



## **RAPPORT DE STAGE DE FIN D'ETUDES**

**Licences Sciences et Techniques**

**« Eau et Environnement, LST-EE »**

# **Étude hydro-géophysique du gisement de phosphate de Sidi Chennane (Khouribga, Maroc)**

**Réalisé par :**

**AIT NACEUR Khaoula & AALLEM Fatima-Ezzahra**

**Encadré par :**

**Pr. A. KCHIKACH (FST-Marrakech)**

**Soutenu le : 24/06/2019**

**Devant le jury :**

**Pr. Kchikach (Encadrant interne)**

**Bichara Moncef (Encadrant externe)**

**Pr. Jaffal (Examineur)**

**Année universitaire : 2018/2019**

## *Dédicace*

Ce travail est dédié tout d'abord à nos parents, à nos frères, à nos amies, et spécialement à Monsieur **A.KCHIKACH** qui nous a beaucoup soutenus tout le long de notre stage. Il est aussi dédié à tous les formateurs et formatrices, à tous les responsables qui ont œuvré pour la mise en place de ce stage. Ainsi que tous ceux qui auront l'occasion de lire ce rapport.

# Remerciements

Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant miséricordieux qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail.

En second lieu nous tenons à remercier toute l'équipe pédagogique de la Faculté des Sciences et Techniques de Marrakech et les intervenants professionnels responsables de la filière « Eau et Environnement », pour avoir assuré la qualité de la formation théorique et pratique au sein de cette filière.

Nos vifs remerciements vont aussi à la direction du groupe OCP, pour nous avoir donné l'occasion d'effectuer notre stage au sein du service géologique de Khouribga.

Nous remercions tout particulièrement et témoignons toute notre reconnaissance aux personnes suivantes, pour l'expérience enrichissante et pleine d'intérêt qu'elle nous a fait vivre durant ce mois au sein du groupe OCP :

- Monsieur **O. KHADIRI YAZAMI** : chef du service géologie
- Monsieur **M. BICHARA** : notre encadrant de stage
- Messieurs José Antonio Pena et Luis Viscaino Davilla de l'Université de Granada
- Toute l'équipe des géologues et géomètres du service géologique de Khouribga

Nous saisissons cette occasion pour exprimer notre profonde reconnaissance et nos vifs remerciements au Professeur **A. KCHIKACH**, notre encadrant à la Faculté des Sciences et Techniques de Marrakech, qui n'a épargné aucun effort pour nous conseiller et nous faire profiter de sa large expérience tout au long de la réalisation de ce travail.

Enfin, à tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin à la réalisation de ce travail, trouvent ici l'expression de nos sincères gratitude et nos meilleures salutations.

# Sommaire

LISTE DES FIGURES .....	4
INTRODUCTION.....	5
CHAPITRE 1 : CADRE GENERAL DU STAGE.....	7
1. Présentation du Groupe Office Chérifien des Phosphates (OCP) .....	7
1.1. Le statut juridique du groupe OCP : .....	7
1.2. La composition du groupe OCP : .....	7
2. Généralités sur les phosphates .....	8
2.1. Définition des phosphates .....	8
2.2. Bassins phosphatés marocains.....	8
CHAPITRE 2 : CONTEXTE GEOLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE DE LA ZONE D'ETUDE.....	10
1. Contexte géographique .....	10
2. Contexte géologique.....	10
3. Contexte hydrogéologique .....	14
4. Mesures piézométriques .....	15
4.1. Méthode utilisée .....	16
4.2. Tableau des données piézométriques .....	18
4.3. La carte piézométrique .....	19
4.4. Commentaire :.....	19
CHAPITRE 3 : TRAVAUX GEOPHYSIQUES REALISES.....	23
1. Description des travaux réalisés.....	23
1.1. Prospection électrique .....	24
1.2. Prospection FDEM .....	26
1.3. Prospection TDEM.....	29
CHAPITRE 4 : ANALYSE HYDRO-GEOPHYSIQUE DES DONNEES TDEM, FDEM et ERT:.....	30
1. Clés pour l'interprétation .....	30
2. Présentation des résultats.....	30
CONCLUSIONS GENERALES.....	33
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....	35

## LISTE DES FIGURES

Figure 1: Schéma structural du Maroc et localisation des bassins phosphatés marocains. (D'après Piqué et *al.*, 2001)

Figure 2 : Situation de la zone d'étude dans le bassin Ouled Abdoun (extrait de Kchikach et *al.*, 2017).

Figure 3 : Log stratigraphique synthétique de la zone d'étude. Log stratigraphique de la série phosphatée du bassin des Ouled Abdoun.

Figure 4 : Schéma générale des aquifères de la plaine de Tadla (document interne Agence du bassin hydraulique d'Oum Rbia)

Figure 5 : Les principaux aquifères d'engraissés dans la série phosphatée de Sidi Chennane (d'après Ihabach et *al.*, 2019)

Figure 6 : Photographie montrant l'équipement utilisé pour le levé du niveau d'eau dans les puits OCP

Figure 7 : Carte de situation des puits levé à Sidi Chennane sud

Figure 8 : Carte piézométrique de la zone d'étude élaborée à la faveur de notre stage (Sidi Chennane Sud)

Figure 9 : carte piézométrique de la zone d'étude élaborée à la faveur de notre stage (par le logiciel surfer)

Figure 10: Photographie prise lors de l'exécution du profil ERT à Sidi Chennane Sud

Figure 11: Photographie prise lors de l'exécution des levés FDEM à Sidi Chennane Sud

Figure 12 : Dispositif quadripôle pour la mesure de résistivités.

Figure 13 : Position des électrodes le long d'un profile ERT qui détermine le point de mesure de la résistivité apparente (en rouge).

Figure 14 : Équipement de tomographie électrique utilisé (a) À gauche on peut voir le résistivimètre et l'alimentation. (b) Vue générale de la ligne électrique avec le câble, les électrodes et les connecteurs.

Figure 15 : Schéma de l'interaction des différents champs qui interagissent dans le processus des mesures FDEM.

Figure 16 : Localisation des levés géophysiques réalisés à Sidi Chennane Sud. En bas, carte des conductivités apparentes élaborées à partir des mesures FDEM acquises.

Figure 17 : Profil TDEM réalisé. En bas, modèle issu de l'inversion des données.

Figure 18 : Profil ERT réalisé montrant les différentes gammes des résistivités obtenues.

## INTRODUCTION

Dans le cadre de l'obtention du diplôme Licence Sciences et Techniques, Filière Eau et Environnement, nous avons effectué notre stage de fin d'études au sein de l'Office Chérifien des Phosphates (OCP). Ce stage s'inscrit dans l'optique d'appliquer les connaissances fondamentales et théoriques acquises lors de trois années d'études de licence. Il a été pour nous l'occasion d'établir un premier contact avec le monde industriel et de toucher de près les applications de ce que nous avons appris au cours de notre cursus universitaire.

Nous avons eu l'opportunité grâce à l'effort de notre encadrant d'effectuer ce stage au sein d'une grande structure minière leader mondial de l'industrie des phosphates. Nous avons bien saisi cette opportunité et acquérir une modeste expérience de terrain sur le fonctionnement et la mission du service géologique dans une entreprise minière, sur la gestion des missions de terrain et sur le travail en équipe.

L'objectif principal fixé pour ce stage était de réaliser une réelle application de ce que nous avons étudié en matière de géophysique et d'hydrogéologie sur un cas concret en menant une étude hydro-géophysique d'un des gisements de phosphate du district minier de Khouribga : Le gisement de Sidi Chennane. La tâche qui nous a été confiée au début du stage était de réaliser les travaux suivants :

- ✓ Etablissement d'une carte piézométrique du gisement de Sidi Chennane Sud
- ✓ Réalisation d'un levé géophysique avec deux méthodes d'exploration appropriées de la même zone couverte par l'étude hydrogéologique
- ✓ Superposition des données géophysiques et hydrogéologiques et analyse des résultats en terme hydrogéologique tout en discutant leur implication minière.

Nous avons tout d'abord sélectionné une parcelle d'étude dans le gisement de Sidi Chennane Sud où nous avons effectué un profil de Tomographie Electrique des Résistivités (ERT) d'une longueur de 2 km. De plus un levé Electromagnétique dans le Domaine des Fréquences type Slingram EM31 (FDEM) a été exécuté dans la même zone sur des parcelles de 100x100m mais aussi le long du profil ERT. Pour interpréter les données géophysiques en terme hydrogéologique, nous avons effectué un levé

piézométrique dans les puits de reconnaissance OCP normalement implantés selon une maille de 500 x 500m. Au total 37 puits ont été concernés par ce levé qui nous a permis d'établir une carte piézométrique de la zone étudiée. Cette dernière a été superposée aux données géophysiques pour discuter la corrélation entre anomalies géophysiques et données hydrogéologiques réelles relevées sur le terrain.

Ce mémoire est constitué de quatre chapitres : le premier est réservé à la présentation du groupe OCP et à quelques des généralités sur les phosphates marocains. Etant donné que notre premier stage dans le monde industriel, nous avons jugé utile de décrire l'organigramme d'une grande structure industrielle. Le second chapitre porte sur le contexte géologique et hydrogéologique du gisement de Sidi Chennane qui fait l'objet de notre étude. Le troisième chapitre est réservé à la description des travaux géophysiques réalisés à la faveur de notre stage mais aussi à l'interprétation des données géophysiques acquises. Dans le quatrième chapitre, nous analysons la superposition des données géophysiques et hydrogéologiques dans l'objectif de vérifier l'efficacité des méthodes géophysiques utilisées dans l'étude des aquifères encaissés dans la série phosphatée en vue de leur exploitation et/ou de délimiter les zones noyées lors de l'extraction des phosphates.

## **CHAPITRE 1 : CADRE GENERAL DU STAGE**

### **1. PRESENTATION DU GROUPE OFFICE CHERIFIEN DES PHOSPHATES (OCP)**

L'Office Chérifien des Phosphates est une firme Etatique créée depuis août 1920, dans le cadre de l'exploitation de la richesse nationale en phosphates, il est transformé à un groupe nommé le groupe OCP à partir de 1975. Le développement des activités assurées par le groupe OCP s'est propagé dans le temps et l'espace, car en commençant par la seule activité initiale qui était l'extraction des phosphates en 1921, le groupe est passé à une autre fonction telle que la commercialisation des produits dérivés du phosphate au niveau international, ainsi qu'il a entamé la fabrication et l'exportation de l'acide phosphorique en 1998. De même il est dénommé groupe, voire l'élargissement continu de son réseau sur le territoire national.

#### **Chiffres clés**

Créé en : 1920

Plus de : 30 filiales & Joint-Ventures

Près de : 21 000 collaborateurs

55.9 Milliards de DH Chiffre d'affaires

Plus de : 160 clients à travers les 5 continents

Près de : 200 milliards DH Programme d'investissements (2008-2027)

#### **1.1. Le statut juridique du groupe OCP :**

Le groupe OCP est un établissement public, honoré de la personnalité civile, et dispose d'une autonomie financière absolue, et ses filiales acquièrent la forme de sociétés anonymes, ainsi comme l'indique l'article premier du Dahir 1-60-178, le groupe OCP est mis sous tutelle administrative du ministère de l'économie nationale.

#### **1.2. La composition du groupe OCP :**

Comme son nom l'indique, le groupe OCP se compose d'un certain nombre de filiales étalées sur le territoire marocain, en fonction de leur cadre de spécialité, notamment pour l'activité chimique, on s'adresse directement à la zone de Safi, et la zone de Jorf Lasfar, alors que pour l'activité dite minière, elle est limitée dans les zones de Khouribga, Youssoufia (GANTOUR) et Boucraâ, Laâyoune. En outre, le groupe OCP procède à la conclusion des Contrats de partenariats avec plusieurs opérateurs étrangers tels que SOTREG, SMESI, STAR, CERPHOS...

## **2. GENERALITES SUR LES PHOSPHATES**

### **2.1. Définition des phosphates**

Les phosphates sont des roches exogènes contenant une quantité plus ou moins élevée en  $P_2O_5$ . Selon la classification minéralogique internationale de 1974, il y en a deux familles de phosphate (El Haddi, 2014) : La première liée à l'apatite dite phosphatite, qui se classe selon la présence et la taille des éléments figurés. La deuxième famille des roches est dite phosphorites qui se classent suivant le type de minéral, la texture, la structure, la nature de l'exogangue et surtout par sa richesse en  $P_2O_5$  qui doit être supérieur à 18 %.

### **2.2. Bassins phosphatés marocains**

Les phosphates marocains se répartissent en plusieurs bassins d'importance inégale (Gharbi et Mchichi, 1996) Ci-dessous nous donnons une description sommaire des quatre principaux bassins (Fig. 1).

