

République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة الجليلي بونعامة خميس مليانة
Université Djilali Bounaâma de Khemis Miliana
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département des Sciences de la Matière



Mémoire de fin d'étude
En vue de l'obtention d'un diplôme de Master en physique
Spécialité: physique du globe

Thème :

**Apport de la méthode gravimétrique à l'étude
structurale du Sillon de Benoud Nord- Ouest Algérienne**

Devant le jury composé de :

BOUGARA MOHAMED	Président
WALID FARHI	Encadreur
LAMALI ATMANE	Examineur

Présenté Par :

EDDAIF FATMA ZOHRA
KHLEDJ DJAMILA

Année universitaire : 2018 / 2019

Remerciements

*Louange à notre seigneur ‘ALLAH ‘ qui nous a doté de la
Merveilleuse faculté raisonnement. Louange à notre créateur qui
Nous a incités à acquérir le savoir. Toute notre gratitude*

**** ALLAH ****

*Nous remercions tous les professeurs qui ont contribué à notre formation,
en particulier, ceux de la faculté des Science de la Technologie
De l’université de Djilali Bounaama.*

*Nous exprimons notre gratitude et notre reconnaissance envers notre
Promoteur le Cdt*WALID FARHI*, pour sa disponibilité, ses précieuse
Aides, ses dévouements et ses conseils, ainsi que pour la confiance qu’il
Nous a accordée pour l’accomplissement de notre travail.*

*Nos profonds remerciement vont aussi aux membres du jury, pour
L’effort qu’ils consentent à fournir en acceptant de juger notre travail.
Nos profonds remerciement et gratitude vont aussi Mr BENTRIDI SALAH
qui nous a assuré l’environnement pour réaliser notre travail.*

Enfin, nous remercions tous nos amis et Collègues pour leur soutien moral

Dédicace

De profonde de mon cœur, je dédie ce travail à tout ceux qui me sont chers :

À MA CHERE MERE

Aucun dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel et ma considération pour les sacrifices que vous avez consenti pour mon instruction et mon bien être

Je vous remercie pour tout le soutien et l'amour que vous me portez depuis mon enfance et j'espère que votre bénédiction m'accompagne toujours, que ce modeste travail soit l'exaucement de vos vœux tant formulés, le fruit de vos innombrables sacrifices.

Puisse Dieu, le très haut, vous accorder santé, bonheur et longue vie

À MON CHER PERE -Mohamed-

Aucune dédicace ne saurait être assez éloquente pour exprimer ma gratitude et ma reconnaissance, vous avez su m'inculquer le sens de la responsabilité, de l'optimisme, et de la confiance en soi face aux difficultés de la vie, vos conseils ont toujours guidé mes pas vers la réussite.

Votre patience sans fin, votre compréhension et votre encouragement sont pour moi le soutien indispensable que vous avez toujours su m'apporter. Je vous dois ce que je suis aujourd'hui et ce que je serai demain et je ferai toujours de mon mieux pour rester votre fierté et ne jamais vous décevoir.

Que Dieu, je tout puissant, vous préserve vous accorde santé, bonheur, quiétude de l'esprit et vous protège de tout mal.

À mes chères frères Hocine, Abdeljalil et Yacine

À ma chère sœur Maroua

A Mr 'NACHE BILLEL' et 'ZENILE FARID' Pour nous avoir fait profiter De son expérience, ces Conseille précieux,

A tous mes amies qui m'ont toujours encouragé et ceux qui me souhaitent du succès

À mes proches ce qui me donne de l'amour et la vivacité

À mes amis et collègues de la promo physique de globe 2019.

À mon binôme Djamila, aussi qu'à toute sa famille.

À tous ceux que j'aime et ceux qui m'aiment

" FATIMA ZOHRRA "

Dédicace

Avec les sentiments d'amour et gratitude les plus sincères je dédie

Ce modeste travail :

*A mes précieux parents pour leur amour, affection et compréhension, pour leur
encouragements et leur priés. Que dieux vous protège.*

*A ma merveilleuse **mère**, la femme qui m'est la plus chère de cette terre, pour l'éducation
qu'elle m'a l'inculquée et toutes les peins qu'elle s'est*

Donnée pour ma réussite.

*A mon chère **papa** aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement
et le respect que j'ai toujours eus pour vous, rien au monde ne vaut les efforts fournis, est
nuit pour mon éducation et mon bien être.*

*A ma **grande mère** qui m'as toujours chérie et gâtée.*

*Lumière de mon chemine : tés sacrifices ton soutien morale, ta gentillesse sans égal ton
profond attachement m'ont premier de réussite ma vie **FOUZIA***

*Et ses adorables oiseaux **AYHAM** et **IHAB** et **ILYAS***

*A mes chères frères **MOHAMED** et sa **petite Famille**, **WAHAB**, **RIDHA** et **NESRO**. Sans
oublier mes très chères sœurs **HOUDA** et **RIMA***

*A Mr "**NACHE BILLEL**" et "**ZENILE FARID**" 'Pour nous avoir fait profiter De son
expérience, ces Conseille précieux,*

A mes chères amies spécialement

*A mes amis et collègues de la promo **physique de globe 2019**.*

*A mon binôme **FATMA Zohra**, aussi qu'a toute sa famille.*

A tous ceux qui porte mon cœur et ceux que j'ai oublié citer.

"DJAMILA "

Résumer

La présente étude porte sur le secteur de sillon du Benoud qui se situe au nord-ouest algérien. Cette étude a pour but la modélisation des structures crustales associées à l'anomalie gravimétrique.

Près de 3300 mesures gravimétriques, appartiennent à Sonatrach (division exploration), sont disponibles dans la région d'étude comprise entre les latitudes 32 et 34°N et les méridiens 1°O et 2°E. Ces données ont permis la réalisation des cartes des anomalies de Bouguer et des anomalies résiduelles gravimétriques. Par la suite Nous avons fait une modélisation directe de ces données, en utilisant le logiciel GM-SYS (*Geosoft d'Oasis montaj*).

Ainsi, l'interprétation qualitative des cartes gravimétriques, suivit par une modélisation 2D de ces données, ont pour objectif principal la détermination de la distribution bidimensionnelle de densité qui a un lien intrinsèque avec la géologie souterraine.

Abstract

This study focuses on the Benoud furrow sector located in northwestern Algeria. This study aims to model the crustal structures associated with the gravity anomaly.

Nearly 3300 gravimetric measurements, belonging to Sonatrach (exploration division), are available in the study area between latitudes 32 and 34 ° N and meridians 1 ° O and 2 ° E. These data made it possible to produce maps of Bouguer anomalies and residual gravity anomalies. Subsequently, we made a direct modeling of this data, using the software (*Geosoft de Oasis montaj*) GM-SYS.

Thus, the qualitative interpretation of the gravimetric maps, followed by a 2D modeling of these data, have for main objective the determination of the two-dimensional density distribution which has an intrinsic link with the underground geology.

ملخص الرسالة

تركز هذه الدراسة على قطاع ثغرات بنود الواقع في شمال غرب الجزائر. تهدف هذه الدراسة إلى نموذج الهياكل القشرية المرتبطة الشذوذ الجاذبية.

يتوفر ما يقرب من 3300 قياسات الجاذبية، تنتمي إلى سوناطراك (قسم الاستكشاف)، في منطقة الدراسة بين خطي العرض 32 و34 درجة شمالا وخطوط الطول 1 درجة غرب و2 درجة شرق. مكنت هذه البيانات من إنتاج خرائط لحالات شذوذ Bouguer وشذوذات الجاذبية المتبقية. بعد ذلك، قمنا بعمل نمذجة مباشرة لهذه البيانات، باستخدام برنامج:

. GM-SYS (*Geosoft de Oasis montaj*)

وبالتالي، فإن التفسير النوعي للخرائط الجاذبية، متبوعاً بنمذجة ثنائية الأبعاد لهذه البيانات، يكون للهدف الرئيسي تحديد توزيع الكثافة ثنائية الأبعاد التي لها صلة جوهرية بالجيولوجيا الجوفية

Table des matières

Remerciements	
Dédicace	
Dédicace	
résumé	
Introduction général.....	10
Chapitre I : Cadre géologique général	
I. Cadre géologique général	11
Introduction :.....	12
I.1. Localisation géographique de la région d'étude	13
I.2. Cadre Géo-structural.....	14
I.3. Stratigraphie.....	15
I.3.1. Le Paléozoïque.....	16
I.3.2. Le Mésozoïque.....	17
I.3.3. Le Cénozoïque Eocène (Ep>32 m) :	18
Chapitre II : La théorie de la gravimétrie	
II. La théorie de la gravimétrie	19
II.1. La gravimétrie :	19
II.2 Principes de base :.....	19
II .3. Corrections et Anomalies gravimétriques :.....	21
- La mesure est d'abord corrigée d'effets propres à l'instrument.....	21
- La correction de marée	21
- La Correction de latitude	21
- la Correction à l'air libre	22
- La Correction de plateau.....	22
- La Correction de relief :.....	22
II .3.1. L'anomalie à l'air libre.....	23
II. 3.2. Anomalie du Bouguer	23
Chapitre III : Traitement des données et discussion des résultats	
III. Traitement des données et discussion des résultats	25

Introduction.....	25
III.1. La carte d'anomalie de Bouguer	26
III.2. Séparation des anomalies.....	27
III.3. Traitements qualitatifs de l'anomalie gravimétrique	33
III .3.1. Dérivée verticale (gradient vertical):	33
III.3.2.Dérivée horizontale (gradient horizontal):.....	34
II .3.2.1 . Carte de dérivée horizontal suivant X.....	34
II.3.2.2. Carte de dérivée horizontale suivant Y	34
III.4. Traitements quantitatifs de l'anomalie gravimétrique	35
III.4.1 Modélisation directe	35
Interprétation des modèles	39

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1. Carte des grands domaines géologiques de l'Algérie.....	11
Figure I.2 . Carte de localisation de la zone d'étude.	12
Figure 0.3.Carte géologique de la région d'étude (extrait de la carte Nord Ouest de l'Algérie au 1/500 000).....	13
Figure I.4 . Coupe structurale.	14
Figure I.5. Colonne stratigraphique de la région de benoud.	15

Chapitre II

Figure II.6. Principe des mesures gravimétriques. A (Modèle géologique montrant une structure de densité ρ_1 encaissée dans un matériel de densité plus élevée ρ_2 . b) L'hétérogénéité de densité provoquée par ce modèle engendre des variations latérales de l'attraction (Klaus Knödel et al. 2007)	19
Figure II.7. Deux masses dans un référentiel cartésien	20
Figure II.8. Représentation des équipotentielles, théorique et réelle, du champ gravitationnel terrestre, par rapport à la topographie de surface. $g_{més}$ correspond au point de mesure en surface, et g_{Th} à sa valeur théorique, calculée sur l'ellipsoïde.	21
Figure II.9. Principe de la correction d'air libre.....	22
Figure II.10. Principe de la correction de plateau.....	22

Chapitre III

Figure III.11. Répartitions des valeurs d'anomalie de Bouguer.....	25
Figure III.12. Carte de l'Anomalie de Bouguer ($d=2.67$).....	26
Figure III.13. Une courbe de séparation de l'anomalie régionale et résiduelle (Kearey et al., 2002).....	27
Figure III.14.Spectre d'énergie gravimétrique en fonction du nombre de cycle par kilomètre au niveau du secteur d'étude.	28

Figure III.15. Carte du polynôme de 1 ^{er} degré du champ gravimétrique.....	29
Figure III.16. Carte du polynôme de 2 ^{ème} degré du champ gravimétrique.....	29
Figure III.17. Carte du polynôme de 3 ^{ème} degré du champ gravimétrique.....	24
Figure III.18. Carte du prolongement vers le haut à une altitude de 40Km du champ gravimétrique.	30
Figure III.19. Comparaison entre la carte du prolongement vers le haut à une altitude de 40 Km (a) du champ gravimétrique et les cartes du polynôme de 1er(b), 2ème (c) et 3ème(d) degré du champ gravimétrique.....	31
Figure III.20. Carte de l'Anomalie Résiduelle.	32
Figure III.21. Carte de la dérivée verticale.....	33
Figure III.22. Carte de la dérivée horizontale selon X	34
Figure III.23. Carte de la dérivée horizontale selon Y.	35
Figure III.24. Organigramme décrivant la procédure de la modélisation directe	36
Figure III.25. Localisation des profils gravimétriques (P ₁ , P ₂ , P ₃) sur la carte des anomalies résiduelles.....	37
Figure III.26. Modèle gravimétrique 2D (P1) montre la distribution	38
Figure III.27. Modèle gravimétrique 2D (P2) montre la distribution des densités en sous-sol.....	38
Figure III.28. Modèle gravimétrique 2D (P3) montre la distribution des densités en sous-sol.....	39

Liste des tableaux

Tableau III-1. Moyennes de densité des unités géologiques.....	37
Conclusion générale.....	42

Introduction Générale

Introduction

La présente étude a pour objet de tenter de mettre en relief l'utilité de la méthode gravimétrique dans la caractérisation des structures superficielles et profondes de sillon du Benoud.

Cette étude est basée sur l'interprétation de données gravimétriques couvrant la totalité du sillon du Benoud. Elle fait appel à une technique d'analyse basée sur l'application de divers traitements mathématiques visant la mise en évidence structurale de notre région d'étude.

Au cours de ce projet, nous avons mis au point d'interprétation quantitative des données gravimétriques, il s'agit de la modélisation 2D. Celle-ci est basée sur le principe de [Talwani et al., 1959 et Talwani et Heirtzler, 1964](#). En général, on ne connaît pas bien ni les densités du sous-sol, ni la géométrie du sous-sol. Le problème des méthodes gravimétriques dit *mal posés* et il n'y a pas unicité des solutions. Plusieurs géométries différentes associées à des paramètres de densité différentes peuvent donner des résultats similaires.

En y associant avec les données gravimétrique, autres informations sur le sous-sol (géologie de surface, logs, forages...), dans ce cas il est possible de déduire la géométrie et les propriétés des structures souterraines.

Ce manuscrit s'articule autour de trois chapitres :

Dans un **premier chapitre**, nous présenterons rapidement le cadre géologique de la région d'étude.

Le **second chapitre** sera consacré à une description de la méthode gravimétrie et à leur application.

Dans le **troisième chapitre**, l'interprétation qualitative et quantitative des données gravimétriques de la région d'étude sera présentée.

Enfin, la dernière partie de ce manuscrit, conclusive, permettra de synthétiser l'ensemble des résultats acquis lors de cette étude.

Chapitre I :
CADRE GEOLOGIQUE GENERAL

I. Cadre géologique général :**Introduction :**

L'Algérie est subdivisée en deux unités tectoniques majeures séparées par la faille sud atlasique :

- Au nord, un domaine alpin marqué par des chaînes de montagne d'âge tertiaire résultant de l'orogénèse alpine .
- Au sud la plate-forme saharienne domaine relativement plus stable constitué d'un socle précambrien sur lequel se sont déposées d'épaisses séries sédimentaires dans des bassins structurés essentiellement durant le paléozoïque.

