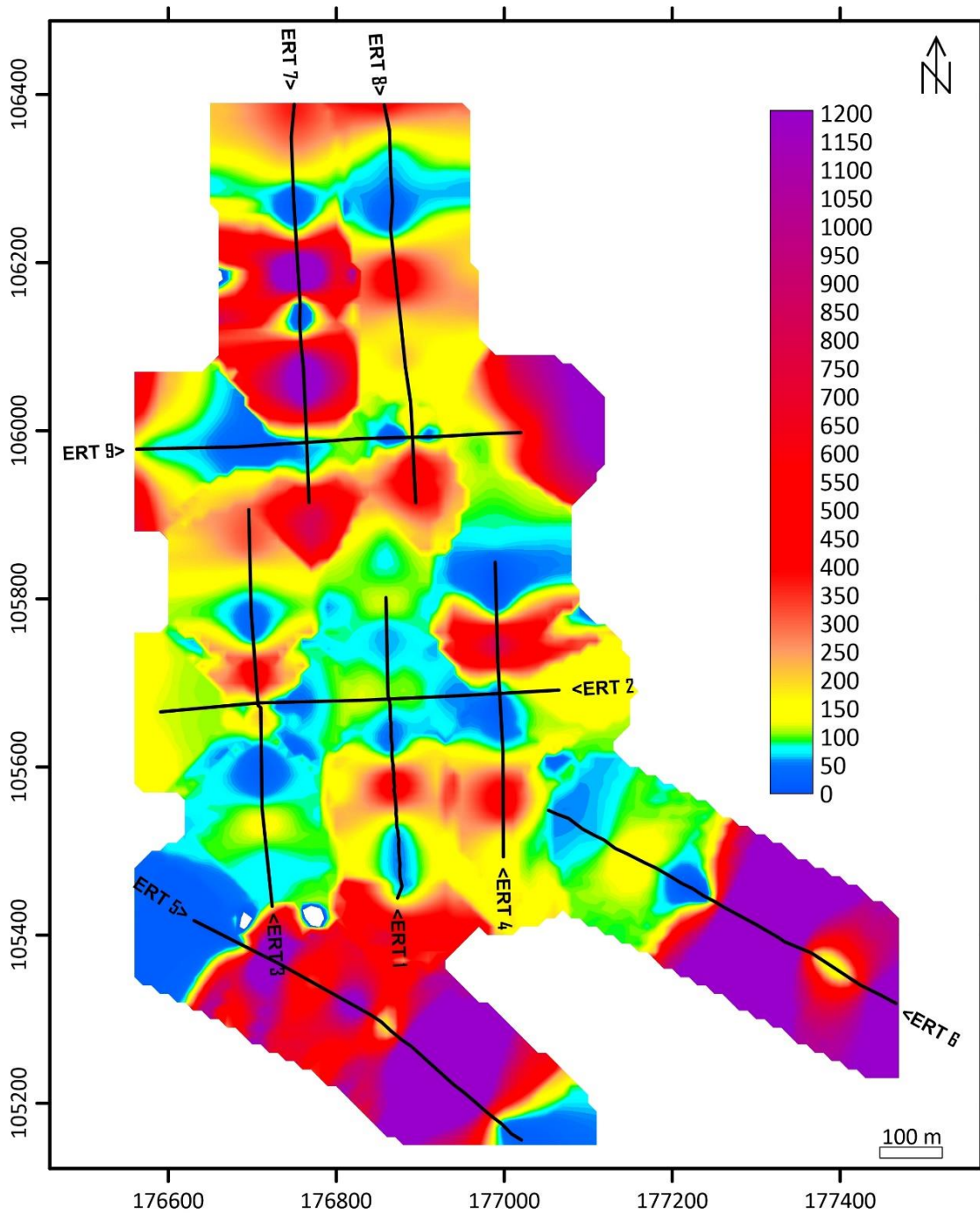


Figure III.8. Carte montrant une section horizontale du modèle global de la résistivité du sous-sol établie au niveau -50 m



La carte correspondant à la profondeur de -100 m montre que la résistivité augmente de façon significative. Elle dépasse les 300 Ohm.m sur la majeure partie du secteur prospecté et devient localement supérieure à 1000 Ohm.m dans plusieurs zones assez localisées que nous attribuons, dans la partie septentrionale, à des blocs de calcaires, et dans celle méridionale aux calcaires et grès recoupés par le forage de Sidi Bouzid.

