République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Larbi Tébessi - Tébessa

Faculté des Sciences Exactes et des Sciences de la Nature et de la Vie

Département des Sciences de la Terre et de l'Univers

MEMOIRE DE MASTER

Domaine: Sciences de la Terre et de l'Univers

Filière: Géologie

Option: Géologie des bassins sédimentaires

Thème :

Reconnaissance géologique et géophysique de l'anticlinal du Djebel Ed Dalaa, El Ma el Abiod : Implication sur potentiel minéral.

Présentée par:

HADDAD Sonia

Devant le jury:

Encadreur	**BOUBAYA Djamel**	**Pr**	**Université de Tébessa**
Président	**FEHDI Chemseddine**	**Pr**	**Université de Tébessa**
Examinateur	**GUEFAIFIA Omar**	**MCA**	**Université de Tébessa**
Co-encadrant	**HADJAM Riad**	**MAA**	**Université de Tébessa**

Date de soutenance: 09/06/2025

Note:……..Mention:…….

ملخص

يقع جبل الضلعة شرق الماء الابيض، وهو جزء من طية جبل بوجلال المحدبة، ويمتد إلى تونس عبر طية بوشبكة المحدبة. وقد أتاحت لنا دراسة جيولوجية وجيوفيزيائية أُجريت على طية جبل الضلعة المحدبة مراجعة جيولوجيتها من خلال رسم خريطة جيولوجية تخطيطية ومقطع جيولوجي تركيبي تفسيري. واستنادًا إلى دراسات سابقة، بُذلت محاولة لإعادة بناء التطور الهالوسيني، ثم الهالوتكتوني، في العصر الترياسي لجبل الضلعة. وقد أتاحت الأساليب الجيوفيزيائية المستخدمة، بما في ذلك المسح الكهربائي المشترك مع الاستقطاب المستحث (SEV-PP) بمسافة قصوى بين خطوط AB تبلغ 2000 متر، بالإضافة إلى التحليل الكهربائي المشترك (PEC)، رسم خرائط للأنواع الصخرية وتقييم إمكاناتها المعدنية، وخاصةً فيما يتعلق بتمعدن البريت.
الكلمات المفتاحية: جبل الدلعة، الترياسي ، التمعدن، الباريت.

ABSTRACT

Le Djebel Ed Dalaa, located east of El Ma Labiod, is part of the Boudjellal anticline and extends into Tunisia through the Bouchebka anticline. A geological and geophysical study conducted on the Djebel Ed Dalaa anticline allowed us to review its geology by establishing a schematic geological map and an interpretative synthetic geological cross-section. Based on previous studies, an attempt was made to reconstruct the halocenitic and then halotectonic evolution of the Triassic period of Djebel Ed Dalaa.

The geophysical methods used, including combined electrical sounding with induced polarization (SEV-PP) with a maximum AB line spacing of 2000 m, as well as combined electrical profiling (PEC), made it possible to map the lithological varieties and assess its mineral potential, particularly with regard to Barytine mineralization.

Keywords: Djebel Ed Dalaa, Trias, mineralization, Barytine.

RESUME

Le Djebel Ed Dalaa, situé à l'est d'El Ma Labiod fait partie de l'anticlinal de Boudjellal et se prolonge en Tunisie par celui de Bouchebka. Une étude géologique et géophysique réalisée sur l'anticlinal du Djebel Ed Dalaa, nous a permis de réviser sa géologie en établissant une carte géologique schématique et une coupe géologique synthétique interprétative. En se basant sur les études antérieures, un essai de reconstitution de l'évolution halocénitique puis halotectonique du Trias de Djebel Ed Dalaa a été proposé. Les méthodes géophysiques employées, incluant le sondage électrique combiné à la polarisation provoquée (SEV-PP) avec un écartement maximal des lignes AB de 2000 m ainsi que le profilement électrique combiné (PEC). Ces études géophysiques ont permis de cartographier les variétés lithologiques et évaluer son potentiel minéral, notamment en ce qui concerne la minéralisation en Barytine.

Mots clés : Djebel Ed Dalaa, Trias, Minéralisation, Barytine

REMERCIMENT:

بِسْمِ ٱللَّهِ ٱلرَّحْمَٰنِ ٱلرَّحِيمِ

" الحمد لله الذي بنعمته تتم الصالحات، وبفضله تتيسر الأمور.

أحمده سبحانه وتعالى على ما أنعم به عليّ من توفيقٍ وعون، وأسأله دوام الفضل والتيسير".

Après avoir rendu grâce à Dieu tout puissant et miséricordieux qui m'a donné le courage et la patience, je tiens à remercier vivement tous ceux qui, de près ou de loin, ont participé à la rédaction de ce travail.

Tout d'abord, ce travail n'aurait pas pu être aussi riche ni voir le jour sans l'aide et l'encadrement de Mr. Pr. Boubaya, malgré sa charge académique et professionnelle. Sa compétence et son encadrement ont toujours suscité mon profond respect.

J'offre mes sincères et chaleureux remerciements à Mr. D. BOUBAYA pour la qualité exceptionnelle de son encadrement, pour sa patience, sa rigueur, son appui et sa disponibilité.

J'exprime mes sincères remerciements aux membres du jury, le président Pr. FEHDI Chemseddine et l'examinateur Dr. Omar Guefaifia, qui ont accepté d'évaluer ce travail.

J'adresse aussi mes remerciements à tous mes professeurs qualifiés du Département des Sciences de la Terre et de l'Univers, qui m'ont enseigné l'amour de la science et de la rigueur, et m'ont insufflé l'espoir.

DÉDICACE:

àmoi-même,

À cette fille qui est tombée, mais qui s'est relevée Qui A Tenu bon malgré les doutes, les pressions, et les nuits blanches.

Je me dédie ce travail comme un hommage à ma force, à ma résilience et à la foi que j'ai gardée en moi-même.

Je l'ai mérité.

À ma chère famille

Vous avez été la lumière sur mon chemin, le refuge dans les moments de doute, et la force dans les instants de fatigue. Merci pour votre amour inconditionnel et votre soutien constant.

À mes parents bien-aimés

Tout ce que je suis aujourd'hui, c'est grâce à Dieu puis à vos prières, vos sacrifices, votre patience et votre amour. Vous êtes la source de tout bien dans ma vie. Que Dieu vous protège et vous récompense pour tout.

À Mes frères et soeurs

Merci d'avoir toujours été là, avec vos sourires, votre écoute et votre soutien sincère.

À mes amis fidéles

Ceux qui ont partagé avec moi les longues soirées de travail, les instants de doute, mais aussi les joies des réussites. Votre présence a rendu ce parcours plus beau et plus léger.



TABLE DES MATIERES

ملخص 2
ABSTRACT 3
RESUME 4
DEDICACES 5
DEDICACES 6
REMERCIEMENTS 7

CHAPITRE I : GENERALITES

I. INTRODUCTION 13
II. SITUATION GEOGRAPHIQUE 14
III. CARACTERISTIQUES GENERALES DE LA REGION D'EL MA EL ABIOD 15
A. Végétation 15
B. Agriculture et élevage 16
C. Industrie 16
D. Patrimoine 16
E. Climat 16
F. Températures et Précipitations 16
G. Le modèle numérique de terrain (MNT) 17
IV. CADRE GEOGRAPHIQUE DU DJEBEL ED DALAA 19

CHAPITRE II : GÉOLOGIE RÉGIONALE

I. INTRODUCTION 21
II. LITHOSTRATIGRAPHIE 21
A. Le Trias 21
B. Le Crétacé 21
1. Crétacé inférieur 22
2. Le Crétacé supérieur 23
C. Le Sénonien 23
D. Le Miocène 23
E. Le Quaternaire 24

CHAPITRE III: GÉOLOGIE LOCALE

I. ORGANISATION STRATIGRAPHIQUE DU BASSIN D'EL MA EL ABIOD 27
A. Crétacé 27
1. Aptien moyen et inférieur 27

2. Aptien supérieur 27
3. Albien inférieur.....28
4. Albien supérieur 28
5. Cénomanien.....28
6. Turonien.....28
7. Campanien inférieur – Emscherien 29
8. Campanien supérieur – Maastrichtien 29
II. ESSAI DE RECONSTITUTION EN SEPT ETAPES DE L'EVOLUTION HALOCINETIQUE PUIS HALOTECTONIQUE DES TRIAS 32
B. Tertiaire.....33
1. Miocène 33
C. Quaternaire.....34
III. TECTONIQUE DE LA REGION 34
A. Style tectonique.....34
B. Phases tectoniques 34
C. Mouvements récents 35
IV. ÉVOLUTION PALEOGEOGRAPHIQUE ET STRUCTURALE DE DJEBEL ED DALAA ...35
A. Phase distensive (Crétacé) 35
B. Phase compressive éocène (phase atlasique NE-SO) 35
C. Période d'érosion durant l'Oligocène 36
D. Ingression marine durant le Miocène inférieur (Burdigalien-Langhien).....36
E. Activité halocinétique des formations triasiques 36
F. Tectonique récente 36
V. CARACTERISTIQUES GENERALES DE LA REGION DJEBEL ED DALAA 36
A. Structure géologique 36
B. Lithologie.....37
C. Minéralisations et potentiel minéral.....37
D. Minéralisation polymétallique au niveau de Djebel Ed Dalaa (Pétrographie) 37
E. Tectonique : 38
VI. CONCLUSION.....38
CHAPITRE IV : THEORIE DES METHODES GEOPHYSIQUES UTILISEES
I. INTRODUCTION.....40

II. LA PROSPECTION ELECTRIQUE: 40
A. Principe 40
B. dispositifs de prospection électrique 41
C. Résistance et Résistivité 43
D. Résistivité des roches 43
E. Sondage électrique vertical (SEV) 45
F. Le profilement électrique combiné 46
III. La polarisation provoquée 47

CHAPITRE V : METHODOLOGIE D'ACQUISITIONS DES DONNEES GEOPHYSIQUES
I. INTRODUCTION 51
II. METHODOLOGIE D'ACQUISITION DES DONNEES ELECTRIQUES 51
III. APPAREILLAGE UTILISE 51
A. Traitement des sondages électriques 51

CHAPITRE VI: RESULTATS ET INTERPRETATIONS DES DONNEES GEOPHYSIQUES
I. INTRODUCTION 56
II. ETUDE GEOPHYSIQUE 56
A. Résultats de l'échantillonnage 56
B. Résultats des travaux de sondage 57
C. Carte de résistivité apparente le long du profil 6 58
D. Interprétation des Sondages Électriques Verticaux (SEV) pour un milieu tabulaire horizontal .60
E. Interprétation de la coupe de résistivité du modèle lissé. 62
F. Résultats du profilement électrique combiné (PEC) 63
G. Interprétation des SEV-PP 64

CONCLUSION GENERALE…….68

BIBLIOGRAPHIE……..……69

LISTE DES FIGURES :

Figure 1: localisation géographique de la zone d'étude.....15
Figure 2: carte de situation sur modèle numérique de terrain (SRTM data) (a) vue d'ensemble (b) vue détaillée. Coordonnées WGS84 UTM zone 32N.....19
Figure 3: Colonne stratigraphique synthétique des monts du Mellègue (d'après : Dubourdieu 1956, 1959 ; David 1956; Madre 1969 ; Fleury 1969 ; Thibieroz et Madre 1976 ; Chikhi, 1980 ; Otmanine 1987, Bouzenoune 1993 et Vila et al, 2000) (Sami, 2004) modifiée par (Abid, C ,2021). 25
Figure 4: Carte géologique du Djebel Ed Dalaa (El Ma El Abiod (d'après (Vila, 2001, redessiné par Haddad, S, 2025).....30
Figure 5: Coupe géologique à travers l'anticlinal da Dj. Ed Dalaa d'après Vila, 2001, redessiné par Haddad, S ,2025).....31
Figure 6: Essai de reconstitution en sept étapes de l'évolution halocinétique (a à e) puis halotectonique (f et g) de la structure salifère du Djebel Ed Dalaa (Algérie, confins algéro-tunisiens, d'après Vila, 2001, redessiné par Haddad, S, 2025).....32
Figure 7: (A) Flanc sud (B) Flanc nord de l'anticlinal de Djebel Ed Dalaa. 37
Figure 8: Représente les dispositifs Wenner, Schluberger et dipole-dipole. 42
Figure 9: Résistivités de quelques roches (d'après Florsch and Muhlach, 2018).....44
Figure 10: Principe du SEV, Boubaya 2020. 46
Figure 11: Principe du profilement électrique combiné.....47
Figure 12: Forme du courant : mode TX-RX Multi-électrodes domaine de temps.....48
Figure 13: Phénomène de décharge. 48
Figure 14: Comparaison des courbes de décharge pour la PP et pour un circuit RC. 49
Figure 15: Exemple d'assemblage d'une courbe de sondage électrique. Sur cet exemple, la courbe SEV a été translatée par rapport au dernier segment MN. 54
Figure 16: Coupe lithostratigraphique passant par le sondage mécanique S.ML3. 57
Figure 17: Carte de résistivité apparente le long du profil 6.....59
Figure 18: Exemple d'interprétation du SEV-PP 8 à l'aide du modèle classique et lissé. 62
Figure 19: Interprétation de la coupe de résistivité du modèle lissé.....63
Figure 20: Résultats du profilement électrique combiné (PEC). 64
Figure 21: Graphe d'interprétation de sondage électrique avec la polarisation provoquée (SEV-PP)...67

LISTE DES TABLEAUX :

Tableau 1: Protocole de mesure du dispositif quadripôle symétrique Schlumberger. 53
Tableau 2: profondeur et nature des formations traversées par le sondage SML3. 58
Tableau 3: comparaison entre le Modèle classique et le Modèle lissé. 61

CHAPITRE I

GENERALITES

CHAPITRE I : GENERALITES

I. INTRODUCTION

La reconnaissance géologique et géophysique représente une étape fondamentale dans l'exploration et la valorisation des ressources naturelles d'un territoire. En particulier, les structures tectoniques majeures, telles que les anticlinaux, jouent un rôle déterminant dans la localisation des accumulations de minéralisations économiques, en raison de leur capacité à former des pièges structuraux favorables à la concentration des ressources minérales ou énergétiques.

Ce mémoire s'inscrit dans cette problématique et se consacre à l'étude intégrée (géologique et géophysique) de l'anticlinal du Djebel Ed Dalaa, situé à l'est de la ville d'El Ma El Abiod dans la wilaya de Tébessa.

Bien que cette zone ait fait l'objet de plusieurs investigations scientifiques antérieures, notamment les travaux de Benkhedda et al, (2021) en paléontologie, Defaflia. N et Hamimed .M et al (2015), Degaichia, A. (2014) en stratigraphie, Rouabhia et al, (2011) en géophysique et en hydrochimie, Vila (2001), ainsi que Guefaifia O. (1996).

La structure anticlinale du Djebel Ed Dalaa et son potentiel minéral, particulièrement en barytine, demeurent insuffisamment documentés.

L'objectif principal de cette étude est donc de caractériser précisément cette structure géologique et d'évaluer son implication dans la genèse et la localisation des minéralisations. Pour ce faire, une méthodologie pluridisciplinaire a été mise en œuvre, associant :

- Une cartographie géologique détaillée, incluant l'établissement d'une carte géologique schématique et d'une coupe structurale à travers l'anticlinal ;
- L'application de méthodes géophysiques, notamment la prospections électrique (résistivité) associée à la polarisation provoquée (PP), afin d'étudier la minéralisation en profondeur.
- Détermination des paramètres de la structure contrôlant la minéralisation par la méthode de profilement électrique combiné (PEC)
-Vérification de la présence de la minéralisation sulfurée en profondeur.

Cette approche intégrée vise non seulement à approfondir la connaissance géologique de la région, mais aussi à identifier les zones à fort potentiel minier, susceptibles d'intéresser les activités de prospection futures.