Dans ce travail, du mémoire de fin d'étude, le secteur concerné couvre le Sillon de Benoud, qui est un bassin étroit, asymétrique d'orientation NE-SW ([Guemmach et al, 2010](#)). La plus grande partie du sillon de Benoud est localisée dans la Plate-forme Saharienne, l'autre partie appartient Atlas Saharien occidental (**Fig.2**). De ce fait, le sillon de Benoud peut être subdivisé en deux ensembles structuraux, séparés par L'Accident Sud Atlasique, il s'agit de l'Atlas Saharien représenté par les affleurements mésozoïques dans la partie nord et de la Plate-forme Saharienne qui occupe la partie sud (**Fig. I.1**).

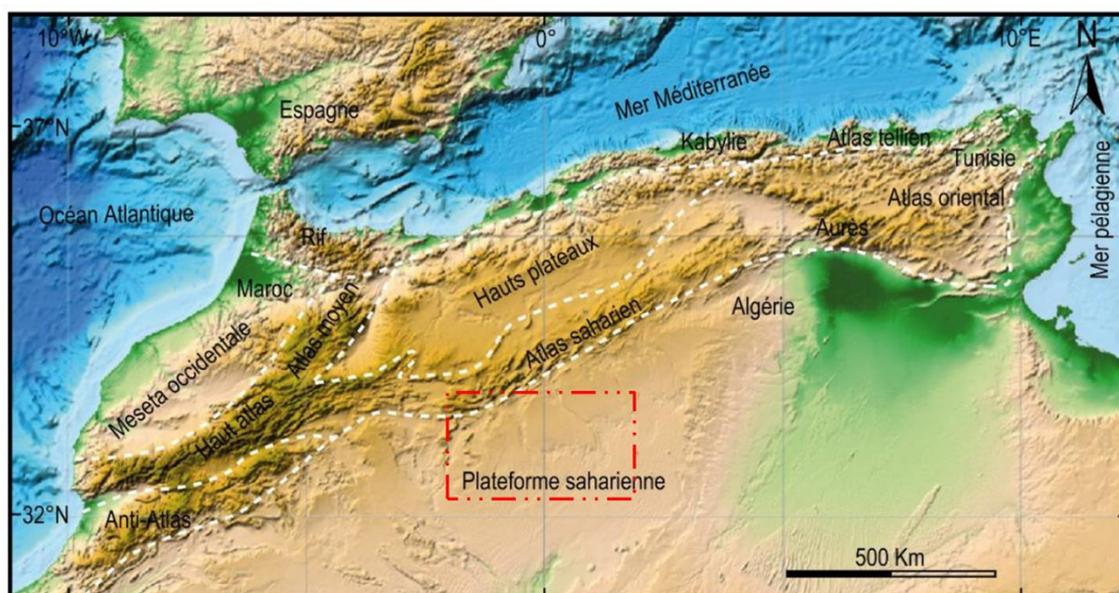


Figure I.1. Carte des grands domaines géologiques de l'Algérie.

I.1. Localisation géographique de la région d'étude

La zone d'étude se situe au Nord-Ouest du Sahara Algérien. Administrativement il appartient aux wilayas d'El Bayadh, de Laghouat, de Djelfa, et celles de Naama de Ain Safra. Elle s'étend entre les latitudes 32.00° et 34.00° et les longitudes -1° et 2°. L'altitude varie entre 600 m et 900 m. Son intérêt réside dans sa proximité du champ gazier de Hassi R'mel. Du point de vue régional, le sillon de Benoud est limité au Sud par l'ensellement de Djofra, au Nord par l'Atlas Saharien, à l'Est par le dôme de Tirlhemt et à l'Ouest par le Bassin de Béchar et la voûte d'Oued Namous (Fig. I.2).

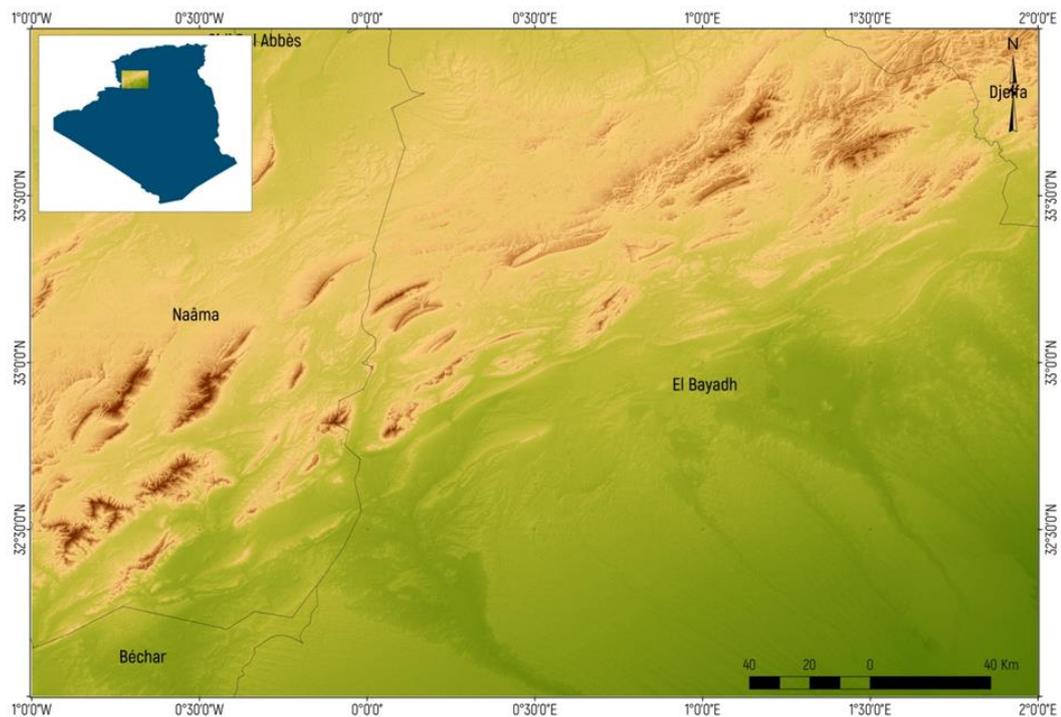


Figure I.2. Carte de localisation de la zone d'étude.

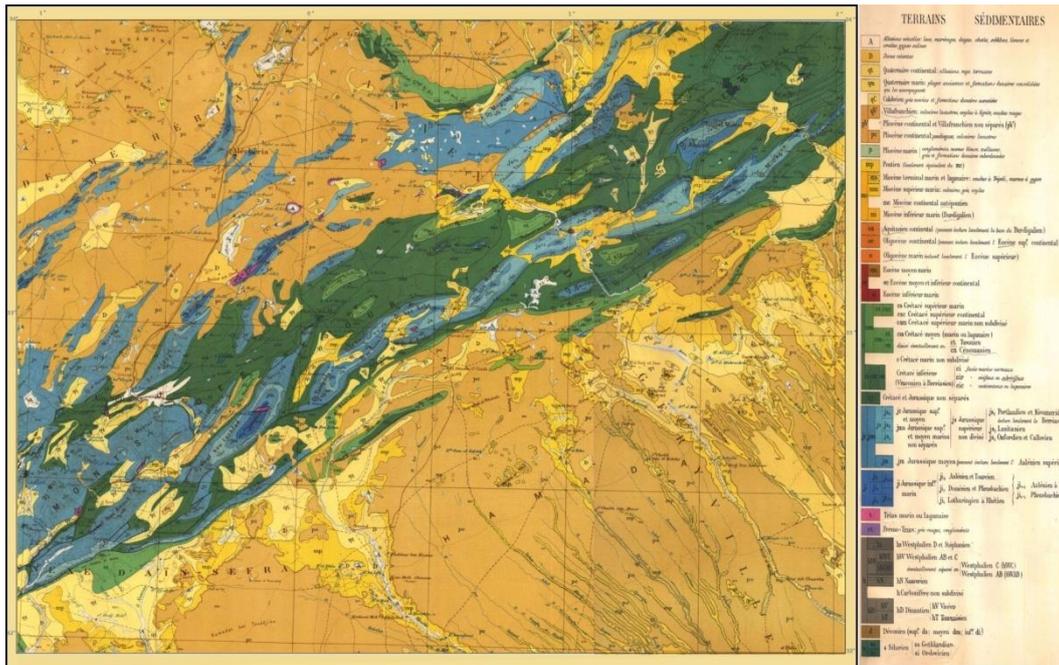


Figure I.3. Carte géologique de la région d'étude (extrait de la carte Nord Ouest de l'Algérie au 1/500 000).

I.2. Cadre Géo-structural

Le Sillon de Benoud a connu une histoire géologique complexe, la configuration structurale actuelle est le résultat de l'influence de plusieurs phases tectoniques liées aux évènements hercyniens et alpins. Comme signalé auparavant, la zone d'étude, peut être subdivisée en deux entités séparées par un accident majeur :

- La zone proche de l'Atlas Saharien. Ce dernier a commencé à fonctionner en distension au Trias, puis en compression à partir de l'Eocène jusqu'à l'Actuel.
- La Plate-forme Saharienne proprement dite au sud, représentée par la voûte de Oued Namous, l'ensellement de Djofra et le dôme de Tilhremt (Hassi R'mel) (Fig. 3). Cette zone a pris naissance au cours du cycle Calédonien et a été déformée au cours du cycle Hercynien. qui est complètement couverte par des dépôts quaternaires.

Cet accident majeur traverse toute l'Afrique du Nord d'Ouest en Est, il s'agit de l'Accident Sud Atlasique (ASA) ou le Front de chevauchement Sud Atlasique (FSA).

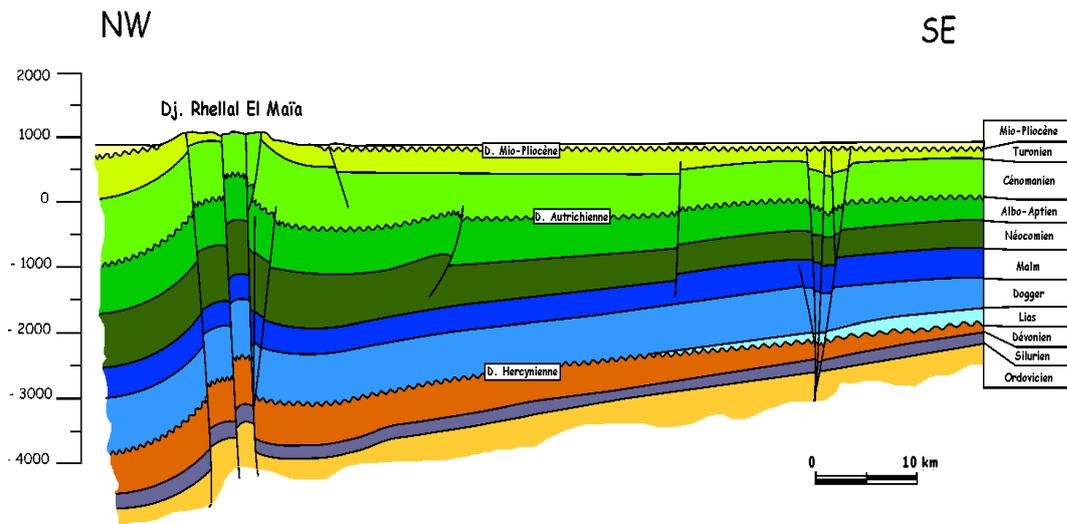


Figure I.4. Coupe géologique structurale régionale (document Sonatrach, 2004).

I.3 Stratigraphie

La couverture sédimentaire dans le sillon de Benoud est constituée essentiellement par des formations d'âge paléozoïque bien préservées dans la partie nord-est et sud-ouest, affectées par la discordance intra-Viséenne, tout le Paléozoïque est recouvert en discordance angulaire par le Mésozo-Cénozoïque plus développé sur la bande nord du sillon (Galmier,1970 ; Bassoullet,1973 ; Douihasini,1976 ; Abed, 1982 ; Herkat, 1982 ; Kazi Tani,1986 et Ait Ouali,1991).. Ainsi la succession stratigraphique de cette région peut être résumée comme suit (Fig. I-5) :

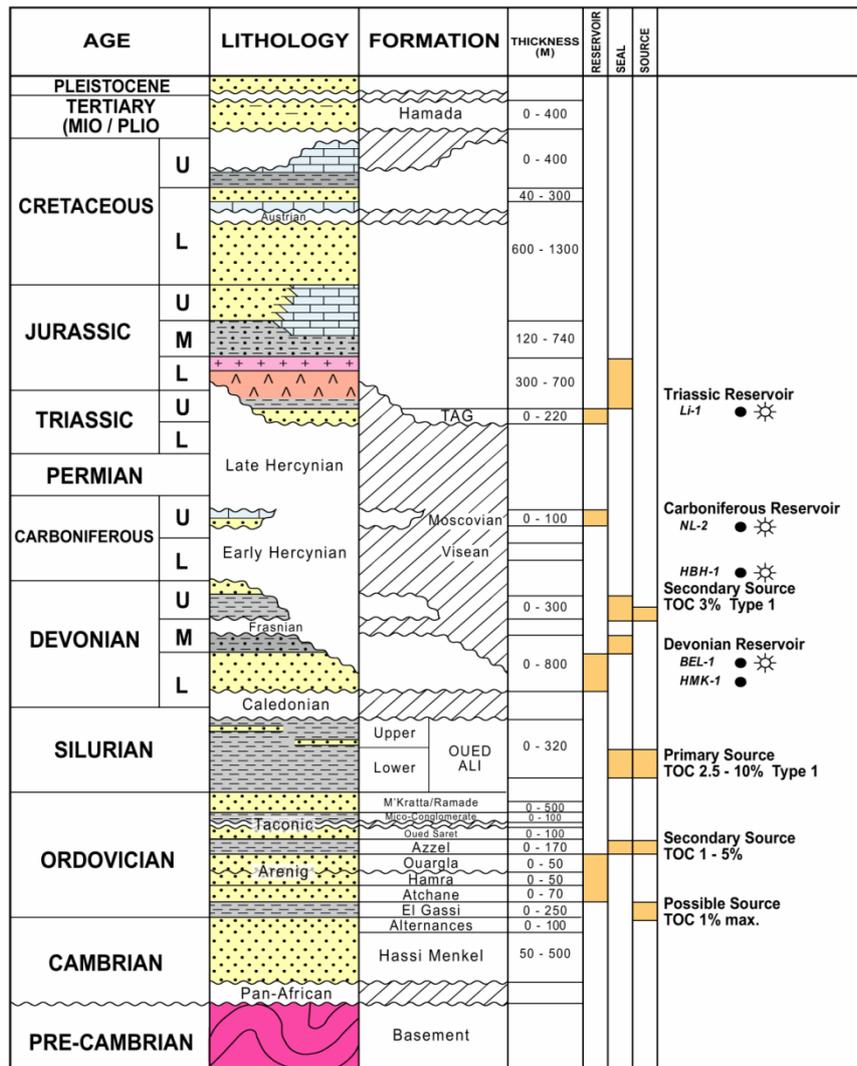


Figure I.5.Colonne litho-stratigraphique de la zone d'étude (document sonatrach, 2004).

I-2-1-Le Paléozoïque

- Le Cambrien (Ep. > 270m) : Constitué d'un ensemble de grès quartzites blanchâtre moyennes à grossières parfois conglomératiques, avec de rares passées d'argiles noires et chloriteux.
- L'Ordovicien (Ep. ± 350m) : Il est formé par : du bas en haut.

