



Apport de la géophysique à la compréhension des structures géologiques profondes de l'oasis de Figuig (Haut Atlas Oriental, Maroc) Contribution of geophysics to understand geological structures of the oasis of Figuig (eastern High Atlas, Morocco)

Abdelhakim Jilali^{1*}, Mounir Amar², Yassine Zarhloule¹, Najib Amar³, Saïd Kerchaoui¹, Elmostafa Baba¹

¹ Laboratoire des Gîtes Minéraux Hydrogéologie & Environnement, Université Mohammed Premier, Faculté des Sciences, Oujda, Maroc

² Hydrogeo Groupe G-tec, Rabat, Maroc

³ Laboratoire des Géosciences Appliquées, Faculté des Sciences, Université Mohammed Premier, Oujda, Maroc

Received 13 March 2014; Revised 23 August 2014; Accepted 23 September 2014.

*Corresponding author Email : yamaapa@hotmail.com

Résumé

Les données issues de différentes techniques de la géophysique ont permis d'étudier la géométrie des structures géologiques profondes de l'oasis de Figuig qui est située à l'extrémité du Haut Atlas Oriental du Maroc. Ces données consistent en : (1) une réinterprétation des sondages électriques ; (2) une réinterprétation des profils de la sismique réflexion en intégrant la géologie de la surface ; (3) une réinterprétation des données de la gravimétrie. Les résultats préliminaires des sondages électriques montrent que les plages des résistivités sont comprises entre 18 Ωm et 4996 Ωm . La sismique réflexion montre que les couches dans le synclinal de Figuig sont biseautées et affectées par de nombreuses failles. Cette configuration est probablement due à la tectonique syn-sédimentaire. Celle-ci provoque des discordances progressives caractéristiques de la tectonique du Haut et Moyen Atlas. La gravimétrie montre des valeurs comprises entre 20 et -30 mGal. Une anomalie gravimétrique négative a été détectée au niveau de Jbel el Haïmeur. Elle peut correspondre aux formations argileuses du Trias.

Mots clé : Prospection électrique, sismique réflexion, gravimétrie, géologie, Figuig.

Abstract

Data from different geophysical technical were used to study the geometry of geological structures of Figuig oasis located in the extremity of the eastern High Atlas of Morocco. The data consist on a reinterpretation of: (1) electrical soundings, (2) seismic reflection profiles by integrating the geology of the study area, (3) gravimetry data. Preliminary results of electrical soundings show that the resistivity ranges between 18 Ωm and 4996 Ωm . seismic reflection shows that the layers in the syncline of Figuig are thin and affected by many faults. This configuration is probably due to the syn-sedimentary tectonics. This causes unconformity progressive characteristics of High and Middle Atlas tectonics. Gravimetry shows values between -30 and 20 mGal. A negative gravity anomaly was detected at Jebel el Haimeur. It may correspond to Triassic clay formations.

Keywords: Electric prospection, seismic reflection, gravimetry, geology, Figuig.

1 Introduction

Les différentes techniques de la géophysique (électrique, sismique réfraction, sismique réflexion, radar, gravimétrie, magnétisme, etc.) sont utilisées au niveau de différents domaines : Géologie, Hydrogéologie, Géothermie, Mine & Carrière, Génie civil, Pédologie, Archéologie, etc.

Les propriétés physiques des roches, le magnétisme, la radioactivité, la résistivité, etc., fournissent aux géophysiciens des informations sur la nature, la géométrie, etc., des corps étudiés. Le choix de la méthode de prospection géophysique est dépendant des objectifs, des problématiques à résoudre et du coût d'investigation.

Plusieurs auteurs à travers le monde ont utilisé les données interprété ou réinterprété de la géophysique pour la compréhension des structures géologiques profondes. A titre d'exemple une étude d'une partie du bassin

d'Essaouira consiste à la réinterprétation des données de la sismique réflexion [1]. Les méthodes géophysiques qui ont été employées pour la prospection des structures géologiques profondes dans la région de Figuig sont :

- Prospection électrique [2-4]
- Prospection par sismique réflexion [5]
- Prospection aéromagnétique [6,7]
- Prospection gravimétrique [8]

L'oasis de Figuig est située dans le Haut Atlas Oriental du Maroc (Figure 1). Les formations géologiques affleurantes appartiennent aux Mésozoïque et Cénozoïque. La sédimentation a commencé pendant le Trias et le Jurassique (Lias et Dogger) [9]. Celui-ci est recouvert par les formations du Quaternaire. La région est formée par : (1) le Trias qui occupe le cœur de l'anticlinal du Jbel Grouz. Il est formé par des argiles rouges-verdâtre et des tufs basaltiques ; (2) l'Hettangien est formé par des calcaires noirs avec une épaisseur maximale de 20 mètres et le Sinémurien par des dolomies rouge-grise avec une épaisseur maximale de 500 mètres ; (3) le Pliensbachien (Carixien et Domérien) et l'Aalénien sont formés par une large série de calcaires (750 mètres d'épaisseur) ; (4) le Bajocien présente une alternance de calcaires et de marnes et une série de calcaires (350 mètres d'épaisseur) ; la série se termine au sommet par le Quaternaire (5) qui est composé d'alluvions, sables et travertins (Figure 2 et Figure 3). Les anticlinaux (sommets) présentent un pendage fort (70° à 86°) vers le Nord ou le Sud et montrent une structure en rides étroites "Tepee". La zone est très fracturée et présente deux réseaux de failles : $N70^\circ$ et $N140^\circ$ [9-15].