Ce mémoire est structuré en 6 chapitres :

Le premier chapitre est consacré au cadre géographique de la région EL MA EL Abiod de Djebel Ed Dalaa.

Le deuxième chapitre aborde la géologie régionale des Monts de Mellègue, il présente la stratigraphie et la description structurale.

Le troisième chapitre traite la géologie locale de la région d'étude, dans lequel sont exposés la stratigraphie, la sédimentologie, la tectonique, la paléogéographie et la minéralisation.

Dans le quatrième chapitre sont donnés les principes théoriques des méthodes géophysiques utilisées. Il s'agit des méthodes électriques à courant continu: la prospection électrique en mode sondage électrique vertical (SEV) et profilement électrique combinée (PEC). Cette méthode a été utilisée à l'échelle de détail, en plus de la polarisation provoque (PP).

Le cinquième chapitre expose la méthodologie d'acquisition des données géophysiques de prospection électrique et polarisation provoquée (PP).

Le sixième chapitre est consacré à la présentation et l'interprétation des résultats des études géologiques et géophysiques.

II. SITUATION GEOGRAPHIQUE

Notre secteur d'étude est situé au fait partie de la circonscription de Tébessa, se situe au nord-est de l'Algérie, à 28,7 km de la ville de Tébessa, chef-lieu de la wilaya. Elle fait partie des Daïras de la wilaya et ses frontières administratives sont bien définies : au nord, on trouve la ville de Tébessa ; au sud, la Daïra d'Oum Ali ; à l'est, la frontière avec la Tunisie ; et à l'ouest, la Daïra de Chéria.

Le bassin d'El Malabiod, appartient aux hautes plaines orientales de l'Atlas saharien, et constitue une partie importante du grand bassin du Chott Melhrir. Ses limites naturelles sont également bien établies : au nord, une crête qui regroupe les Djebels Doukkane, El Khenga, et Bouroumane ; au sud, les monts de Boudjellal, El Guellia et Ed Dalaa ; à l'ouest, Guebel Er'Rouiss et Draâ Douamiss ; et à l'est, Djebel El Kechrid et Koudiet Sidi Salah, marquant la frontière avec la Tunisie.

La plaine d'El Ma El Abiod, au cœur de cette région, se présente comme une dépression entourée de deux ensembles montagneux orientés Est-Ouest et Nord-est/Sud-ouest. Cette plaine est constituée principalement de dépôts mio-plioquaternaires et forme une vaste zone géographique, traversée par plusieurs cours d'eau. Sa limite nord est formée par les massifs calcaires des Djebels Doukkane, Anoual et Bouroumane, tandis que sa limite est se rapproche de la frontière tunisienne, autour de Koudiat Sidi Salah. À l'ouest, la plaine est délimitée par Guebel Er'Rouiss et Draâ Douamiss, et au sud, par les monts de Boudjellal, El Guelia et Ed Dalaa, ainsi que le synclinal de Bir Sbeikia datant du Mio-Quaternaire.

Les infrastructures de transport de la région se basent sur deux routes principales : la RN16, reliant Tébessa à El Ma El Abiod et Bir El Ater, et la RN10, reliant Tébessa à Bouchebka, en direction de la

Tunisie. La région dispose également d'une voie ferroviaire à voie unique pour faciliter les déplacements.

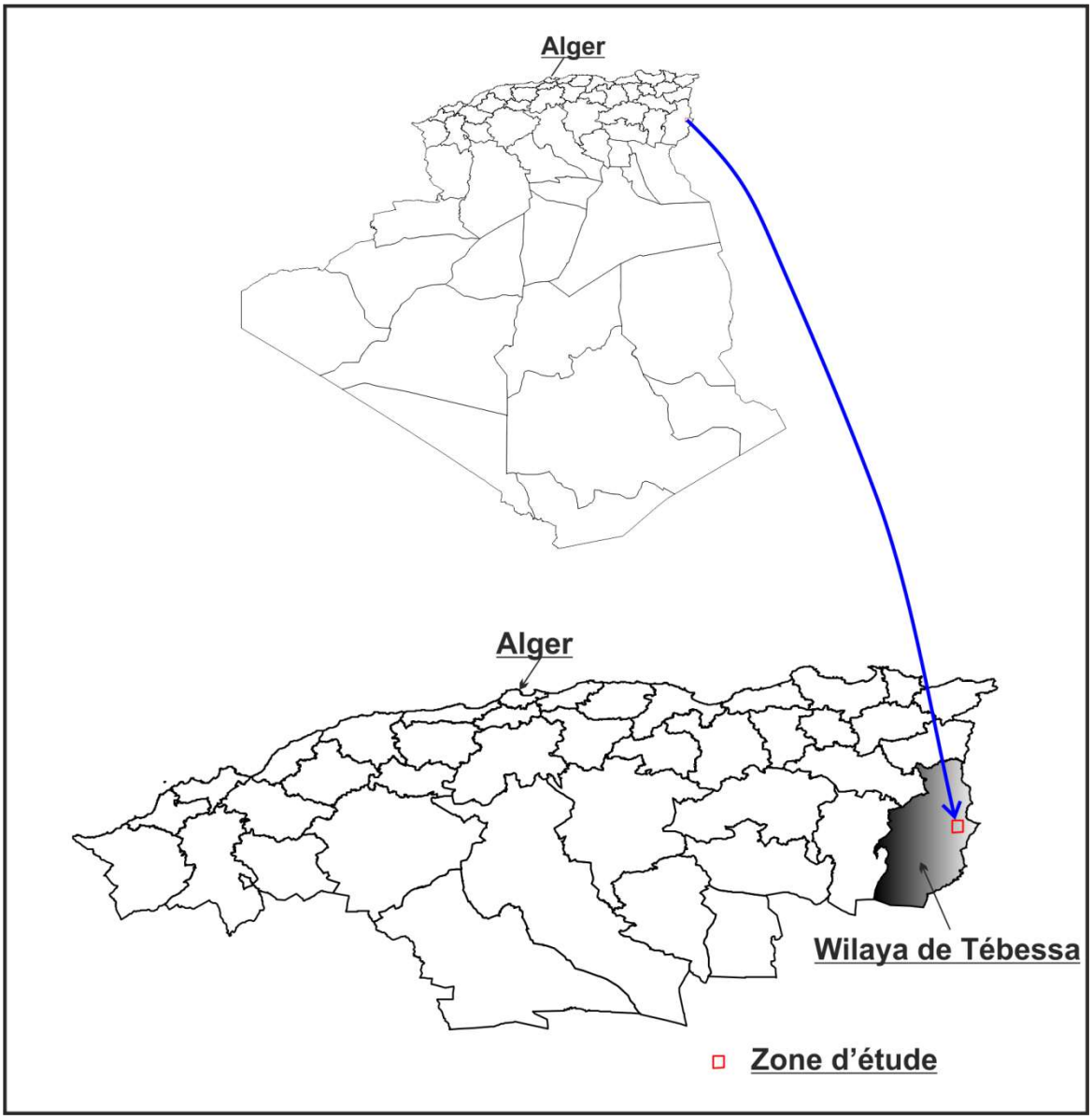


Figure 1: localisation géographique de la zone d'étude.

III. CARACTERISTIQUES GENERALES DE LA REGION D'EL MA EL ABIOD

A. Végétation

La couverture végétale suit le relief. Au nord, on trouve surtout du pin d'Alep, notamment sur les pentes du bassin d'El Ma El Abiod. Plus on va vers le sud, plus la végétation devient rare, jusqu'à presque disparaître vers le Djebel Boudjelal. À part quelques zones avec genévriers (Djebel Abiod, Djebel Arour), c'est surtout une steppe à alfa, avec de nombreux sols à nu.

B. Agriculture et élevage

L’agriculture est dispersée et dépend des conditions locales (climat sec, traditions, type de sol).

Les céréales occupent un peu plus de 5 % du territoire.

Le maraîchage : un peu plus de 6 %.

Les fourrages : plus d’un tiers de la surface agricole.

C’est une zone à forte vocation pastorale, utilisée pour la transhumance des troupeaux, notamment les ovins. L’histoire romaine de la région confirme son ancienne richesse agricole, notamment avec la culture de l’olivier.

C. Industrie

L’industrialisation est récente, surtout depuis les années 1990. Trois grandes usines ont été implantées :

- Une cimenterie (ERCE),
- Une verrerie (SOVEST/ENAVA),
- Une usine de tubes roulés (ANABIB).

À cela s’ajoutent des carrières au sud et des sablières au nord.

D. Patrimoine

Le territoire garde les traces de civilisations anciennes. Des sites néolithiques, dits escargotières, indiquent la présence passée de lacs. On trouve aussi des vestiges romains, surtout d’anciennes huileries, rappelant que la région était jadis appelée « la Région du blé ».

E. Climat

La région d'El Ma El Abiod, située dans la wilaya de Tébessa, présente un climat subtropical humide de type Cfa selon la classification de Köppen-Geiger. Ce climat se caractérise par des hivers relativement frais et des étés chauds, sans véritable saison sèche. La température moyenne annuelle est de l'ordre de 16,3°C, tandis que la pluviométrie annuelle atteint environ 371 mm, répartie de manière irrégulière sur l'année.

F. Températures et Précipitations

Les températures moyennes varient entre 5,7°C en janvier, mois le plus froid, et 27°C en juillet, mois le plus chaud. Les extrêmes enregistrés montrent une amplitude thermique importante, avec des minima pouvant atteindre -10°C et des maxima proches de 45°C. Les précipitations sont concentrées principalement au printemps, notamment en mai, tandis que les mois d'été, notamment juillet, connaissent une sécheresse marquée avec des précipitations très faibles.

G. Le modèle numérique de terrain (MNT)

La carte du modèle numérique de terrain (données SRTM, résolution 1 seconde soit 30m) est montrée à la figure 2, le haut de la figure montre les altitudes de la zone d'étude qui varient entre 980m et 1308m. Les altitudes maximales sont enregistrées sur Dj. Dalaa nord (1308m), Dj. El Guella (1292m) Les valeurs minimales de l'altitude sont enregistrées sur la plaine d'EL MA EL Abiod.

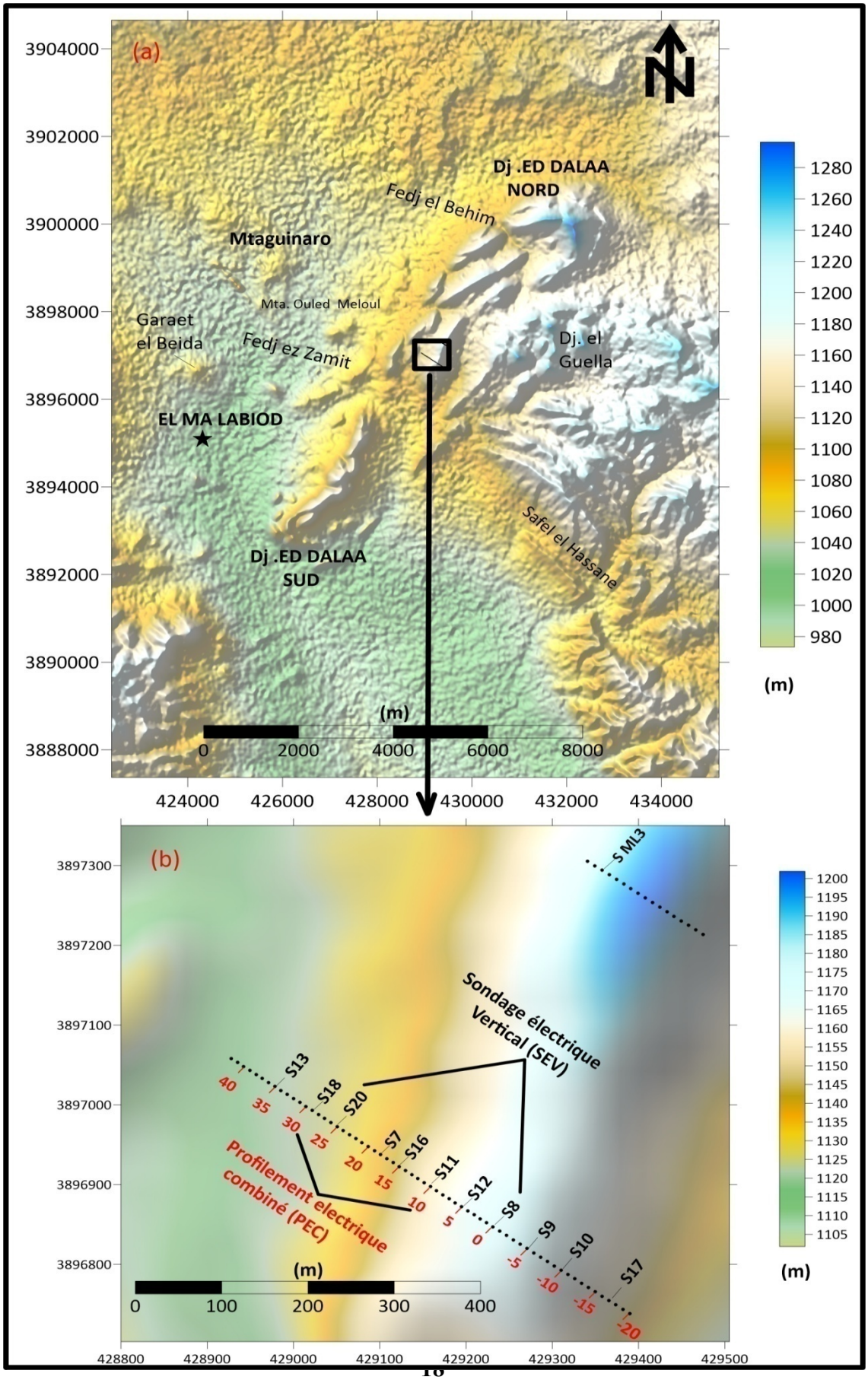

(a)
Dj .ED DALAA NORD
Fedj el Behim
Mtaguinaro
Mta. Ouled Meloul
Garaet el Beida
Fedj ez Zamit
Dj. el Guella
EL MA LABIOD
Safel el Hassane
Dj .ED DALAA SUD
(m)
0
2000
4000
6000
8000
3904000
3902000
3900000
3898000
3896000
3894000
3892000
3890000
3888000
424000
426000
428000
430000
432000
434000
1280
1260
1240
1220
1200
1180
1160
1140
1120
1100
1080
1060
1040
1020
1000
980
(m)
(b)
S ML3
Sondage électrique Vertical (SEV)
Profilement electrique combiné (PEC)
S13
S18
S20
S7
S16
S11
S12
S8
S9
S10
S17
40
35
30
25
20
15
10
5
0
-5
-10
-15
-20
(m)
0
100
200
300
400
3897300
3897200
3897100
3897000
3896900
3896800
428800
428900
429000
429100
429200
429300
429400
429500
1200
1195
1190
1185
1180
1175
1170
1165
1160
1155
1150
1145
1140
1135
1130
1125
1120
1115
1110
1105
(m)

Figure 2: carte de situation sur modèle numérique de terrain (SRTM data) (a) vue d'ensemble (b) vue détaillée. Coordonnées WGS84 UTM zone 32N.

IV. CADRE GEOGRAPHIQUE DU DJEBEL ED DALAA

Le Djebel Ed Dalaa est un massif montagneux situé dans la commune d'El Ma El Abiod, au sud de la wilaya de Tébessa, près de la frontière tunisienne. Il fait partie des Monts des Aurès et culmine à environ 1300–1400 m. Ce djebel présente un relief accidenté, dominé par une structure anticlinale bien marquée.

Les coordonnées géographiques du Djebel Ed Dalaa sont approximativement :

Latitude : 34°30' N

Longitude : 8°00' E

La région a un climat semi-aride, avec une végétation steppique (alfa, buissons, quelques chênes verts). Elle est traversée par des oueds intermittents, qui contribuent à l'érosion des versants. L'accessibilité est limitée à des pistes depuis Bir El Ater ou El Ma El Abiod.