#### **2.2.1. Bassin des Gantour.**

Il est situé entre les massifs des Rhamna au Nord et les Jbilet au Sud. A l'Ouest il est limité par les collines jurassiques de Mouissat et se prolonge à l'Est jusqu'aux rives de l'Ouest Tessaout. Le bassin des Ganntour renferme deux centres miniers (El Haddi, 2014) : le premier à l'Youssoufia qui se trouve à l'extrémité occidentale du bassin et le deuxième à Benguérir au centre de celui-ci. La série phosphatée de ce bassin s'étend du Crétacé sup. (Maastrichtien) à l'Eocène (Lutétien sup.) (Gharbi et Mchichi, 1996).

#### **2.2.2. Bassin de Meskala**

Il se situé à environ 150 km au Sud de l'Youssoufia, au pied de l'Atlas, le gisement était l'objet d'une intense campagne de recherche il y a quelques années. Tectoniquement morcelée en sous bassins (Imi n'Tanout et Chichaoua), la série phosphatée ressemble fortement à celle des Gantour et la couche phosphatée danienne a été atteinte dans un sondage près d'Imi n'Tanout à 500 m de profondeur avec à peu près 300 m d'alluvions sur la série (Belfkira, 1980) : Il est limité par la plaine alluviale de Mejjatte, à l'Ouest par les affleurements permo-triasiques de l'Ouest Tidsi qui le sépare de la plaine côtière d'Essaouira et au Sud par le Haut Atlas occidental. La puissance totale de la série phosphatée, d'âge MaastrichtienLutécien, est d'environ 130 m en moyenne (Gharbi et Mchichi, 1996).

#### **2.2.3. Bassin d'Oued Eddahab**

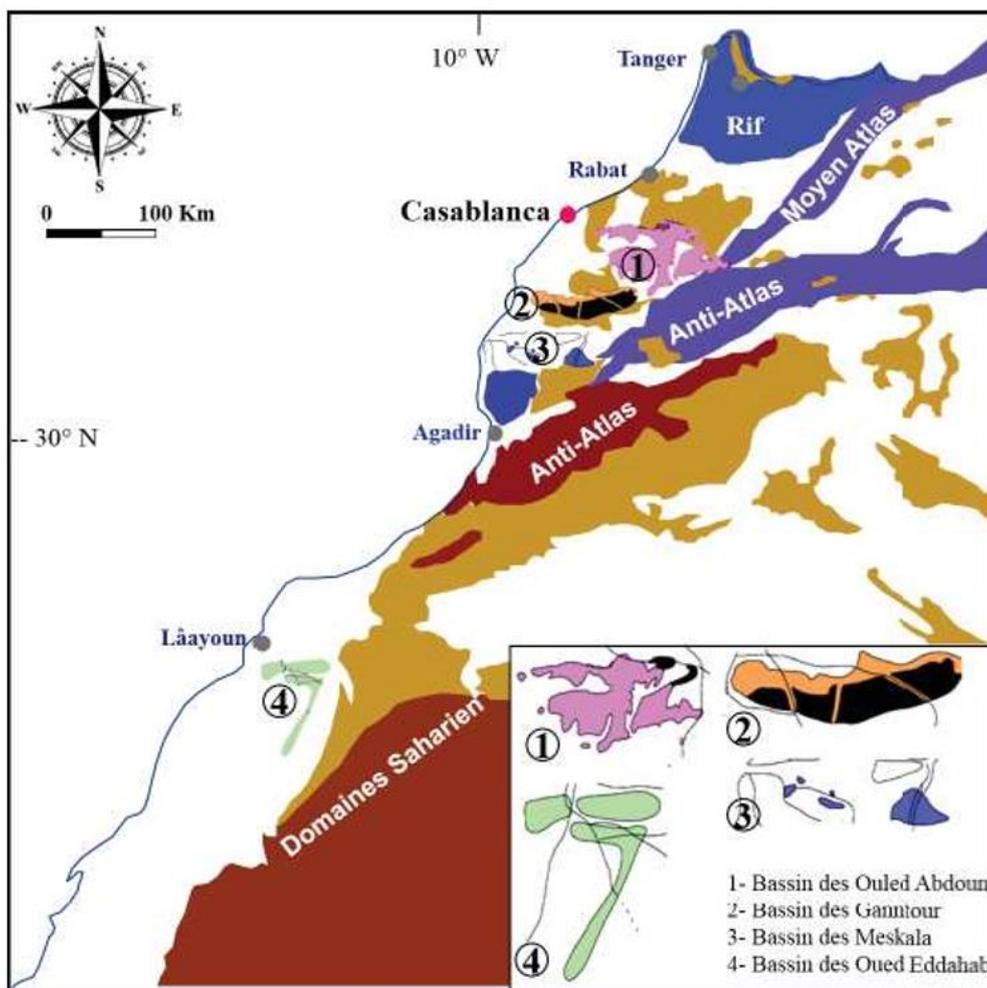
Il se situé au Sahara marocaine à 100 km au Sud-est de la ville de Laâyoune et à 1200 km de Casablanca. Compris entre le Précambrien et le Paléozoïque de la dorsale de Rguibat et l'Océan Atlantique (Rios, 1972) : Il s'étend du Nord au Sudouest jusqu'aux les environs de Nouadibou. Les dépôts phosphatés de ce bassin beaucoup plus au Nord que les affleurements actuels et l'érosion réduisent ses extensions. Ces dépôts phosphatés s'étend du Maastrichtien sup. à l'Eocène inférieure. Cette série dont la

puissance varie de 13 à 45 m, est formée de 3 niveaux principaux de phosphate (40 à 77% BPL) seul la couche 1 est exploitée à ciel ouvert (Gharbi et Mchichi, 1996).

#### 2.2.4. Bassin d'Oulad Abdoun

Il est le plus anciennement connu et le plus anciennement exploité des dépôts phosphatés marocains. Il est également le plus important, aussi bien par son extension que par la qualité et la quantité des minerais qu'il renferme. Le bassin d'Oulad Abdoun s'étend sur une superficie de 4000 Km<sup>2</sup> environ, occupe la majeure partie du plateau des Ouardirha ou plateau des phosphates. Il est limité au Nord par les affleurements où l'on rencontre les villes d'Oued-Zem, et Khouribga et au sud-est par la bordure du Haut-Atlas de Béni Mellal. Chennane Ces dépôts phosphatés s'étend du Maastrichtien sup. à l'Eocène inférieure. La puissance totale de la série phosphatée passe d'une quarantaine de m au nord de Khouribga à plus de 140 m au sud du bassin (Gharbi et Mchichi, 1996).

L'exploitation des phosphates se fait actuellement dans trois mines à ciel ouvert : Sidi Daoui en cours d'épuisement, Marah El Arech, et Sidi Chennane.



**Figure 1:** Schéma structural du Maroc et localisation des bassins phosphatés marocains. (D'après Piqué et al, 2001)

## **CHAPITRE 2 : CONTEXTE GEOLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE DE LA ZONE D'ETUDE**

### **1. CONTEXTE GEOGRAPHIQUE**

La zone d'étude correspond au gisement phosphaté de Sidi Chennane. Ce dernier est situé à 35 km au sud-est de Khouribga, 25 km au sud-ouest d'Oued Zem et 20 km au nord de Fkih Ben Saleh. Il est délimité à l'ouest par le méridien Lambert 372 500 au sud par la parallèle Lambert 228 000, à l'est par la route principale RP22 et au nord par les affleurements de la base de la série phosphatée.

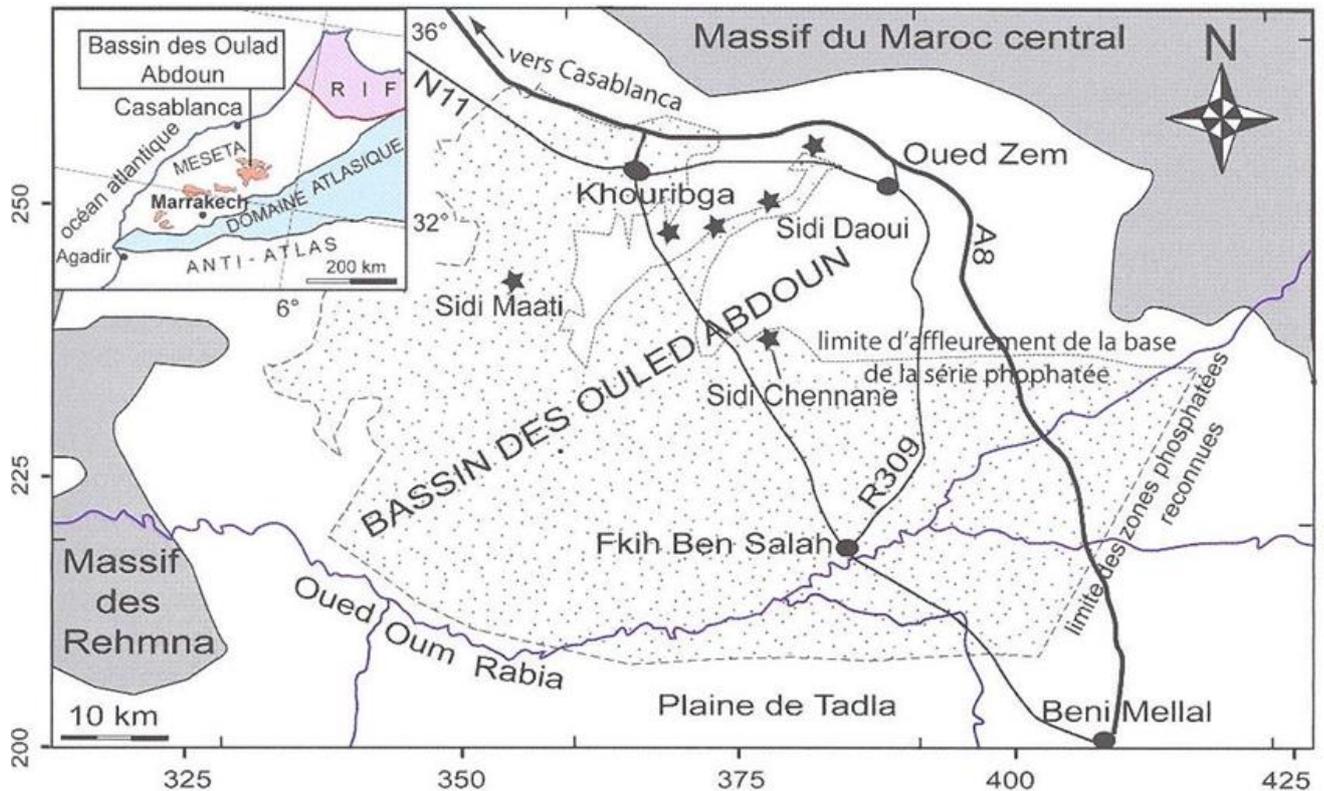
### **2. CONTEXTE GEOLOGIQUE**

Le sous-sol marocain recèle plus des trois quarts des réserves mondiales en phosphate [Bouda et al., 1971]. Ces réserves existent dans quatre bassins sédimentaires dont le plus important est celui des Ouled Abdoun, au Centre du Maroc. Dans ce bassin, la couverture sédimentaire de structure tabulaire s'échelonne du Permo-Trias au Quaternaire (Choubert et Salvan, 1946) et repose en discordance sur le socle hercynien de la partie occidentale de la Meseta marocaine (Michard, 1976 ; Zouhrietal., 2008). La série sédimentaire des Ouled Abdoun est circonscrite au nord et à l'ouest par les affleurements paléozoïques de la Meseta, et au sud-est par les escarpements jurassiques du Moyen et du Haut Atlas.

La série phosphatée correspond à la partie supérieure de la couverture sédimentaire du bassin des Ouled Abdoun. Elle est d'âge Maastrichtien au Lutétien (Boujo, 1976 ; Azmany et al., 1986). Cette série affleure dans la partie nord-ouest du bassin où les couches phosphatées sont exploitées dans des mines à ciel ouvert. Au sud et au sud-est, cette série est enfouie sous les dépôts continentaux du Miocène, Pliocène et Quaternaire de la plaine du Tadla.