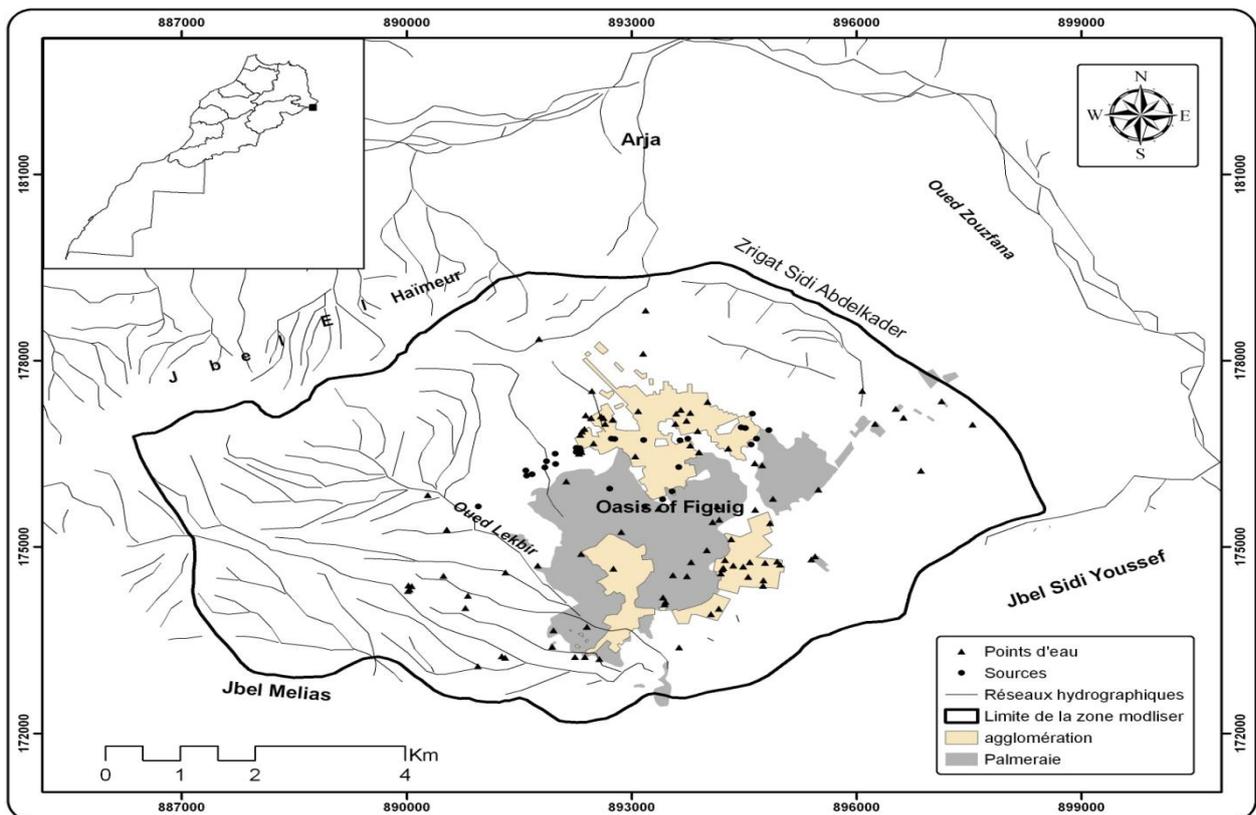


Figure 1: Situation géographique de la zone d'étude.

2 Matériels & méthodes

La prospection par sondage électrique a été employée [2-4]. Les valeurs de résistivité apparente obtenues, caractérisent des volumes de sous-sol. Le quadripôle Schlumberger a été mis en œuvre pour la prospection électrique dans la région de Figuig. La réinterprétation de ces SE à l'aide du logiciel WinSev6 a été effectuée. Le calcul de la courbe théorique utilise la méthode décrite par O. Koefoed [16], pour le dispositif Schlumberger. Les logs lithostratigraphiques des forages ont été collectés au près de l'ABHM (Agence de Bassin Hydraulique de la Moulouya) et ont servi pour le calage des SE (Figure 4). La méthode sismique est très utilisée dans le domaine pétrolier ainsi que dans la recherche fondamentale. Une prospection de la sismique réflexion a été réalisée pour dégager la structure du réservoir aquifère dans l'oasis de Figuig [5]. La réinterprétation des profils sismiques a été faite en intégrant la géologie de la surface (Figure 2 et Figure 4).

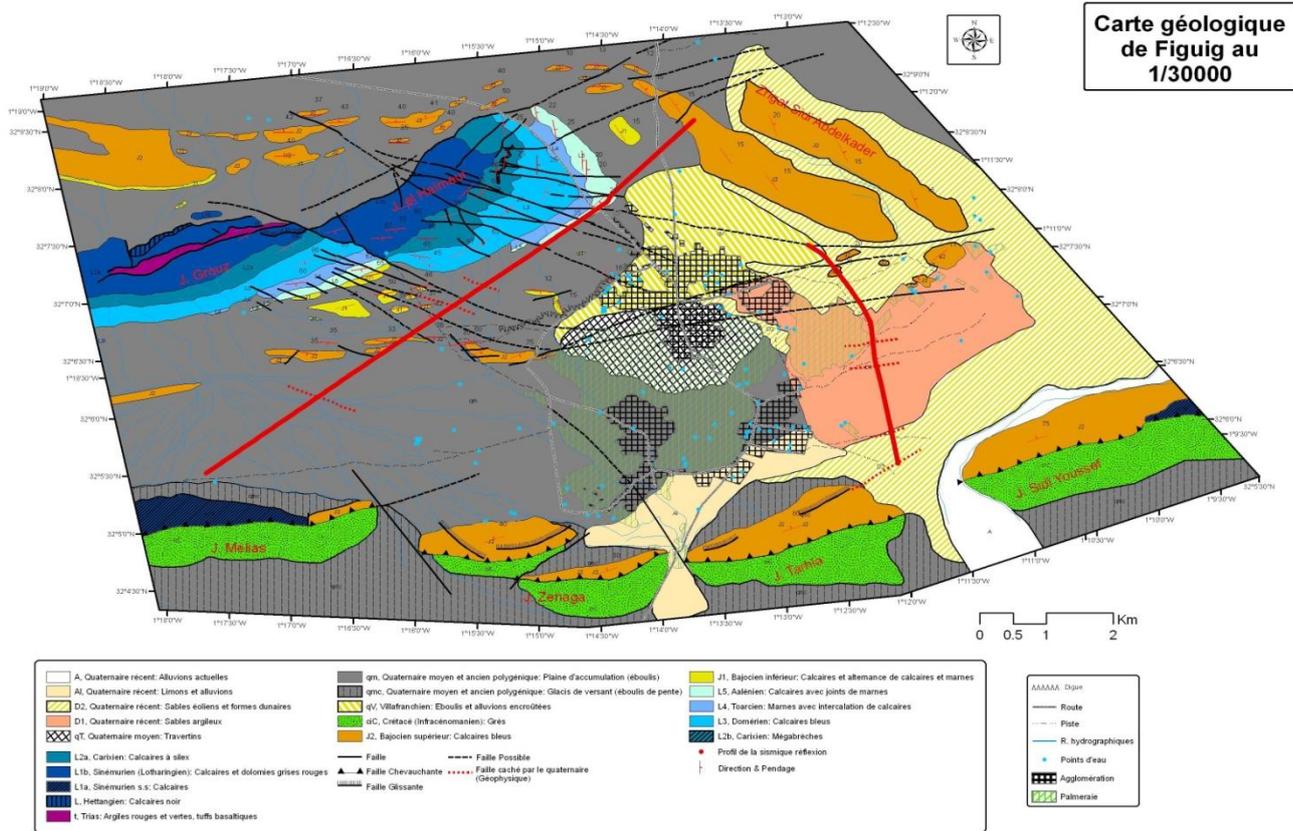


Figure 2: Carte géologique de la zone d'étude [9].