Peu peuplée, la zone est surtout utilisée pour l'élevage, l'agriculture et présente un fort potentiel minéral, ce qui attire des études géologiques.

CHAPITRE II

GÉOLOGIE RÉGIONALE

CHAPITRE II : GÉOLOGIE RÉGIONALE

I. INTRODUCTION

Les Monts de Mellègue constituent une composante essentielle de l'Atlas saharien, qui se prolonge en Tunisie sous le nom d'Atlas tunisien. Ils sont situés à mi-chemin entre Souk-Ahras, au nord, et Tébessa, au sud (G. Dubourdieu, 1948).

La région des confins algériens est caractérisée par la présence de formations du Trias diapirique, du Crétacé (du Barrémien au Sénonien) et du Miocène. Le relief accidenté de cette région est principalement attribué à la morphologie massive des calcaires aptiens ainsi qu'à l'aspect chaotique et désorganisé des terrains triasiques (G. Dubourdieu, 1948).

Dans l'Atlas saharien oriental, la majorité des structures extrusives présentent un allongement NE-SW sur plusieurs kilomètres. Ces structures se manifestent sous forme de dômes percés, révélant un cœur triasique (M. Aoudjehane et al, 1992). C'est dans cette zone atlasique que les corps triasiques ont fait l'objet des études les plus approfondies, notamment dans la région où leur occurrence est la plus dense, entre Tunis (Tunisie) et Tébessa (Algérie), désignée comme « zone des diapirs » (Perthuisot et al, 1998).

II. LITHOSTRATIGRAPHIE

A. Le Trias

Le Trias, uniquement visible sous forme de diapirs, est constitué de marnes multicolores gypsifères renfermant divers matériaux rocheux. Très salées et teintées de vert, rouge ou violet, ces marnes représentent un faciès lagunaire typique bien connu en Algérie (G. Dubourdieu, 1948). Dans l'Atlas saharien, l'épaisseur des dépôts triasiques peut dépasser 1000 mètres (Alièv et al, 1971 ; Busson et Cornet, 1989).

La partie supérieure du Trias est caractérisée par un faciès argilo-gypseux dolomitique, souvent accompagné de diabases et de microdiabases, tandis que la partie inférieure est essentiellement composée de sel gemme.

Les affleurements triasiques sont généralement entourés d'épaisses formations calcaires classiquement attribuées à l'Aptien, témoignant d'un environnement de sédimentation récifale (G. Dubourdieu, 1956).

B. Le Crétacé

Le Crétacé est largement représenté dans les Monts de Mellègue, tant par ses séries inférieures que supérieures.

1. Crétacé inférieur

Dans la région d'étude, le Crétacé inférieur comprend les formations du Barrémien, de l'Aptien, de l'Albien et du Vraconien. Ces dépôts sont fréquemment traversés par des structures diapiriques triasiques.

a) Le Barrémien

Le Barrémien n'affleure que dans la région du Djebel Harraba et au cœur de l'anticlinal de Sidi Emmbarka. Il se compose de 200 à 250 mètres de marnes gris-jaunâtres. Localement, on y observe un banc d'huîtres, ainsi que, vers le sommet, des intercalations de calcaires gris clair, noduleux, à patine ocre. Ces marnes renferment une faune fossile modeste comprenant Desmoceras (Uhlighella) monicae Coquand et Baculites semi-canaliculatus Blainville (G. Dubourdieu, 1948).

b) L'Aptien

Dans les monts de Tébessa et du Mellègue, l'Aptien se distingue par le développement marqué de faciès récifaux. Ces dépôts apparaissent notamment au niveau des noyaux des anticlinaux et en périphérie des affleurements triasiques diapiriques. D'une épaisseur variant généralement entre 250 et 600 mètres, la série aptienne présente deux faciès principaux (G. Dubourdieu, 1956) :

Un faciès clastique, constitué de marnes et grès, avec des intercalations de bancs calcaro-gréseux ou calcaro-argileux.

Un faciès récifal, formé de calcaires organo-détritiques.

La partie inférieure est dominée par des calcaires massifs, souvent riches en oolithes ferrugineuses et en dolomies. On y observe une abondance d'Orbitolines, ainsi qu'une faune diverse comprenant Rudistes, Échinides, Lamellibranches et moules internes de Gastéropodes. Cette série est surmontée par des calcaires massifs gris ou rougeâtres, incluant des intercalations de marnes et de marno-calcaires à Orbitolines (A. Degaichia, 2014).

c) L'Albien

L'Albien est marqué, à son sommet, par un banc caractéristique de grès calcaire très dur, à teinte brun-rouille, contenant de nombreux nodules noirs ainsi qu'une faune abondante : Ammonites, Nautiles, Bélemnites, Lamellibranches et Gastéropodes. En dessous de ce banc repère, on trouve des marnes jaunes, entrecoupées de niveaux marno-calcaires très siliceux, à patine rouille ou verdâtre. L'épaisseur de l'Albien est estimée à environ 140 mètres (G. Dubourdieu, 1948).

d) Le Vraconien

La série représentative du Vraconien a été décrite à Boukhadra (G. Dubourdieu, 1956). Elle se compose d'une épaisse succession de 600 mètres, analogue à celle de l'Albien supérieur. Elle est constituée de marnes avec des intercalations calcaires et marno-calcaires, souvent riches en empreintes d'ammonites. Dans certaines localités, telles que l'Ouenza et le Djebel Slata, le Vraconien transgressif remanie des matériaux d'origine triasique (Smati, 1986 ; Perthuisot et al, 1988 ; Masse et Thieuloy, 1979 ; L. Sami, 2011).

2. Le Crétacé supérieur

Le Crétacé supérieur est représenté par les dépôts du Cénomanien, du Turonien et du Sénonien.

a) Le Cénomanien

Le Cénomanien se manifeste par une série relativement monotone de marnes grises à gris-verdâtre, souvent traversées de nombreux filons calcitiques. Dans sa partie supérieure, les marnes évoluent progressivement vers des calcaires marneux à composantes gréseuses, avec des intercalations de bancs de calcaires gréseux d'une épaisseur variant de 0,1 à 0,3 mètre. L'épaisseur totale de cette formation oscille entre 600 et 900 mètres (A. Degaichia, 2014).

b) Le Turonien

Très bien développé dans la région, le Turonien peut atteindre jusqu'à 1000 mètres d'épaisseur (G. Dubourdieu, 1956, 1959). Sa base est composée de calcaires et de marno-calcaires riches en empreintes d'Inocéramus. Ces niveaux sont surmontés par une formation massive de marnes argileuses renfermant une faune abondante : ammonites, huîtres, et divers lamellibranches (L. Sami, 2011).

C. Le Sénonien

Le Sénonien débute avec une série de marnes et de calcaires marneux du Sénonien inférieur, dont l'épaisseur ne dépasse pas les 300 mètres (G. Dubourdieu, 1950). Cette série est suivie par les dépôts du Sénonien supérieur (Campanien-Maastrichtien), visibles au sud de Tébessa, d'une puissance variant de 200 à 600 mètres. Elle commence par des calcaires marneux campaniens qui passent à des marnes gypsifères, et se termine par des calcaires massifs à rognons de silex, riches en Inocéramus maastrichtiens (L. Sami, 2011).

D. Le Miocène

Les formations miocènes reposent en discordance sur les unités géologiques plus anciennes, qu'elles recouvrent partiellement. Elles sont constituées de conglomérats, grès, argiles, marnes et calcaires

d'origine lacustre. Leur épaisseur varie de 50 à 200 mètres. Selon les travaux de M. Hamimed (2004), trois unités miocènes sont identifiées : le Burdigalien, le Langhien-Serravalien et le Tortonien. Ces unités traduisent trois cycles eustatiques à conglomérats transgressifs, correspondant à des cycles sédimentaires de second ou troisième ordre, en lien avec la dynamique des nappes de sédimentation.
Deux grands bassins sédimentaires miocènes sont ainsi reconnus : le bassin d'El Ma El Abiod, au sud, et le bassin d'El Aouinet-Meskiana, au nord (M. Hamimed, 2004 ; A. Degaichia, 2014).

E. Le Quaternaire

Les formations continentales les plus anciennes de la région remontent au Quaternaire supérieur (G. Dubourdieu, 1950). Celui-ci est essentiellement représenté par des dépôts argileux et conglomératiques. Ces formations constituent la majeure partie du comblement du fossé d'effondrement de Morsott-Tébessa, dont l'épaisseur est estimée à plus de 170 mètres (L. Sami, 2011).
Il convient de souligner qu'aucun dépôt d'âge pliocène ou de pléistocène ancien n'a été observé dans la région. D'après G. Dubourdieu (1956, 1950), cette absence s'expliquerait par une surrection régionale suivie d'une phase d'érosion intense durant cette période (L. Sami, 2011).

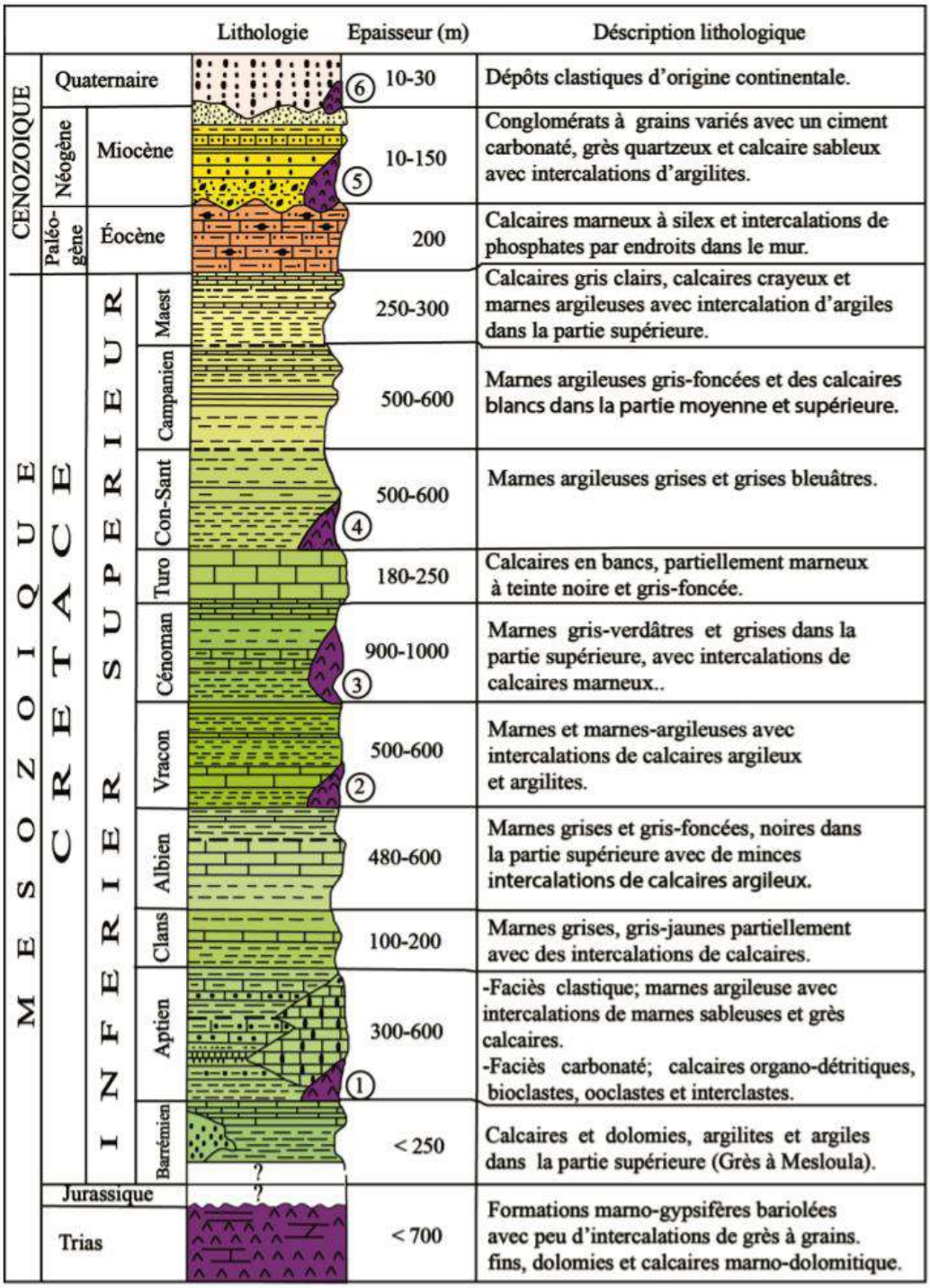


Figure 3: Colonne stratigraphique synthétique des monts du Mellègue (d'après : Dubourdieu 1956, 1959 ; David 1956; Madre 1969 ; Fleury 1969 ; Thibieroz et Madre 1976 ; Chikhi, 1980 ; Otmanine 1987, Bouzenoune 1993 et Vila et al, 2000) (Sami, 2004) modifiée par (Abid, C ,2021).

CHAPITRE III

GÉOLOGIE LOCALE

CHAPITRE III: GÉOLOGIE LOCALE

I. ORGANISATION STRATIGRAPHIQUE DU BASSIN D'EL MA EL ABIOD

La lithostratigraphie du bassin d'El Ma El Abiod se divise en deux grands ensembles distincts. Le premier est constitué principalement des formations crétacées et tertiaires, qui affleurent en périphérie du bassin. Le second ensemble est représenté par un important recouvrement miocène et quaternaire, couvrant la quasi-totalité de la surface de la plaine.

L'ensemble stratigraphique ainsi défini présente certaines discontinuités, notamment l'absence marquée des formations éocènes.

La description détaillée de ces unités lithologiques s'appuie sur les travaux d'Guefaifia (1996) et A. Rouabhia (2006).

A. Crétacé

1. Aptien moyen et inférieur

Au nord de la zone d'étude, sur le flanc est de Djebel Bouroumane, affleure un ensemble de calcaires et de dolomies. La partie inférieure est majoritairement dolomitique, avec une forte présence d'orbitalines. Des rudistes sont également observés dans les intercalations de calcaire rognoneux. L'épaisseur moyenne de cette formation est de 400 m.

Plus au sud, à Koudiat Adeila, le forage pétrolier Boudjellal-2 (BDJ2) a intercepté l'Aptien moyen et inférieur à des profondeurs respectives de 2531 m et 2786 m. L'Aptien moyen est composé de calcaires gris clair à gris brunâtres, durs, compacts, bioclastiques, pseudo-oolitiques, légèrement dolomitiques, avec des intercalations d'argile verte et grise légèrement carbonatée et souvent feuilletée. Son épaisseur est d'environ 225 m.

L'Aptien inférieur se caractérise par des alternances de marnes gris foncé, compactes et carbonatées, et de calcaires gris foncé, compacts et cryptocristallins, parfois argileux. L'épaisseur moyenne est de 107m.

2. Aptien supérieur

Dans la partie nord, à Djebel Bouroumane, les affleurements de cet étage se présentent sous forme de calcaires massifs, gris ou roux, avec des intercalations de marnes et marno-calcaires sur quelques mètres. L'épaisseur moyenne est de 70 m. Le forage BDJ2 a intercepté l'Aptien supérieur à une profondeur de 2316 m, composé de calcaires oolithiques gris-clair à gris foncé, bioclastiques, parfois cryptocristallins, rarement silteux et pyriteux. Son épaisseur est de 215 m.

3. Albien inférieur

L'Albien inférieur à Djebel Bouroumane est constitué de bancs calcaires bruns et très durs à Ostrea latissima, et de bancs de calcaires à rudistes. Au sud, le forage BDJ2 a révélé la succession suivante, de bas en haut :

Calcaires oolithiques gris-clairs, blanchâtres, brunâtres, compacts, souvent crayeux et bioclastiques ou graveleux, avec traces de foraminifères et intercalations d'argiles grises (épaisseur : 85 m).