L'Unité III-1 : Elle est constituée de deux formations différentes, d'une épaisseur de 157 à 284m :

- Les Argile d'El Gassi : constituée d'une épaisse série d'argile noire.
- Les Grès d'El Atchane : constitué de grès gris-beige, fin à moyen, quartzitique, à passées d'argile noire.

L'Unité III-2 : d'une épaisseur totale variant de 74 à 171m, cette formation correspond aux quartzites de Hamra, constitué essentiellement de grès quartzitique.

L'Unité III-3 : elle est représentée par trois formations :

- Les Grès d'Ouargla : il s'agit de grès gris-beige, massif.
- Les Argile d'Azzel : constituée d'une série d'argile noire.
- Les Grès de Oued Saret : ils sont, constitués de grès gris à gris-beige, fin à moyen, localement quartzitique.

L'Unité IV : Elle est représentée par un complexe glaciaire argilo-gréseux :

- Les Argiles microconglomératiques : il s'agit d'argiles noires, feuilletées.
- La Dalle de M'krata: constitués de grès gris, quartzitique.

➤ **Le Silurien (Ep. ± 300m)**

Le Silurien est marqué à la base par une surface de transgression. Il est représenté par des argiles noires, très riches en matière organique (Argiles radioactives). A l'Ouest, il est caractérisé par un ensemble argilo-gréseux et argilo-carbonaté.

➤ **Le Dévonien (Ep. ±400m)**

- **Le Dévonien inférieur** : représenté par les dépôts détritiques littoraux avec toutefois quelques influences marines.
- **Le Dévonien supérieur** : durant cette période la sédimentation devient carbonatée avec des dolomies grises à rouges, noduleuses, micritiques, à goniatites abondantes, avec des intercalations d'argiles noires et de marnes grises-foncées, fortement fossilifères.

➤ **Le Carbonifère (Ep. ± 670m)**

Le Carbonifère a été atteint par certains puits de la région à TAJ-1, le Carbonifère est composé de calcaires gris, de marnes noires et d'argiles en plaquettes attribués au Viséen. Un niveau argileux daté Nammurien et enfin un Westphalien argilo-gréseux et carbonaté.

I-2-2-Le Mésozoïque

Les terrains mésozoïques reposent en discordance sur les formations paléozoïques et se composent comme suit :

- **Le Trias (Ep. ±70m)** : Il est formé par des argiles rouges gypseuses à traces d'anhydrites, intercalées d'une quarantaine de mètres environ de roches magmatiques (Dolérite), vertes, très altérées.

- **Le Jurassique (Ep. ±900m)**

Dans le Jurassique on distingue :

- **Le Lias (± 150m)** : Ce sont des alternances de grès bruns, très fins, légèrement dolomitiques, d'argiles gris-verdâtre, de dolomies grises à beiges très fines, pseudo-oolithiques, légèrement argileuses et localement sableuses et de calcaires blancs, légèrement argileux.
- **Le Dogger (± 350m)** : Il est composé d'argiles bariolées, brunes, avec des intercalations de grès beiges à blancs extrêmement fins et de dolomies légèrement silteuses et argileuses vers le milieu de la série.
- **Malm (± 420m)** : Il est composé de grès blancs, gris-clair, moyens à grossiers, dolomitiques et à intercalations d'argiles gris verdâtre légèrement silteuses.

- **Le Crétacé (Ep. ± 1150m)**

- **Le Crétacé inférieur**: Cette ensemble sédimentaire débute par des calcaires gréseux alternant avec des argiles, puis il devient essentiellement sableux .
- **Le Crétacé supérieur** : Le Cénomano-Turonien est caractérisé par des dépôts argileux, marneux à gypses et par des calcaires dolomitiques. Le Sénonien est composé d'argiles rouges à passées de calcaires blancs.

I-2-3- Le Cénozoïque Eocène (Ep>32 m) :

Il est formé par du sable translucide, grossier, avec passées de calcaire jaune à beige, gréseux, dur et d'argile brun-rouge, sableuse, légèrement carbonatée.

Chapitre II :
LA THEORIE DE LA GRAVIMETRIE

II. La théorie de la gravimétrie

II .1 La gravimétrie :

La gravimétrie est une méthode de champ de potentiel permettant de caractériser les variations de densité du sous-sol, et se base sur la variation du champ de pesanteur. En effet, a l’aplomb d’un corps dense la pesanteur sera plus forte (et inversement pour un corps léger) (Fig.II.1). La distribution du champ de pesanteur en surface nous renseigne alors sur les variations des masses en profondeur.

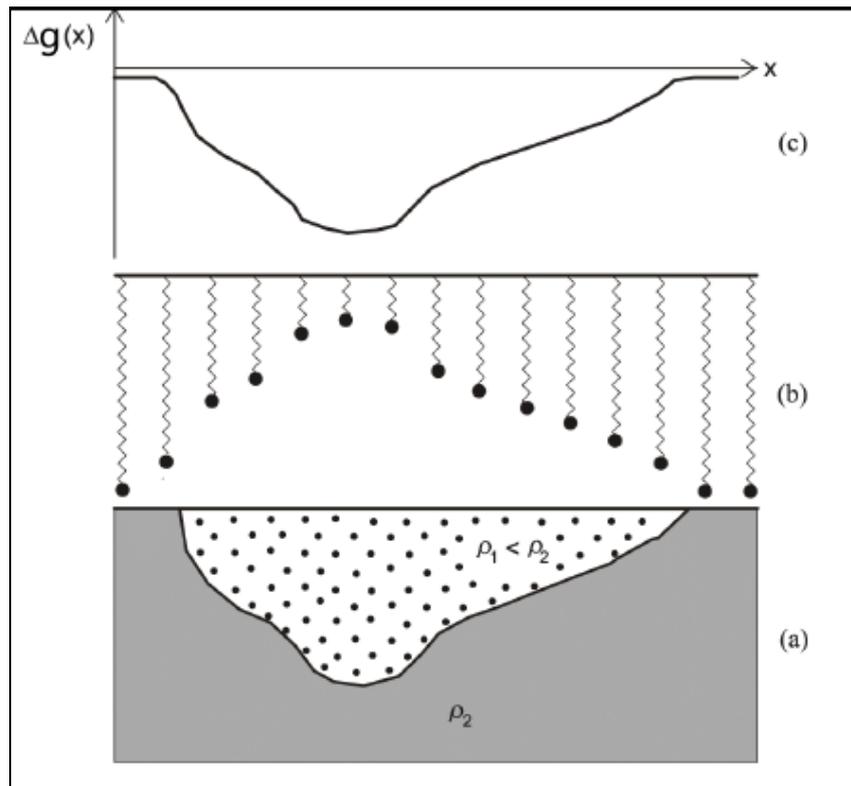


Figure II.6. Principe des mesures gravimétriques. A (Modèle géologique montrant une structure de densité ρ_1 encaissée dans un matériel de densité plus élevée ρ_2 . b (L’hétérogénéité de densité provoquée par ce modèle engendre des variations latérales de l’attraction (Klaus Knödel et al. 2007)

II.2 Principes de base :

La force newtonienne est une force d’attraction qui s’exerce entre deux particules, de masses m et m' (Fig.II.2), dont les dimensions caractéristiques sont faibles par rapport a la distance d qui les sépare. Elle est définie par:

$$\vec{F} = G \frac{mm'}{d^2} \vec{u}$$

Avec G la constante gravitationnelle universelle ($G = 6.673.10^{-11}m^3.kg^{-1}.s^{-2}$), et \vec{u} un vecteur unitaire.

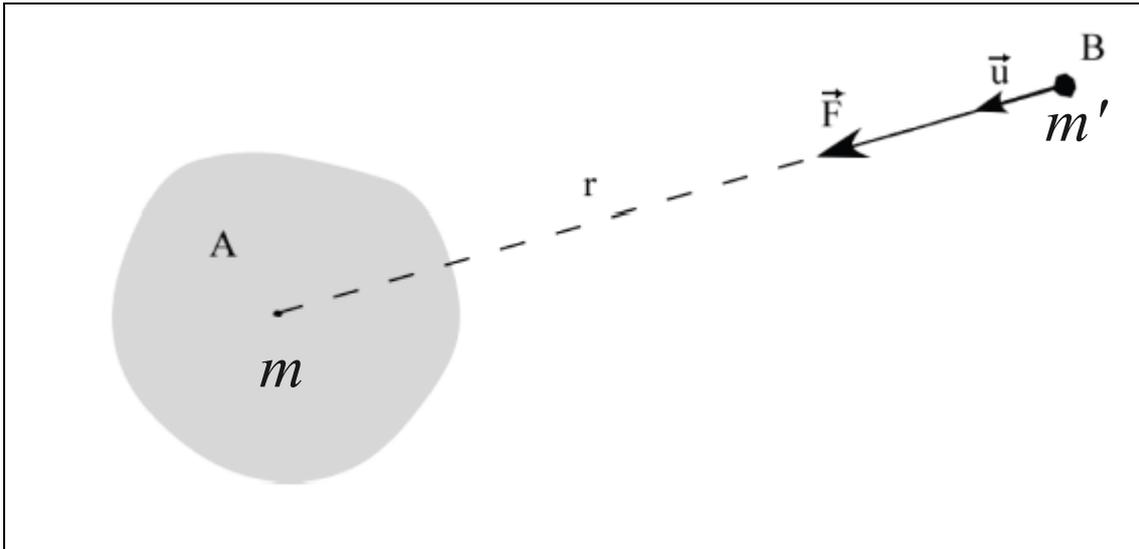


Figure II.7. Deux masses dans un référentiel cartésien

Si on considère qu'une des masses est la Terre (notée M), possédant une distribution de masse homogène et sphérique, alors elle exerce sur l'autre masse m , située à sa surface, un champ newtonien associé à la force d'intensité :

$$\mathbf{F} = G \frac{Mm}{R^2}$$

Avec R le rayon de la Terre. En considérant une distribution homogène des masses, on admet que l'effet gravitationnel sur un point extérieur est identique à celui d'une source ponctuelle ou toute la masse serait concentrée en ce point (Dubois et al.2001). En appliquant le principe fondamental de la dynamique ($\mathbf{F} = m\mathbf{g}$) et en négligeant la force centrifuge, on obtient la formule d'accélération de la pesanteur :

$$\vec{g} = G \frac{M}{R^2} \vec{u}$$

La pesanteur \vec{g} s'exprime en Gal (ou en $m.s^{-2}$) avec $1Gal = 10^3mGal = 10^{-2}m.s^{-2}$.

La valeur moyenne de la pesanteur à la surface de la Terre est de 981 000mGal. L'équipotentielle du champ de pesanteur terrestre théorique est définie en gravimétrie par un *ellipsoïde* de référence (Fig.II.3). En réalité, l'hétérogénéité de notre planète crée des déformations de cette surface théorique, définissant ainsi une équipotentielle irrégulière qui correspond au champ de gravitation réel : le *géοïde*

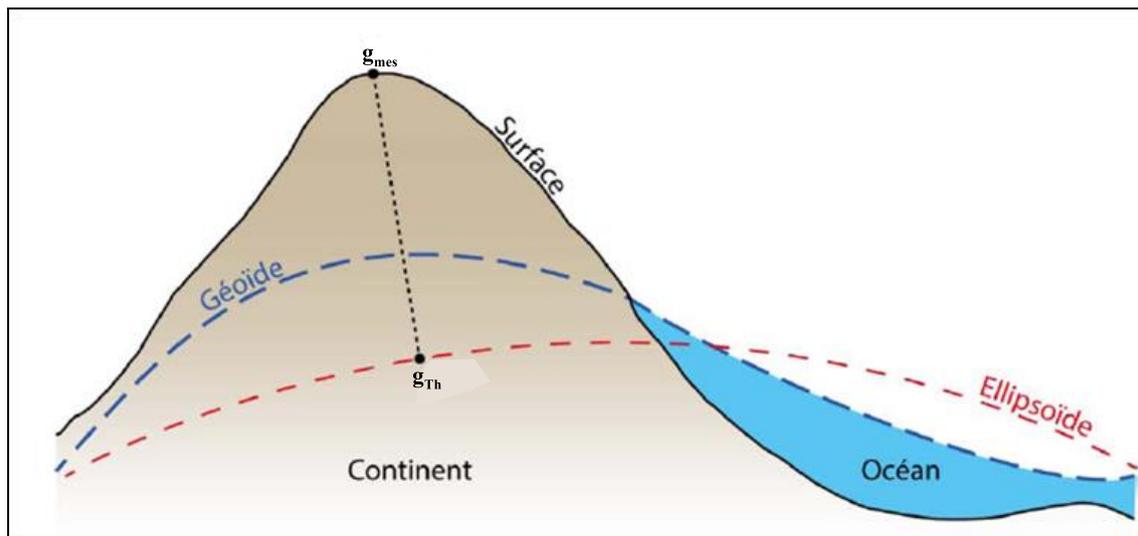


Figure II.8. Représentation des équipotentielles, théorique et réelle, du champ gravitationnel terrestre, par rapport à la topographie de surface. g_{mes} correspond au point de mesure en surface, et g_{Th} à sa valeur théorique, calculée sur l'ellipsoïde.

II .3 Corrections et Anomalies gravimétriques :

Il faut rappeler que la valeur de la pesanteur mesurée g_{mes} est fait sur la surface terrestre et non pas sur le géoïde. Aussi, le calcul de la valeur théorique g_{Th} , se fait par rapport à l'ellipsoïde qui ne tient pas compte de la densité des différents matériaux entre la surface de mesure et la surface de référence. Pour que les mesures soient comparables entre elles, il faut ramener toute les mesures sur un même plan référentiel, Il est donc nécessaire d'apporter tout un ensemble de corrections ([LaFehr, 1991](#) ; [Li &Götze, 2001](#) ; [Hackney&Featherstone, 2003](#)).

La correction de la dérive : la mesure est d'abord corrigée d'effets propres à l'instrument compensation de légères inclinaisons et variations de température.

La correction de marée : cette correction retranche l'effet de l'attraction des astres (Lune et Soleil) sur le champ de gravité mesuré. Cette correction est appliquée connaissant les orbites respectives des astres et l'heure de la mesure.

La Correction de latitude : Cette correction tient compte de la rotation de la terre et de son aplatissement. Le premier phénomène entraîne l'apparition d'une force axifuge variable avec la distance de la station à l'axe de rotation, donc avec la latitude.

Le second modifie la distance du point de mesure au centre de la terre et du même coup l'attraction en fonction de la latitude. D'après [Dubois et Diamant \(2001\)](#); la correction de latitude est donnée par la formule suivante :

$$g_{th}(\varphi) = 978031.846 (1 + \alpha \sin^2 \varphi + \beta \sin^4 2\varphi)$$

Où:

φ : est la latitude

$$\alpha: 0.00527895$$

$$\beta: 0.000023462$$

la Correction à l'air libre : Cette correction prend en compte la distance du point de mesure au centre de masse de la Terre. Il en résulte l'anomalie à l'air libre, corrélée avec la topographie.

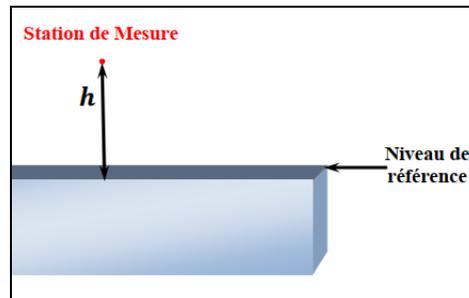


Figure II.9. Principe de la correction d'air libre.