Age		Epaisseur		Lithologie simplifiée	
Quaternaire	-	-	0 à 300		Alluvions, sables, limons et travertins
Jurassique	Dogger	Bajocien Sup	30 à 150		Calcaires bleu
		Bajocien Inf	50 à 200		Calcaires & alternance de calcaires et marnes
		Aalénien	10 à 150		Calcaires avec joints de marnes
	Lias	Toarcién	20 à 150		Marnes & alternance de calcaires et marnes
		Domenien	50 à 300		Calcaires bleu avec des joints marneux
		Carixien	50 à 300		Calcaires bleu vert
		Sinemurien (Lotharingien)	150 à 500		Calcaires et dolomies grises rouges
Trias	-	-	10 à 20		Calcaires noir
			> 200		Argiles rouges et vertes, tuffés basaltiques

Figure 3: Log stratigraphique [9].

La prospection gravimétrique se base sur la détection et la caractérisation des variations latérales de la densité dans le sous sol à l'aide du champ de gravité terrestre. La densité d'une roche dépend de sa composition minéralogique, de sa porosité (compaction, cimentation) et du fluide contenu dans les pores. Le levé gravimétrique a été effectué pour déterminer la structure profonde, la géométrie, les dimensions et la nature des différentes unités géologiques et hydrogéologiques existantes (Figure 4). Une campagne de mesure a été réalisée en 2002 par Carmona et al [8].

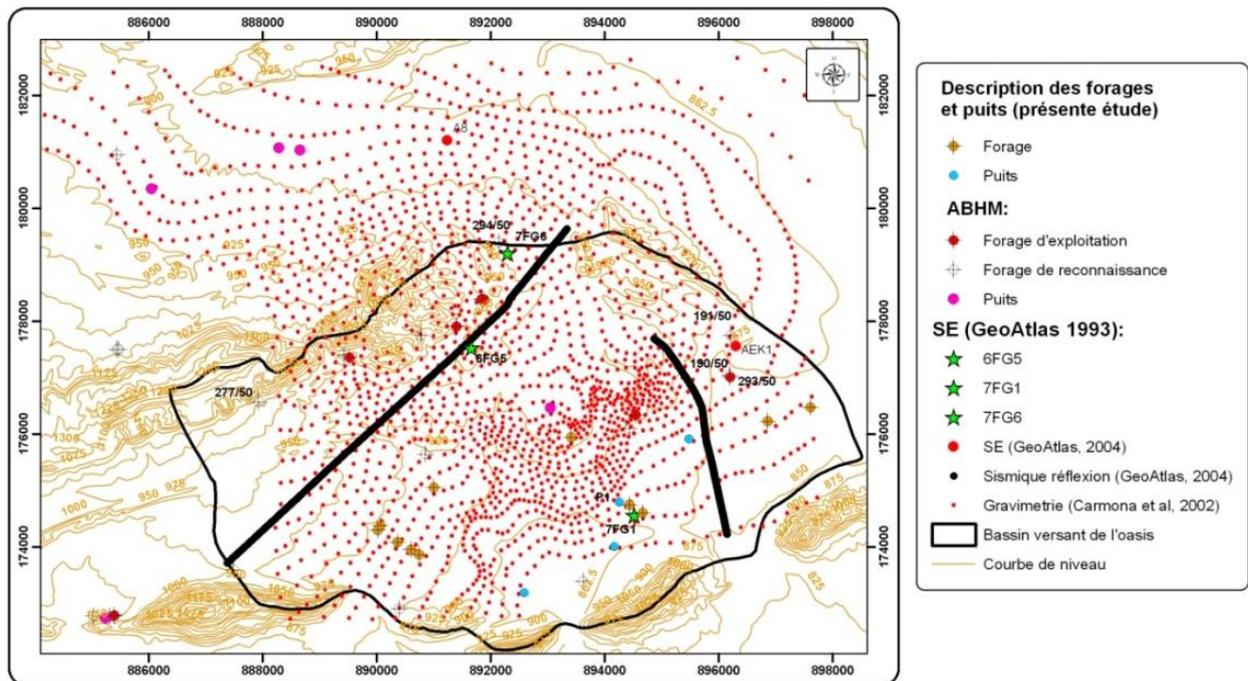


Figure 4: Localisation des SE, profils de la sismique réflexion, gravimétrie et des forages.

3 Résultats & discussion

3.1. Sondage électrique

La réinterprétation de six sondages électriques (SE) a été effectuée. Trois forages de numéro IRE : 277/50 et 191/50 ont servis successivement au calage de trois SE : 277/50, 7FG6 et AEK1 (Figure 5-7). Une description lithologique au reste des SE : 6FG5, A8 et 7FG1 (Figures 8-10) a été effectuée en se basant sur les résultats des modèles électriques des forages 277/50, 294/50 et 191/50 et en s'appuyant sur les observations de terrain. Le Tableau 1 résume les résultats des différents SE. Les plages de résistivité sont comprises entre 18 Ωm et 4996 Ωm . Les résistivités les plus faibles (< 90 Ωm) ont été attribuées à des sables, sables marneuses, limons et alluvions. Les résistivités moyennes (entre 90 Ωm et 220 Ωm) ont été attribuées à des éboulis de calcaire et des alternances de calcaires et marnes. Finalement, les résistivités supérieures à 220 Ωm ont été attribuées à des calcaires.

Le modèle électrique obtenu pour le sondage électrique 7FG1 montre quatre couches de résistivités. La profondeur des forages / puits autour du SE ne dépasse pas les 30 mètres, et ils sont constitués par des alluvions et des limons. L'interprétation de celui-ci reste difficile en exploitant les résultats obtenus par le calage effectué avec les forages mécaniques. Un log lithologique interprétatif a été attribué au modèle électrique mais qu'il faut prendre avec précaution (Figure 10) :

- Trois couches de résistivité de 18, 44 et 58 Ωm avec des épaisseurs successives de 40, 466 et 297 m. Le SE a été effectué dans une zone à forte salinité. Les valeurs de la conductivité électrique et de la salinité des quatre points d'eau autour du SE 7FG1 varient successivement de 6530 à 7620 $\mu\text{S}/\text{Cm}$ et de 3,44 à 4,05 mg/l [9]. Cette salinité peut influencer sur les valeurs des résistivités réelles des roches. Cela se manifeste sur le fait que la résistivité des roches va diminuer. Une lithologie peut correspondre à des alluvions et des limons du Quaternaire puis à des calcaires du Bajocien supérieur et d'alternance de calcaires et de marnes du Bajocien inférieur ;
- Une couche de résistivité de 168 Ωm . Elle peut correspondre à des calcaires fracturés ou karstifiée et/ou des alternances des calcaires et des marnes du Bajocien inférieur.