Le bassin des Ouled Abdoun (Fig. 2), sur la Meseta marocaine, renferme les plus grands gisements de phosphate au monde. Il s'étend sur plus de 10000 km<sup>2</sup> et est limité au Nord par le massif hercynien du Maroc central, au Sud et à l'Est par les escarpements jurassiques du Moyen et du Haut Atlas et à l'Ouest par les affleurements paléozoïques des Rehamna. Géomorphologiquement, ce bassin comprend deux unités distinctes : le plateau des phosphates et la plaine de Tadla. Son importance tient non seulement à sa vaste superficie mais aussi aux teneurs élevées en phosphates (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) marins que l'on y rencontre (Boujo, 1976 ; Sheldon et al., 1989 ; Moutaouakil & Giresse, 1993). Parmi les bassins phosphatés marocains, il est le plus anciennement connu (1917) et exploité (1921). La série sédimentaire des Ouled Abdoun est traditionnellement décrite (Azmany, 1979 ; Sheldon et Davidson, 1989 ; Moutaouakil et Giresse, 1993) comme comportant cinq grands ensembles lithologiques superposés, de bas en haut (Fig. 3A)

: (i) une série cénomanienne complexe où alternent marnes et calcaires; (ii) une série turonienne dominée par des dolomites et des calcaires massifs à rares intercalations marneuses, affectés par des phénomènes karstiques ; (iii) une série dite sénonienne, mais vraisemblablement d'âge coniacien à campanien, essentiellement marneuse ; (iv) une série d'âge campanien à yprésien qui comporte des bancs phosphatés et des inter-bancs stériles et (v) une série lutétienne principalement constituée de biocalcarénites marines lithostratigraphiquement regroupées au sein de la « dalle à Thersitées » (gastéropodes marins des genres *Hemithersitea* et *Thersiteasp* ; Slavan, 1963).



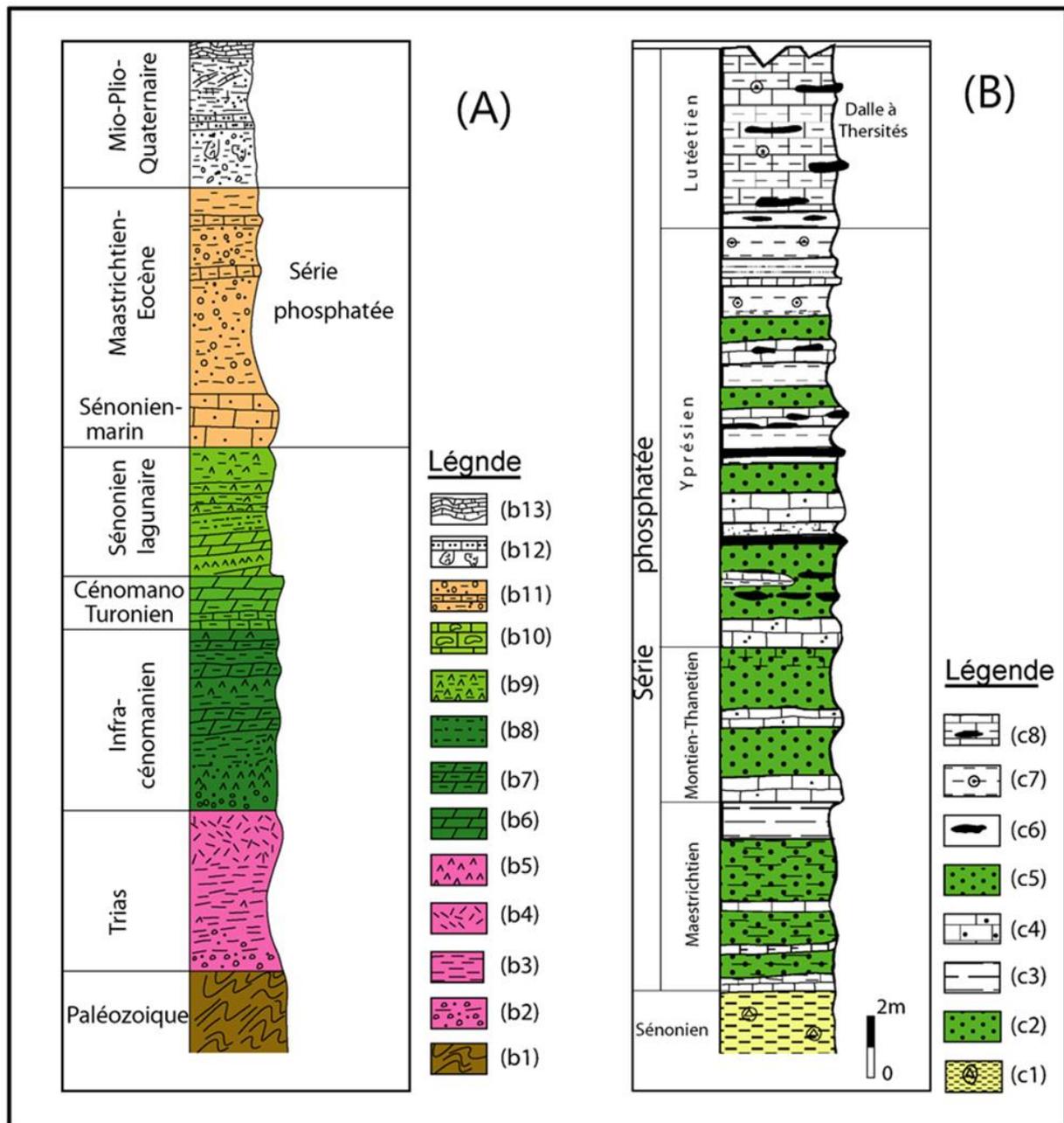
**Figure 2** : Situation de la zone d'étude dans le bassin Ouled Abdoun (extrait de Kchikach et al., 2017).

D'un point de vue structural, la couverture sédimentaire des Ouled Abdoun a la particularité d'être globalement peu affectée par des déformations imputables aux contraintes tectoniques du Crétacé supérieur et du Cénozoïque. Bien que les bordures du bassin aient toutes été soulevées et consécutivement érodées au cours de l'orogénèse alpine, il apparaît qu'aucun basculement majeur ne décale notablement la régularité des reliefs de cuesta de cette région. Cependant, il doit être remarqué que les principaux oueds qui entaillent le plateau des phosphates et le drainent en direction du fleuve Oum Rabia ont une orientation qui coïncide avec celle des principales failles qui délimitent les grabens permotriassiques affleurant au nord et au nord-est du bassin. Inscrite entre N20° et N40°E, cette orientation est aussi celle des failles qui ont contrôlé la sédimentation jurassique, puis la surrection cénozoïque du Moyen-Atlas (Fedan, 1989; El Hammichi et al., 2002). On peut donc en déduire que ces failles anciennes existent

sous la série sédimentaire des Ouled Abdoun et qu'elles auraient pu jouer sensiblement au cours de l'orogénèse Atlasique. Elles ont par exemple influencé la position et l'orientation des champs de diaclases affectant la dalle lutétienne « dalle à Thersités » et ont ainsi contrôlé la mise en place et le développement du réseau hydrographique actuel. Il est donc probable que certaines de ces failles héritées aient pu avoir une incidence sur l'évolution de l'épaisseur de la série phosphatée et son enfouissement sous les dépôts continentaux de la plaine de Tadla en allant vers les parties sud et sud-est du bassin.

La série phosphatée proprement dite (Fig. 3B) est formée par une alternance de couches de phosphate meuble et de niveaux stériles calcaires et marno-calcaires sur une épaisseur moyenne de 50 m dans les gisements en cours d'exploitation (Kchikach et al., 2012 ; Kchikach et al., 2006). Elle débute par des marnes phosphatées et des niveaux calcaires très riches en débris osseux, connus sous le nom de calcaires à bone-beds d'âge maastrichtien (Noubhani et al., 1995; Suberbiola et al., 2003). Cet étage marque le début d'une phosphatogenèse qui atteint son maximum dans les étages suivants. Au-dessus, vient une succession de niveaux de phosphates meubles grossiers et de calcaires phosphatés. Le Montien est représenté par des phosphates meubles surmontés par des calcaires à coprolithes et à nodules de silex, qui constituent un niveau repère pour l'exploitation minière. Ce dernier est surmonté par une alternance de bancs réguliers de calcaires marneux et phosphatés, de niveaux de phosphates meubles à grains grossiers, d'horizons continus de silex et, parfois, de niveaux silto-pélitiques d'âge thanétien à yprésien (Azmany et al., 1986). Le Lutétien est représenté à sa base par des alternances de niveaux à silex, de marnes et de calcaires peu phosphatés dans lesquels s'intercalent les derniers termes de la phosphatogenèse. La partie sommitale correspond à de puissants niveaux carbonatés, riches en gastéropodes, appelée dalle à Thersités (Salvan, 1963).

La série phosphatée surmonte une épaisse formation marneuse du Sénonien (Boujo, 1976 ; El Assel et al., 2012). Dans la majorité des bassins téthysiens et péritéthysiens, le Sénonien est généralement régressif, alors que le Maastrichtien est plutôt transgressif (Salvan & Farkhany, 1982 ; Hardenbol et al., 1998). Le Sénonien dans le bassin des Ouled Abdoun est couramment constitué de dépôts d'environnement marin très peu profond et confiné. Les dépôts évaporitiques, en particulier gypseux, y sont fréquents (El Assel et al., 2012). Les travaux de Choubert & de Salvan (1976) ont décrit par endroit du bassin des Ouled Abdoun une épaisse série sénonienne (plus de 250 m) formée exclusivement de marnes grisâtre et jaunâtre par effet de l'altération à l'affleurement. Ces observations expliqueraient le fort contraste d'impédance acoustique au passage des marnes sénoniennes aux calcaires phosphatés du Maastrichtien qui constituent la base de la série phosphatée.



**Figure 3 : Log stratigraphique synthétique de la zone d'étude(A).** (b1) Schistes et quartzites, (b2) Conglomérat de base, (b3) Argiles rouges et vertes légèrement anhydritique, (b4) basaltes doléritiques, (b5) Anhydrite, (b6) Dolomie, (b7) Dolomie marneuse, (b8) Marnes, (b9) Marnes dolomitiques, (b10) Calcaires lumachelliques, (b11) Argiles dolomitiques et dolomie à silex avec débris phosphatés, (b12) Calcaires sableux, conglomérats polygéniques à ciment argileux, marnes sableuse (b13) Croûte calcaire. **C. Log stratigraphique de la série phosphatée du bassin des Ouled Abdoun(B).** (c1) Marnes indurés à gypse, (c2) Marnes phosphatées, (c3) Marnes, (c4) Calcaire phosphatée, (c5) Sables phosphatée, (c6) Niveaux discontinus de silex, (c7) Marnes siliceux à silex, (c8) Dalle à Thersités.

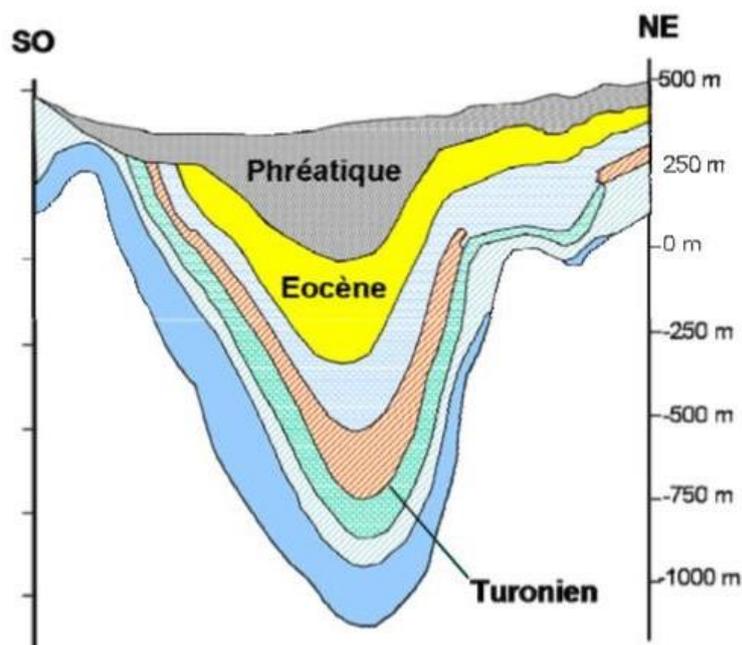
### 3. CONTEXTE HYDROGÉOLOGIQUE

Le système aquifère de la plaine du Tadla se présente sous forme d'une superposition de plusieurs nappes qui sont du bas vers le haut (Fig.4) :

- la nappe du Primaire
- la nappe du Turonien carbonaté
- la nappe du Sénonien carbonaté
- la nappe de l'Eocène calcaréo-sableux
- les nappes de Mio-Plio-Quaternaires alluvionnaires du Tadla (aquifères des Béni Amir, des Béni Moussa, aquifère des Béni Moussa-Dir).

L'épaisseur des aquifères de Tadla est très variable sur l'ensemble de la plaine de Tadla entraînant ainsi une hétérogénéité au niveau de la disponibilité de la ressource en eau sous terrain.

L'épaisseur de la nappe phréatique dépasse 80 m sur l'ensemble du périmètre de Tadla avec une valeur atteignant les 300 m au voisinage de l'Oued Oum Rbia. L'épaisseur de la nappe captive de l'éocène est relativement homogène, mais sa profondeur est la plus faible dans la partie nord-est du périmètre de Béni Amir où des forages dépassant 100 m de profondeur peuvent facilement l'atteindre. L'éocène disparaît à l'ouest du périmètre de Béni Moussa. Le turonien se situe à des profondeurs relativement élevées sur l'ensemble du périmètre ce qui le met théoriquement sur l'abri des pompages.