Cette correction ne tient pas compte des masses situées entre les stations et ce plan d'référence. La correction d'air libre est donnée par la relation suivante :

$$cal = 0.3086 h \text{ (mgal)}$$

Avec h : altitude (en mètre)

La Correction de plateau : dite aussi correction de Bouguer, elle tient compte de la couche de terrain située entre le point de mesure et le plan de référence que nous avons négligé lors du calcul de la correction d'Air libre. Elle est donnée par la relation (Telford, 1981).

$$cp = 2\pi G\rho h$$

$$cp = 0,04191\rho h \text{ (mgal)}$$

Avec: ρ : densité, h : altitude .

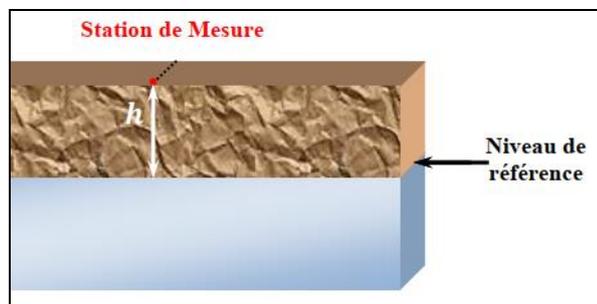


Figure II.10. Principe de la correction du plateau

La Correction de relief :

Cette correction tient compte des irrégularités de la surface topographique à proximité de la station, par exemple des collines s'élevant (excès de masse), au-dessus de la stationne des vallées (défaut de masse), situées au-dessous. La contribution du relief est

proportionnelle à la densité ρ par l'intermédiaire d'un terme T , celui-ci s'obtient par un calcul complexe

$$T = \int_v \frac{dv}{r^2} \cos \alpha$$

En appliquant ces corrections on a donc accès aux anomalies gravimétriques. Deux principaux types d'anomalies ont été définis :

II .3.1. L'anomalie à l'air libre

Cette anomalie résulte de la différence entre la valeur de la pesanteur mesurée et la valeur théorique corrigée de la correction à l'air libre.

$$A_{airlibre} = g_{mes} - (g_{th} - 0.03086h)$$

Avec h orienté vers le haut et exprimé en mètres.

II. 3.2. Anomalie du Bouguer

Une fois ces corrections effectuées aux mesures gravimétriques, le seul paramètre qui les influence est la densité qui caractérise les effets causés par les structures géologiques. L'anomalie de Bouguer pour chaque station s'écrit :

$$AB = g_{mes} + T - cp + cal - g_{th}$$

$$AB = g_{mes} + T - 0.0419\rho h + 0.3086h - g_{th}$$

Chapitre III :
TRAITEMENT DES DONNEES ET
DISCUSSION DES RESULTATS

III. Traitement des données et discussion des résultats

Introduction

Dans le présent chapitre on présentera les données gravimétriques utilisées, leurs analyses, et les résultats d'interprétation. Toutes les opérations de traitements ont été effectuées à l'aide du logiciel ([Geosoft Oasis-montaj](#)).

Les données gravimétriques utilisées dans la présente étude sont disponibles depuis la fin des années 1997 ; Elles ont été acquises par l'entreprise nationale de géophysique (ENAGEO) dans le cadre d'un contrat avec la division d'exploration (DES-département, Géophysique). Les mesures gravimétriques avaient été effectuées au sol avec un gravimètre LaCoste-Romberg selon des stations espacées d'environ 2 Km et disposées le long des routes et des pistes selon un réseau qui offre une bonne couverture de la région d'étude ([Fig.III.11](#)).

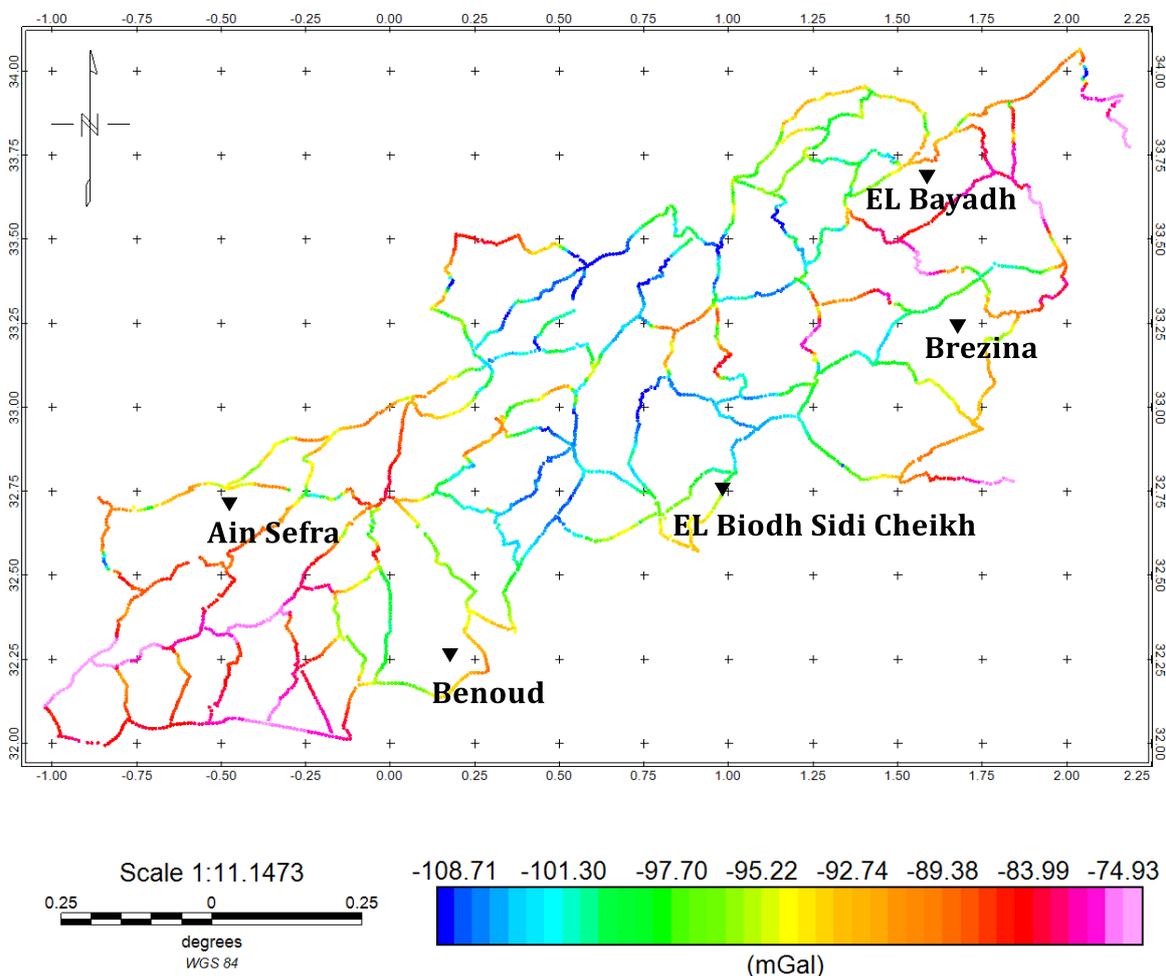


Figure III.11. Répartitions des valeurs d'anomalie de Bouguer

Nous avons établi par la suite, l'ensemble des cartes gravimétriques ainsi que leurs transformées, à partir d'une grille régulière élaborée par la méthode d'interpolation appelée : *Krigeage* (*Kriging en anglais*).

III.1. La carte d'anomalie de Bouguer

La première étape du traitement des données débute par l'élaboration de la carte d'anomalie de Bouguer, qui est l'élément de base de l'interprétation gravimétrique.

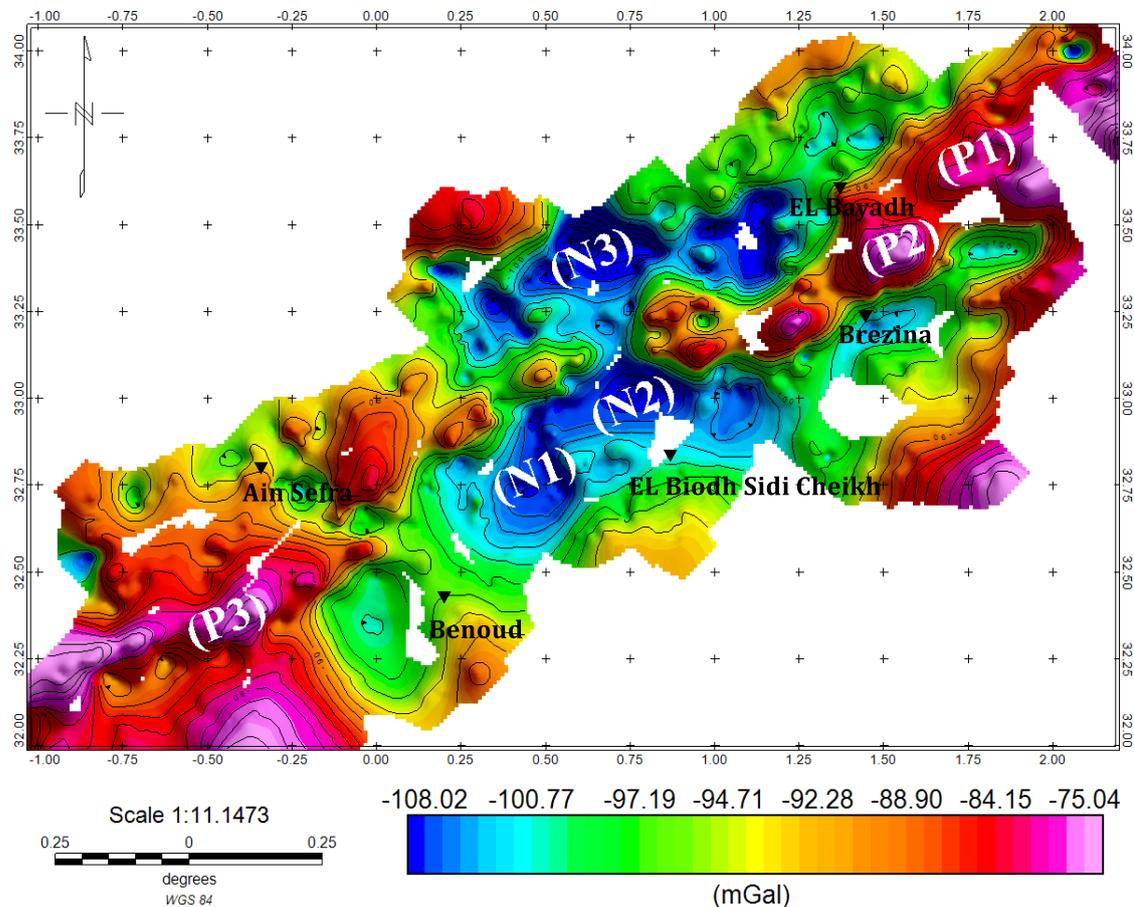


Figure III.10. Carte de l'Anomalie de Bouguer (d=2.67).

Cette carte gravimétrique (Figure III.12), présente des valeurs allant de -108 mGal dans la partie centrale de la région d'étude à -75 mGal dans la partie Sud-Ouest et Nord-Est, et traduit les variations latérales de la densité dans le sous-sol.

La variation négative entre -108 à -93 des anomalies (N1), (N2) et (N3) constitue une zone subsidence où la couverture sédimentaire est très épaisse, selon (Takherist, 1990) cette épaisseur atteint les 7000 m. On appellera ce bloc structural le bassin atlasique.

Les anomalies (P1), (P2) et (P3) qui semble être plus positif, tel que les valeurs des anomalies de Bouguer varient entre -88 à -75. Cette variation d'anomalies identifie une série sédimentaire peu épaisse qui correspond à une remontée du socle environ 3000 m selon (Bracene, 2002). Ce domaine géologique correspond à la partie de la plateforme saharienne.

Les principales anomalies ont une tendance NE-SW, cette direction est liée à la chaîne atlasique saharienne.

III.2. Séparation des anomalies

Les anomalies obtenues a la surface de la terre représentent le reflet de toutes les hétérogénéités de masses en profondeur (Schoeffler, 1975; Blakely, 1996). Des sources profondes qui vont générer des anomalies de grande longueur d'onde et de faible amplitude dites « anomalies régionales » (Lowrie, 2007) tandis que des sources proches causent généralement des anomalies de courte longueur d'onde (Telford et al. 1990 ; Lowrie, 2007). Il est donc nécessaire de séparer ces deux effets, Une fois le champ régional soustrait du champ total, l'anomalie est dite « résiduelle » (Figure.III.13)

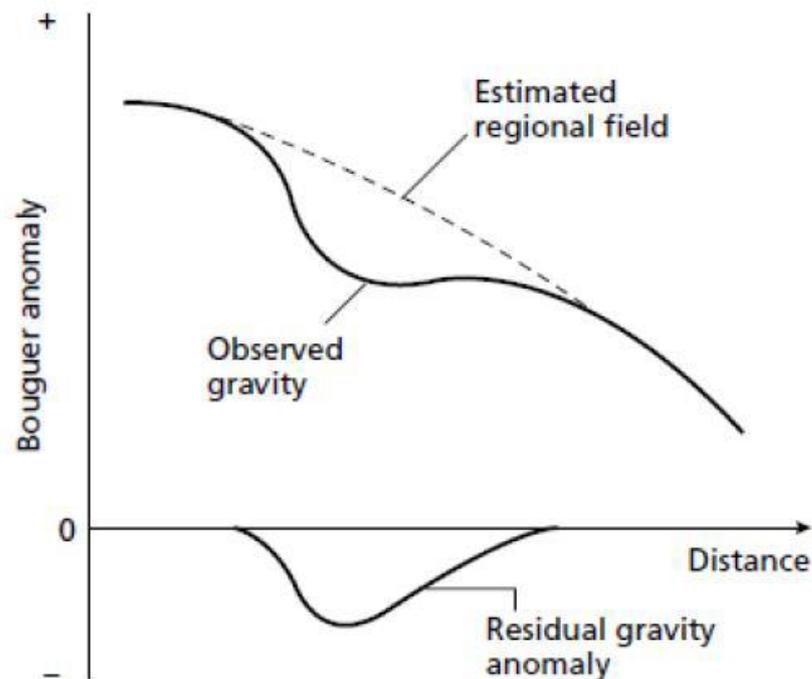


Figure.III.13.Représentation d'une courbe de séparation de l'anomalie régionale et résiduelle (Kearey et al. 2002)

Il existe plusieurs techniques de Séparation **Régional-Résiduel**, qui est habituellement estimée par ajustement d'une tendance bilinéaire ou polynomiale (eg. Dentith & Mudge, 2014). Dans notre manuscrit nous avons procédé cette technique de la séparation des anomalies gravimétriques par la méthode polynomiale à divers ordres qui est un compromis entre le prolongement vers le haut et le lissage polynomiale (Jacobsen (1987), Zeng (1989)).

La simulation gravimétrique la plus concluante de l'architecture de la discontinuité du Moho est retrouvée avec un prolongement vers le haut de 40 kilomètres. En visualisant la carte de l'anomalie de Bouguer prolongée vers le haut de 40 kilomètres (correspondant à un plan moyen à 20km de profondeur) (Jacobson 1987).