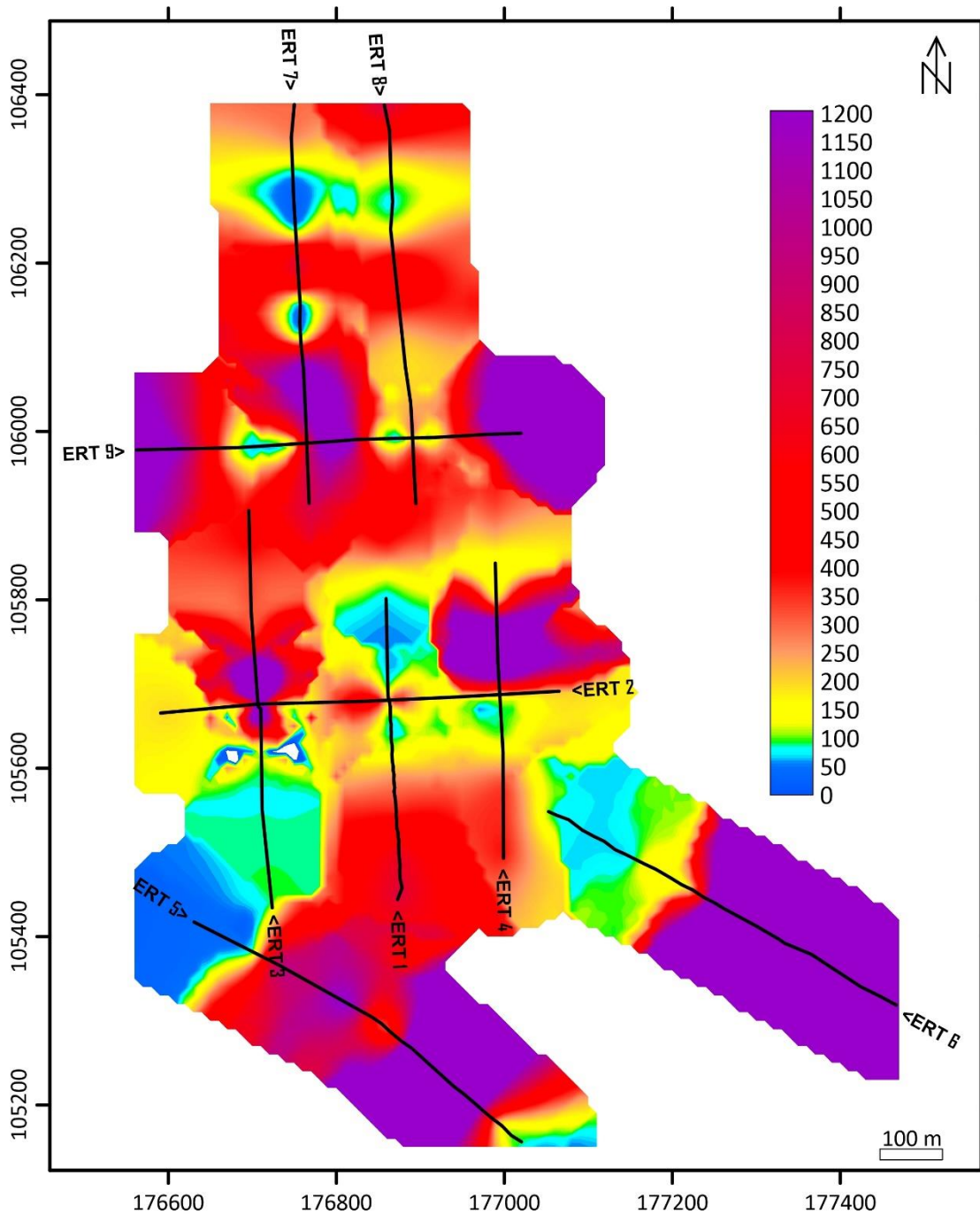


Figure III.9. Carte montrant une section horizontale du modèle global de la résistivité du sous-sol établie au niveau -100 m

Au terme de cette étude, une carte d'interprétation synthétisant l'ensemble des résultats a été établie (Fig. III.10). En effet, l'interpolation des modèles du sous-sol entre les différents profils a permis de corrélater latéralement les anomalies de résistivité. Ainsi, plusieurs zones résistives ont été délimitées. Selon les données de sondages disponibles autour du site prospecté, ces zones qui sont représentées en couleur rouge pourraient correspondre à des formations à dominance de calcaires dans la partie septentrionale et de calcaires associés à des grès au niveau de la terminaison méridionale de la grille de levé. Ces zones résistives alternent avec d'autres conductrices qui représentent probablement la présence des formations à dominance de marnes sableuses, marnes phosphatées, marnes, etc. en plus des alluvions quaternaires. Ces formations sont susceptibles d'abriter des eaux souterraines et constituent des cibles pour l'implantation des forages d'exploitation de ces eaux, en particulier la partie centrale de la zone investiguée. Leur caractère conducteur pourrait être en partie lié à la présence de ces ressources hydriques souterraines.