Alternance de calcaires bioclastiques et d'argiles grises à noires (épaisseur : 87 m).

Dolomies blanches à gris brunâtres, microcristallines et compactes (épaisseur : 40 m).

4. Albien supérieur

L'Albien supérieur se trouve principalement en petits affleurements en contact avec le Trias à Djebel Ed Dalaa Er Rouail. À Adeila, le forage BDJ2 a révélé la succession suivante :

- Alternance de calcaires gris-clairs, beiges, argileux, et d'argiles grises à foncées, feuilletées et parfois dolomitiques (épaisseur : 116 m).
- Alternance de calcaires gris et marnes noires compactes, silteuses (épaisseur : 129 m).

Au nord, à Djebel Bouroumane, les affleurements se trouvent à la base des pentes, composés de calcaires et marno-calcaires gris avec des empreintes d'Ammonites et Bélemnites. L'épaisseur est d'environ 150 m.

5. Cénomanien

Dans le sud-est, l'affleurement est large et en contact tectonique avec le Trias. Il se compose de marnes jaunes et parfois grises et de bancs calcaires lumachelliques, avec une faune abondante (Ostréa, Exogyra, Cardita). L'épaisseur atteint 560 m. À Adeila, le forage BDJ2 montre la série complète du Cénomanien, avec une succession suivante :

- Argile grise carbonatée (épaisseur : 238 m).
- Alternances de calcaires gris-clairs et d'argiles grises (épaisseur : 130 m).
- Calcaires gris cryptocristallins avec intercalations d'argile grise (épaisseur : 76 m).
- Alternance d'argiles grises et de calcaires lumachelliques (épaisseur : 73 m).

6. Turonien

L'affleurement du Turonien est largement présent au nord (Djebel Bouroumane, Djebel El-Koreiz, T'noukla). À sa base, une série de calcaires marneux gris forme des petits bancs d'une épaisseur de 60

à 70 m. En profondeur, on rencontre des calcaires beiges et dolomitiques, avec des rognons de silex. À proximité de T'noukla, le Turonien supérieur (épais de 150 m) présente la succession suivante :

- Marnes noires gypsifères.
- Marno-calcaires gris en plaquettes.
- Marnes noires lumachelliques et rognées.

Le forage BDJ2 a révélé une succession suivante :

- Calcaires bruns crayeux, dolomitiques, lumachelliques (épaisseur : 109,5 m).
- Calcaires gris-clairs compacts avec intercalations d'argiles marneuses (épaisseur : 131,5 m).

7. Campanien inférieur – Emscherien

Ce faciès se compose de marnes avec des bancs de calcaires lumachelliques et affleure largement à Djebel Doukkane et Djebel Ed-Dalaa. À Adeila, le forage BDJ2 a montré la succession suivante :

- Argile brun rougeâtre et marnes gris verdâtres (épaisseur : 47 m).
- Argile grise avec bancs de calcaires gris-clairs (épaisseur : 83 m).
- Argile grise avec bancs de calcaires fossiles (épaisseur : 242 m).
- Calcaire gris compact marneux (épaisseur : 24 m).

8. Campanien supérieur – Maastrichtien

Cette formation est présente au nord-ouest à Djebel Koreiz et au centre de la plaine (M'Taguinaro). Elle est constituée de calcaires et marno-calcaires blancs à inocérames. À Adeila, le forage BDJ2 a permis de reconnaître une épaisseur de 67 m composée de calcaires blancs compacts, biomicritiques, à faune pélagique.

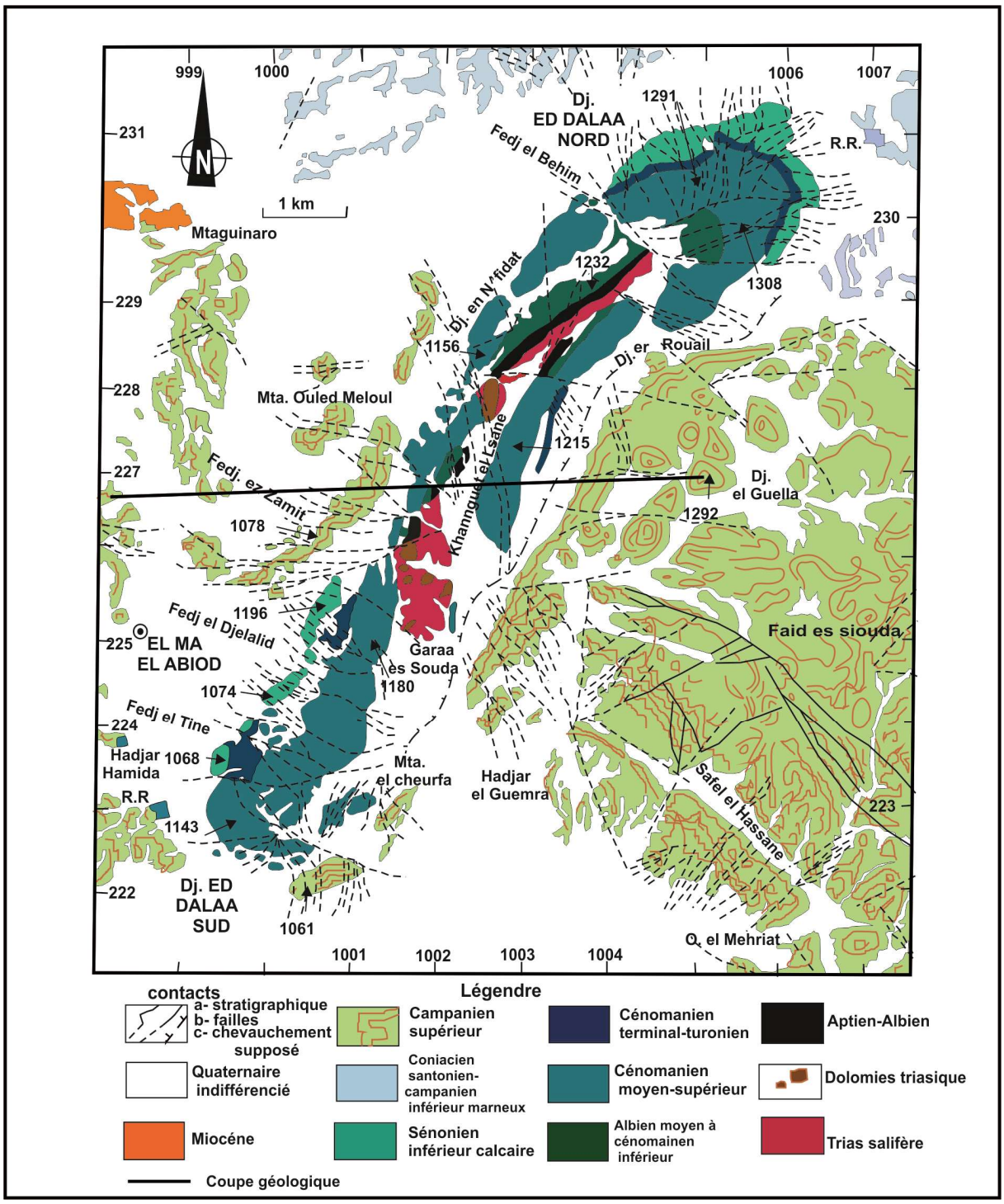


Figure 4: Carte géologique du Djebel Ed Dalaa (El Ma El Abiod (d'après (Vila, 2001, redessiné par Haddad, S, 2025).

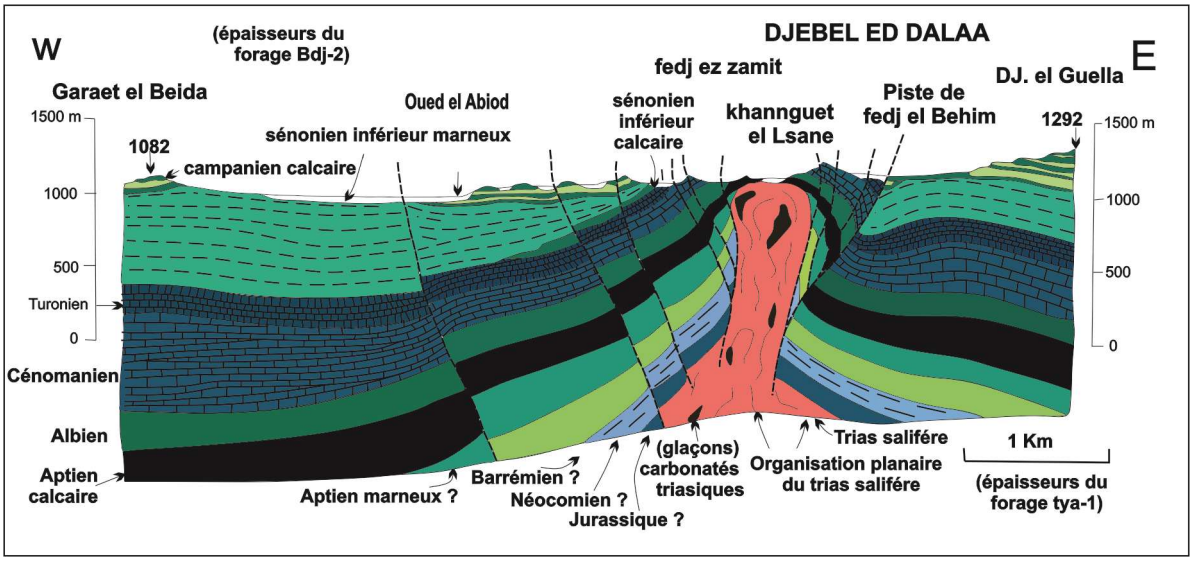


Figure 5: Coupe géologique à travers l'anticlinal da Dj. Ed Dalaa d'après Vila, 2001, redessiné par Haddad, S ,2025).

II. ESSAI DE RECONSTITUTION EN SEPT ETAPES DE L'EVOLUTION HALOCINETIQUE PUIS HALOTECTONIQUE DES TRIAS

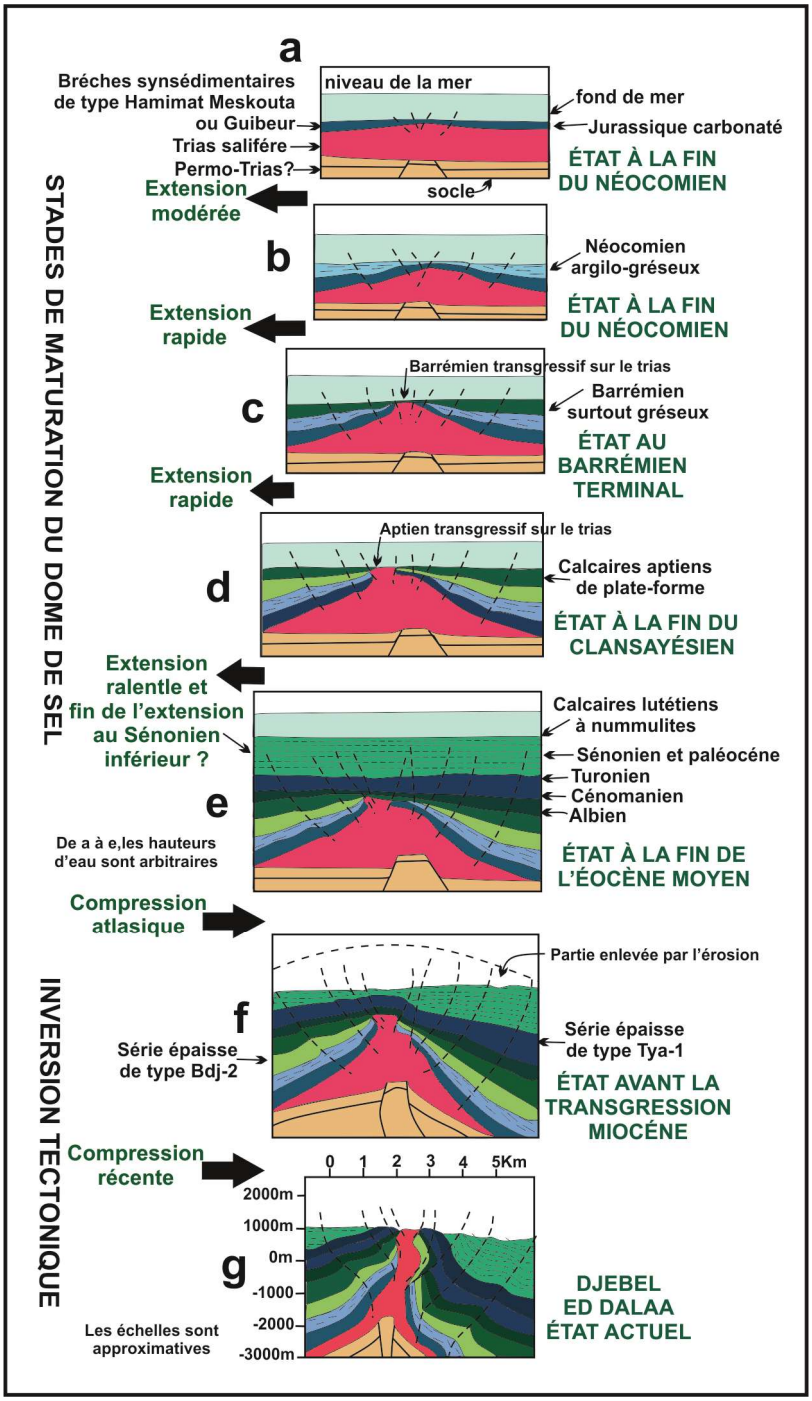


Figure 6: Essai de reconstitution en sept étapes de l'évolution halocinétique (a à e) puis halotectonique (f et g) de la structure salifère du Djebel Ed Dalaa (Algérie, confins algéro-tunisiens, d'après Vila, 2001, redessiné par Haddad, S, 2025).

La figure 4, propose une évolution possible de la structure de Djebel Ed Dalaa (Vila, 2001). La figure présente un scénario en 7 étapes

Les étapes de (a-e) décrivent les stades de maturation du dôme de sel. Ces stades correspondent à l'évolution halocinétique.

- Le stade (a) correspond à l'extension modérée jusqu'à la fin du Néocomien.
- Le stade (b) correspond à une extension rapide, aussi à la fin du Néocomien.
- Le stade (c) correspond à l'extension rapide, état au Barrémien Terminal.
- Le stade (d) correspond à l'extension ralentie et fin de l'extension au Sénonien inférieur jusqu'à la fin de l'éocène moyen.

Les étapes de (f et g) halotectonique de la structure salifère.

- Le stade (f) correspond à la compression atlasique, état avant la transgression Miocène.
- Le stade (g) correspond à la compression récente, Djebel Ed Dalaa état actuel.

B. Tertiaire

1. Miocène

D'après le rapport de G. Durozoy du 18 avril 1949 et les fiches techniques des forages hydrogéologiques réalisés dans la région, le Miocène affleure largement dans la partie est de la plaine d'El Ma El Abiod, tandis qu'au centre de la plaine, il est recouvert par le Quaternaire.

a) Miocène inférieur et moyen (Vindobonien et Burdigalien)

Selon le rapport de J. L. Bles et J. J. Fleury (1969), cette série débute par des conglomérats de l'Aquitano-Burdigalien, présents à l'Est d'El Kouif et à Houidjbet. Ces conglomérats sont siliceux, extrêmement durs, et contiennent de gros rognons de silex plus ou moins arrondis. G. Durozoy (1949) confirme l'affleurement étendu de ces conglomérats, qui sont cependant recouverts par le Quaternaire au centre de la plaine. À Oglat Chaâchaa, les éléments siliceux de la roche sont de taille plus réduite. À l'Est et au Sud de M'taguinaro, les conglomérats contiennent des silex de tailles plus importantes.

b) Miocène supérieur (Pontien)

Les formations de cet étage ont été observées du côté de T'noukla, où elles se composent principalement de sables fins à grossiers et de grès, en transgression directe sur les calcaires Maestrichtiens ou les marnes Emschériennes. On y trouve également des marnes rouges continentales, parfois bariolées.