Les figures suivantes (Fig.III.15, Fig.III.16, Fig.III.17) présentent un exemple de procédure d'extraction d'une régionale en utilisant 3 traitements différents de la carte de l'anomalie de Bouguer de la région d'étude :

Un calcul d'un polynôme de 1^{er} degré en utilisant une régression polynomiale (Fig.III.15) avec :

$$Z(x, y) = A + Bx + Cy$$

Un calcul d'un polynôme de 2^{ème} degré en utilisant une régression polynomiale (Fig.III.16) avec:

$$Z(x, y) = A + Bx + Cy + Dx^2 + Exy + Fy^2$$

Un calcul d'un polynôme de 3^{ème} degré en utilisant une régression polynomiale (Fig.III.17) avec:

$$Z(x, y) = A + Bx + Cy + Dx^2 + Exy + Fy^2 + Gx^3 + Hx^2y + Ixy^2 + Jy^3$$

En comparant les trois cartes réalisées avec différents ordres de polynômes (Fig.III.15, Fig.III.16, Fig.III.17) avec la carte du prolongement vers le haut à une altitude de 40km (Fig.III.18), on peut remarquer une quasi-ressemblance au niveau de l'allure des courbes iso-gals et au niveau des grandes tendances gravimétriques avec la carte réalisée avec un polynôme de 1^{er} degré.

Le prolongement vers le haut de l'anomalie de Bouguer à (40 km) correspondant à un plan moyen d'une profondeur approximative à l'interface croûte-manteau supérieur (discontinuité du Moho) de (20km) dans la région d'étude. Cette profondeur a été choisie suite à une analyse spectral (Fig.III.14) et selon les travaux antérieur sur la région d'étude (Ferré et al. 2017, Meliani et al. 2016 ; Frizon de Lamotte et al. 2011).

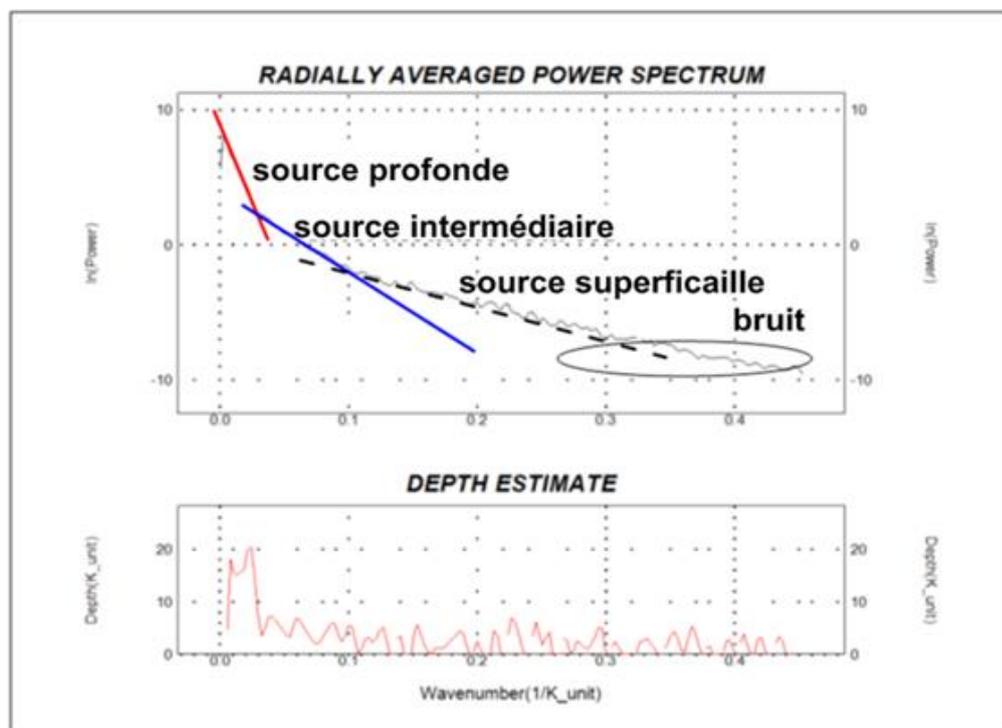


Figure III.14 Spectre d'énergie gravimétrique en fonction du nombre de cycle par kilomètre au niveau du secteur d'étude.

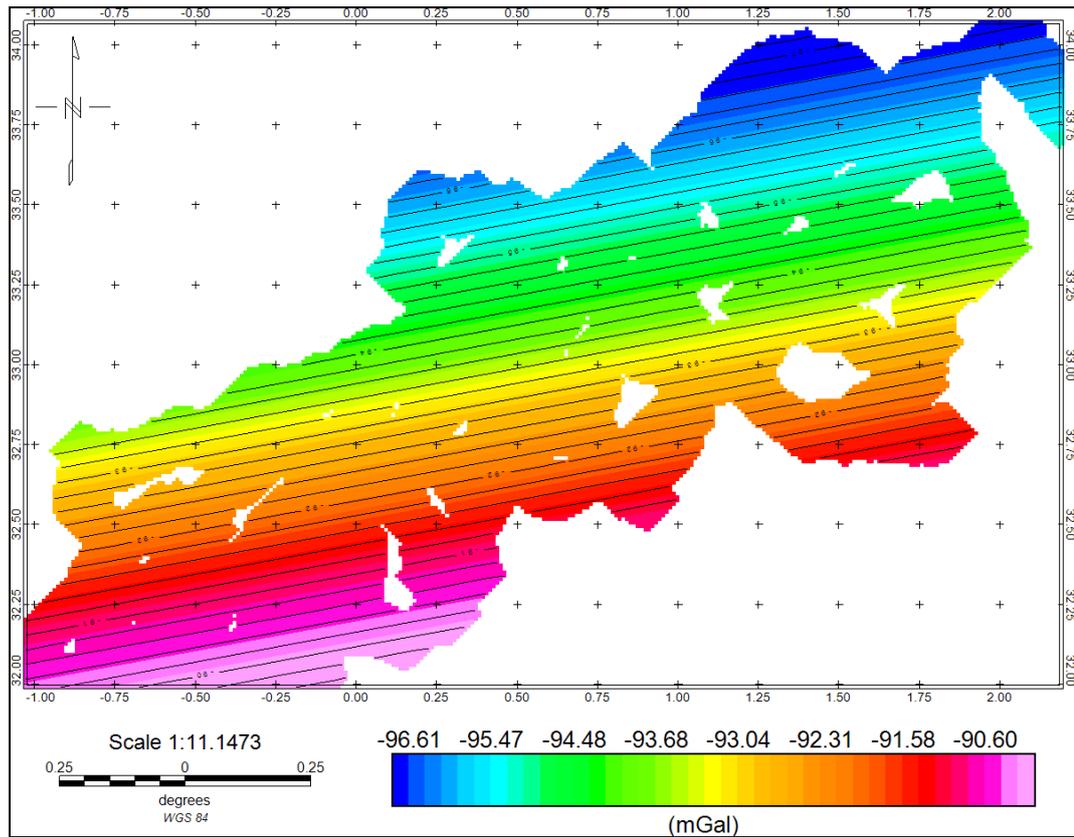


Figure III.15. Carte du polynôme de 1^{er} degré du champ gravimétrique.

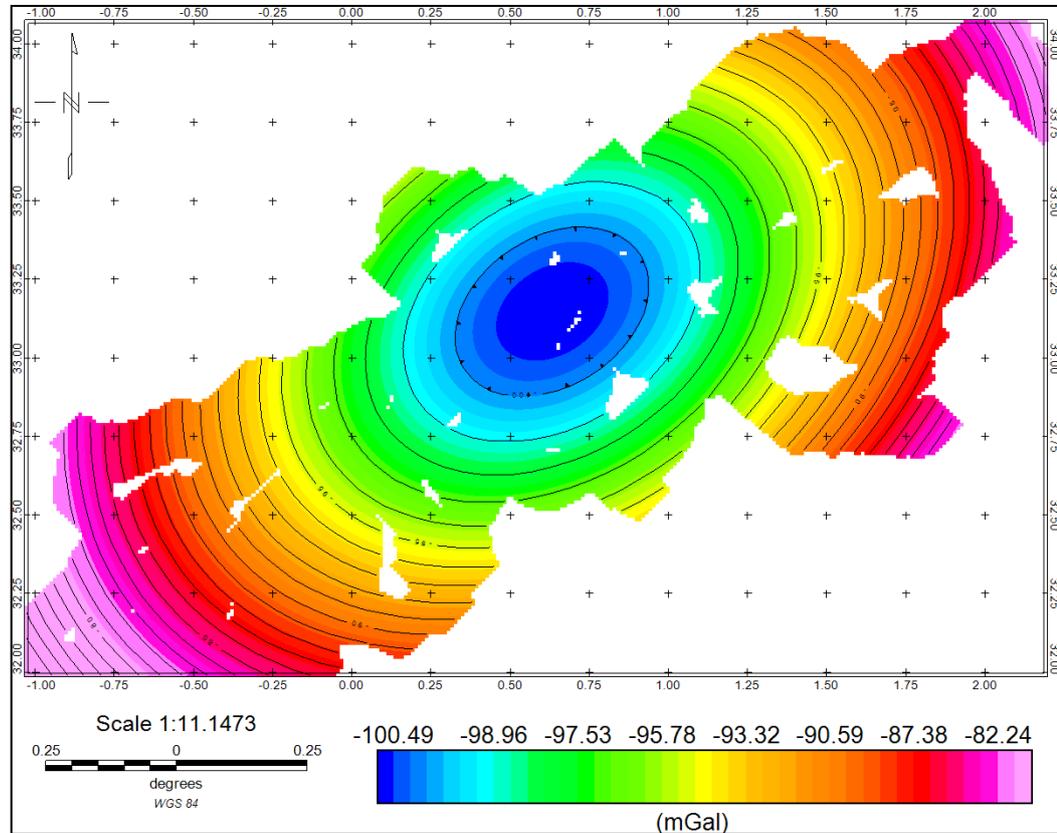


Figure III.11. Carte du polynôme de 2^{ème} degré du champ gravimétrique.

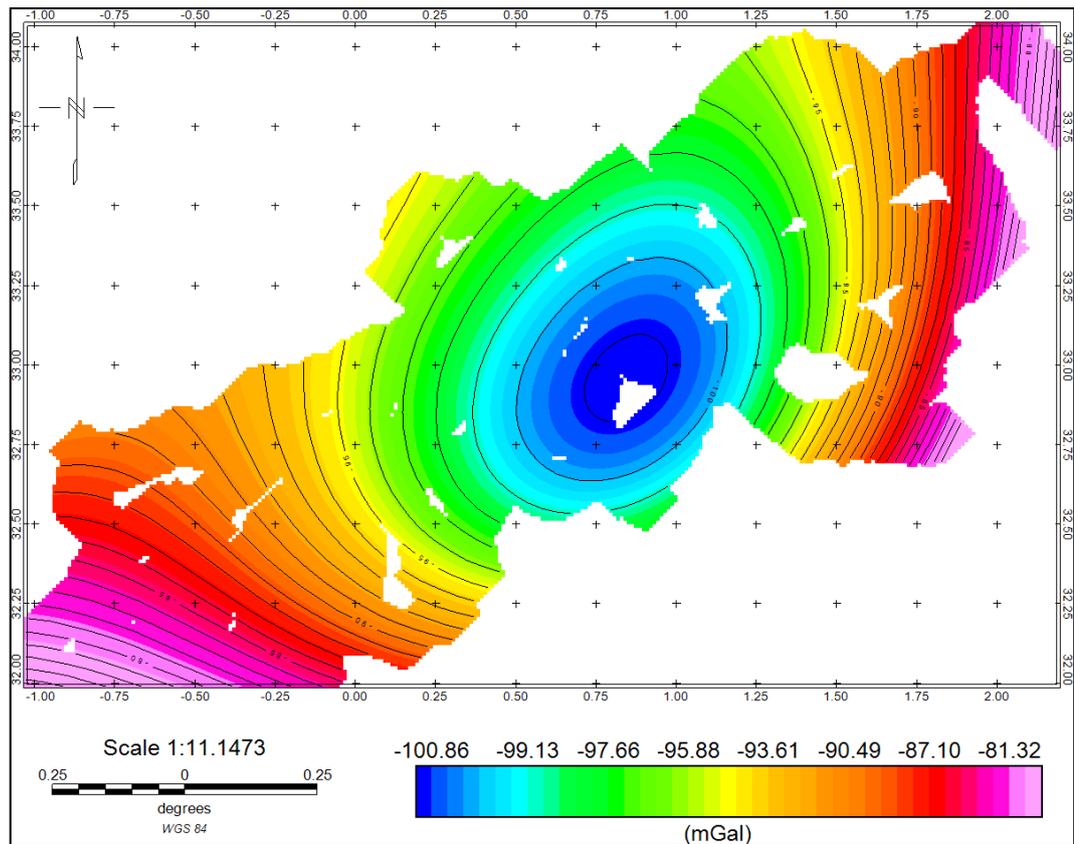


Figure III.12. Carte du polynôme de 3^{ème} degré du champ gravimétrique.

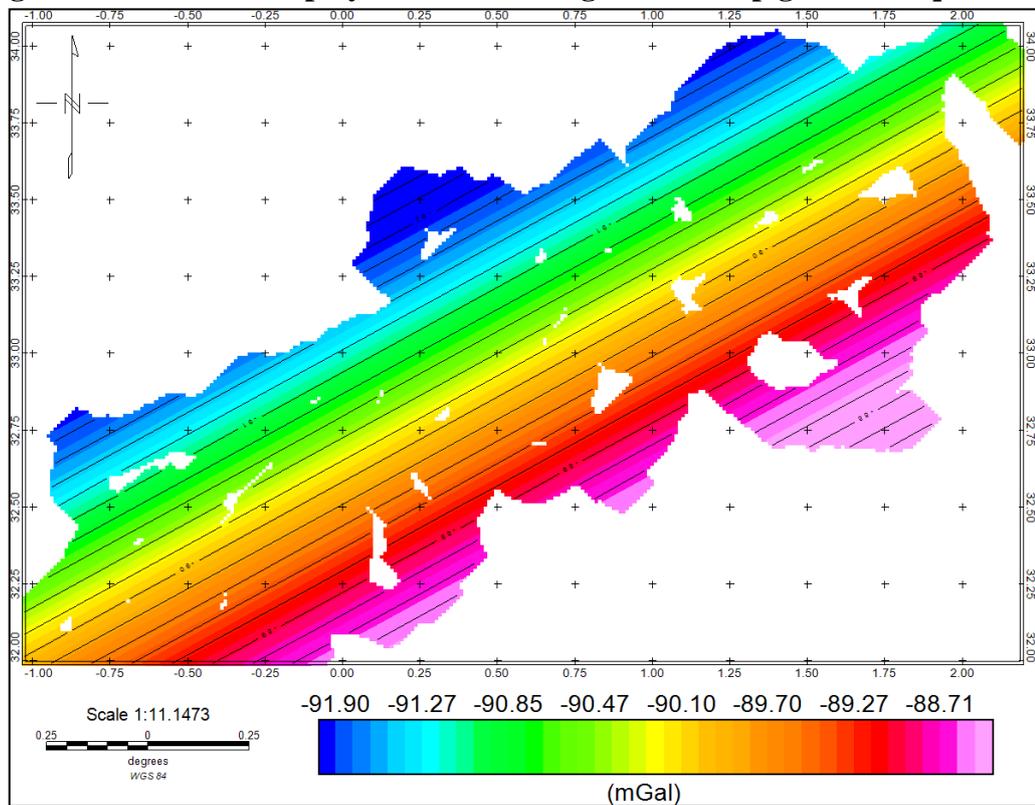


Figure III.18. Carte du prolongement vers le haut à une altitude de 40Km du champ gravimétrique.