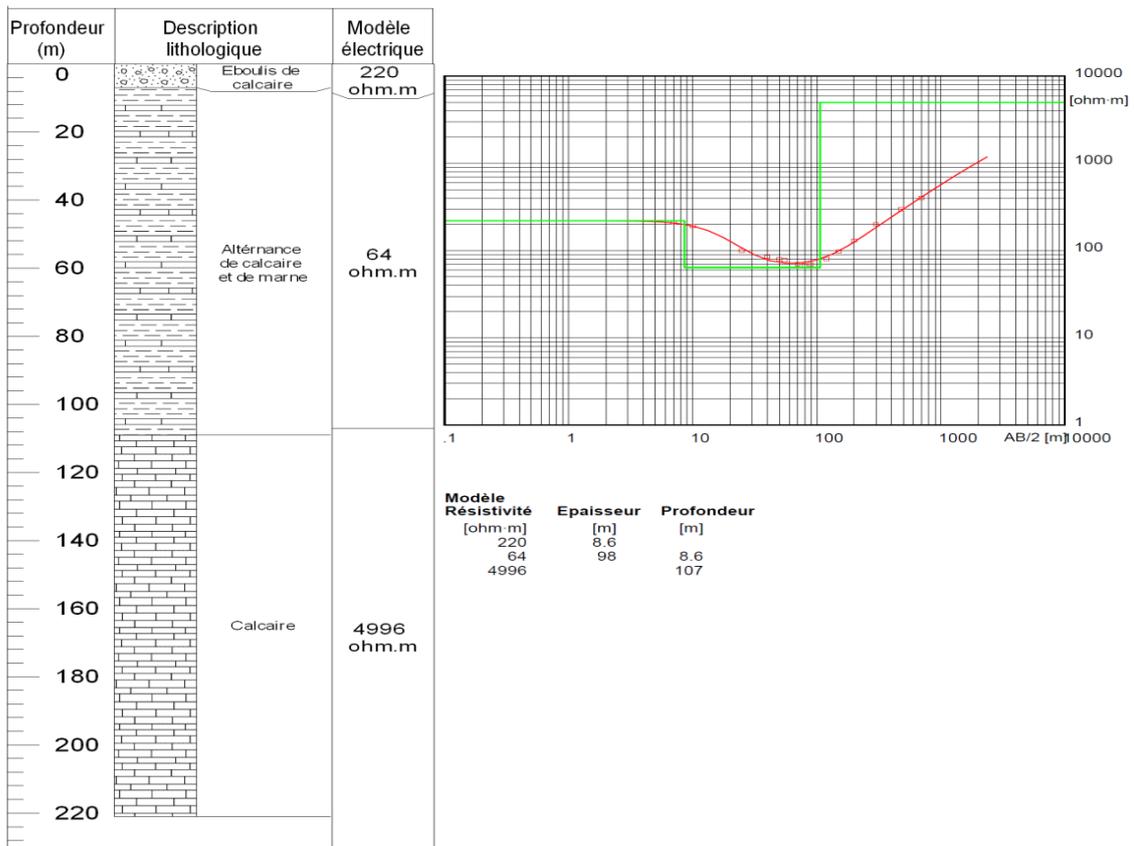


Figure 5: Modèle électrique et calage avec le forage 277/50

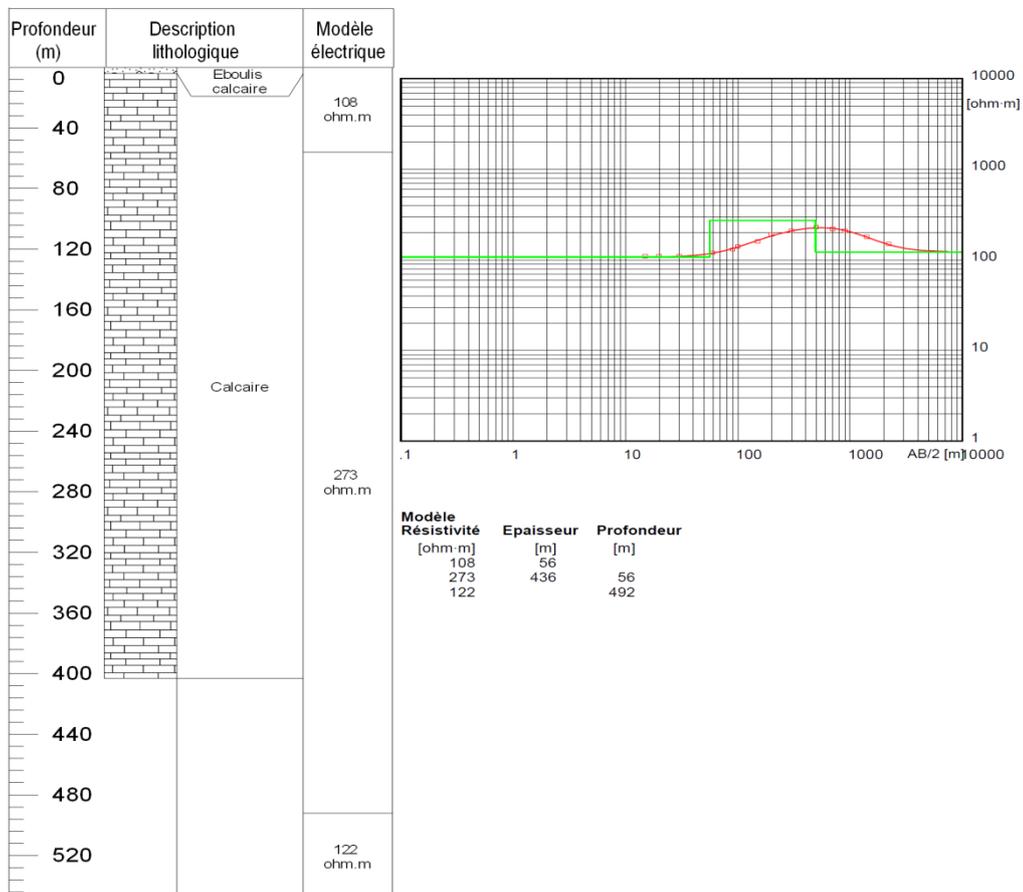


Figure 6: Modèle électrique 7FG6 et calage avec le forage 294/50

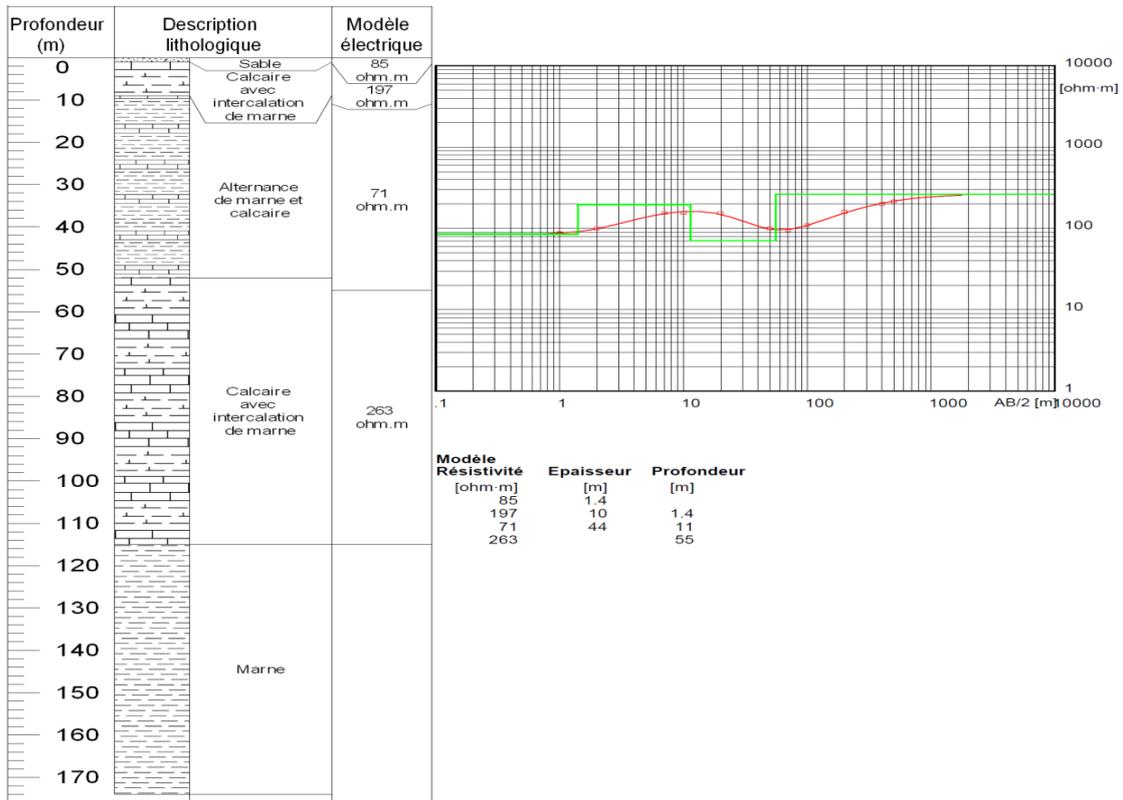


Figure 7: Modèle électrique AEK1 et calage avec le forage 191/50

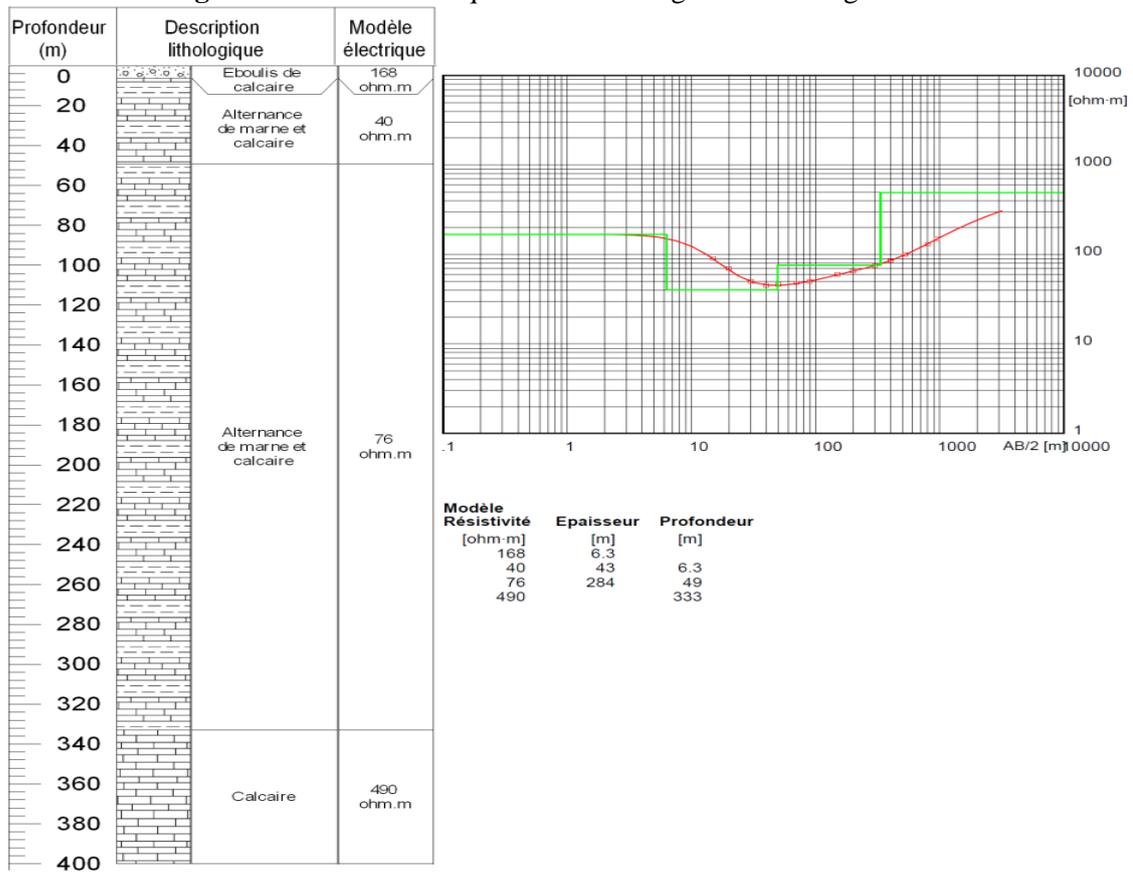


Figure 8: Modèle électrique 6FG5

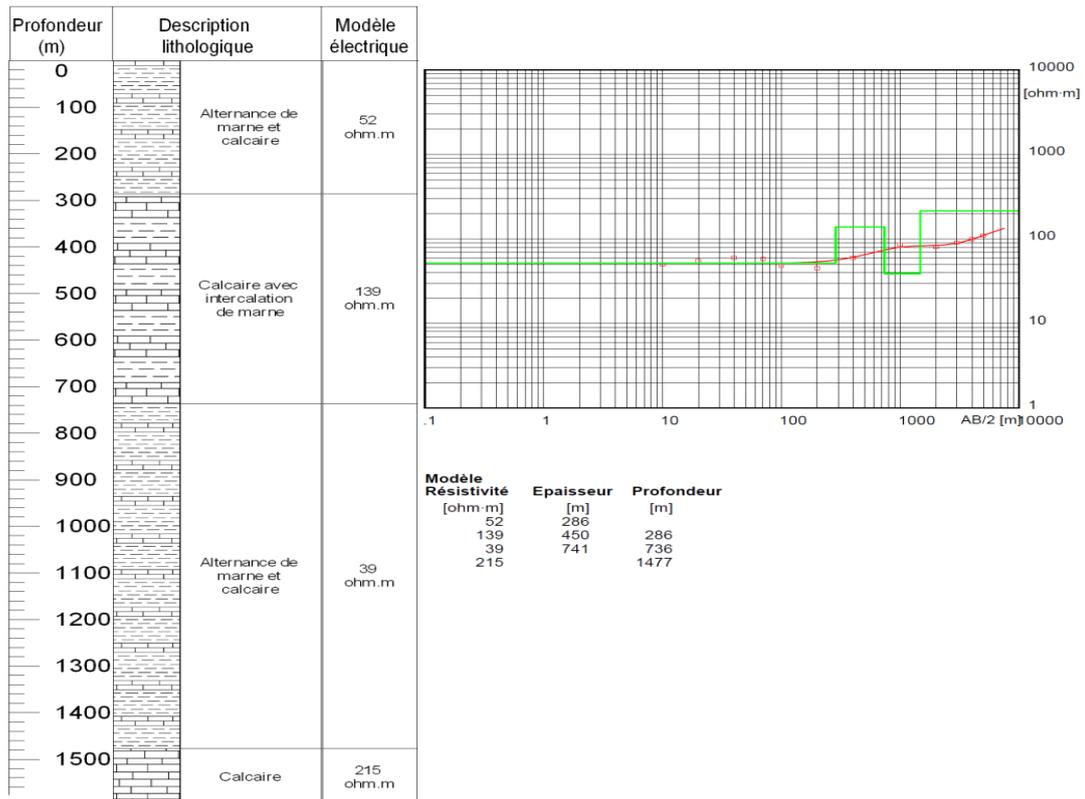


Figure 9: Modèle électrique A8

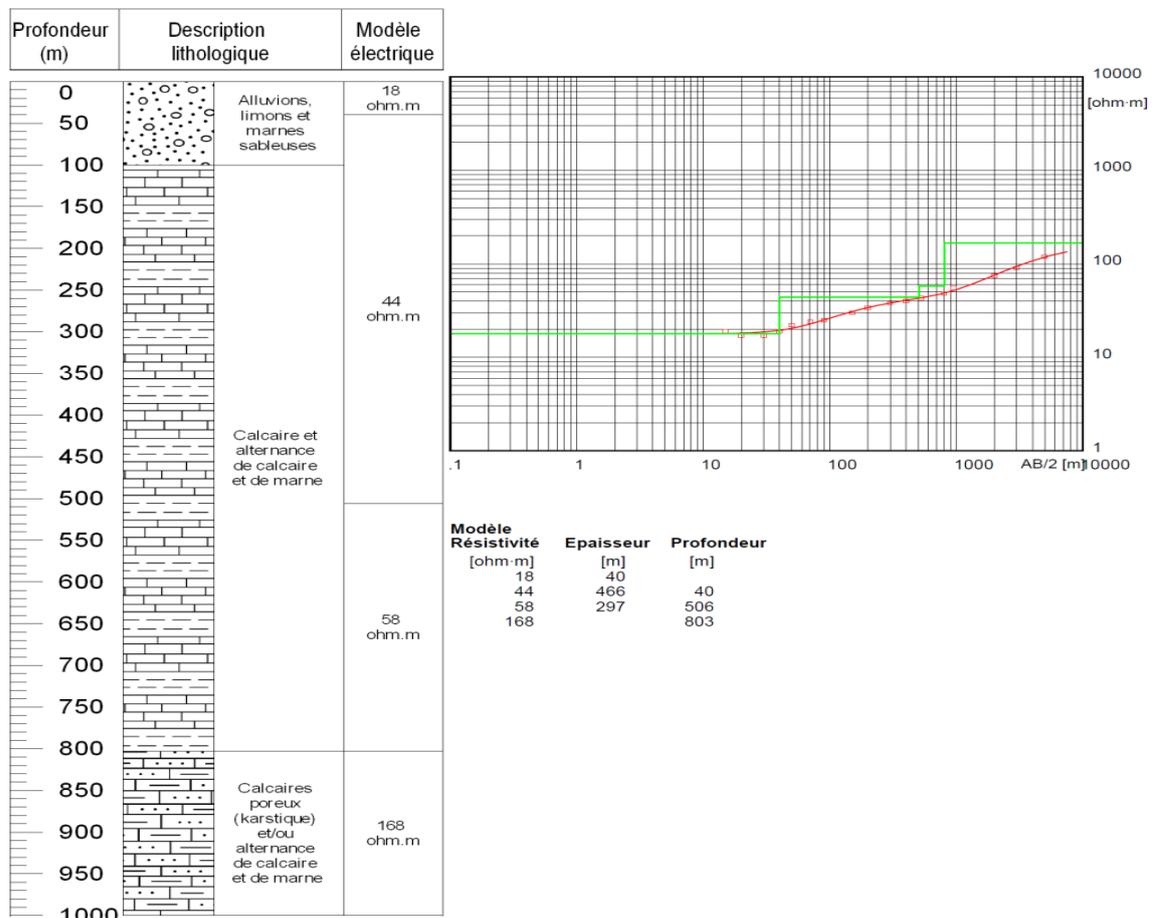


Figure 10: Modèle électrique 7FG1

Tableau 1: Description des sondages électriques

Sondage électrique	Résistivité en Ωm	Epaisseur en m	Formation géologique	Age