C. Quaternaire

Le Quaternaire recouvre presque entièrement la plaine. Son épaisseur est relativement faible, ne dépassant pas une dizaine de mètres. Il se compose principalement de faciès anciens (conglomérats, croûte calcaire) et de faciès récents (éboulis limoneux).

III. TECTONIQUE DE LA REGION

A. Style tectonique

La région est marquée par deux directions structurales principales : Sud-ouest/Nord-est et Est-Ouest. Ces orientations se manifestent à travers les accidents tectoniques tels que plissements, flexures, allongements de bassins et cassures, influençant à la fois la morphologie topographique et, dans une certaine mesure, l'hydrographie.

Les plis, de type isopaque, proviennent du niveau structural moyen. Ils sont généralement serrés, érigés sur des plans verticaux, caractéristiques des structures observées dans l'Atlas saharien. Ce type de plissement indique un fort raccourcissement de la couverture sédimentaire, tandis que le socle, plus rigide, est resté relativement peu affecté, suggérant ainsi une tectonique essentiellement de couverture.

B. Phases tectoniques

La région étudiée présente une succession de phases tectoniques compressives et distensives, marquée d'abord par une phase distensive Crétacé-Éocène favorisant la subsidence et des dépôts néritiques, suivie d'une phase compressive fini-lutétienne à priabonienne (contrainte NW-SE) générant des plis SW-NE (phase atlasique) et des failles comme celle de T'noukla (Zerdazi, 1990). Une distension miocène post-oligocène forme le bassin d'El Ma El Abiod, avec subsidence accrue (ingression marine langhienne) puis décroissante (croûte ferrugineuse). La phase fini-lutétienne crée des structures synclinales (Djebel Dyr) et anticlinales (Rbaia-Gouraya) (Durozoy, 1956 ; Bles & Fleury, 1970), tandis que le Pliocène inférieur (tectonique tellienne) produit des plis Ouest-Est (Draâ Es Snouber, Djebel Tebega) et réactive des directions atlasiques (Djebel Bouroumane, interprété comme flexure (Vila, 1969) ou polyphasé (Kowalski et al, 1996)). La distension pliocène provoque l'effondrement partiel de Djebel Kechrid et total du fossé de Foussana, ainsi que le diapirisme de Djebissa (première manifestation en surface au Pliocène-Plio-Quaternaire). Enfin, une phase compressive locale plio-quaternaire génère des plis NNW-SSE (Djebel Belkfif, Oued Faid El Obbiz (Morel, 1957 ; Bles, 1969), tandis qu'une dernière distension forme le fossé de Tébessa et réactive le diapir de Djebissa, influençant la verticalité des séries miocènes.

C. Mouvements récents

La tectonique récente, bien que dynamique, n'a pas perturbé l'organisation des anciens plissements. Elle est responsable de la formation du fossé d'El Ma El Abiod, typique des structures autochtones de Tunisie et de l'Algérie orientale (G. Castany, 1954 ; Dubourdieu, 1956).

La tectonique récente se distingue par :

- Un plissement affectant les grès miocènes du col de T'noukla.
- Une fracturation touchant les formations crétacées, notamment l'anticlinal cénomanien-turonien de Draâ M'taa El Ma El Abiod et les falaises turoniennes de T'noukla.

Ces déformations sont probablement liées à la phase atlasique, sous une contrainte principale orientée Nord-Ouest/Sud-est. Elles témoignent d'importants coulissements ayant affecté le socle durant le Plio-Quaternaire.

La distension de la couverture a généré des déchirures donnant naissance aux fossés, en partie en lien avec les déplacements méditerranéens dans la région d'El Ma El Abiod.

IV. ÉVOLUTION PALEOGEOGRAPHIQUE ET STRUCTURALE DE DJEBEL ED DALAA

La région de Djebel Ed Dalaa a subi une série de mouvements tectoniques compressifs et distensifs, conduisant à sa configuration actuelle :

A. Phase distensive (Crétacé)

Cette phase a favorisé la formation d'une plateforme récifale et d'un milieu subsident profond. Les accidents disjonctifs y sont peu développés, avec :

- Une faille NE-SO influençant le percement des formations triasiques.
- Un système de failles Est-Ouest affectant les versants nord et sud de l'anticlinal.
- Ces structures sont liées au fossé d'effondrement de Tébessa (Durozoy, 1949, 1956).

B. Phase compressive éocène (phase atlasique NE-SO)

Des plis se forment dans les calcaires crétacés, et les anticlinaux sont remplacés par des synclinaux, souvent percés par du Trias diapirique. L'orientation NE-SO résulte des compressions néogènes (Éocène-Miocène), attestée par les discordances stratigraphiques (Durozoy, 1956 ; Blès & Fleury, 1969 ; Vila, 1980).

C. Période d'érosion durant l'Oligocène

Après l'émersion au Lutétien supérieur, l'érosion ante-miocène a effacé presque toutes les formations oligocènes. Le Miocène-Pliocène est marqué par une sédimentation continentale (sables, argiles, conglomérats), tandis que le Quaternaire voit se déposer colluvions et alluvions. La distension miocène contribue à la formation du bassin subsident d'El Ma El Abiod.

D. Ingression marine durant le Miocène inférieur (Burdigalien-Langhien)

La subsidence miocène provoque une transgression marine (Langhien-Serravalien), suivie d'une sédimentation deltaïque. La phase décroissante s'achève par une croûte ferrugineuse à la fin du Serravalien.

E. Activité halocinétique des formations triasiques

La distension pliocène active le diapirisme, observable dès l'Albo-Aptien par des variations d'épaisseur sédimentaire. Le flanc sud-est de Djebel Ed Dalaa est particulièrement déformé par des poussées halocinétiques, redressant ou verticalisant les couches.

F. Tectonique récente

- Pliocène-Quaternaire : Coulissements du socle et distension de la couverture, créant des fossés (ex. : région d'El Ma El Abiod).
- Structures plicatives : Plissement des grès miocènes (col de T'Noukla) et dislocation de l'anticlinal cénomanien-turonien (Draâ M'Taa-El Ma El Abiod), résultant d'une contrainte NO-SE (phase atlasique).

V. CARACTERISTIQUES GENERALES DE LA REGION DJEBEL ED DALAA

A. Structure géologique

Le Djebel Ed Dalaa est une structure plissée anticlinale orientée nord-est/sud-ouest, avec des flancs inclinés et un cœur constitué de calcaires massifs. Ce pli est le résultat de la déformation tectonique alpine. Les formations géologiques sont principalement composées de calcaires, dolomies, et marnes.

- Flanc sud : Calcaires et dolomies marins du Crétacé.
- Flanc nord : Marnes et argiles plus récentes, souvent affectées par l'érosion.
- Cœur du pli : Calcaires massifs du Crétacé supérieur, parfois fracturés, favorisant l'infiltration de fluides minéralisés.

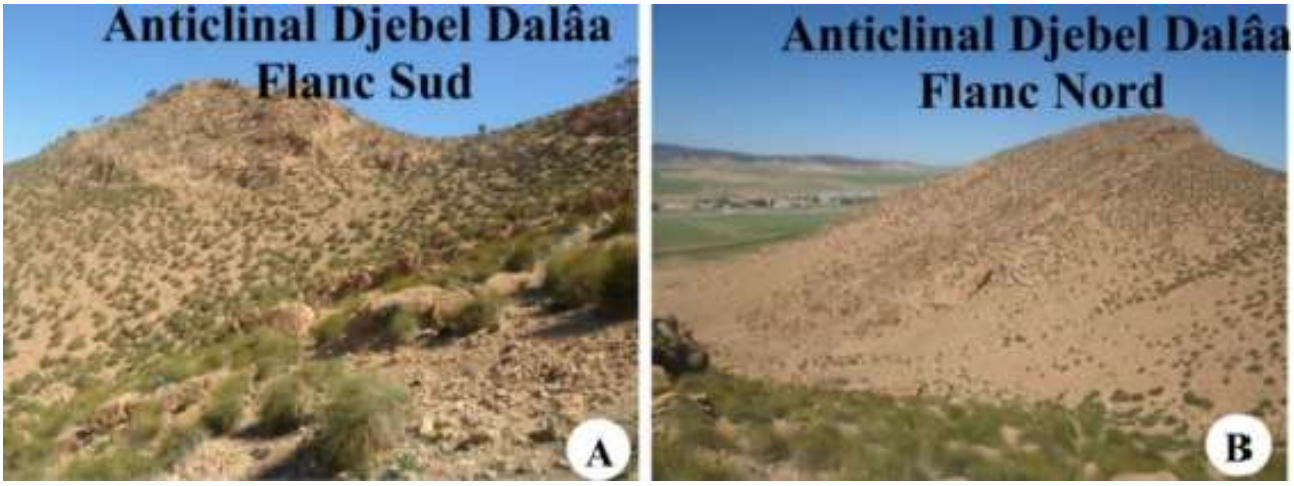


Figure 7: (A) Flanc sud (B) Flanc nord de l'anticlinal de Djebel Ed Dalaa.

B. Lithologie

La région est caractérisée par des formations calcaires, dolomiques, et des marnes. Ces couches sédimentaires témoignent d'un environnement marin peu profond, avec des variations lithologiques correspondant à des changements environnementaux survenus au cours des différentes périodes géologiques.

C. Minéralisations et potentiel minéral

Le massif du Djebel Ed Dalaa présente un fort potentiel minéral :

Plomb (Pb) et Zinc (Zn) : souvent concentrés dans les zones de failles et de fractures.

Barytine et Fluorine : Associées aux formations calcaires et aux fluides minéralisés circulant dans les fractures.

Les zones de fractures sont cruciales pour la concentration des minéraux métalliques, ce qui rend le massif intéressant pour l'exploration minière.

D. Minéralisation polymétallique au niveau de Djebel Ed Dalaa (Pétrographie)

Développent autour des corps minéralisés autres que la minéralisation ferrifère principale.

La minéralisation est principalement cuivro-zincifère (Cu-Zn) et se situe sur le flanc sud du Djebel, à proximité du contact cénomanien-turonien.

Elle se présente sous forme de veines et de disséminations, accompagnées d'une minéralisation secondaire épigénétique marquée par la smithsonite et des minéraux de cuivre tels que la malachite et l'azurite.

La gangue est essentiellement composée de calcite et de quartz.

La limonitisation apparaît sous forme de veines irrégulières en bordure des corps minéralisés, traduisant une altération supergène au stade final de la minéralisation.

E. Tectonique :

La région a été fortement affectée par l'orogenèse alpine qui a créé des structures plissées (anticlinaux et synclinaux) et des failles inverses. Ces structures ont facilité la circulation de fluides minéralisés, contribuant à la formation des gisements métalliques.

VI. CONCLUSION

L'analyse géologique de la région d'El Ma El Abiod, enrichie par les documents consultés et les observations menées, met en lumière plusieurs aspects importants de l'évolution géologique de la zone. À travers deux phases orogéniques successives, la structure actuelle de la région s'est formée, caractérisée par un haut plateau appartenant à l'Atlas saharien, où des plis d'orientation Nord-est Sud-ouest délimitent un bassin subsident. Ce bassin présente deux grands ensembles : les affleurements d'âge crétacé sur les bordures et les formations du Miocène et du Quaternaire qui dominent presque entièrement la plaine. Cette dernière est caractérisée par une dépression de forme cuvette, avec un substratum calcaire et marneux datant du Crétacé, séparé du Miocène par des éboulis perméables. La région présente ainsi une structure géologique complexe, résultat de multiples phénomènes tectoniques et stratigraphiques, avec une dominance des formations du Miocène et du Quaternaire qui témoignent d'une évolution dynamique au cours des époques géologiques.

CHAPITRE IV

THEORIE DES METHODES GEOPHYSIQUES UTILISEES

CHAPITRE IV : THEORIE DES METHODES GEOPHYSIQUES UTILISEES

I. INTRODUCTION

Dans ce chapitre, nous présentons les fondements théoriques des méthodes géophysiques mises en œuvre dans le cadre de cette étude. Il s'agit notamment de la polarisation provoquée, des méthodes électriques. La polarisation provoquée ont été appliquées en phase de reconnaissance générale du site, tandis que la méthode des sondages électriques verticaux (SEV) et Le profilement électrique combiné (PEC) a été utilisée pour une investigation plus détaillée à l'échelle locale.

II. LA PROSPECTION ELECTRIQUE:

L'étude du sous-sol à l'aide de méthodes électriques a été initiée dès les premiers travaux de Maxwell, qui proposa l'utilisation de quatre électrodes au lieu de deux pour mieux mesurer la résistance au passage du courant électrique dans un milieu conducteur. Toutefois, ce n'est qu'en 1912 que Conrad Schlumberger posa les véritables bases de la prospection électrique, en introduisant notamment la notion de résistivité apparente (Mahammed, 2012). Lorsque le sous-sol est formé de couches stratifiées, Schlumberger suggéra d'assimiler la résistivité du milieu réel à celle d'un milieu homogène qui, dans les mêmes conditions expérimentales, générerait le même potentiel mesuré.

En fonction des principes physiques mis en jeu, les méthodes de prospection électrique se répartissent en quatre grandes catégories :

- Les méthodes à courant continu (méthodes de résistivité).
- Les méthodes à basse fréquence, utilisant des champs électromagnétiques variant lentement.
- Les méthodes à haute fréquence, basées sur l'étude de champs électromagnétiques rapides.
- Les méthodes géo-électrochimiques, utilisant les champs secondaires générés.

Pour la mesure, des électrodes métalliques (pieux) sont enfoncées dans le sol. Les électrodes d'alimentation sont désignées par A et B, tandis que celles de réception sont notées M et N. L'ensemble formé par la disposition des électrodes d'alimentation et de réception sur la

Surface est Appelé dispositif de prospection électrique.

Le principe général repose sur la mesure de la réponse électrique du sol à une stimulation contrôlée à travers ce dispositif.

A. Principe

La prospection électrique consiste à injecter un courant électrique dans le sol à travers deux électrodes de courant, puis à mesurer la différence de potentiel créée entre deux électrodes de potentiel placées à proximité.

En connaissant l'intensité du courant injecté et la différence de potentiel mesurée, il devient possible de déterminer la résistivité apparente du sol.

La résistivité apparente ρa est donnée par la relation :

$$\rho_a = K \times \frac{\Delta V}{I}$$

Où :

- $\boldsymbol{\rho_a}$: S'exprime en Ohm mètre : Ω.m.
- **ΔV :** S'exprime en millivolt : mV.
- ***I*** : S'exprime en milliAmpère : mA.
- ***K*** : Coefficient géométrique fonction de la disposition des électrodes.

Le coefficient K est défini par :

$$K = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN}\right) - \left(\frac{1}{BM} - \frac{1}{BN}\right)}$$

La résistivité apparente possède trois propriétés principales (Dubois et al, 2011) :

- Elle est indépendante de l'intensité I.
- Elle dépend de la géométrie du dispositif utilisé.
- Elle représente une moyenne pondérée des résistivités des différentes couches traversées.

La résistivité apparente est également fonction de la structure géologique (disposition et nature des couches) ainsi que de la configuration des électrodes choisie.

Parmi les dispositifs les plus utilisés, on retrouve :

- Wenner.
- Schlumberger.
- Wenner-Schlumberger.
- Pôle-Pôle.
- Dipôle-Dipôle.

Le choix du dispositif dépend de plusieurs facteurs : le type de structure à imager, le niveau de bruit ambiant, la sensibilité de l'équipement utilisé, ainsi que les caractéristiques propres à chaque configuration, telles que la profondeur d'investigation effective, la résolution horizontale et la réponse aux variations verticales (Loke, 1994).

B. dispositifs de prospection électrique

Wenner :

- Électrodes équidistants.