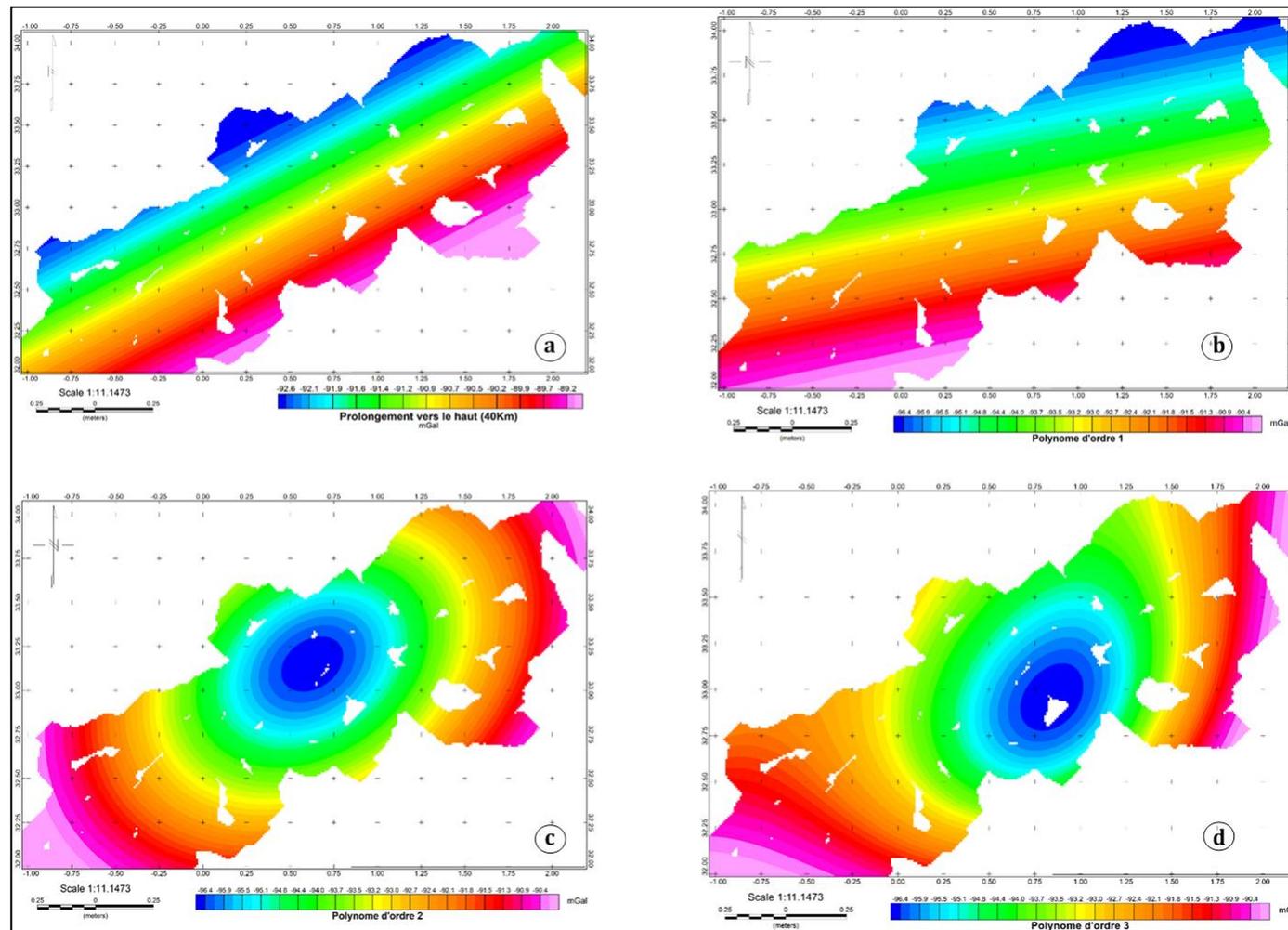


Figure III.19. Comparaison entre la carte du prolongement vers le haut à une altitude de 40 Km (a) du champ gravimétrique et les cartes du polynôme de 1er(b), 2ème (c) et 3ème(d) degré du champ gravimétrique.

La (Fig.III.20) qui représente la carte d'anomalies résiduelles montre une répartition complexe des anomalies positives et négatives caractérisées par des dimensions variables et des amplitudes variant de -16.7 à 9 mGal

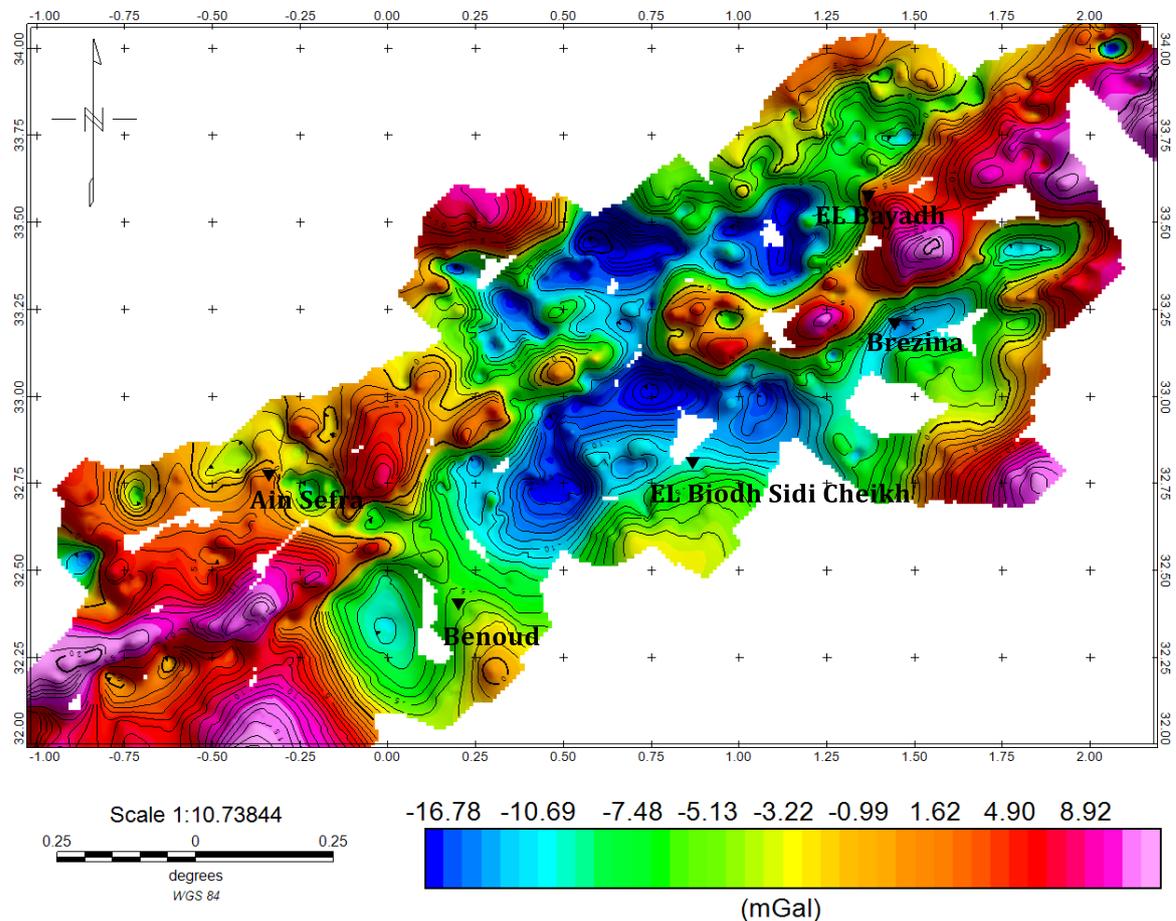


Figure III.20. Carte de l'Anomalie Résiduelle.

La carte de la résiduelle confirme les observations déjà notées pour la carte de l'anomalie de Bouguer. De plus, lorsqu'elle est superposée les structures géologique (Fig. III.20), elle met en évidence une tendance Nord-Ouest Sud-Est des anomalies. Ces derniers sont liés à la flexure sud atlasique (FSA) qui sépare les deux domaines géologiques. Ces anomalies gravimétriques de forme et d'amplitude variables sont aussi bien corrélées avec les grandes structures géologiques de la région d'étude.

III.3. Traitements qualitatifs de l'anomalie gravimétrique

Afin de faciliter les interprétations des données gravimétriques différents opérateurs ont été appliqués. Ces opérateurs se définissent dans le domaine des fréquences en utilisant la transformée de Fourier, puis l'inverse de la transformée de Fourier pour revenir dans le domaine spatial. Néanmoins, nous invitons le lecteur à se référer à (Blakely, 1996; Nabighian et al. 2005) pour une description exhaustive de ces opérateurs traitements ainsi que de leur historique.

III .3.1. Dérivée verticale (gradient vertical):

La dérivée verticale permet de mieux mettre en évidence les anomalies de surface en atténuant les anomalies à plus grande longueur d'onde (basse fréquence), et de localiser les limites des structures (Dobrin and Savit, 1988).

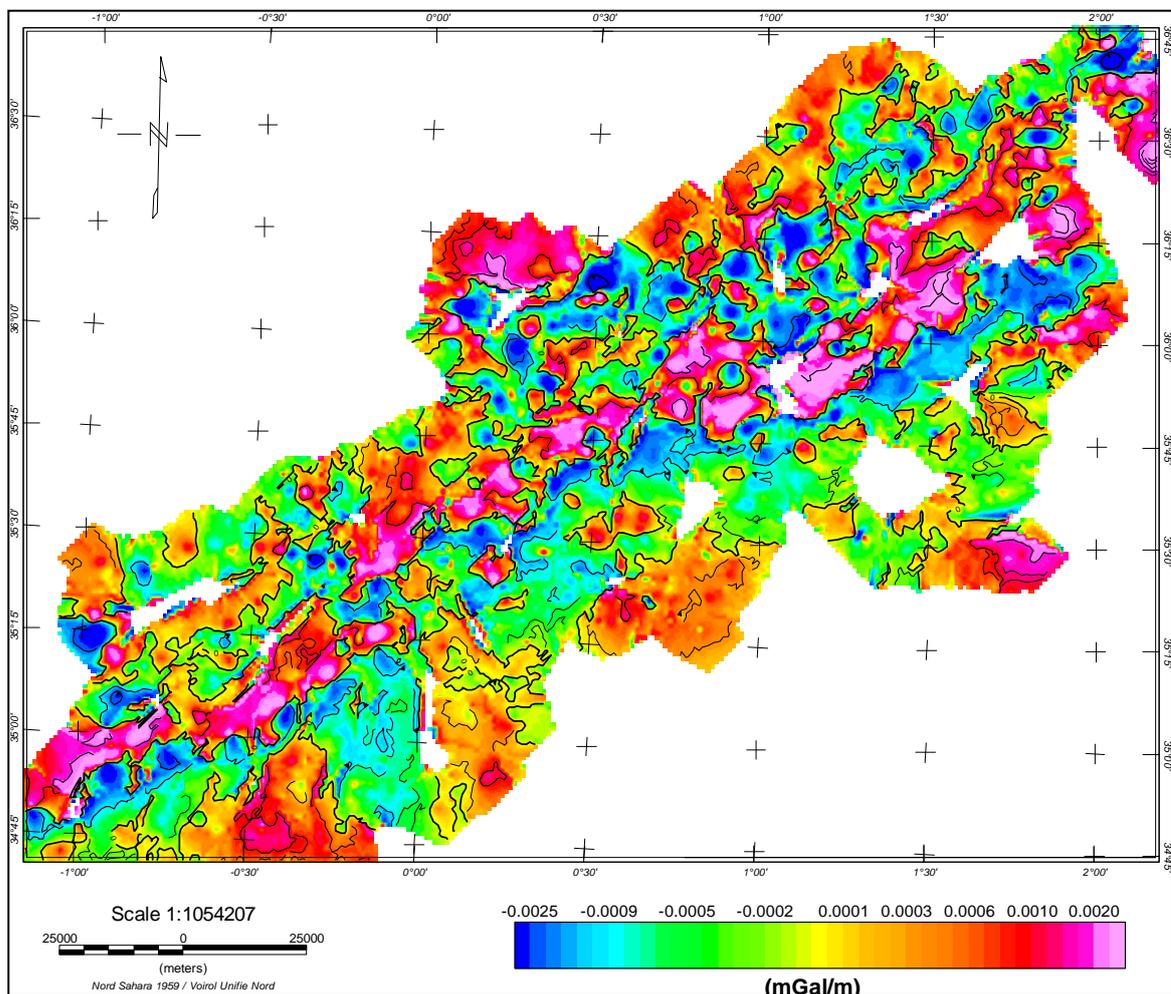


Figure III.21. Carte de la dérivée verticale.

La carte du gradient vertical (Fig.III.21) présente de grandes zones avec des valeurs de gradient très proche de 0. Cela indique vraisemblablement, connaissant la verticalité des unités, que celles-ci se prolongent profondément. Ceci semble corroborer l'hypothèse de la verticalisation d'immense flexure sud atlasique suite à la séparation des deux domaines géologiques.

III.3.2.Dérivée horizontale (gradient horizontal):

Les dérivées horizontales sont considérées comme moyen efficace pour mettre en évidence les linéaments de hautes fréquences, orientés dans les directions perpendiculaires au sens de la dérivation.

II .3.2.1 . Carte de dérivée horizontal suivant X

La carte de la dérivée horizontale selon X (Fig.III.22) nous montre surtout les linéaments orientés globalement N-S, correspondant à des contacts géologiques orientés dans cette direction.