277/50	220	8.6	éboulis de calcaires	Quaternaire
	64	98	alternances de calcaires et de marnes, avec une constitution marneuse plus importante	Toarcien
	4996	-	calcaires	Domérien
7FG6 (294/50)	108	56	éboulis de calcaires	Quaternaire
	273	436	calcaires	Aalénio-Bajocien
	122		alternances de marnes et de calcaires	Toarcien
AEK1 (191/50)	85	1.4	sables	Quaternaire
	197	10	calcaires avec intercalation des marnes	Bajocien inférieur
	71	44	alternances de marnes et de calcaires, avec une constitution marneuse plus importante	Bajocien inférieur
	263	-	calcaires avec intercalation de marnes	Bajocien inférieur
6FG5	168	6.3	éboulis des calcaires	Quaternaire
	40 et 76	43 et 284	alternance de calcaires et de marnes	Bajocien inférieur
	490	-	calcaires	Aalénien !
A8	52	286	sables (sables limoneux argileux) ou alternance de marnes et de calcaires	Quaternaire ou Bajocien supérieur
	139	450	calcaires avec intercalation de marnes	Bajocien supérieur
	39	741	marnes avec intercalation de bancs de calcaires	Bajocien inférieur
	215	-	calcaires	Aalénien

Le nombre des SE limité ne permet pas de réaliser une coupe géoélectrique à travers la zone. Mais les résultats ont permis de dégager la profondeur de certaines formations géologiques du Quaternaire et du Bajocien inférieur sur quelques endroit de la zone d'étude. Une prospection électrique est très souhaitable afin de réaliser des coupes nord-sud dans le synclinal de Figuig.