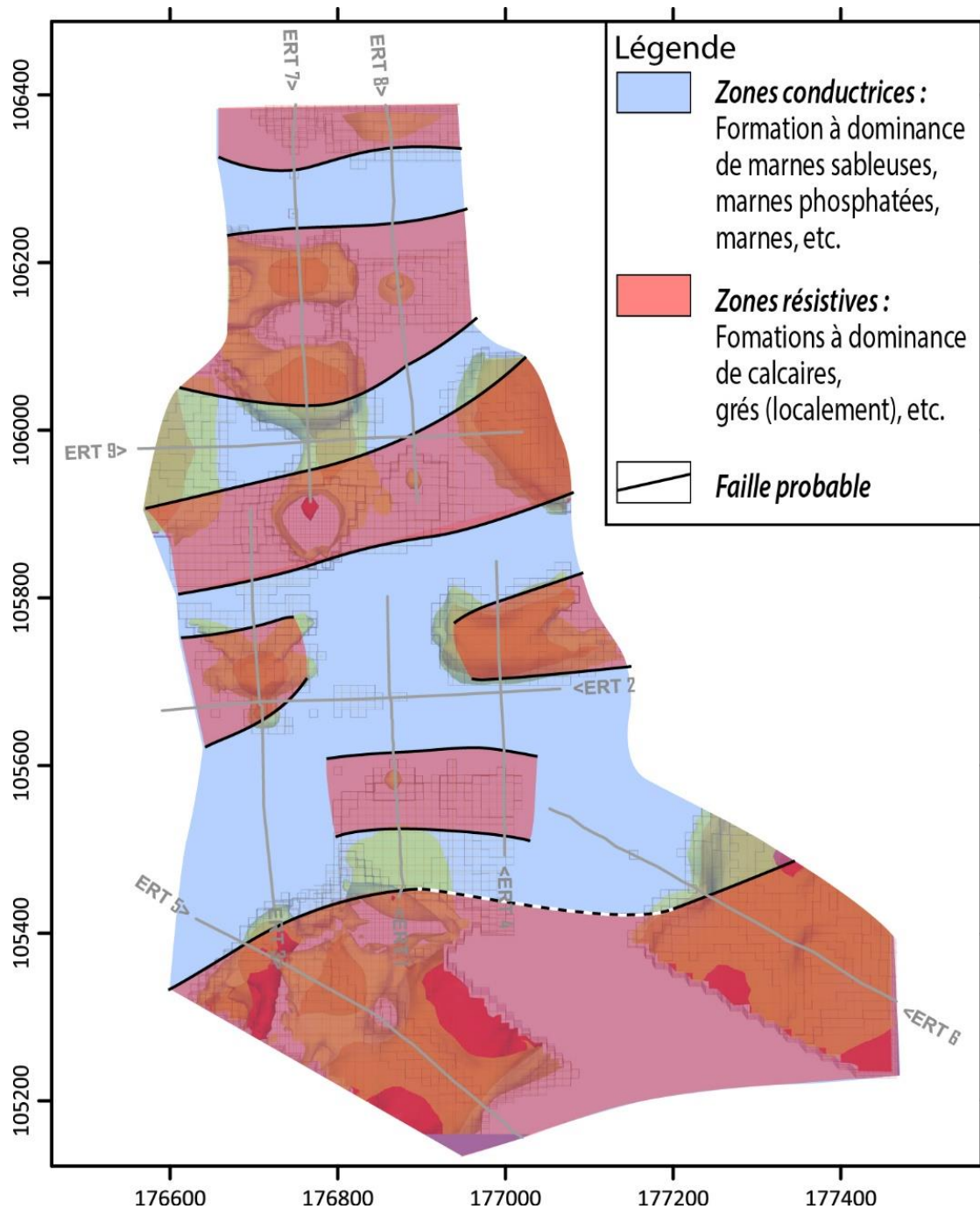


Figure III.10. Interprétation et synthèse des résultats

## CONCLUSIONS

Notre stage de fin d'études a porté sur la reconnaissance du site de Sidi Bouzid, dans la province de Chichaoua, à l'aide de la méthode de la tomographie de la résistivité électrique. L'objectif de l'étude réalisée était de caractériser la structure profonde du site par imagerie ERT en vue d'identifier des zones favorables à l'implantation des forages d'exploitation des eaux souterraines.