- Simple à utiliser.
- Bonne sensibilité verticale.
- Adapté aux couches horizontales.

Schlumberger :

- Électrodes de potentiel proches, électrodes de courant éloignées.
- Permet une exploration plus profonde.
- Idéal pour des variations verticales de résistivité.

Dipôle-Dipôle :

- Deux dipôles séparés (courant et potentiel).
- Très sensible aux variations horizontales.
- Utilisé pour détecter des structures latérales complexes (failles, cavités...).

Le choix du dispositif dépend du type de structure recherchée (couches horizontales, variations verticales, anomalies latérales) et des contraintes du terrain.

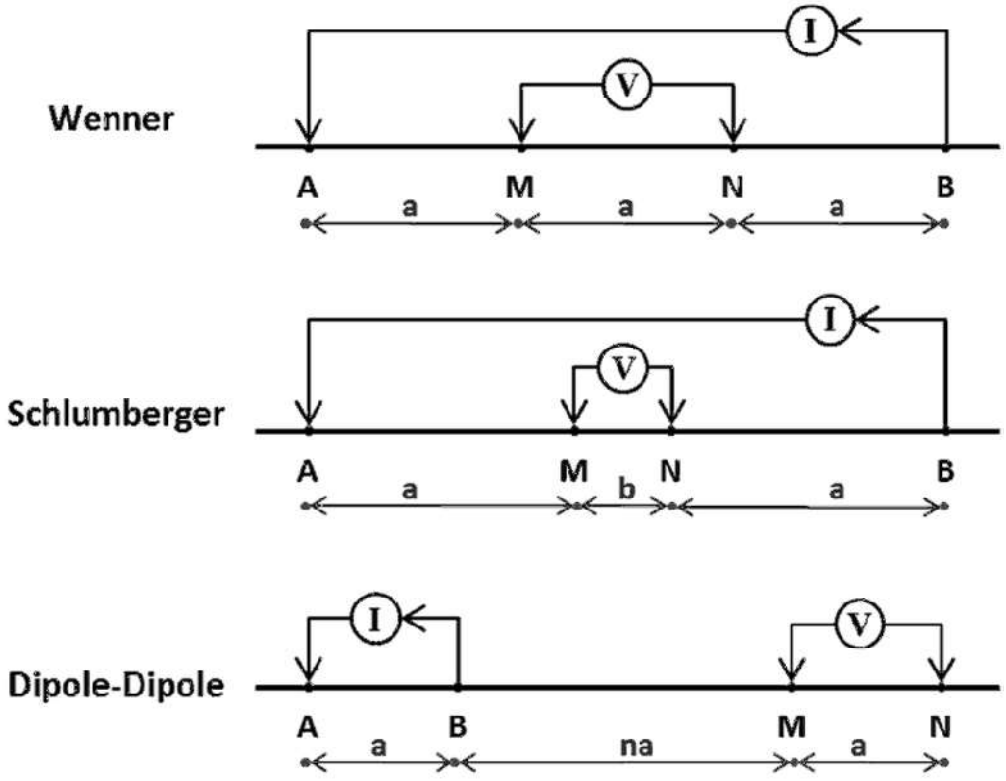


Figure 8: Représente les dispositifs Wenner, Schluberger et dipole-dipole.

C. Résistance et Résistivité

La résistance électrique (R) exprime l'aptitude d'un matériau à s'opposer au passage d'un courant électrique. Elle est mesurée en ohms (Ω) et dépend à la fois des propriétés du matériau et de sa géométrie. En effet, si la distance que parcourt le courant est doublée, la résistance double également ; inversement, si l'aire de la section transversale est doublée, la résistance est divisée par deux. Ainsi, la résistance résulte non seulement des caractéristiques intrinsèques du matériau, mais aussi de sa forme et de sa taille par rapport aux points d'application du courant électrique (PWJ Glover, 2015).

La résistivité, quant à elle, représente une propriété intrinsèque du matériau, indépendante de sa géométrie. Elle correspond à la résistance d'un cube de matériau d'un mètre de côté. Son unité est l'ohm-mètre (Ω.m). Lorsqu'un courant continu traverse un matériau homogène et isotrope de longueur L et de section A, la relation entre la résistance R et la résistivité ρ est donnée par :

$$\boldsymbol{\rho = R \times \frac{A}{L}}$$

Où :

- R est la résistance (en ohms).
- ρ est la résistivité (en ohm-mètre).
- A est l'aire de la section (en mètres carrés).
- L est la longueur parcourue par le courant (en mètres).

Les unités standards sont l'ohm (Ω) pour la résistance, le mètre (m) pour la longueur, et par conséquent l'ohm-mètre (Ω.m) pour la résistivité. À noter que l'unité ohm-centimètre (Ω.cm), parfois utilisée, équivaut à 0,01 ohm-mètre.

La conductivité électrique σ est l'inverse de la résistivité et s'exprime en mho/mètre ou siemens/mètre. En hydrogéologie, les unités usuelles sont le micromho/cm ou le microsiemens/cm. Les relations usuelles sont :

$$\boldsymbol{\rho(\Omega.m) = \sigma\left(\frac{\mu s}{cm}\right)10000 = \sigma\left(\frac{ms}{m}\right)1000}$$

Il est important de préciser que la loi d'Ohm s'applique rigoureusement aux conducteurs métalliques. Dans le cas des gaz et des électrolytes, cette loi n'est valable qu'en première approximation.

D. Résistivité des roches

La résistivité électrique des roches présente une large gamme de valeurs en fonction de leur nature lithologique : elle est généralement faible (de 1 à quelques dizaines d'ohm.m) pour les argiles et les marnes, intermédiaire (de quelques dizaines à plusieurs milliers d'ohm.m) pour les grès, et élevée (de plusieurs centaines à plusieurs milliers d'ohm.m) pour les calcaires et les roches éruptives. La

corrélation entre résistivité et faciès géologique constitue un outil fondamental en prospection géophysique. Toutefois, certaines formations, telles que les argiles, peuvent conserver une résistivité relativement constante sur de grandes distances, alors que dans d'autres cas, notamment au sein des dépôts quaternaires, la résistivité peut évoluer progressivement au sein d'une même unité géologique (Chapellier, 2000).

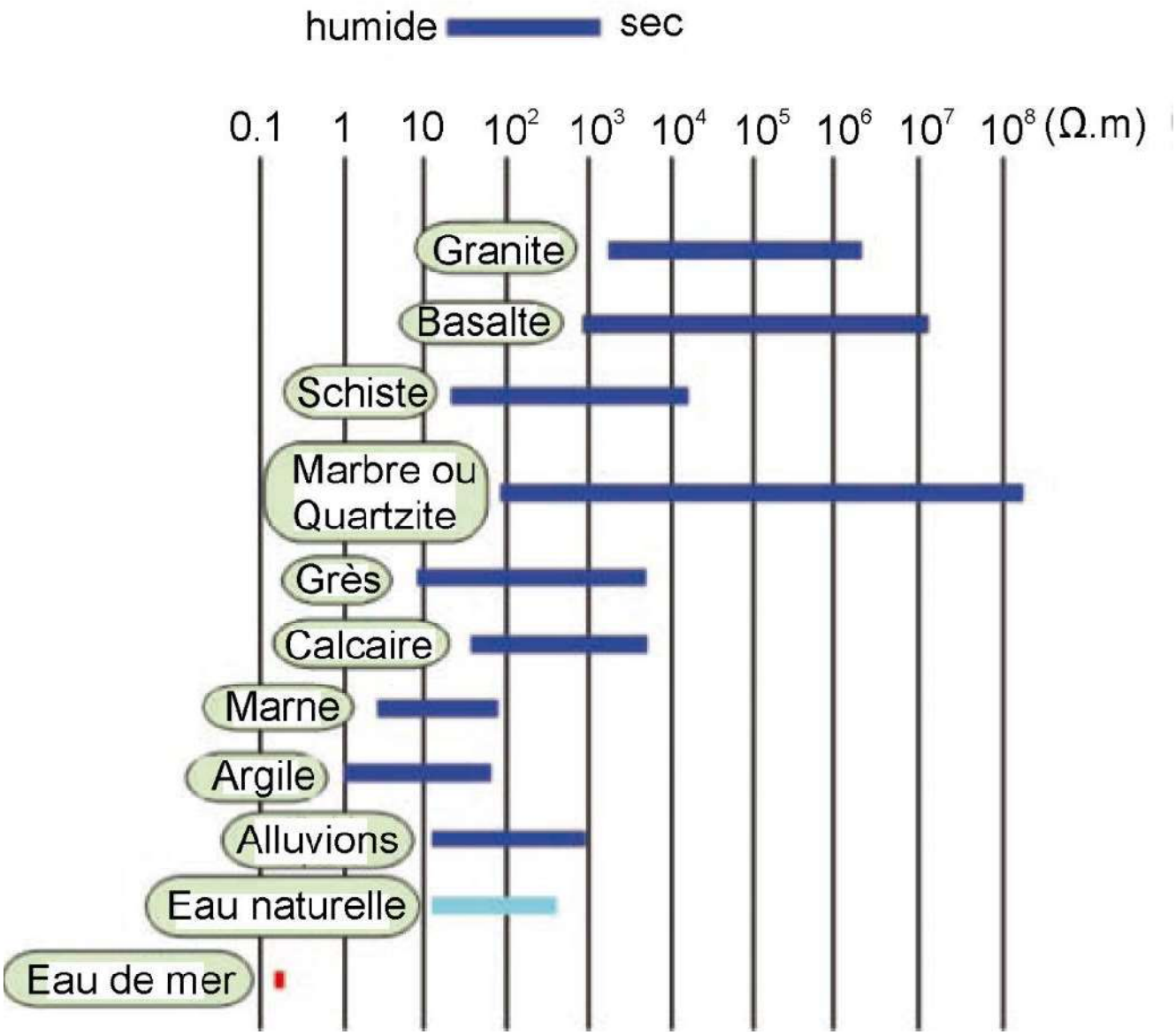


Figure 9: Résistivités de quelques roches (d'après Florsch and Muhlach, 2018).

E. Sondage électrique vertical (SEV)

Le sondage électrique a été réalisé selon le dispositif de Schlumberger. La technique mise en œuvre consiste à mesurer la résistivité apparente du sous-sol à des profondeurs croissantes en augmentant progressivement les deux pôles A et B d'envoi de courant. La chute de potentiel qui en résulte à la surface du sol est mesurée entre deux électrodes rapprochées M et N centrées sur le milieu O de AB. La résistivité apparente est donnée par la relation (Khadri et al, 2022) :

$$\boldsymbol{\rho_a = \pi * \left(\frac{AB^2 - MN^2}{4MN}\right) * \frac{\Delta V}{I}}$$

($\boldsymbol{\rho_a}$ Est la résistivité apparente en Ω.m, AB est l'écartement entre les électrodes d'émission en m, MN est l'espacement en m entre les électrodes de potentiel, ΔVest la différence de potentiel en Volte I est le courant injecté en Ampère).

En supposant que la résistivité spécifique et l'épaisseur du terrain superficiel (dans lequel se trouvent généralement les électrodes) ne varient pas de façon considérable d'une mesure à l'autre, les variations de la résistivité apparente sont dues essentiellement aux changements verticaux de la résistivité spécifique. On voit donc que la profondeur d'investigation augmente en fonction de l'espacement AB. Dans la pratique cette profondeur d'investigation est proportionnelle à la longueur du dispositif dans le rapport approximatif et empirique de 1/4 à 1/10. Généralement, On continue les mesures jusqu'à ce que la formation géologique recherchée soit atteinte.

Pour cette raison, le champ d'application idéal des SEV consiste en l'étude des formations géologiques stratifiées subhorizontales (angle entre les couches ne dépasse guère les 15°) qui s'étendent sur une certaine distance et dont les caractéristiques géologiques ne varient pas latéralement trop brusquement (latéralement homogènes).

Lors de l'exécution des sondages avec un dispositif Schlumberger, le principal problème consiste à conserver un ΔV suffisamment grand pour être mesuré. Or au fur et à mesure que A et B s'éloignent ΔV diminue. On peut alors résoudre ce problème soit, (1) en augmentant la tension à la source de façon à augmenter I et ΔV, (2) en multipliant le nombre d'électrodes en A et B, (3) en arrosant les électrodes A et B, si nécessaire avec de l'eau salée, de façon à accroître I et ΔV ou (4) en augmentant MN afin d'augmenter ΔV mesurée. Les résultats de mesure sont représentés sur un papier bi-logarithmique où l'on reporte, en abscisses, les longueurs AB/2 en mètres et en ordonnées les valeurs

des résistivités apparentes correspondantes exprimées en Ω.m, on obtient la courbe de SEV qui correspond à une succession déterminée de couches de résistivité.

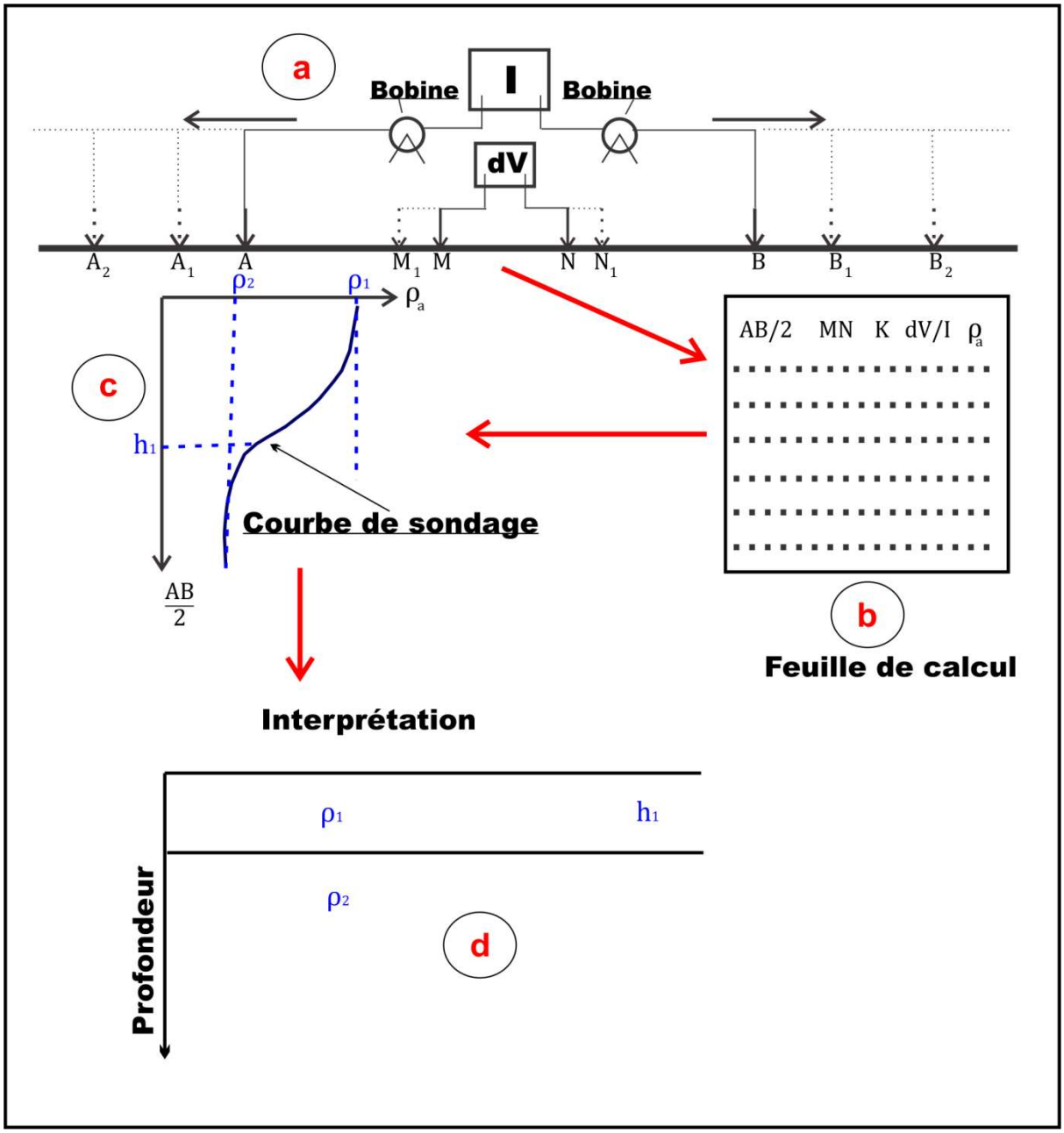


Figure 10: Principe du SEV, Boubaya 2020.