3.2. Sismique réflexion

Les deux coupes sismiques obtenues par GéoAtlas (2004) ont été réinterprétées en se basant sur la carte géologique de la Figure 2. Les deux coupes montrent peu de réflexions sismiques claires. Il est difficile de faire la distinction entre les réflecteurs ayant une réalité géologique et les artéfacts liés au procédé sismique. Ils sont tout à fait possibles et peut-être même récurrents (Figure 11 & 12).

La réinterprétation des profils sismiques a été réalisée (Figure 11 & 12). La carte géologique de la Figure 2 [9] a été utilisée pour interpréter les deux coupes sismiques. Le positionnement des profils sur la carte géologique nous a permis de distinguer les réflecteurs ayant une réalité géologique. Plusieurs discontinuités ont été interprétées comme des failles normales et parfois inverses. Les coupes sismiques montrent un synclinal dans la plaine de Figuig confirmé par les observations de terrain. L'identification des différentes couches géologiques nous indiquent que les structures plongent de l'ouest vers l'est, et deviennent de plus en plus épaisses et profondes, ainsi que le cœur du synclinal est affaissé par des failles normales (structure d'un graben). Par contre du Nord vers le Sud les formations géologiques se biseautent (diminution d'épaisseur). Cette configuration est due à la tectonique syn-sédimentaire. Celle-ci provoque des discordances progressives caractéristiques de la tectonique du Haut et Moyen Atlas [17-19]

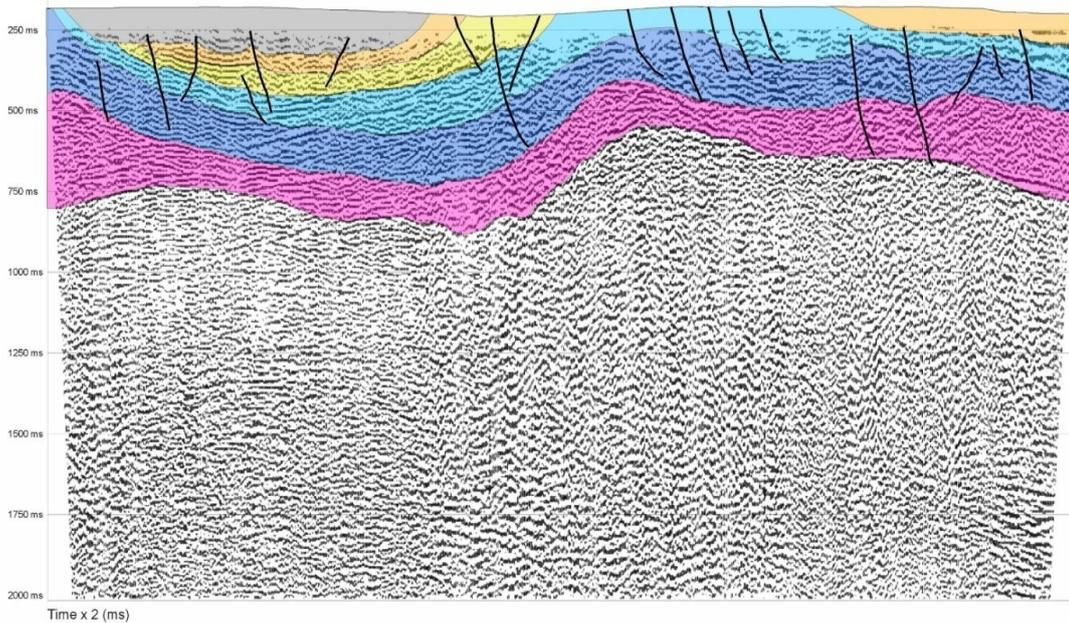


Figure 11: Réinterprétation du profil 1 (orientation NE-SO) de la sismique réflexion

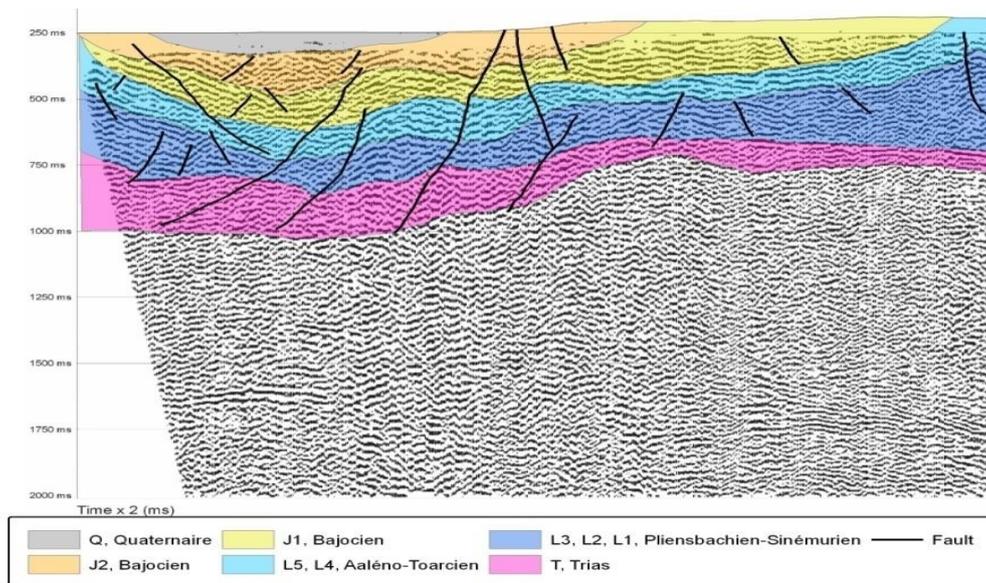


Figure 12: Réinterprétation du profil 2 (orientation NNW-SSE) de la sismique réflexion

En utilisant la carte géologique de la Figure 2, les données de forages, les résultats des SE et de la sismique réflexion nous pouvons dégager la structure profonde de la géologie de l'oasis de Figui. Une modélisation 3D des structures géologiques peut servir à une bonne compréhension de la géométrie de la zone d'étude. Ce modèle peut être exploité pour une modélisation des écoulements souterrains.