**Figure 4** : Schéma générale des aquifères de la plaine de Tadla (document interne Agence du bassin hydraulique d'Oum Rbia)

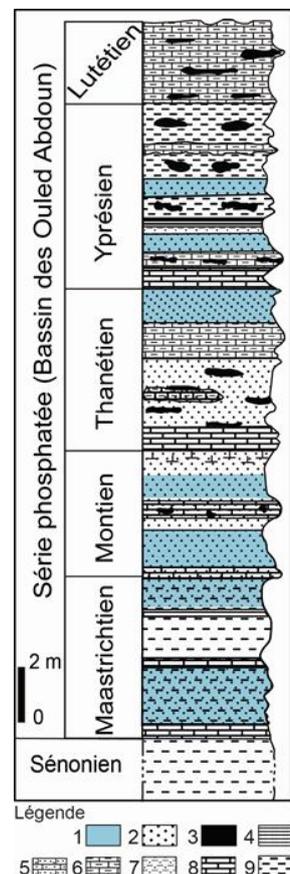
D'un point de vue hydrogéologique, on peut donc synthétiser d'après plusieurs travaux de recherche (Bougadra (1991), Ettazarini (2004), El Moktar et al. (2012) et

Karoum et al. (2014)) que les principaux aquifères souterrains encaissés dans la série sédimentaire des bassins des Ouled Abdoun correspondent aux calcaires karstiques du Turonien, aux horizons de phosphates meubles de la série phosphatée et aux calcaires à Thersités fracturés qui coiffent cette dernière. L'aquifère turonien est très profond (plus de 250m) dans les deux bassins susmentionnés et y donc peu reconnu et exploité. Celui correspondant à la dalle à Thersités fracturée d'âge Yprésien supérieur (Salvan, 1963) n'est important que dans les zones que la série phosphatée est enfouie sous la plaine de la Bahira et de Tadla. Dans les périmètres des mines à ciel ouvert aussi bien dans le bassin de Gantour que dans celui des Ouled Abdoun, le niveau piézométrique se situe généralement en dessous des calcaires yprésiens.

Cette étude s'intéresse aux aquifères correspondants aux horizons de phosphate meuble encaissés dans la série phosphatée. Il s'agit en réalité d'un système aquifère formé d'au moins huit horizons superposés de couches à phosphates meubles sableux surmontant chacune un intercalaire stérile imperméable argileux, marneux, banc continu de silex ou du calcaire phosphaté siliceux. Ces horizons aquifères communiquent entre eux via le réseau de fractures et microfailles affectant la série phosphatée. Ils sont du bas en haut (Fig. 5): (i) deux couches à phosphates sableux du Maastrichtien qui constituent l'aquifère le plus important dans les mines de Youssoufia et Benguéir ; (ii) quatre couches de phosphates meubles d'âge Montien-Thanétiens qui surmontent souvent des niveaux de calcaires siliceux. L'épaisseur de ces couches varie d'un endroit à l'autre des bassins étudiés ; et finalement les couches à phosphates grossiers de l'Yprésien qui surmontent soit des argiles plastiques soit des marnes siliceuses.

**Figure 5 :** Les principaux aquifères encaissés dans la série phosphatée de Sidi Chennane (d'après Ibach et al., 2019)

1 : Aquifères. 2: Phosphate sableux. 3: Silex. 4: Argiles.  
5: Calcaire phosphaté. 6: Calcaire marneux. 7: Marnes phosphatées. 8: Calcaires. 9: Marnes



#### 4. MESURES PIEZOMETRIQUES

Les mesures du niveau d'eau dans les puits et forages constituent la base de toute étude hydrologique. Il existe de nombreux systèmes pour mesurer les hauteurs d'eau. On pourra soit déterminer la cote de la margelle et soustraire par la suite la cote du niveau d'eau, soit définir un niveau repère en surface et rapporter les profondeurs d'eau par rapport à cette référence. On parlera alors de carte piézométrique en isohypses ou en isobathes,...

#### **4.1. Méthode utilisée**

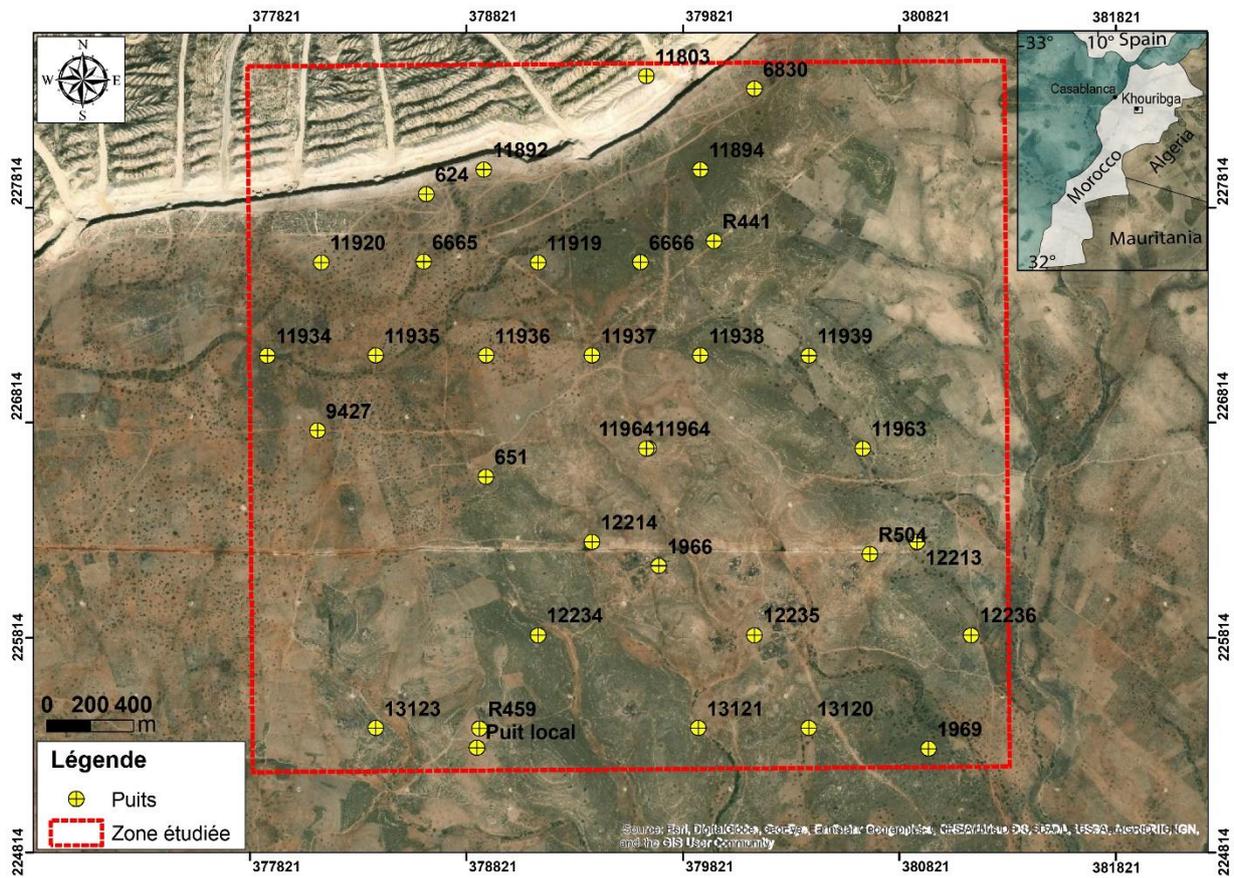
Le matériel de mesure utilisé est une sonde piézométrique manuelle associé à un signal sonore (Fig. 6).

La démarche est la suivante :

- Relevé des coordonnées GPS de la margelle du puits
- Mesure du niveau d'eau à l'aide d'une sonde piézométrique manuelle (capacitive sonore)
- Mesure du fond de l'ouvrage, également grâce à la sonde
- Relevé des dimensions de l'ouvrage (diamètre, hauteur par rapport au sol, la margelle...)
- Prise des photos
- Pour chaque point de mesure, une fiche a été remplie où ont été retranscrites toutes les informations citées ci-dessus. Ces fiches piézomètres permettent d'avoir une synthèse des informations de chaque point et une traçabilité de la mesure. Nous présentons dans le tableau 1, les données acquises lors de notre stage.



**Figure 6 :** Photographie montrant l'équipement utilisé pour le levé du niveau d'eau dans les puits OCP.



**Figure 7 :** Carte de situation des puits levé à Sidi Chennane Sud

#### 4.2. Tableau des données piézométriques

N° PUIITS	X	Y	Z	Zp	OBSERVATION
11803	379652	228424	555,87	509,87	Margelle a 1m de hauteur
11894	379902	227990,99	560,4	504,2	
6830	380151,98	228365,37	560,4	509	
R441	379965,95	227657,9	536	494,8	La hauteur de la margelle : 60 cm Diamètre : 2 m
6666	379626,9	227559,3	545,1	495,3	Hauteur de la margelle : 50m Etat de la margelle : fracturée
11938	379902	227125	548,46	487,26	
11963	380652	226692	520,77	-	Puit sec
11939	380402	227124,97	520,78	-	Puit sec
11964	379663	226693	527,97	476,77	
11892	378902	227990,99	543	-	Puit sec
11919	379152	227557,98	545,13	-	Puit sec Indice de dérangement
11964	379652	226692	527,97	478,37	Pompage
1966	379710,18	226146,69	519,42	465,79	Affleurement de calcaire éocène Diamètre de puit : 2m
13121	379892	225392,93	501,41	458,48	Talweg, affleurement de calcaire série normale
13120	380402	225392,93	511,11	458,97	Dérangement (380359 ; 225491)
12235	380152	225825,94	517,12	464,51	
R504	380685,41	226201,16	522,43	-	Puit sec
12213	380902	226258,95	509,49	-	Puit sec
12236	381152	225825,94	501,53	-	Puit sec
1969	380956,05	225296,14	503,74	451,64	Silexite gréseuse à pendage converge

					vers le nord-Est de puit
12214	379402	226258,95	520,21	467,26	Pompage
12234	379152	225825,94	512,98	-	Puit sec
R459	378882,99	225390,63	512	-	Puit sec
Puit local	378870	225300	512,2	460,55	Puit local
13123	378402	225392,93	517,62	460,57	Faciès noir, indice de dérangement vers le N-E de puit
624	378636	227876	539,8	-	Puit sec
11920	378152,48	227558,07	534,79	-	Puit sec
11934	377902	227124,97	537,05	471,6	
9427	378134,59	226776,96	538,3	476,1	
11936	378912	227125,32	547	482,4	
11935	378402	227125	536,72	472,82	
6665	378624,8	227561,4	536,6	-	Puit sec
651	378911,94	226561,43	538,72	-	Puit sec
11937	379402	227125	542,02	485,42	

**Tableau 1 :** Données piézométriques acquises lors du stage

#### 4.3. La carte piézométrique

Les données acquises ont été introduites dans le logiciel ArcGIS pour établir la carte piézométrique de la zone d'étude (Fig. 8). Sur cette dernière on a reporté la position des différents puits relevés. Au total une superficie de 10 km<sup>2</sup> a été recouverte par les mesures piézométriques, ce qui nous donne une carte assez représentative de la zone d'étude. Nous avons adopté une équidistance des iso-valeurs de 10 m mais le lecteur pourra se référer aux plages de couleurs définies pour chaque tranche de côtes du niveau d'eau dans les puits relevés.