F. Le profilement électrique combiné

Le profilement électrique est une méthode de prospection électrique, dans laquelle le dispositif se déplace d'une certaine distance. Il s'agit simplement de déplacer un quadripôle AMNB de dimension

fixe sur le site à prospecter (figure 11). A chaque station, on fait une mesure de I et de ΔV qui permet de calculer ρ_a qu'on affecte au centre du dispositif (Michel Chouteau Bernard Giroux, 2006).

Le profilement électrique combiné (PEC) est une méthode de mesure avec deux dispositifs (tri-pôles) opposées à trois électrodes AMN et MNB avec une ligne MN commune. De plus, il y a une électrode d'alimentation C, située à l'infini (OC≥10AO). Son influence peut être négligée. Le dispositif est composé de deux parties - gauche AO et droite OB, ainsi que d'un fil OS reliant le centre du dispositif à une électrode située à l'infini (fig.11). A chaque station, deux mesures de la différence de potentiel et du courant sont effectuées, en connectant alternativement les parties gauche et droite à l'électrode distante C. Sur la base des résultats de mesure, deux valeurs de résistivité apparente ρa AMN et ρa MNB sont calculées.

Sur les graphiques ρa du profilement combiné, les contacts, les filons et les corps isométriques sont clairement visibles. En termes de productivité, le rendement de la méthode PEC est inférieure aux autres méthodes de profilement électrique ; cependant, en termes de résolution, il les surpasse, et il est utilisé au stade de la prospection et de la cartographie géologique (Electrorazvedka, en russe ,1980).

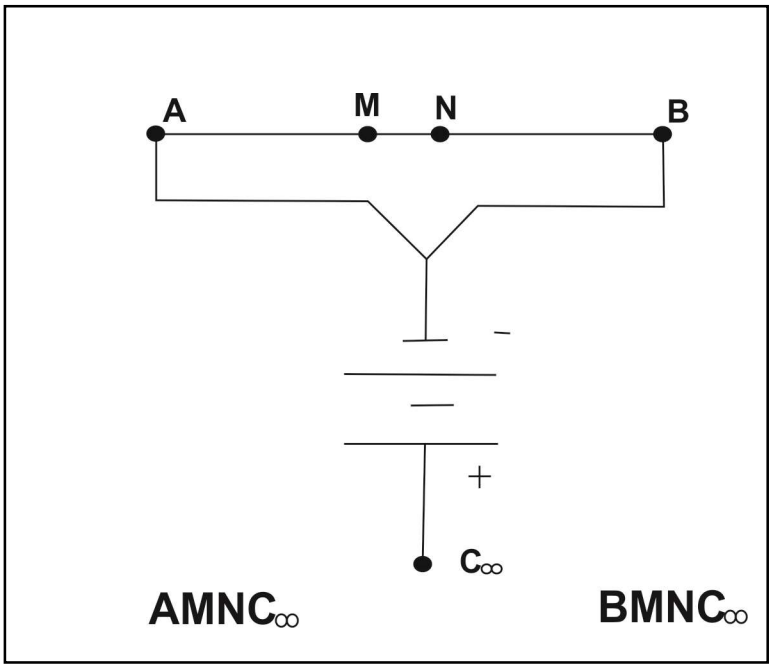


Figure 11: Principe du profilement électrique combiné.

III. La polarisation provoquée

La polarisation provoquée (PP) est une méthode relativement récente en géophysique. Elle est surtout employée dans la prospection des minerais ordinaires et, dans une moindre mesure, pour l'étude des aquifères. Les relevés de polarisation provoquée sont réalisés à l'aide d'instruments qui injectent un

courant électrique sous forme d'impulsions bipolaires, entrecoupées de phases de coupure de l'injection.

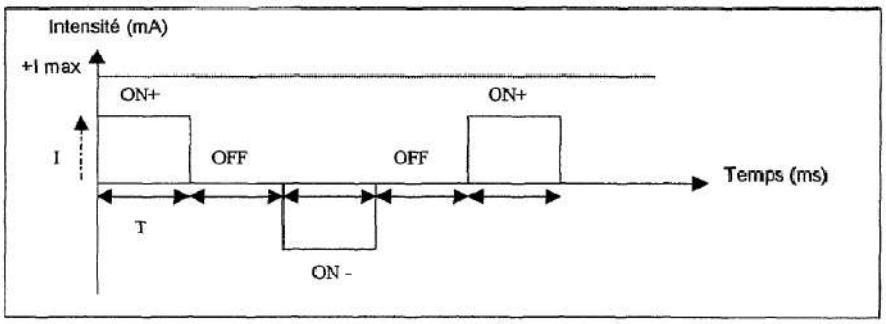


Figure 12: Forme du courant : mode TX-RX Multi-électrodes domaine de temps.

En utilisant un montage classique ABMN, on injecte un courant entre A et B et, à chaque interruption, on enregistre entre M et N un potentiel résiduel qui décroît progressivement : c'est ce que l'on nomme « polarisation provoquée ».

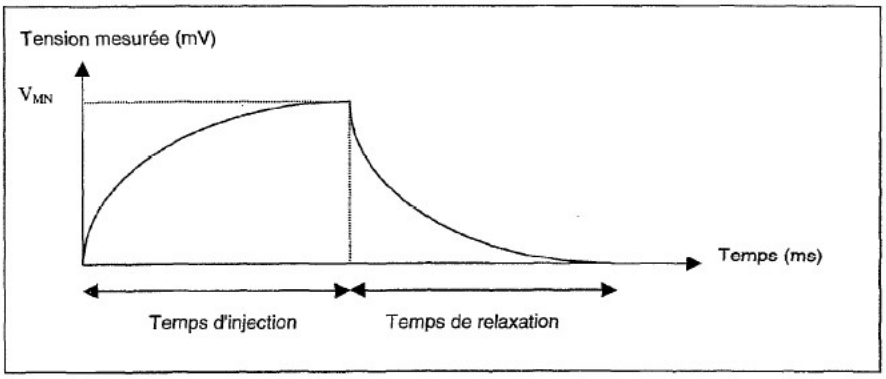


Figure 13: Phénomène de décharge.

Bien que C. Schlumberger ait repéré ce phénomène dès avant 1920, ce n'est qu'en 1948 qu'il fut réellement adopté pour l'exploration géophysique.

Un phénomène apparenté, la surtension, était quant à lui déjà familier en chimie physique depuis longtemps. La polarisation provoquée se traduit par une variation de l'impédance du sol en fonction de la fréquence du courant injecté. Si, d'un point de vue très schématique, on peut l'assimiler au comportement d'un cir=cuit RC en parallèle, la décroissance du potentiel n'y suit pas une loi exponentielle pure ni ne démarre à la valeur maximale attendue dans un circuit idéal. Ces écarts, mis en évidence à la figure 14, soulignent la complexité du phénomène. En domaine fréquentiel, on

observe par ailleurs que la résistivité apparente du sous-sol diminue lorsque la fréquence augmente : c'est ce qu'on appelle la « dispersion de résistivité ».

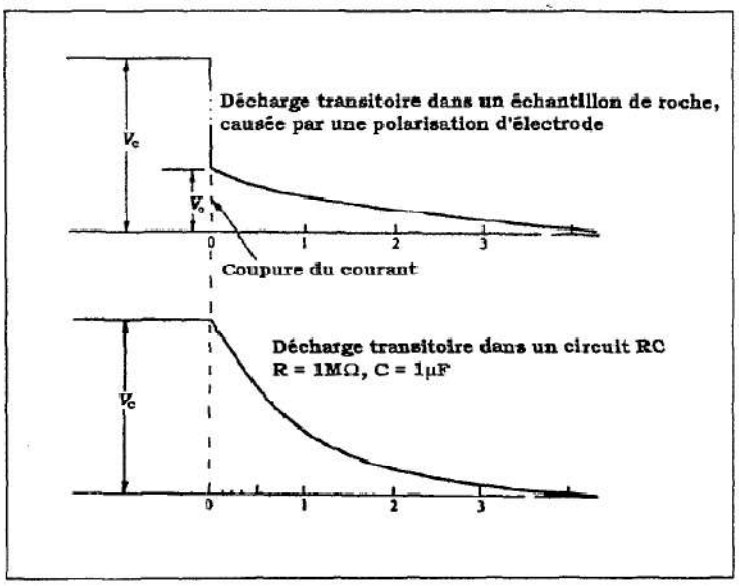


Figure 14: Comparaison des courbes de décharge pour la PP et pour un circuit RC.

CHAPITRE V

METHODOLOGIE D'ACQUISITIONS DES DONNEES GEOPHYSIQUES

CHAPITRE V : METHODOLOGIE D'ACQUISITIONS DES DONNEES GEOPHYSIQUES

I. INTRODUCTION

Ce chapitre expose la méthodologie d'acquisitions des données géophysiques de prospection électrique de détail réalisé sur le secteur Dj. Ed Dalaa (EL MA EL Abiod)

II. METHODOLOGIE D'ACQUISITION DES DONNEES ELECTRIQUES

Dans cette étude on a utilisé deux types de dispositifs :

1- Le dispositif tri-pole pour le profilement combiné (AB= 300 m, MN=40 m, pas=10 m). Pour ce type de dispositif, une électrode C est située à l'infini.

2- Le sondage électrique vertical-polarisation provoquée.

Les sondages électriques verticaux (SEV) ont été réalisés par le dispositif symétrique Schlumberger. Les écartements des lignes de courant des SEV ont atteint une longueur maximale de AB=2000 m.

III. APPAREILLAGE UTILISE

Les mesures ont été effectuées à l'aide d'un appareillage de marque SCINTREX, il comprend :

- un groupe électrogène de type Briggs and Straton.
- un émetteur TSQ3.
- un récepteur de type IPR10.
- des électrodes émettrices en acier.
- des électrodes impolarisables pour la réception.
- L'onde émise par l'émetteur a une forme carrée (2s on, 2s off, 2s on).

La quantité M(Chargeabilité) mesurée par le récepteur est la valeur moyenne de la tension transitoire pendant un intervalle de temps sélectionné (2S), auquel les normalisations suivantes ont été appliquées:

-Normalisation pour la longueur de l'intervalle d'intégration.

- La forme de la courbe.
- Le nombre d'impulsions.

A. Traitement des sondages électriques

Le premier traitement des données de sondage électrique vertical, consiste à assembler la courbe de sondage électrique finale. En effet, cette courbe est constituée de plusieurs segments MN. Dans notre cas, elle en a 4 segments (Figure 15). Le premier segment MN=2, le deuxième segment MN=10, le troisième segment MN=40 et le quatrième segment est MN=150 m.

Une partie des courbes des sondages électriques ont été translatées verticalement par rapport au dernier segment MN. La translation a été réalisée au moyen du programme IPI2WIN de l'Université de Moscou (Bobatchev, 2002). La figure 15, représente l'opération de translation, réalisée sur le sondage électrique S12.

Le protocole de mesure du dispositif quadratique symétrique Schlumberger est montré sur le tableau 1.

Tableau 1: Protocole de mesure du dispositif quadripôle symétrique Schlumberger.

N°	*AB/2*	MN	K
1	3	2	12.566
2	4.5	2	30.238
3	6	2	54.978
4	9	2	125.66
5	15	2	351.86
6	15	10	62.832
7	25	10	188.5
8	25	2	980.18
9	40	10	494.8
10	65	10	1319
11	65	40	300.41
12	100	40	753.98
13	100	10	3134
14	150	40	1736
15	225	40	3945
16	225	150	942.48
17	325	150	2094
18	325	40	8264
19	500	150	5118
20	750	150	11663
21	1000	150	20826

Sur le tableau 1, on peut voir le demi-écartement des électrodes d'émission (AB/2), l'écartement des électrodes de réception (MN) et le calcul du coefficient géométrique du dispositif quadripôle symétrique Schlumberger (K).

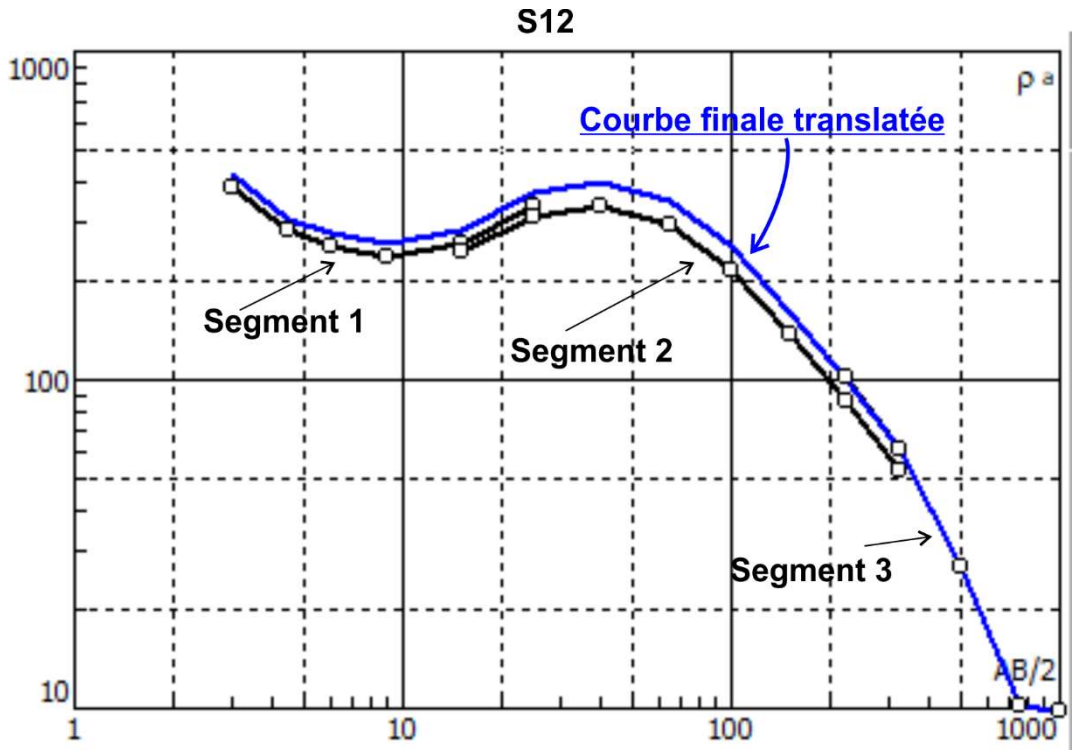


Figure 15: Exemple d'assemblage d'une courbe de sondage électrique. Sur cet exemple, la courbe SEV a été translatée par rapport au dernier segment MN.

CHAPITRE VI RESULTATS ET INTERPRETATIONS DES DONNEES GEOPHYSIQUES

CHAPITRE VI: RESULTATS ET INTERPRETATIONS DES DONNEES GEOPHYSIQUES

I. INTRODUCTION

Ce chapitre expose les résultats et interprétations des données géophysiques de prospection électrique de détail réalisé sur le secteur d'étude.

Nous allons commencer par les résultats de la prospection géologique au niveau de l'affleurement des minéralisations, ainsi que la description de cette minéralisation dans les sondages mécaniques.

II. ETUDE GEOPHYSIQUE

A. Résultats de l'échantillonnage

Secteur NE : le secteur NE d'une superficie de 0,125 km² (500 x 250) renferment cinq zones minéralisées subparallèles entre elles. Leurs dimensions variant de 10 à 60m donnant une longueur moyenne de 30m, leur épaisseur varient de 2 à 5m soit une moyenne de 2,5m.