L'interprétation des données enregistrées par la société 4GEO à Sidi Bouzid selon un réseau 9 profils montre que la méthode ERT a permis d'investiguer le site étudié jusqu'à une profondeur de l'ordre de 100 m. Le sous-sol prospecté s'avère très hétérogène. Dans le sens vertical, ces hétérogénéités sont représentées par la superposition de couches de différentes résistivités à caractère plus moins continues. Cependant, horizontalement, elles sont matérialisées par l'individualisation de blocs résistifs (calcaires, grès, etc. ?) séparés par des zones conductrices formées de marnes sableuses, marnes phosphatées, marnes, etc. Ces dernières constituent des réservoirs aquifères qui pourraient être potentiellement productifs en eaux souterraines. Par conséquent, les forages visant des reconnaissances hydrogéologiques ou l'exploitation des eaux souterraines devraient cibler ces zones conductrices.

## Références bibliographiques

- AFRAOU S. (2020) Etude de la structure du bassin d'Essaouira et sa zone côtière (Maroc) : Apport à la connaissance de l'hydrogéologie de la région et de l'intrusion d'eau marine. Mémoire de Master, FST Marrakech, 100p.
- Ambroggi R., et Thuille G., (1952). Haouz de Marrakech. XIXème Cong. Géol. International morphologies régionales. 3ème série, Maroc, N°4, hydrologie du Maroc.
- Amrhar M., (1995). Tectonique et inversions géodynamiques post-rift dans le Haut Atlas Occidental : Structures, instabilités tectoniques et magmatismes liés à l'ouverture de l'Atlantique Central et la collision Afrique - Europe. Thèse Doctorat d'état Es-sciences, Univ. Cadi Ayyad, Fac. Sc. Marrakech. 253p.
- Amrhar M., (2002). Syn- and post collision Africa-Europe palaeostresses and deformations identified in the West High Atlas Mesozoic and Cenozoic cover (Morocco). Comptes Rendus Géosciences 334, 279-285, Académie des Sciences, Elsevier (éd.), Paris.
- Astier J.L., 1971. Géophysique appliquée à l'hydrogéologie. Masson, 277 p
- Bernert G., (1973). Etude hydrogéologique et aménagement hydraulique de la vallée de l'oued Chichaoua. MTPC / DH / DRE.
- Bertrand Y., 1967. La prospection électrique appliquée aux problèmes des Ponts et Chaussées. Bulletin Liaison des Laboratoires Routiers, Paris XV.
- Biron P.E., (1982). Permo-Trias de l'Ourika. Thèse de 3ème cycle, Univ. Grenoble France, 150 p.
- DAHLIN T., (2001) – The development of DC resistivity imaging techniques. Computers & Geosciences, 27 (9), 1019-1029.
- Edwards L.S., (1977) – A modified pseudosection for resistivity and induced polarization. Geophysics, 42 (5), 1020-1036.
- Favede F., (1975). Recherche sur la géomorphologie du Haouz occidental. Thèse de 3ième cycle. Univ. Paul Valery. Montpellier, France. 156 p.
- Guérin R., 2004. Contribution à l'hydrogéophysique. Habilitation à Diriger des Recherches, Univ. Paris IV, 262 p.
- Guérin R., 2005. Borehole and surface-based hydrogeophysics. Hydrogeology 13, 251-254.
- Loke M.H., & Barker R.D., (1996) – Rapid least-square inversion of apparent resistivity pseudosection by a quasi-Newton method Geophysical Prospecting, 44 (2), 131-152.
- McNeill J.D., and Labson V.F., 1991. Geological mapping using VLF radio fields. Electromagnetic methods in applied geophysics 2: Applications, chapter 6, Nabighian M.N. (ed.), SEG Publ., 521-640.
- Parasnis D.S., 1986. Principles of applied geophysics, Fourth Edition. Chapman and Hall Editions, London, New-York, 236 p.
- Soukrate I. ; Zahir S. (2019) Caractérisation hydrogéochimique de la nappe de Bou Sbâa (Région de Chichaoua, Maroc). Mémoire de fin d'études, Licence Science et Technique Eau et Environnement, FST Marrakech, Maroc, 51p.
- Tijani, R.; El Mandour, A.; Chafouq, D.; Elmeknassi, M.; El Ghazali, F.E.; Bouchaou, L. (2022) Chemical and Isotopic Tracers for Characterization of the Groundwater in the Heterogeneous System: Case from Chichaoua-Imin'tanout (Morocco). Water, 14, 9