#### 4.4. Commentaire :

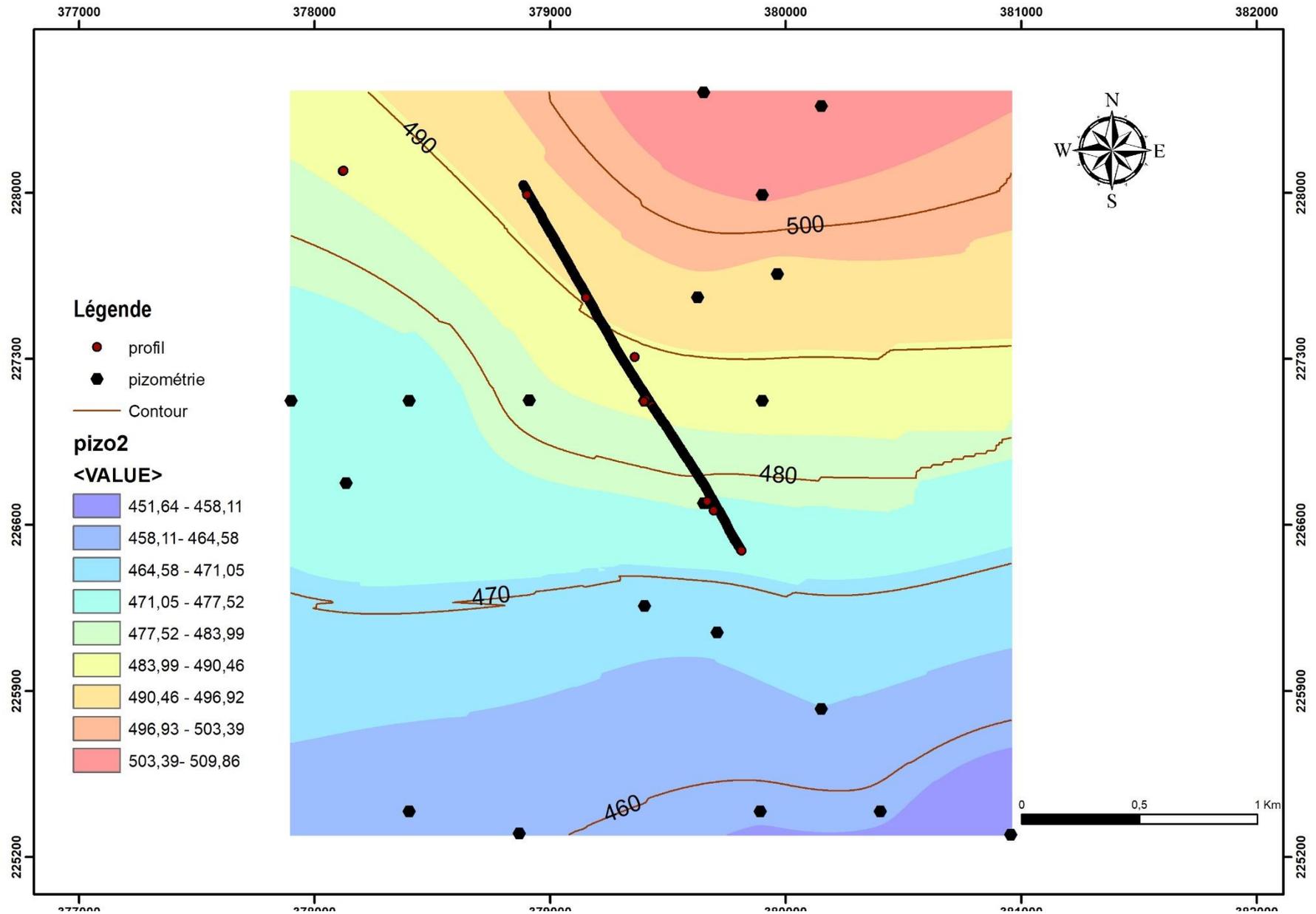
A première observation de la carte, on constate que la côte de l'eau dans les puits dans notre zone d'étude varie entre 510 et 451 par rapport au niveau de la mer soit plus de 50 m de dénivelé. Ce dénivelé engendre un gradient hydraulique assez important que l'on peut schématiser selon deux sens d'écoulements :

- Un écoulement NW-SE avec un gradient assez fort dans la partie Est de la zone d'étude
- Un écoulement NE-SW avec un gradient faible dans la partie Ouest

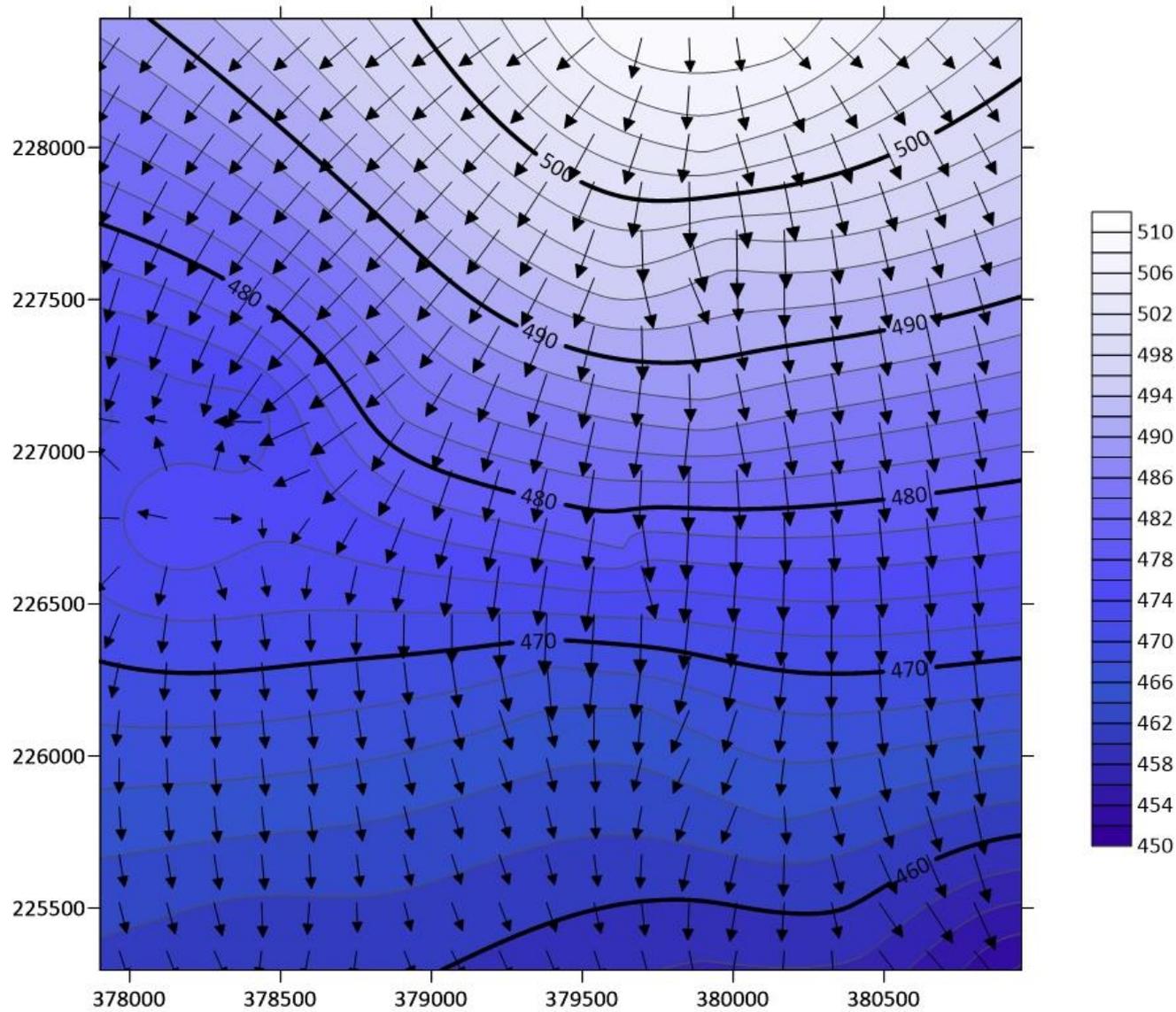
En effet, dans la partie Est, les courbes sont plus serrées que la partie Ouest ce qui traduit un gradient hydraulique fort, ce qui pourra donner une idée sur la perméabilité de la section Est qui sera probablement plus importante que celle dans la section Ouest. L'écoulement général de l'eau souterraine s'effectue donc, d'après les résultats de ce levé piézométrique de la zone où existent actuellement les chantiers d'exploitation des phosphates (partie nord) vers la plaine de Tadla (en direction de la ville de Fkih Ben Salah).

En plus du traitement des données piézométriques par le logiciel ArcGis, nous avons aussi utilisé le logiciel Surfer pour question de comparer les interpolations entre mesures à l'aide des deux logiciels. Cela a beaucoup de sens sur la fiabilité de la carte piézométrique produite. Nous avons tout d'abord 'gridé' les données correspondantes à la côte de l'eau avec la méthode de 'Krigage', puis établi la carte piézométrique par le logiciel Surfer (Fig. 9). La comparaison entre les deux cartes obtenues montre qu'il n'y a pas une différence significative, ce qui rassure sur la fiabilité des documents élaborés.

# carte piézométrique de Sidi Chennane



### Carte piézométrique Sidi Chennane



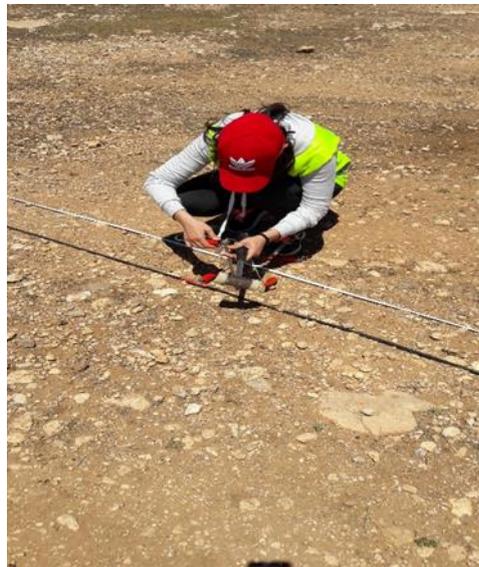
**Figure 9** : Carte piézométrique de la zone d'étude élaborée à la faveur de notre stage (Logiciel Surfer)

## CHAPITRE 3 : TRAVAUX GEOPHYSIQUES REALISES

Vu la non disponibilité des données géophysique de 2019 on a utilisé les anciennes valeurs correspondant à 2017.

### 1. DESCRIPTION DES TRAVAUX REALISES

Les travaux géophysiques de terrain furent développés pendant la période du 26 à 30 avril 2019. Ils ont consisté en des levés de Tomographie Electrique des Résistivités (ERT) et l'Electromagnétisme en mode Fréquentielle (FDEM). Au total, un profil ERT de 2km a été réalisé (photo 10) et parcelles de 100x 100m ont été couvertes par le levé FDEM (photo 11). Nous résumons ci-dessous les principes des méthodes géophysiques utilisées dans notre prospection hydro-géophysique du gisement de Sidi Chennane Sud.

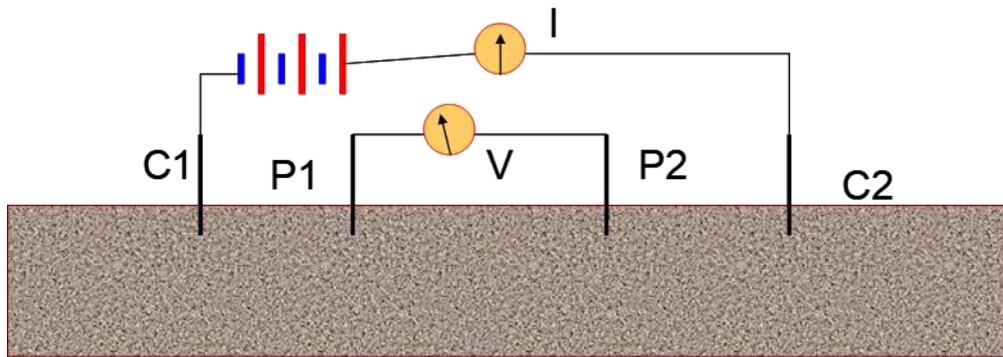


**Figure 10:** Photographie prise lors de l'exécution du profil ERT à Sidi Chennane Sud  
**Figure 11:** Photographie prise lors de l'exécution des levés FDEM à Sidi Chennane Sud



## 1.1. Prospection électrique

La Tomographie Electrique des Résistivités (Electric Resistivity Tomography, ERT) est une technique de recherche non destructive qui permet d'obtenir une image des résistivités 2D du sous-sol. Pour cela, on détermine la résistivité apparente du terrain avec un dispositif composé de 4 électrodes (Fig. 12) ; deux pour l'injection du courant, (C1 et C2) et deux (P1 et P2) pour la mesure de la différence de potentiel qu'on génère. Les électrodes sont séparées entre eux de certaines distances prédéterminées (5 m pour cette étude).

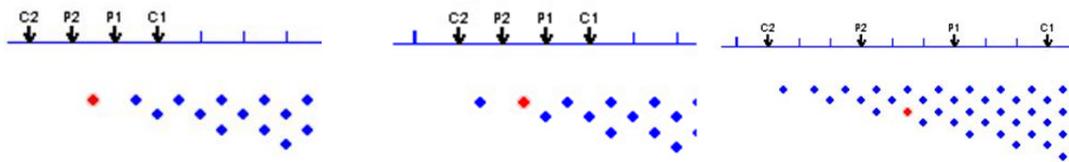


**Figure 12 :** Dispositif quadripôle pour la mesure de résistivités. I est l'intensité du courant injecté. V est la différence de potentiel générée. Les distances entre les électrodes permettent calculer la constante géométrique K du dispositif.