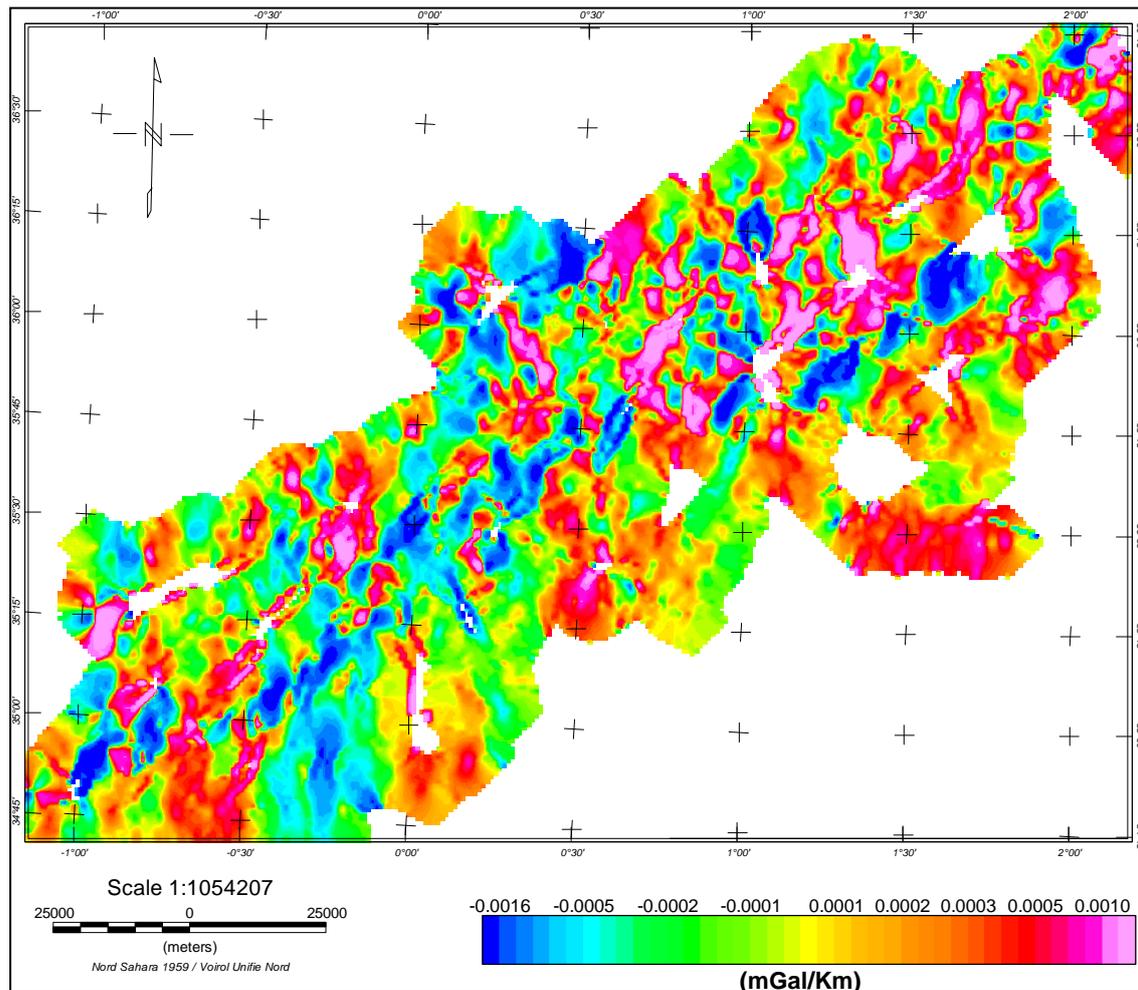


Figure III.22. Carte de la dérivée horizontale selon X

III.3.2.2. Carte de dérivée horizontale suivant Y

Le gradient horizontal selon Y permet la mise en évidence des contacts anormaux et des failles orientés dans la direction E-O, sur la (Fig III.23) nous remarquons également les grands linéaments de contraste de densités dans la direction Est-Ouest, correspondent aux grands accidents sud Atlasique qui affecte toute la région du Benoud dans la direction NE-SO.

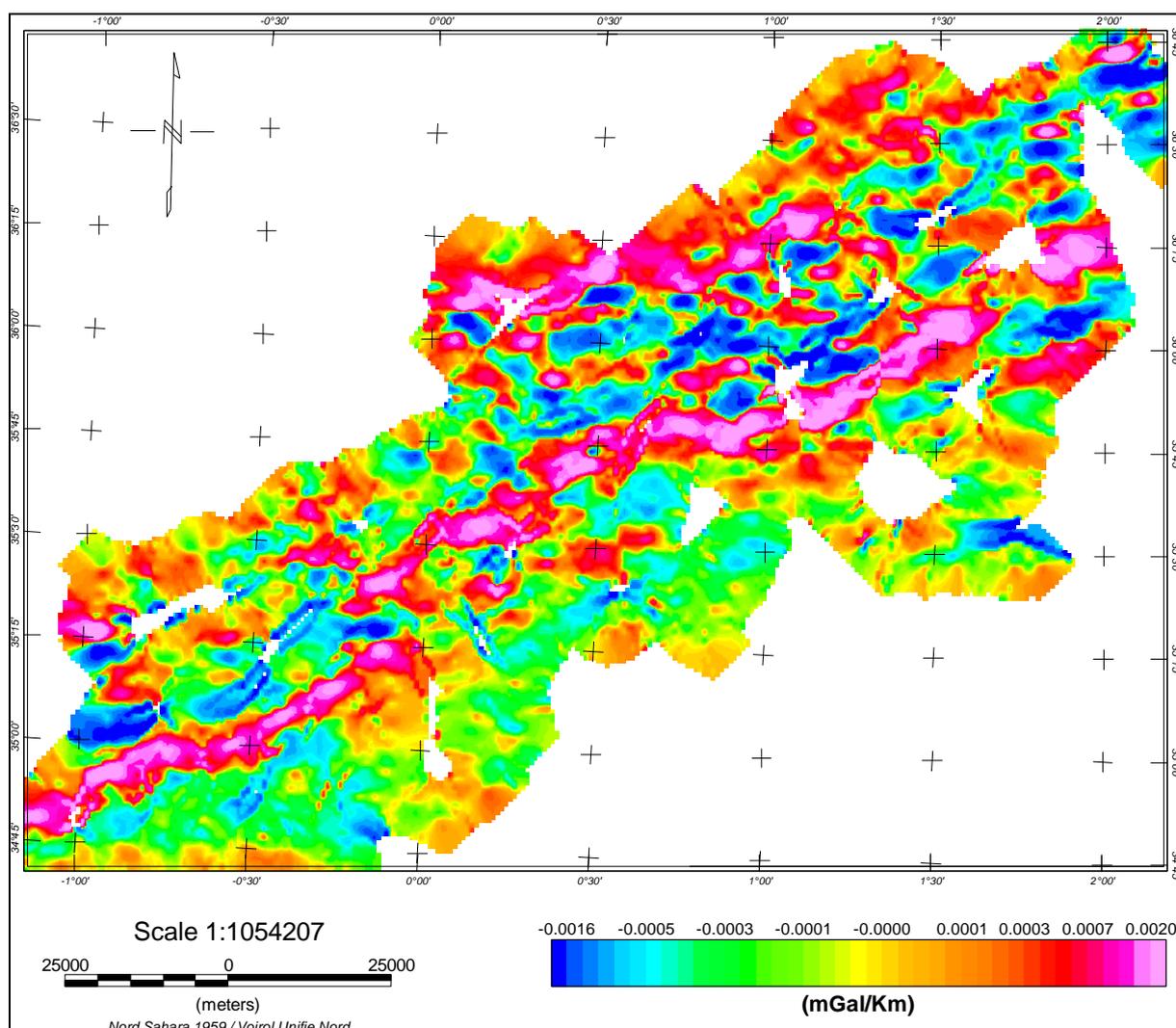


Figure III.23. Carte de la dérivée horizontale selon Y.

III.4. Traitements quantitatifs de l'anomalie gravimétrique

III.4.1 Modélisation directe

La modélisation gravimétrique se base sur la technique des approximations successives, en effet, l'anomalie gravimétrique provoquée par le modèle reste modifiable jusqu'à ce que l'anomalie calculée coïncide avec l'anomalie observée sur le terrain.

Dans la présente étude, la modélisation est effectuée par le logiciel « GM-SYS ». Ce logiciel est doté d'une interface interactive qui permet la comparaison entre la courbe calculée et la courbe expérimentale tracées sur la carte d'anomalies résiduelles. Ceci, ceci conduit l'opérateur vers une productivité maximum. Dans la pratique, l'interprétation s'effectue en trois étapes (fig. III.24)

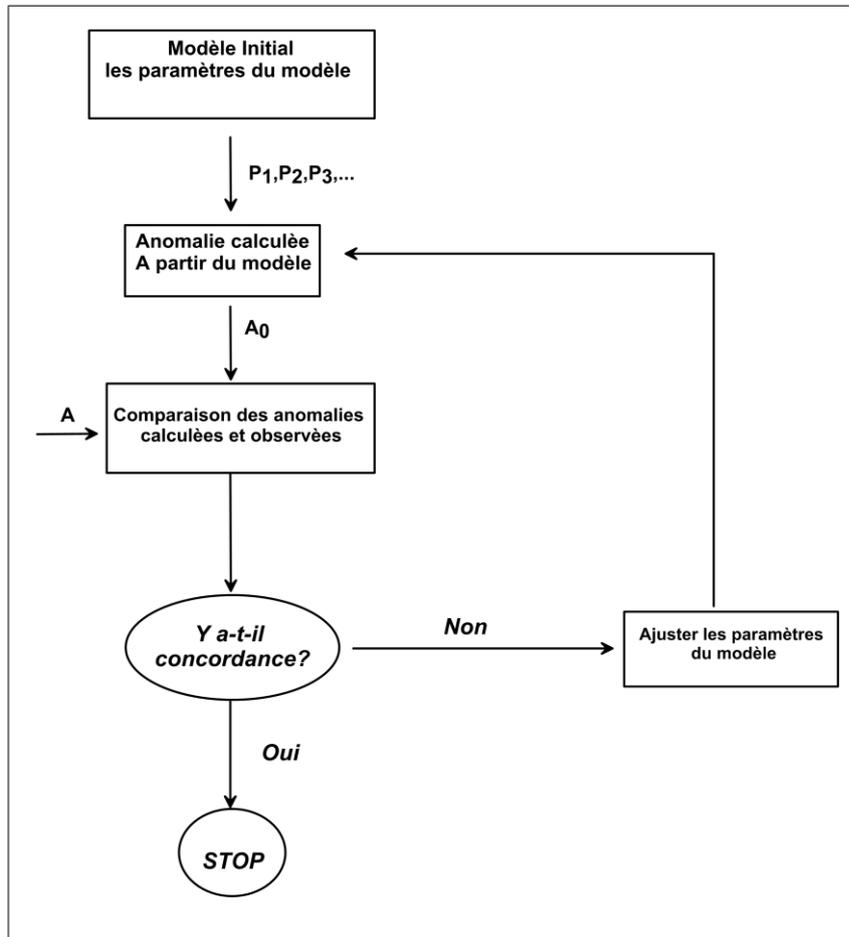


Figure III.24. Organigramme décrivant la procédure de la modélisation directe.
A : Anomalie observée ; A_0 : anomalie calculée Blakely (1995).

Le processus de la modélisation commence par un modèle initial dont les paramètres (densité, épaisseur, géométrie, profondeur) sont suggérés par les résultats de l'interprétation géologique.

Pour élaborer des modèles gravimétriques en 2D, trois profils gravimétriques des anomalies résiduelles (P_1, P_2, P_3) d'une dizaine de kilomètres et de direction NO-SE ont été choisis, dont l'objectif est d'imager 2D des trois profils gravimétriques des anomalies résiduelles (P_1, P_2, P_3), en utilisant GM-SYS. Ces profils sont orientés NO-SE perpendiculaire à la flexure sud atlasique et traverse deux domaines géologiques différents (Fig.III.25)

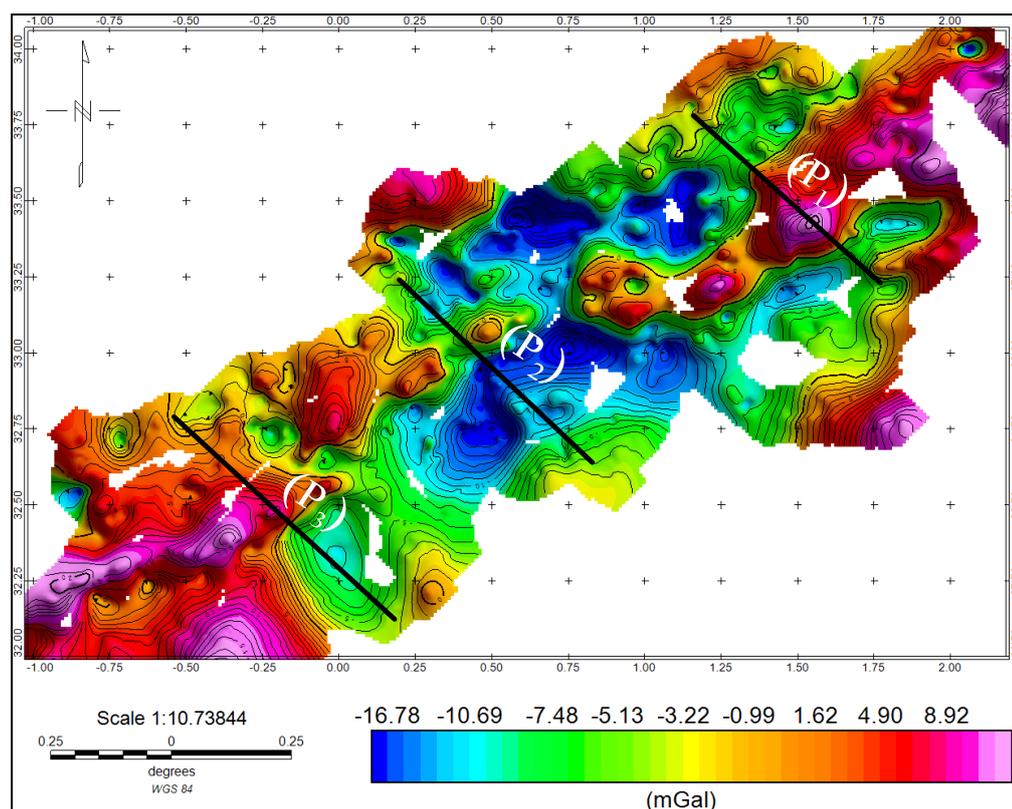


Figure III.25. Localisation des profils gravimétriques (P₁, P₂, P₃) sur la carte des anomalies résiduelles.

Les estimations de densité présentées sur le (tableau III.1) fournissent le lien entre les unités géologiques et les anomalies gravimétriques.

unités géologiques	Densité (g/cm ³)
Couverture sédimentaire	2.30
Croute supérieur	2.67
Croute inférieur	2.85
Manteau supérieur	3.00
Manteau inférieur	3.30

Tableau III.1. Moyennes de densité des unités géologiques.