3.3. Gravimétrie

Les valeurs de la carte d'anomalie gravimétrique sont comprises entre 20 et -30 mGal (Figure 13). Une anomalie gravimétrique négative a été détectée au niveau de Jbel el Haïmeur (-30 mGal). Celle-ci a une orientation NE-SW, qui correspond à la direction des formations argileuses du Trias faiblement évaporitiques. Plusieurs linéaments (failles) peuvent être observés, avec des directions NO-SE et NNE-SSO. Ces failles ont été démontrées par la cartographie de terrain [9] et par Du Dresnay [12]. La majorité des failles à ce niveau sont cachées par les formations du Quaternaire. Seule la géophysique (sismique réflexion et l'électrique) a mis en évidence ces failles. L'allure des courbes iso-valeurs gravimétrique au niveau de Jorf sont quasiment identique à la topographie.

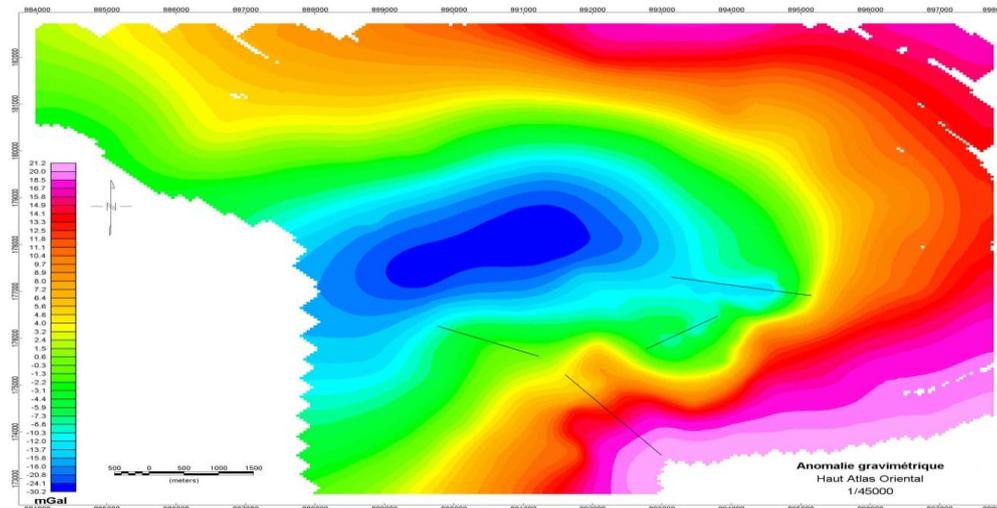


Figure 13: Anomalie de la gravimétrie avec des linéaments en trait noir

4 Conclusions

La région d'étude est située à l'extrémité du Haut Atlas Oriental du Maroc. Celle-ci est une chaîne de montagne essentiellement carbonatées d'âge Mésozoïque. La prospection électrique montre des plages de résistivité comprises entre 18 Ωm et 4996 Ωm . En générale, les résistivités les plus faibles ($< 90 \Omega\text{m}$) ont été attribuées à des sables, sables marneuses, limons et alluvions. Des résistivités moyennes (entre 90 Ωm et 220 Ωm) ont été attribuées à des éboulis de calcaire et des alternances de calcaires et marnes. Finalement pour les résistivités supérieures à 220 Ωm ont été attribuées à des calcaires.

Les profils de la sismique réflexion ont permis d'observer plusieurs discontinuités (failles normales et parfois inverses). La structure des coupes sismiques montre un synclinal dans la plaine de Figuig. Ce qui confirme les observations de terrain. Les couches géologiques plongent de l'ouest vers l'est, et deviennent de plus en plus épaisses et profondes. Le cœur du synclinal est affaissé par des failles normales (structure d'un graben). Du Nord vers le Sud les formations géologiques se biseautent (diminution d'épaisseur). Cette configuration est probablement due à la tectonique syn-sédimentaire. Celle-ci provoque des discordances progressives caractéristiques de la tectonique du Haut et Moyen Atlas [17-19].

Les valeurs de la carte d'anomalie gravimétrique résiduelle sont comprises entre 20 et -30 mGal. L'anomalie gravimétrique négative a une orientation NE-SO qui correspond à la direction des formations géologiques de Jbel el Haïmeur. Elle peut correspondre aux formations argileuses du Trias. Les linéaments observés de direction NO-SE et NNE-SSO peuvent correspondre à des failles.

Références

1. Jaffal M., Kchikach A., Lefort J. P., Hanich L., *Comp. Rendus. Geosc.* 334:4 (2002) 229-234.
2. CAG., *MTPC. DH. DRE.* (1968).
3. CAG., *MTPC. DH. DRE.* (1974).
4. GéoAtlas., *MTPC. DH. DRE.* (1993).
5. GéoAtlas., *DGH. DRPE.* (2004).
6. Amar M., *Univ. Moulay Ismail. Meknès.* (2013) 157.
7. Amar M., Manar A., Boualoul M., *Bull. Instit Sci.* 34 (2012) 29-40.
8. Carmona J.M., Puigserver D., Casas A., Himi M., Bitzer K., *Conferencia: Agua e infraestructuras. Barcelona.* (2002).
9. Jilali A., *Univ. Mohammed Premier. Oujda.* (2014) 161.
10. Dresnay R.D., *Cong Géol. Intern. Comp. Rendus. Dix-neuvième. Session. Alger.* (1954) 309-318.
11. Dresnay R.D., *Comp. Rendus. Hebdom. Séa. Acad. Sci.* 245:25 (1957) 2341-2343.
12. Dresnay R.D., *Not. Mém. Serv. Géol. Maroc. Rabat.* (1963).
13. Jilali A., *Univ. Liège. Liège.* (2009) 84.
14. Jilali A., Zarhloule Y., Georgiadis M., *Arab. J. Geosci.* (2014) DOI: 10.1007/s12517-014-1320-3.
15. Ziani N., *Univ. Mohammed Premier. Oujda.* (2010) 160.
16. Koefoed O., *Elsev. Sci. Pub. Comp.* (1979) 275.
17. Ettaki M., Ibouh H., Chellaï E.H., *Estu. Geol.* 63:2 (2007) 103-125.
18. Fedan B., *Bull. Instit Sci.* 2 (1978) 87-96.
19. El Kochri A., Chorowicz J., *Canad. J. Earth Sci.* 33:1 (1996) 84-92.