La résistivité apparente se calcule grâce à l'expression :  $\rho_a = K \frac{\Delta V}{I}$

Dans la Figure 13 on peut voir le point du sous-sol à qui se réfère une mesure donnée au courant de l'exécution d'un profil ERT. Avec une disposition symétrique des électrodes, il se situe dans le demi-point des électrodes de potentiel et leur profondeur est fonction des distances inter-électrodes. De cette façon, si on change les positions des électrodes le long d'un profil, on peut obtenir successivement des mesures de résistivité apparente pour une profondeur déterminée. Si postérieurement, on parcourt le même profil avec différentes séparations des électrodes, on obtient des lectures pour une autre profondeur.

Le procédé habituel consiste à réaliser des passages successifs avec différentes séparations d'électrodes pour obtenir des lectures correspondantes à certaines profondeurs. Avec le dispositif expérimental on obtient une collection de mesures de résistivité apparente que postérieurement seront converties à des «résistivités réelles» et «profondeurs vraies» grâce au traitement approprié « l'inversion ».

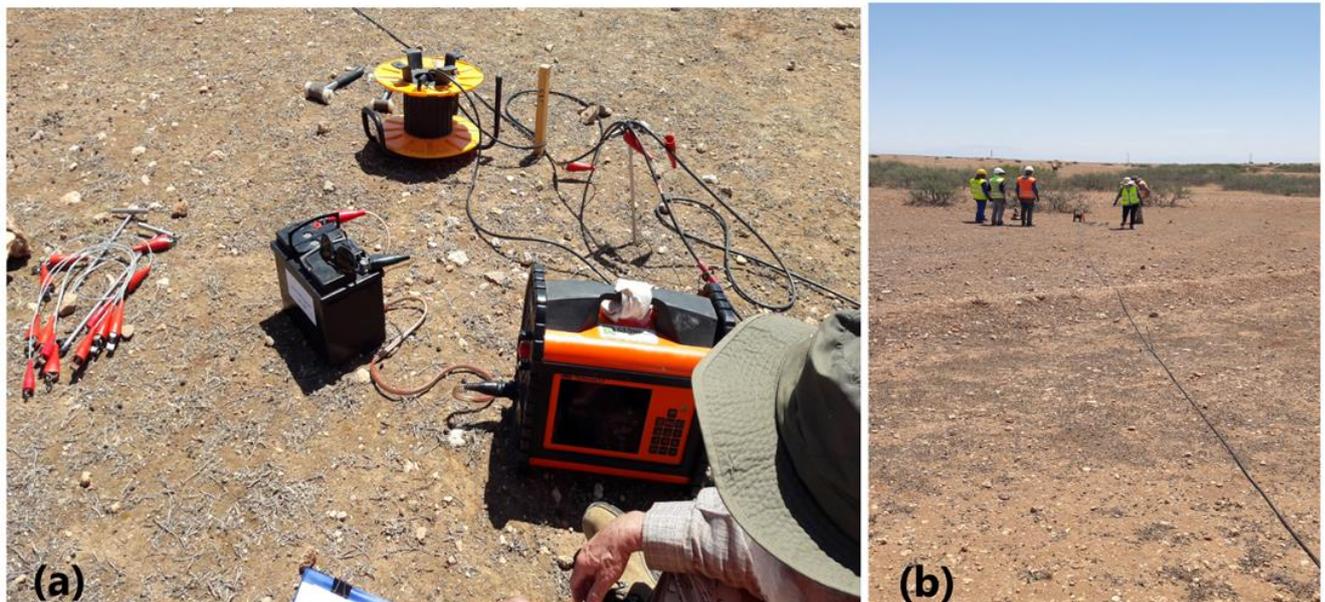


**Figure 13 :** Position des électrodes le long d'un profil ERT qui détermine le point de mesure de la résistivité apparente (en rouge). Tous les points en bleu seront mesurés grâce à des passages successifs dans au cours de la prospection.

### Instrumentation utilisée et travail sur le terrain

L'équipement de tomographie électrique utilisé (Figure 14) correspond à :

- Résistivimètre ABEM TERRAMETER LS 12
- 4 bobines de câble multi-électrodes de 21 sorties espacées 5 m
- 81 électrodes d'acier inoxydable
- Connecteurs et matériel auxiliaire
- Programmes d'acquisition



**Figure 14 :** Équipement de tomographie électrique utilisé (a) À gauche on peut voir le résistivimètre et l'alimentation. (b) Vue générale de la ligne électrique avec le câble, les électrodes et les connecteurs.

Le traitement des données de tomographie électrique est effectué avec le logiciel Res2dinv (V.358; Geotomo Software), basé sur le concept de la résolution du problème inverse

en définissant une maille de blocs dans le sous-sol. Dans chaque bloc, on attribue une résistivité et une «sensibilité» en fonction des données expérimentales. Avec ce premier modèle et l'équation de transport du potentiel électrique, on génère les premières résistivités apparentes qui sont comparées avec les résistivités expérimentales. Le processus itératif conduit à minimiser la différence entre les deux types de résistivités apparentes (calculés et expérimentales) grâce à des algorithmes d'inversion spécifiques qui modifient progressivement les résistivités des blocs du modèle jusqu'à ce que les résistivités apparentes calculées soient peu différentes des résistivités expérimentales mesurées. Quand l'ajustage est satisfaisant, l'image électrique obtenue est considéré comme celle du modèle des résistivités réelles du sous-sol étudié.

## 1.2. Prospection FDEM

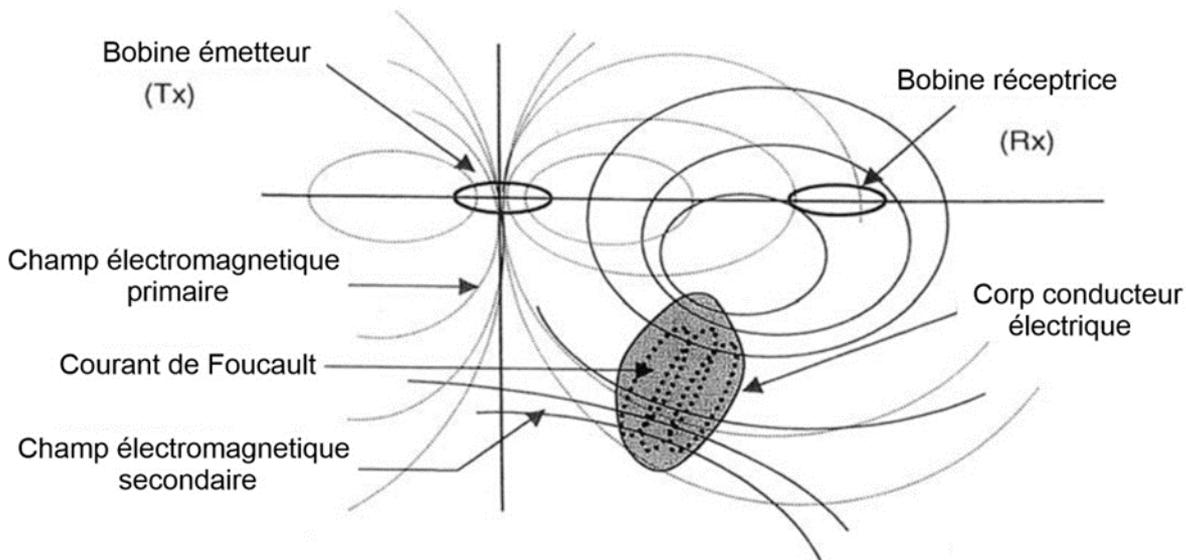
L'équipement FDEM permet de mesurer la conductivité de la terre au moyen d'une induction électromagnétique. Pour cette étude, nous avons utilisé le model EM-31MK-2 de Geonics Limited (Fig.11). C'est un équipement qui permet de mesurer la distribution de la conductivité pour les 4-6 premiers mètres du sol.

Le dispositif est composé pour deux bobines : un émetteur (Tx) et un autre récepteur (Rx). La bobine émettrice permet d'émettre un champ électromagnétique primaire (HP) à fréquence fixé connu,  $\omega$ , qui induit un courant de faible intensité dans le terrain (courant de Foucault). Ce courant, à son tour, génère un autre champ électromagnétique secondaire (HS) qui est mesuré par la bobine réceptrice. Comme le champ primaire est de basse fréquence, de l'ordre de kHz, il y a une proportion linéaire entre le quotient HS / HP et la conductivité électrique apparente du terrain  $\sigma_a$  mesurée en mS / m:

$$\sigma_a = \frac{4}{\mu_o \omega S^2} \left[ \frac{H_S}{H_P} \right]$$

«S» est la séparation entre les bobines mesurées en mètres et « $\mu_o$ » la susceptibilité magnétique de l'air.

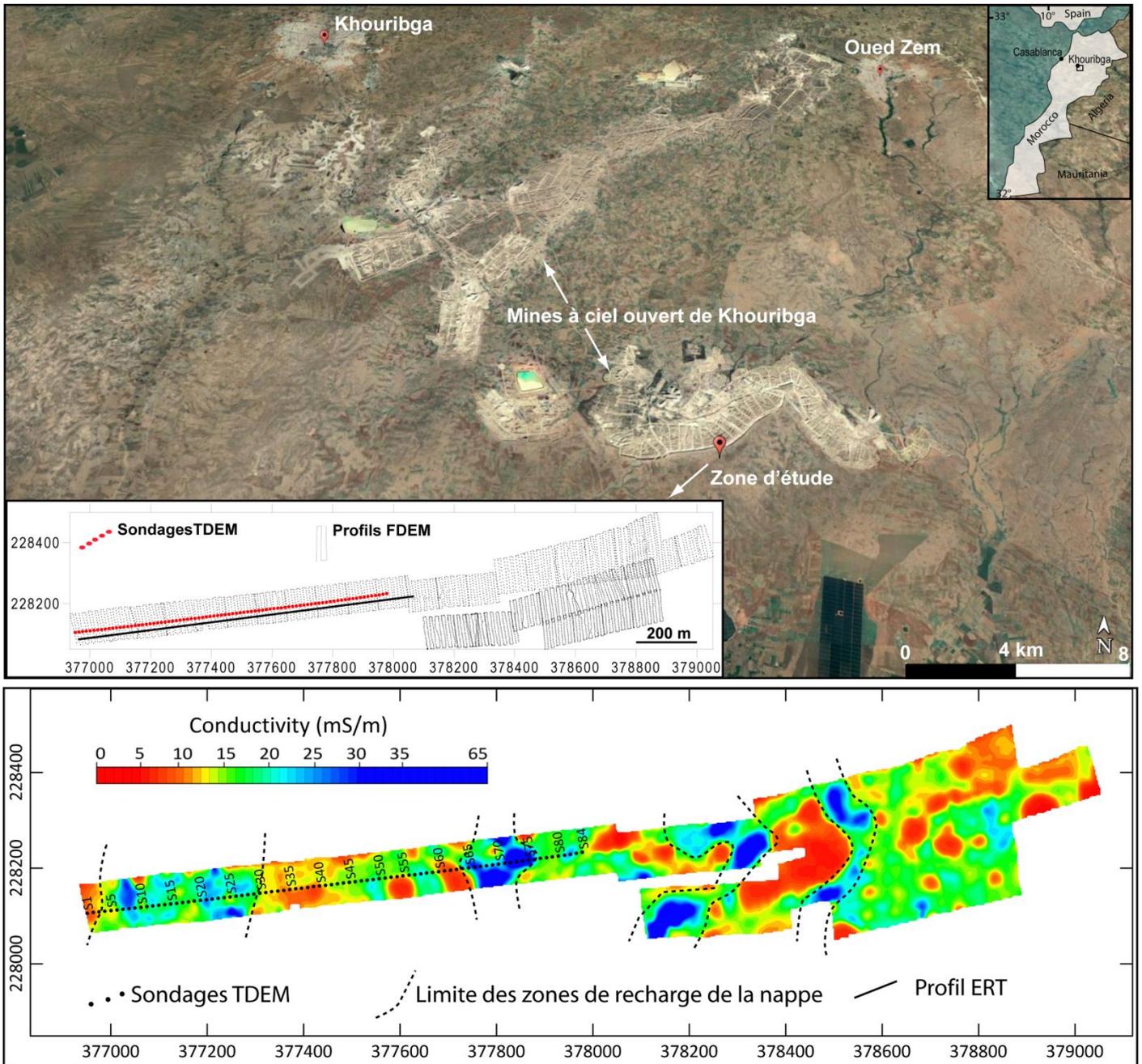
Les corps géologiques conducteurs ont une réponse plus énergétique en FDEM que les corps résistifs.



**Figure 15 :** Schéma de l'interaction des différents champs qui interagissent dans le processus des mesures FDEM.

Nous avons utilisé un GPS de main que nous avons synchronisé avec l'EM-31 MK-2 en le connectant avec la console de contrôle de l'acquisition (Fig.11). De cette façon, il est possible de faire correspondre chaque mesure effectuée avec ses coordonnées. Les profils FDEM réalisés dans chaque parcelle sont séparés de 10 m.