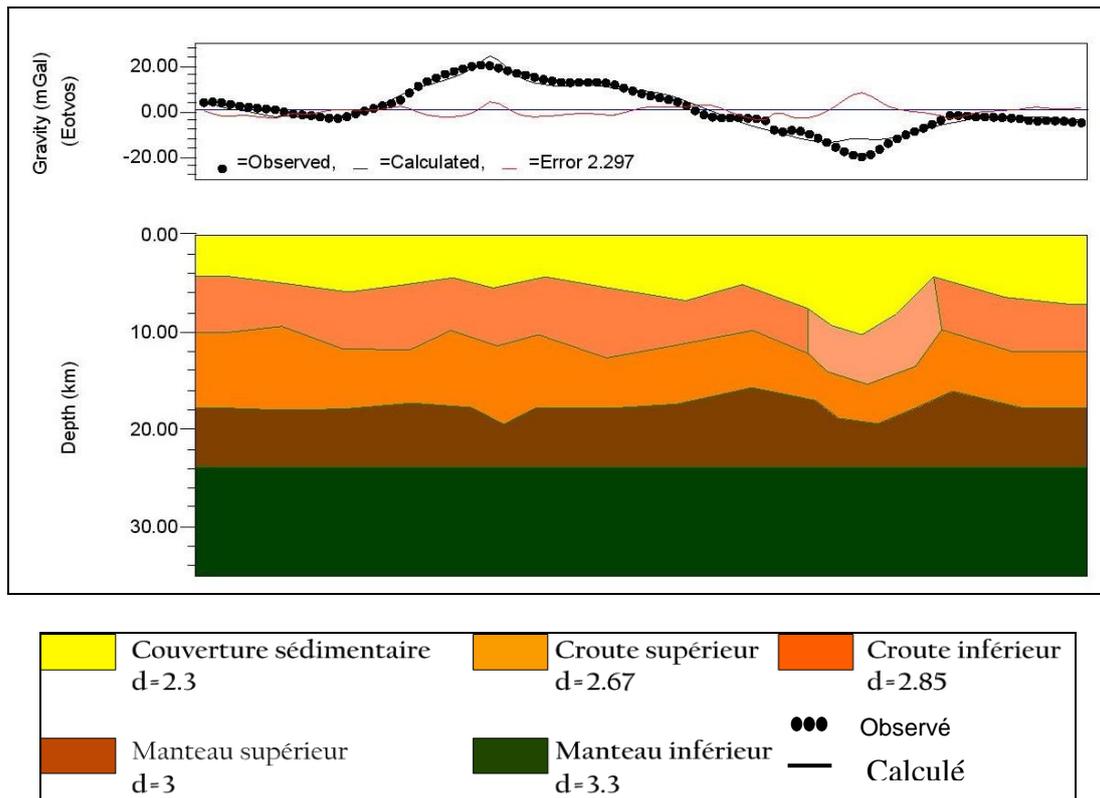


Figure III.26. Modèle gravimétrique 2 (P1) montre la distribution des densités en sous sol.

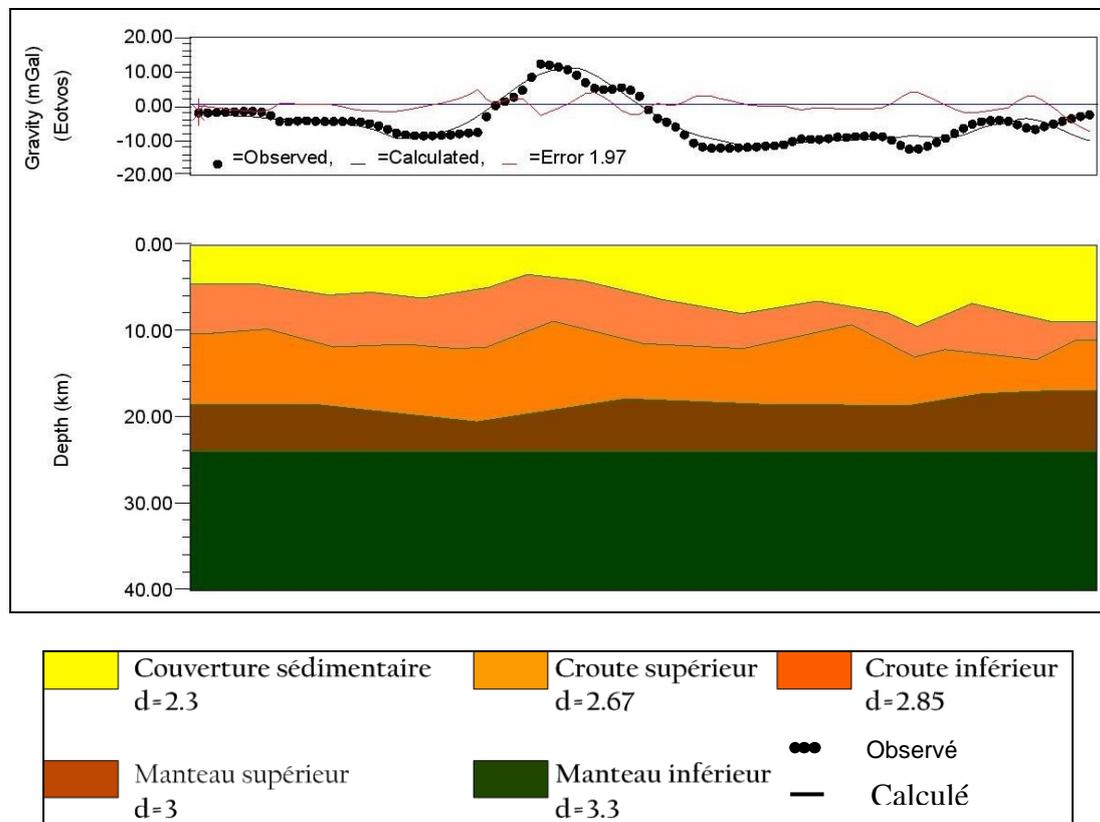


Figure III.27. Modèle gravimétrique 2D (P2) montre la distribution des densités en sous-sol.

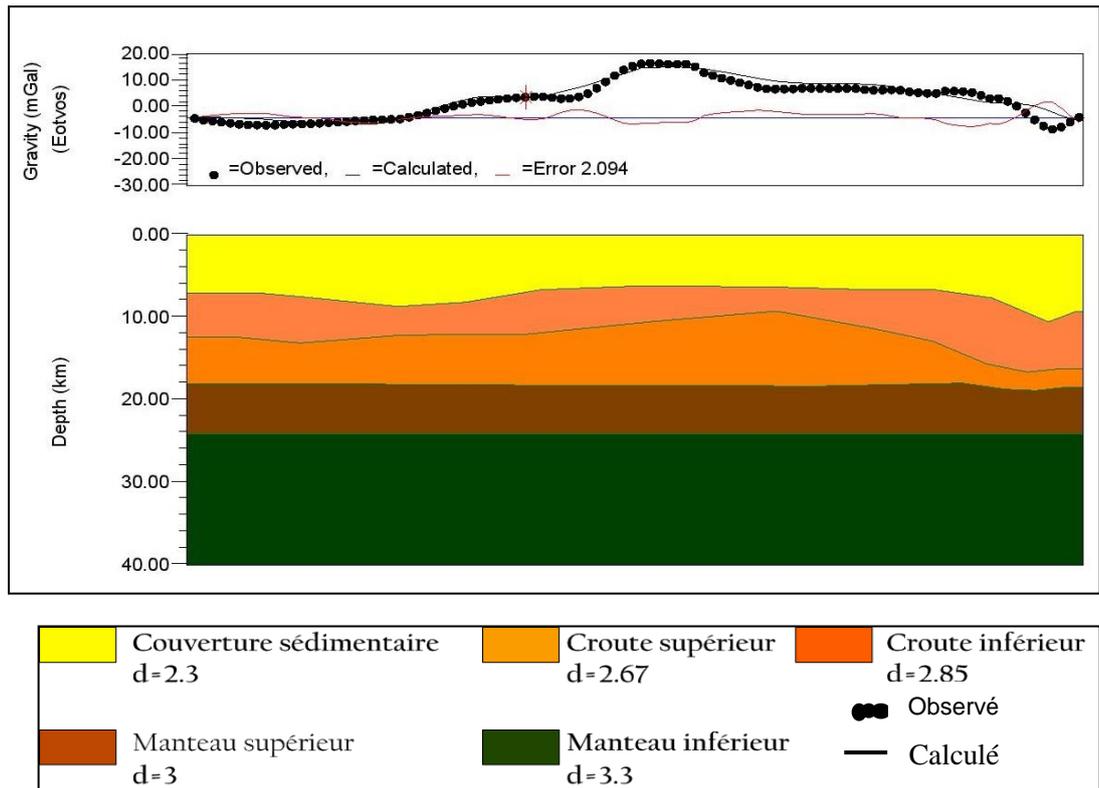


Figure III.28. Modèle gravimétrique 2D (P3) montre la distribution des densités en sous-sol

- Interprétation des modèles :

Afin de quantifier la géométrie et la structuration de sous-sol de notre région d'étude, on a procédé à une modélisation de la géométrie et des densités des niveaux géologiques de sous terrain. Il s'agit de calculer l'effet gravifique de trois profils dont la disposition est perpendiculaire à la flexure sud atlasique **FSA**.

La réponse calculée au niveau des profils P1, P2, P3 montre le comportement de la réponse gravimétrique avec la variation des épaisseurs des entités géologiques simulées. En passant du Sud-Est au Nord-Ouest on note une diminution progressive, remarquable, de l'amplitude de la réponse gravimétrique à partir de milieu de chaque profil. Ce comportement est en étroite relation avec la variation d'épaisseur des sédiments. Comme nous avons signalé auparavant que notre région se trouve entre deux domaines géologiques différents ; il s'agit de l'Atlas Saharien caractérisé une couverture sédimentaire épaisse ([Takhersist, 1990](#)) dans la partie Nord-Ouest et de la Plate-forme Saharienne qui occupe la partie Sud-Est caractérisé par une couverture sédimentaire moins épaisse ([Boudjemaa, 1987](#)).

Chapitre 3 TRAITEMENT DES DONNES ET DISCUSSION DES RESULTATS

On peut conclure que les résultats de modélisation, corrobore les hypothèses géologiques, tel que : l'analyse des trois modèle montre un *amincissement de la croûte* dans la partie N-O et un *épaississement de la croûte dans la partie S-E*.

Les modèles 2D mis évidence que la profondeur de la discontinuité du *Moho* oscille entre 18 et 22 km. Ceci, confirme les résultats obtenus auparavant par l'analyse spectrale et le prolongement vers le haut de l'anomalie de Bouguer.

Conclusion Générale

Conclusion Général :

L'étude structurale, que nous avons réalisée sur le sillon de Benoud met en évidence plusieurs structures géologiques. Le but était de fournir une image structurale de l'ensemble de la région et les accidents qui l'affectent en utilisant comme méthode géophysique la gravimétrie.

L'analyse de la distribution des densités sur la carte d'anomalie de Bouguer et les cartes compilées mettent en évidence des contrastes de densité au sein de sillon de Benoud, retraçant les effets de structures profondes.

L'interprétation quantitative des sources gravimétriques corréle parfaitement avec l'interprétation qualitative des cartes gravimétriques. Ainsi, la modélisation de la répartition des densités dans le sous-sol exprime des structures denses associées à des remontées de socle précambrien, ou à un *épaississement de la croûte*.

L'analyse des données gravimétriques montre que le FSA est en corrélation avec les linéaments des anomalies négatives avec une direction NE-SW (Fig.III.). Tel que Les profils 2D (**P1**, **P2**, **P3**) exprime le rôle important de cette discontinuité majeure (FSA) dans la structuration de la zone d'étude.

On peut dire en conclusion, que la surface de discontinuité du MOHO, issue par l'intermédiaire de la modélisation 2D des données gravimétriques, présente une légère ondulation. Cette ondulation, est due au deux réseaux de faille profonde orientée ENE-OSO correspondant au deux atlas majeurs (Bracen, 2002).

Bibliographie

Bibliographie

Aït Ouali, R. (1991). Le rifting des Monts des Ksour au Lias. Organisation du bassin, diagenèse des assises carbonatées, place dans les ouvertures mésozoïques au Maghreb. *Alger, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene*

Bracène, R., & De Lamotte, D. F. (2002). The origin of intraplate deformation in the Atlas system of western and central Algeria: from Jurassic rifting to Cenozoic–Quaternary inversion. *Tectonophysics*, 357(1-4), 207-226.

Bassoullet, J. P. (1973). *Contribution à l'étude stratigraphique du Mésozoïque de l'Atlas saharien occidental, Algérie* (Doctoral dissertation).

Blakely, R. J. (1996). *Potential theory in gravity and magnetic applications*. Cambridge university press.

Dobrin, M. B., & Savit, C. H. (1988). *Introduction to Geophysical Prospecting* McGraw-Hill Book Co. *New York* (867 pp.).

Dubois, j. And m. Diament (2011). *Geophysique-2e ed.: geophysique, cours et exercices corrigés.*, dunod.

Douhasni, M. (1976). *Etude géologique de la région d'Ain Ouarka-Bousemghoun (partie centrale des Monts des Ksour). Stratigraphie et analyse structurale [Geological study of the region of Ain Ouarka-Bousemghoun (central part of Ksour Mountains). Stratigraphy and structural analysis]* (Doctoral dissertation, Thèse 3^{ème} cycle. Oran. University of Oran).

Dentith, m. And s. T. Mudge (2014). *Geophysics for the mineral exploration geoscientist*, cambridge university press

Frizon de Lamotte, D., Raulin, C., Mouchot, N., Wrobel-Daveau, J. C., Blanpied, C., & Ringenbach, J. C. (2011). The southernmost margin of the Tethys realm during the Mesozoic and Cenozoic: Initial geometry and timing of the inversion processes. *Tectonics*, 30(3).

Guemache, M. A., Addoum, B., Machane, D., Gharbi, S., Ymmel, H., Djadia, L., & Djellit, H. (2011). Apport de la morphotectonique et des profils sismique réflexion 2D dans l'analyse du front Sud de l'Atlas saharien occidental: exemple du pli d'El Kohol (région de Laghouat, Algérie). *Mémoires du Service Géologique de l'Algérie*, 17, 107-123.

Herkat, M. (1982). *Lithostratigraphie et sédimentologie des formations carbonatées du jurassique supérieur des monts des Oulad Nail et de la terminaison orientale du Djebel Amour (Atlas saharien)* (Doctoral dissertation).

- Hackney, R. I., & Featherstone, W. E. (2003).** Geodetic versus geophysical perspectives of the 'gravity anomaly'. *Geophysical Journal International*, 154(1), 35-43.
- Jacobsen, b. H. (1987).** A case for upward continuation as a standard separation filter for potential-field maps." *geophysics* 52(8): 1138-1148.
- KAZI TANI, N. (1986).** *Evolution géodynamique de la bordure nord-africaine: le domaine intraplaque nord-algérien, approche mégaséquentielle* (Doctoral dissertation).
- Knödel, K., Lange, G., & Voigt, H. J. (2007).** *Environmental geology: handbook of field methods and case studies*. Springer Science & Business Media.
- Kuhn, M., Featherstone, W. E., & Kirby, J. F. (2009).** Complete spherical Bouguer gravity anomalies over Australia. *Australian journal of Earth sciences*, 56(2), 213-223.
- LaFehr, T. R. (1991).** Standardization in gravity reduction. *Geophysics*, 56(8), 1170-1178.
- Lowrie, W. (2007).** *Fundamentals of geophysics*. Cambridge university press.
- Schoeffler, j. (1975).** Gravimétrie appliquée aux recherches structurales et à la prospection Pétrolière et minière, éditions technip
- Takherist, D., 1990.** Structure crustale, subsidence mésozoïque et flux de chaleur dans les bassins nord-sahariens (Algerie): apport de la gravimétrie et des données de puits. PhD thesis. Université de Montpellier, p. 207.
- Talwani, m. (1964).** Computation of magnetic anomalies caused by two dimensional structures of arbitrary shape." *computers in the mineral industries* 1: 464-480.
- Talwani, m., j. L. Worzel, et al. (1959).** "rapid gravity computations for two-dimensional bodies with application to the mendocino submarine fracture zone." *journal of geophysical research* 64(1): 49-59.
- Telford, w. M., w. Telford, et al. (1990).** *Applied geophysics*, cambridge university press.