La première étape a consisté en la correction des coordonnées géographiques en les plaçant dans le système de référence local. Les profils FDEM ont été ainsi implantés (Fig16). Dans la deuxième étape, nous avons créé une grille régulière en considérant une interpolation avec le logiciel Surfer 13. Pour obtenir un meilleur rapport signal/bruit, nous avons lissé chaque profil par le calcul d'une moyenne mobile. Différents filtrages spatiales ont été testés pour améliorer la qualité des données. Finalement, on a adopté une palette de couleur approprié pour la représentation des anomalies les plus importantes.



**Figure 16 :** Localisation des levés géophysiques réalisés à Sidi Chennane Sud. En bas, carte des conductivités apparentes élaborées à partir des mesures FDEM acquises.

### 1.3. Prospection TDEM

Les méthodes électromagnétiques se basent sur le phénomène de diffusion d'un champ électromagnétique (EM) dans le sous-sol pour déterminer sa résistivité électrique. Pour les Sondages Electromagnétiques Temporels (TDEM) réalisés sur le site minier de Sidi Chennane, le champ EM, appelé primaire, est créé par la coupure brusque d'un courant circulant dans une bobine émettrice disposée au sol. Le champ secondaire, associé aux courants induits, est mesuré par une bobine réceptrice après la coupure. Les courbes des sondages TDEM donnent la variation de la résistivité apparente du sous-sol en fonction du temps, autrement dit en fonction de la profondeur, qui croît avec le temps au cours duquel le champ secondaire est mesuré (Galibert et al., 1996 ; Descloîtres et al., 2000). Les courbes enregistrées peuvent, par conséquent, être assimilées à des pseudo-profondeurs (McNeill, 1994 ; Schmutz, 1999). La profondeur d'investigation est fonction des résistivités des formations et du rapport signal sur bruit, mais aussi de la dimension de la boucle de mesures. Elle est estimée à 1,5 à 2,5 fois la grandeur de cette boucle (AEMR, 1997).

Le matériel utilisé est de type Tem-Fast ProSystem en possession du service géologique de l'OCP à Khouribga. Les sondages ont été réalisés en adoptant une boucle d'émission carrée de 20 m de côté et tractée au sol par quatre ouvriers. Au total 85 sondages TDEM ont été exécutés avec un pas d'échantillonnage de 12,5 m le long d'un profil de 1050 m (Fig. 17). Les données de chaque sondage ont été inversées moyennant le logiciel TemRes basé sur la technique Temfast Prosystem (AEMR, 1997). La corrélation entre les modèles issus des inversions des sondages TDEM réalisés a permis de situer les horizons conducteurs pouvant être attribués à des aquifères souterrains.

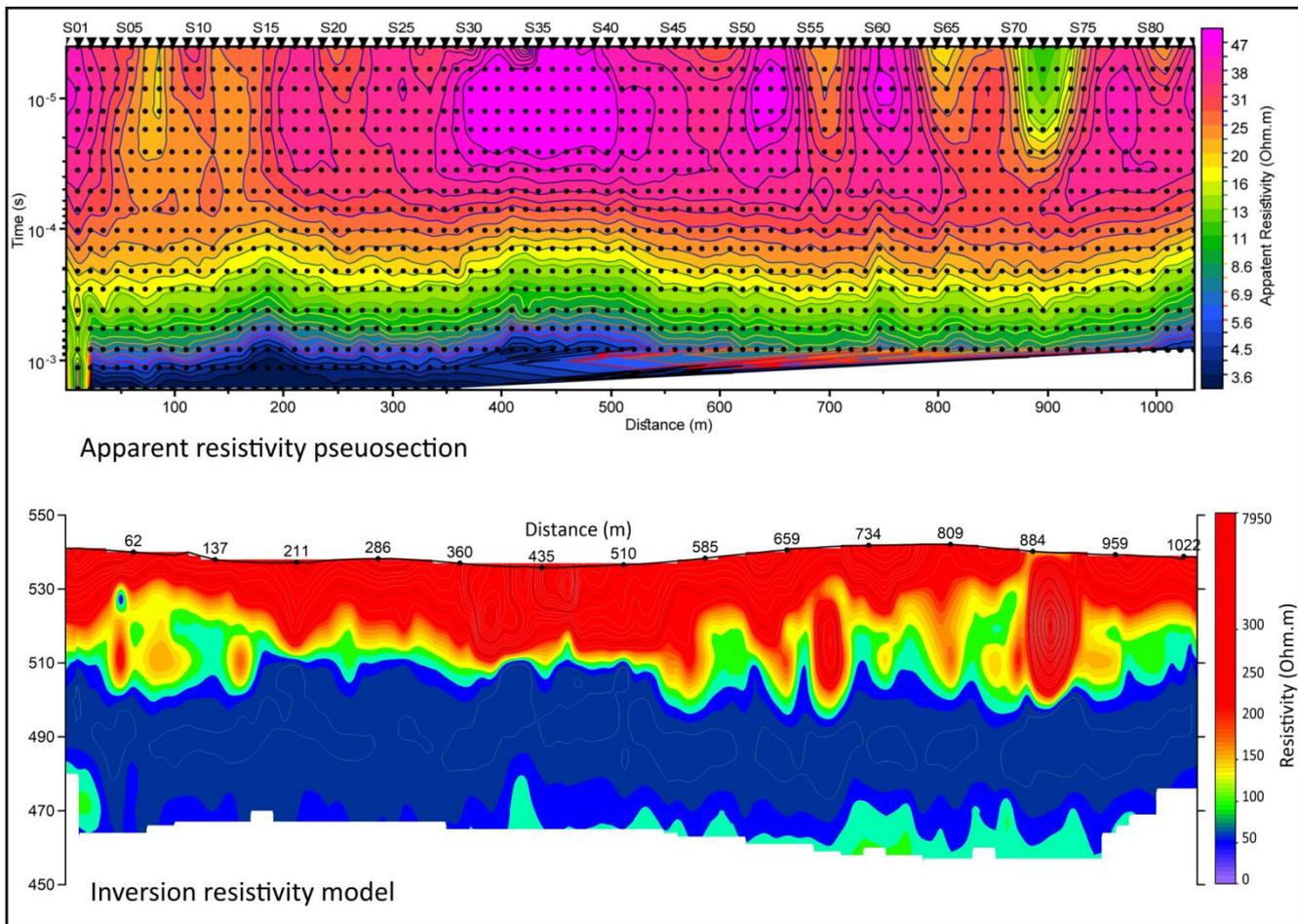
## **CHAPITRE 4 : ANALYSE HYDRO-GEOPHYSIQUE DES DONNEES TDEM, FDEM ET ERT:**

### **1. CLÉS POUR L'INTERPRÉTATION**

Les modèles géophysiques constituent des images approximatives du sous-sol puisque, comme il est connu, ils sont toujours affectés par des erreurs (intrinsèques) expérimentales, méthodologiques et de calcul. L'interprétation des résultats doit être toujours contrôlée par les données géologiques locales et la convergence des résultats issus de plusieurs techniques doit être assurée. C'est pour cette raison que nous avons utilisé deux méthodes distinctes d'analyse du sous-sol ; même si on ne disposait que d'un temps limité pour les travaux sur le terrain. Comme on verra, ci-dessous, l'utilisation de deux techniques d'exploration différentes permet d'obtenir des réponses distinctes des matériels sous-jacents (résistivités et conductivités) dont l'analyse conjointe facilite l'interprétation. Un autre aspect inéludable pour interpréter les modèles géophysiques est l'intégration d'un maximum d'informations de l'environnement immédiat.

### **2. PRESENTATION DES RESULTATS**

Pour faciliter l'interprétation des résultats, nous avons utilisé la même palette des couleurs aussi bien pour les résistivités (méthode TDEM) que pour les conductivités (méthode EM31). Les résultats des sondages TDEM sont présentés sous forme d'une pseudo-section obtenue par corrélation des résistivités d'un sondage à l'autre après inversion des 85 sondages réalisés (Fig. 17). La pseudo-section montre un horizon nettement conducteur situé à la cote 490 m c'est-à-dire à une profondeur moyenne de 50 m. Cet horizon conducteur est grossièrement continu et s'étale sur plus de 1 km et le long du profil TDEM exécuté. En dessous, au-delà de 70 m de profondeur, les couches sont moyennement résistantes. Elles correspondent aux marnes grises compactes et marnes gypseuses du Sénonien que l'on peut décrire dans les puits de reconnaissance de l'OCP à cette profondeur. Au-dessus de l'horizon conducteur, viennent des terrains moyennement résistants et résistants qui correspondent aux couches phosphatées à très faible teneur en eau et intercalaires formés de calcaires et niveaux riches en silex. Plus proche de la surface, les couches sont encore plus résistantes car secs et riches en encroûtement calcaires. D'autres corps résistants recoupent aussi la série phosphatée. Ils sont attribués aux zones dérangées de celle-ci connus par les géo-miniers sous le nom de *dérangements*. La formation de ces structures est souvent accompagnée d'un phénomène de silicification localisé. Les travaux de Kchikach et al. 2002 et Kchikach et al., 2012, montrent que les zones dérangées de la série phosphatée sont caractérisées par une signature électrique nettement résistive par rapport à l'encaissant.



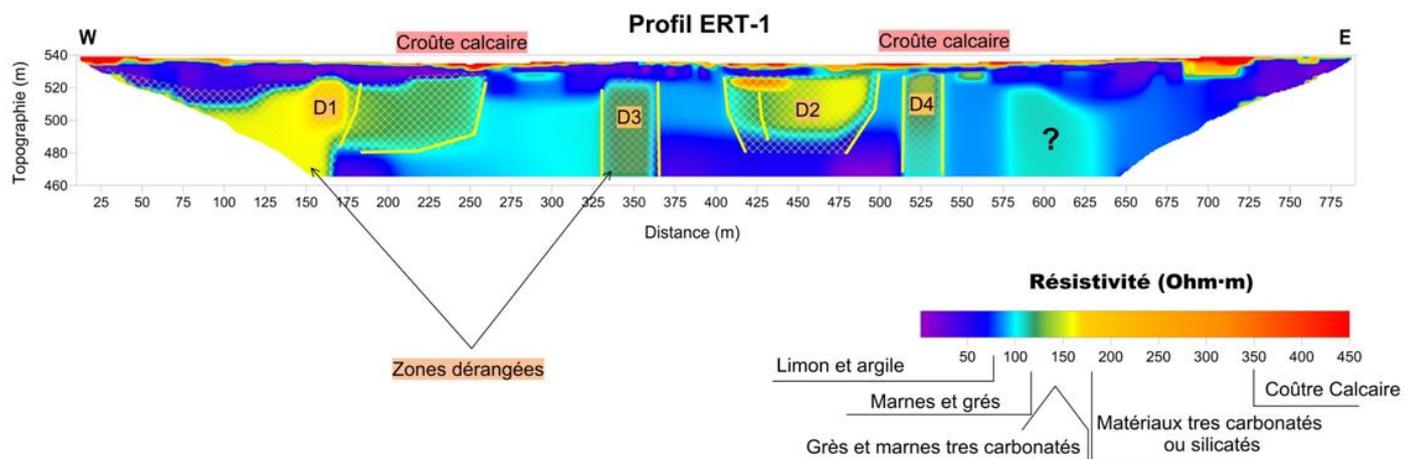
**Figure 17** : Profil TDEM réalisé. En bas, modèle issu de l'inversion des données.

La carte des conductivités apparentes obtenue après lissage des données EM31 et échantillonnage selon une maille régulière de 1x1m, montre une série d'anomalies conductrices dans la zone étudiée (An1 à An 4). Ces anomalies où les valeurs des conductivités sont supérieures à 20 mS/m (Fig. 16) correspondent généralement sur le terrain à des zones altérées et fracturées des encroûtements calcaires. Par contre, les zones où ces encroûtements semblent plus épais et moins fracturées offrent des conductivités inférieures à 15 mS/m. Les anomalies conductrices se superposent donc avec des couloirs fracturés et altérés que l'on peut facilement délimiter sur le terrain. En effet, lors des levés géophysiques, ces couloirs se distinguaient sur le terrain par leur aspect humide. Ils constitueraient donc des zones potentielles d'infiltration des eaux de surface vers l'aquifère identifié dans la même zone par la méthode TDEM. En dépit de sa faible profondeur d'investigation, la technique EM31 serait un bon outil de cartographie des zones de recharge des aquifères souterrains encaissées dans la série phosphatée. Les puits et forages d'eau les plus productifs seraient, à notre sens, ceux implantés à l'aplomb des anomalies conductrices de fortes amplitudes.

En général, les résistivités des matériaux situés en profondeur tout le long du profil, varient entre 50 et 120  $\Omega \cdot m$  (couleurs bleus et violet). A ces profondeurs, les couches sont généralement formées de phosphates meubles, marnes et calcaires phosphatées et argiles. La teneur en eau devra être assez élevée. Les conductivités de ces matériaux ressorties par la

signature FDEM, sont supérieures à 20 mS/m. Ils sont marqués avec des couleurs bleus sur la carte établie (Fig. 18).

On voit un premier niveau superficiel très résistive (plus que 350  $\Omega\cdot m$  et de conductivité inférieur 20 mS/m). Ce niveau ne pénètre plus que 5 m (couleurs rouges). Nous attribuons ce niveau résistif à des encroutements calcaires que l'on peut facilement voir sur le terrain. Parfois ces corps résistifs atteignent jusqu'à 20 mètres de profondeur. Ils correspondent probablement à la partie supérieure de corps dérangés (formées de carbonates ou silex). Nous les avons marqués en couleur jaune, les zones d'une résistivité apparente de 120  $\Omega\cdot m$  dans le profil électrique. Il s'agit de corps verticaux avec les limites nettement définies. Nous avons délimité les zones attribuées à des dérangements dans tous les profils électriques (D1, D2, D3 et D4). La conductivité de ces mêmes zones dans les résultats de FDEM ne dépasse pas les 15 mS/m.



**Figure 18** : Profil ERT réalisé montrant les différentes gammes des résistivités obtenues.

Le profil ERT montre que les horizons conducteurs qui peuvent être attribués à des aquifères se situent au-delà de 40 m de profondeur. Cela corrobore avec les résultats issus de l'interprétation des données TDEM de la même zone.

## CONCLUSIONS GENERALES

Cette étude nous a permis d'élaborer la carte piézométrique de zone étudiée qui montre que la cote de l'eau dans les puits varie entre 510 et 451 par rapport au niveau de la mer soit plus de 50 m de dénivelé. Ce dénivelé engendre un gradient hydraulique assez important que l'on peut schématiser selon deux sens d'écoulements :

- Un écoulement NW-SE avec un gradient assez fort dans la partie Est de la zone d'étude
- Un écoulement NE-SW avec un gradient faible dans la partie Ouest.

On ce qui concerne l'étude géophysique, elle montre clairement l'efficacité des méthodes utilisées pour prospector les ressources hydriques souterraines et évaluer leur importance dans le contexte géologique des mines à ciel ouvert de Kouribga. Le modèle hydrogéologique issu de l'inversion des données corrobore d'une méthode à l'autre et avec les données hydrogéologiques réelles du site. L'aquifère mis évidence correspond aux deux couches de phosphates meubles maastrichtiennes à forte teneur en eau comme le montre les travaux d'exploitation dans les zones avoisinantes.

Le profil ERT permet également de délimiter en profondeur les horizons conducteurs attribués aux aquifères souterrains. Ils montrent clairement que les aquifères dans la zone étudiée se situent au-delà de 40 m de profondeur. Les horizons aquifères correspondants aux couches de phosphates meubles et les intercalaires marneux et calcaires humides offrent des signatures électriques comparables limitant ainsi de situer avec précision le toit et le mur de l'aquifère supposé saturé. Par contre, cette méthode est sensible aux variations latérales des résistivités le long du même horizon aquifère. Ces variations traduiraient l'évolution de la teneur en eau d'une zone à l'autre le long de ce dernier.

Les sondages TDEM réalisés dans le site minier de Kouribga ont permis de mettre en évidence un horizon conducteur situé à une profondeur moyenne de 50 m. la corrélation entre les modèles des 85 sondages exécutés montre que ce dernier est continu dans toute la zone prospectée. L'intégration des données des coupes lithologiques des puits OCP avoisinants permet d'attribuer ce conducteur aux couches phosphatées d'âge Maastrichtien inférieur. Ces derniers surmontent les marnes sénoniennes compactes et imperméables qui empêchent l'infiltration des eaux souterraine plus en profondeur. C'est donc les couches à phosphates meubles du Maastrichtien inférieur qui constituent l'aquifère le plus important dans le contexte géologique des mines à ciel ouvert de Kouribga. La réalisation de levés géophysiques de plus grande envergure, permettrait de mieux appréhender l'aquifère maastrichtien inférieur et d'évaluer ses paramètres hydrodynamiques.

En dépit de sa faible profondeur d'investigation, la méthode FDEM peut être utilisée comme outil de cartographie et délimitation des zones de recharge en surface des aquifères encaissés dans la série phosphatée. La superposition de la carte des conductivités issue des données FDEM aux résultats TDEM et à la distribution spatiale des paramètres hydrodynamiques de l'aquifère, permettrait de guider l'implantation des forages ou puits d'exploitation de l'eau souterraine vers les zones les plus productives. La localisation de ces zones permettra aussi aux géo-miniers de l'OCP, de prédire les dispositions nécessaires pour l'extraction des phosphates noyés.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- A. Boujo, Contribution à l'étude géologique du gisement de phosphates des Ganntour, Maroc occidental, Notes Mém. Serv. Géol. Maroc 262 (1976) (227 p.) ; Sci. Géol. Mém. Strasb. 43 (1976) (227 p.).
- Azmany et al., 1986 : AZMANY, M., FARKHANY, X., et SALVAN, H. M. Gisement des Ouled Abdoun, géologie des gites minéraux marocains. Notes et Mémoires, Service Géologique du Maroc, 1986, vol. 276, no 3, p. 200-249.
- Azmany, M. Evolution des faciès sur le gisement des Ouled Abdoun, Mines, Géologie et Energie, Rabat, 44 p.35-38. (1979).
- BELFKIRA, Omar. Evolutions sédimentologiques et géochimiques de la série phosphatée du Maestrichtien des Ouled Abdoun (Maroc). 1980. Thèse de doctorat. Université Scientifique et Médicale de Grenoble.
- Boujo, A., 1976. Contribution à l'étude géologique du gisement de phosphate crétacé-éocène des Ganntour, Maroc occidental. PhDThesis, Université Louis Pasteur de Strasbourg, Institut de géologie, 227 pp.
- Bouda, A., Salvan, H.M., 1971. État des connaissances sur le plateau continental marocain et ses dépôts phosphatés, Mines, Géologie et Énergie, 1971 (132 p.).
- BOUDA, A. et SALVAN, M. État des connaissances sur le plateau continental marocain et ses dépôts phosphatés. Mines, Géologie et Énergie, 1971, vol. 25, p. 15-52.
- BOUGADRA, A. Synthèse hydrogéologique de la Bahira occidentale. 1991. Thèse de doctorat. Thèse de troisième cycle. Université Cadi Ayyad, Marrakech.
- Bougadra (1991), Ettazarini (2004), El Moktar et al. (2012) et Karoum et al. (2014))
- CHALIKAKIS, Konstantinos, NIELSEN, Mette Ryom, LEGCHENKO, Anatoli, et al. Investigation of sedimentary aquifers in Denmark using the magnetic resonance sounding method (MRS). Comptes Rendus Geoscience, 2009, vol. 341, no 10-11, p. 918-927.
- Choubert, G., Salvan, H.M. (1976). Evolution du domaine atlasique marocain depuis les temps paléozoïques. Mémoires du Service Géologique de France, 1, 447-527.
- CHOUBERT, G. et SALVAN, H. Essai sur la paléogéographie du Sénonien au Maroc. Notes et Mémoires du Service Géologique du Maroc, 1949, vol. 74, p. 13-50.
- Compagnie Générale de Géophysique (CGG), 1985. Rapport de synthèse sur la campagne de sismique réflexion et forages pétrolier du bassin de Tadla (Document interne ONHYM).
- El Assel, N., Kchikach, A., Durllet, C., AlFedy, N., El Hariri, K., Charroud, M., Jaffal, M., Jourani, E., Amaghaz, M., 2013. Mise en évidence d'un Sénonien gypseux sous la série phosphatée du bassin des Ouled Abdoun: Un nouveau point de départ pour l'origine des zones dérangées dans les mines à ciel ouvert de Khouribga, Maroc. EstudiosGeológicos, 69(1), 47-70.
- EL HADDI, Hamid. Les silicifications de la série phosphatée des Ouled Abdoun (Maestrichtien-Lutétien Maroc): Sédimentologie, Minéralogie, Géochimie et Contexte Génétique. 2014. Thèse de doctorat. Université Hassan II de Casablanca; Faculté des Sciences Ben M'Sik.

- El Hammichi, F., Elmi, A., Faure-Muret, K., 2002. Une plate-forme en distension, témoin de phases pré-accrétion téthysienne en Afrique du nord pendant le Toarcien- Aalenien (synclinal IguerAwragh-Afennourir, Moyen Atlas occidental, Maroc). *Comptes Rendus Geoscience*, 334, 1003-1010.
- ELMOUTASSAMIH M. Groupe OCP historique et présentation[en ligne].Disponible sur : <https://fr.scribd.com/doc/144523779/groupe-ocp-historique-et-presentation-docx> [Consulté le 10/05/2019]
- Fedan, B., 1989. Evolution géodynamique d'un bassin intraplaque sur décrochements: le Moyen Atlas durant le Méso-Cénozoïque. PhdThesis, Université Mohammed V, Rabat, 338 pp.
- GALIBERT, Pierre-Yves, GUERIN, Roger, et ANDRIEUX, Pierre. Structural mapping in basin-and-range-like geology by electromagnetic methods: a powerful aid to seismic. *Geophysical prospecting*, 1996, vol. 44, no 6, p. 1019-1040.
- Galibert et al., 1996 ; Descloitres et al., 2000).
- Gharbi, A., 1998. Les phosphates marocains. *Chroniques de la Recherche Minière* 531, 127–138.
- Kchikach, A., Jaffal, M., Aïfa, T., Bahi, L., 2002. Cartographie de corps stériles sous couverture quaternaire par méthode de résistivités électriques dans le gisement phosphaté de Sidi Chennane, Maroc. *Comptes Rendus Géoscience*, 334, 379-386
- Kchikach, A., Andrieux, P., Jaffal, M., Amrhar, M., Mchichi, M., Bouya, B., Amaghazaz, M.;Veyrieras, T.,
- KCHIKACH, Azzouz, ANDRIEUX, Pierre, JAFFAL, Mohammed, et al. Les sondages électromagnétiques temporels comme outil de reconnaissance du gisement phosphaté de Sidi Chennane (Maroc): Apport à la résolution d'un problème d'exploitation. *Comptes Rendus Geoscience*, 2006, vol. 338, no 5, p. 289-296.
- MCNEILL, J. Technical Note TN-27, Principles and application of time domain electromagnetic techniques for resistivity sounding. *PROTEM TDEM Sounding systems, principles and application*, Geonics Limited, Ontario Canada, 1994.
- Michard, A., 1976. Eléments de géologie marocaine. *Notes et Mémoires du Service Géologique du Maroc*, 252, 217-245.
- Moutaouakil, D., Giresse, P., 1993. Petrology and sedimentary environment of mesocenozoic phosphorites of OuledAbdoun. *Bulletin de la Société Géologique de France*, 164, 473-491.
- NOUBHANI, A. et CAPPETTA, H. Batoïdes nouveaux ou peu connus (Neoselachii: Rajiformes, Myliobatiformes) des phosphates maastrichtiens et paléocènes du Maroc. *Belgian Geological Survey, Professional Paper*, 1995, vol. 278, no Elasmobranches et Stratigraphie, p. 157-183.
- Rios, J.M. Investigaciones geologicas en los yacimientos del Sahara espanol (marrocos). *Inst. Nat. Ind. (INI) Empr. Nat. ADARO rapport inéd.*
- Salvan, H., Farkhany, M., 1982. Les phosphates de chaux sédimentaires du Maroc. Leurs caractéristiques et leurs problèmes (essai de synthèse). *Notes et Mémoires du Service Géologique du Maroc*, 14, 7-20.
- SALVAN, H. M. Étude complémentaire sur le gisement de Merah El Areh. Etude d'ensemble des niveaux supérieurs. *Rapport Inédit*, Edition du Service Géologique de l'Office Chérifien des Phosphates, 1963, p. 1-14.
- Sheldon, A.J.G., Davidson, R.P., 1989. The phosphates basins of Morocco. In: *Phosphate deposits of the world*. (Notholt, A.J.G., Ed.) Cambridge University Press, Cambridge, 2, 301-311.

Zouhri, S., Kchikach, A., Saddiqi, O., El Hamer, F.Z., Baidder, L., Michard, A., 2008. The Cretaceous-tertiary plateaus. In: Continental Evolution-The Geology of Morocco: Structure, Stratigraphy, and Tectonics of the Africa-Atlantic-Mediterranean. (Michard, A.; Saddiqi, O.; Chalouan, A.; Frizon de Lamotte, D., Eds., Springer verlag, eds.), 331-358.