Vingt une (21) saignées de 1 m de long chacune prélevées sur l'ensemble de ces zones afin d'apprécier les teneurs en $BaSO_4$ ont donné des teneurs variant de 55,86 à 97,66% (teneur moyenne 78,88%) en $BaSO_4$ et une teneur moyenne de 2,79% en $SrSO_4$. Ces zones minéralisées sont encaissées à première vue d'une façon uniforme aux calcaires récifaux d'âge Aptien avec un pendage de 50 à 60° et sont décalées en moyenne de 30 l'une de l'autre.

Secteur SW : le secteur SW de dimensions analogues au secteur nord-est est représenté par une zone minéralisée affleurant sur 400 m, présentant des épaisseurs de 1.2 à 4m atteignant exceptionnellement au centre de la zone, donnant une épaisseur moyenne de 4m. 25 saignées de 1m de long prélevé sur cette zone ont donné des teneurs en $BaSO_4$ variant de 20,5 à 93,24% soit une moyenne de 60%.

La zone minéralisée est localisée à premier vue dans la zone de contact (Trias /crétacé ?) ou ses environs immédiats et possède les mêmes éléments de gisement que les calcaires récifaux adjacents c'est-à-dire 55 à 60° comme angle de pendage et 320-330° d'azimut de pendage.

La baryte est à gros cristaux blancs, parfois transparents ; par endroit elle est associée dans une très faible mesure à la malachite, azurite, cuivre gris, galénite et quartz bipyramidé, l'ensemble de ces minéraux n'atteint pas le pourcent.

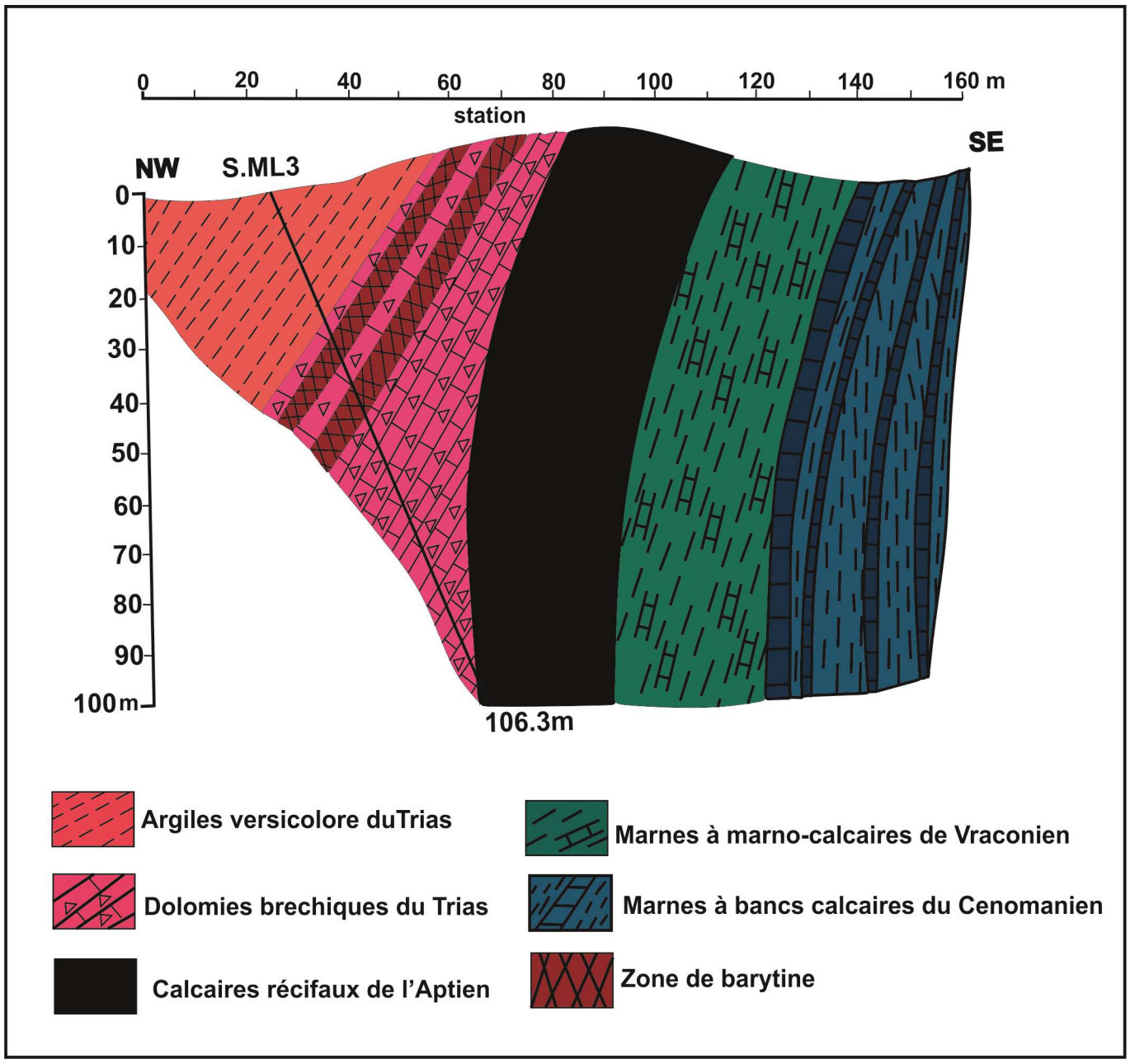


Figure 16: Coupe lithostratigraphique passant par le sondage mécanique S.ML3.

B. Résultats des travaux de sondage

La figure 16 présente la coupe géologique s'en basent sur les résultats du sondage mécanique (carotté). La position de la coupe passant par le sondage SML3 est montrée sur la figure 2 (b), le sondage a recoupé de haut en bas.

Nous ne disposons pas des données lithologiques originales du sondage carotté SLM3, cependant nous les avons restituées à partir de la coupe géologique sur laquelle figure ce sondage avec les profondeurs

de la lithologie (figure 16). Donc les différents intervalles décrits ci-après doivent être pris avec prudence.

Tableau 2: profondeur et nature des formations traversées par le sondage SML3.

Profondeur	Description
0 – 31 m	Argiles versicolore du Trias
31 – 35 m	Dolomies bréchiques du Trias
35 – 40 m	Zone de barytine
40 – 44 m	Dolomies bréchiques du Trias
44 – 49 m	Zone de barytine
49 – 101.5 m	Dolomies bréchiques du Trias
101.5 – 106.3 m	Calcaires récifaux de l'Aptien

Ainsi, il semble que la zone minéralisée de Barytine est traversée sur deux niveaux presque égaux par le sondage carotté. Un niveau supérieur qui va de la profondeur 35 à 40 m et un niveau plus bas qui va de la profondeur 44 à 49 m. L'épaisseur de chaque niveau est de l'ordre de 5 m. Les deux niveaux comme le montre la figure 16 sont encaissées dans les dolomies bréchiques du Trias. Le sondage a été arrêté à la profondeur 106.3 m dans les calcaires de l'Aptien.

C. Carte de résistivité apparente le long du profil 6

Les écartements de la ligne d'émission AB/2 des sondages électriques verticaux (SEV) réalisés sur notre zone d'étude varie entre 3 et 1000 m. Ceci, donne une profondeur d'investigation maximale de l'ordre de 400 m (Edwards, 1977). Les valeurs de la résistivité apparente, comme le montre la figure 17, varient entre un minimum de 8 Ohm.m et un maximum de plus 270 Ohm.m.

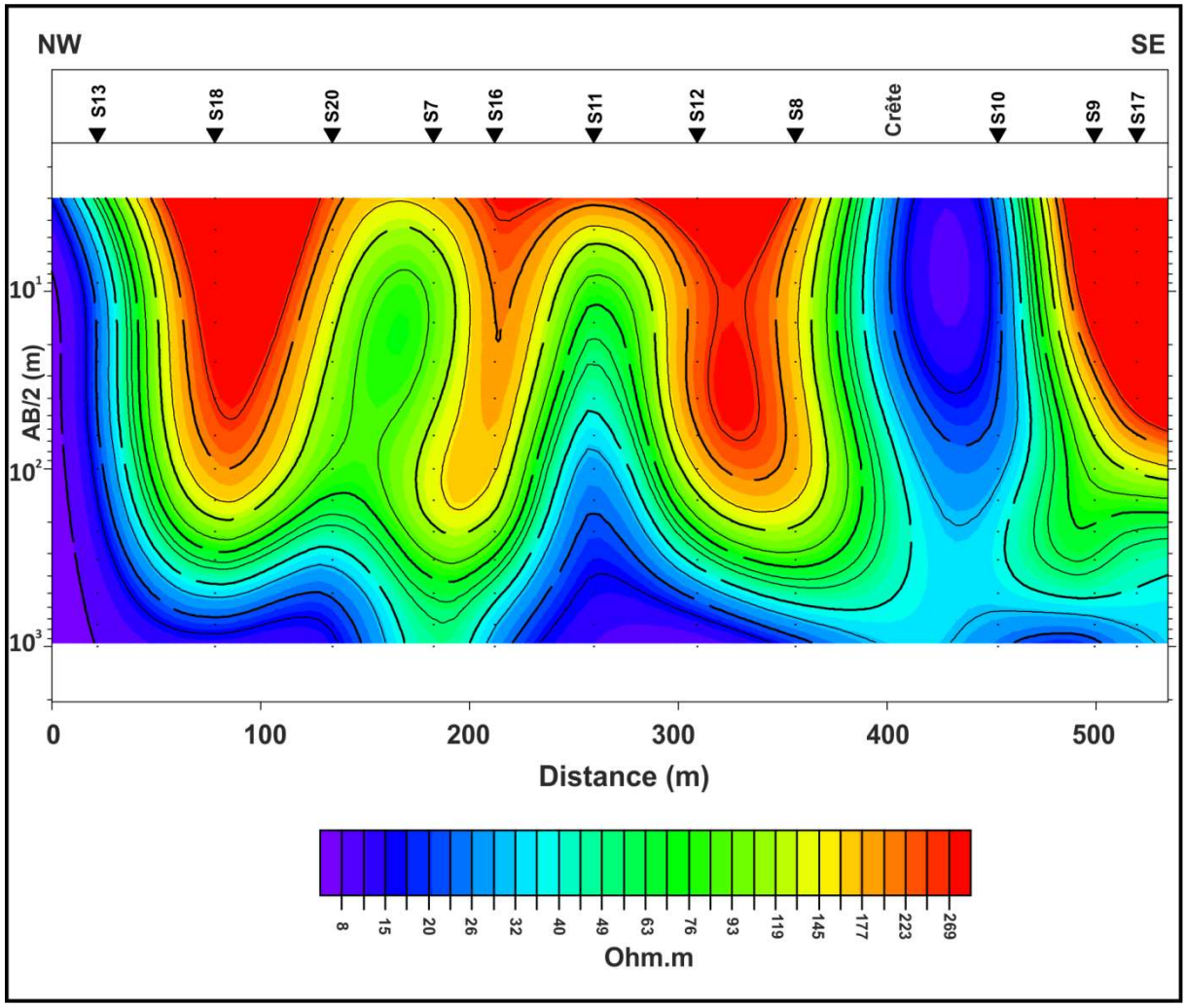


Figure 17: Carte de résistivité apparente le long du profil 6.

La carte de la résistivité apparente en fonction de l'écartement AB/2 (figure 17) montre clairement des zones résistantes de proche surface (entre les SEV 18 et 8) qui correspondent sans doute aux calcaires de l'Aptien. Notons aussi que ces zones franchement résistantes de couleur rouge s'alternent avec des zones semi-résistantes (couleurs vertes). Il est difficile de se prononcer sur l'origine exacte de cette alternance. Probablement, les zones semi-résistantes indiquent une certaine fracturation des calcaires. En profondeur, ces valeurs chutent et indiquent un milieu conducteur qui correspond vraisemblablement à l'Aptien marneux. En plus une zone conductrice est visible sous le SEV S10 et la crête et correspond sans doute à l'affleurement à cet endroit du Trias composé par une dominance argileuse. En effet la comparaison de la coupe géologique réalisée sur un profil adjacent corrobore parfaitement cette hypothèse.

D. Interprétation des Sondages Électriques Verticaux (SEV) pour un milieu tabulaire horizontal

1. Modèle Classique (Modèle à Couches Horizontales Homogènes)

Le SEV est une méthode géophysique utilisée pour déterminer la résistivité électrique des couches du sous-sol en fonction de la profondeur. Dans le modèle classique, on suppose un milieu stratifié horizontalement, composé de couches homogènes et isotropes, chacune caractérisée par :
Une résistivité électrique (ρ_1, ρ_2, ..., ρ_n),
Une épaisseur (h_1, h_2, ..., h_{n-1} ; la dernière couche est semi-infinie).

a) Principe d'interprétation:

Les données mesurées (résistivité apparente ρ_a en fonction de la distance entre les électrodes AB/2) sont comparées à des courbes théoriques (abaques ou modèles numériques) générées pour des empilements de couches.
La méthode repose sur l'inversion : ajuster les paramètres (ρ, h) du modèle pour minimiser l'écart entre les données observées et les courbes théoriques.

Étapes clés:

1. Courbe type : Comparaison avec des abaques standards (e.g. Orellana, Mooney) pour une première estimation.
2. Inversion manuelle ou automatique : Affinement du modèle par essai-erreur ou algorithmes.
3. Limites du modèle classique :

Équivalence : Plusieurs modèles peuvent expliquer les mêmes données (exemple : couche mince très résistante vs couche épaisse moins résistante).
Suppression : Les couches très minces ou peu contrastées peuvent être "invisibles".
Hypothèses simplificatrices (milieu parfaitement stratifié, absence d'hétérogénéités latérales).

2. Modèle Lissé (Smoothed Model) et Couches de Constable

Pour pallier les limites du modèle classique, les approches modernes privilégient des modèles lissés, comme ceux proposés par Constable et al. (1987) avec la méthode d'inversion d'Occam.

a) Principe du modèle lissé

Le sous-sol est représenté par une variation continue de la résistivité avec la profondeur, plutôt que par des couches discrètes.
Le modèle est régularisé pour éviter les oscillations non physiques (principe de parcimonie : préférer le modèle le plus simple possible).

b) Caractéristiques des couches de Constable

Paramétrisation fine : Le sous-sol est discrétisé en un grand nombre de couches minces (par exemple de 10 à 100 couches), mais leurs résistivités sont contraintes pour être spatialement cohérentes.
Fonction coût: Combinaison de l'erreur d'ajustement aux données et d'un terme de lissage (par exemple minimiser la dérivée seconde de la résistivité).

Avantage

- Mieux adapté aux variations graduelles (exemple : altération, sédimentation).
- Réduit les artefacts liés aux non-unicités.
- Stable en présence de bruit.

Inconvénients

- Perte de résolution sur les interfaces nettes (exemple : contact).
- Dépend du paramètre de lissage choisi.

Tableau 3: comparaison entre le Modèle classique et le Modèle lissé.

Modèle Classique	Modèle Lissé
Couches discrete	Résistivité continue
Interprétation manuelle/abaques ou inversion sur PC	Inversion automatique
Sensible à l'équivalence	Moins influence par l'équivalence
Idéal pour interfaces nettes	Adapté aux gradients

Le modèle classique reste utile pour une première interprétation ou en milieu géologique simple, tandis que le modèle lissé (type Constable) est privilégié pour les milieux complexes ou en présence de bruit. La complémentarité des deux approches permet une interprétation robuste des SEV, en équilibrant résolution géologique et parcimonie.

L'interprétation a été réalisée par le module DC Soundings du logiciel WinGLink. Ce module est dédié à l'interprétation et à la modélisation des données de sondages électriques en courant continu (DC).

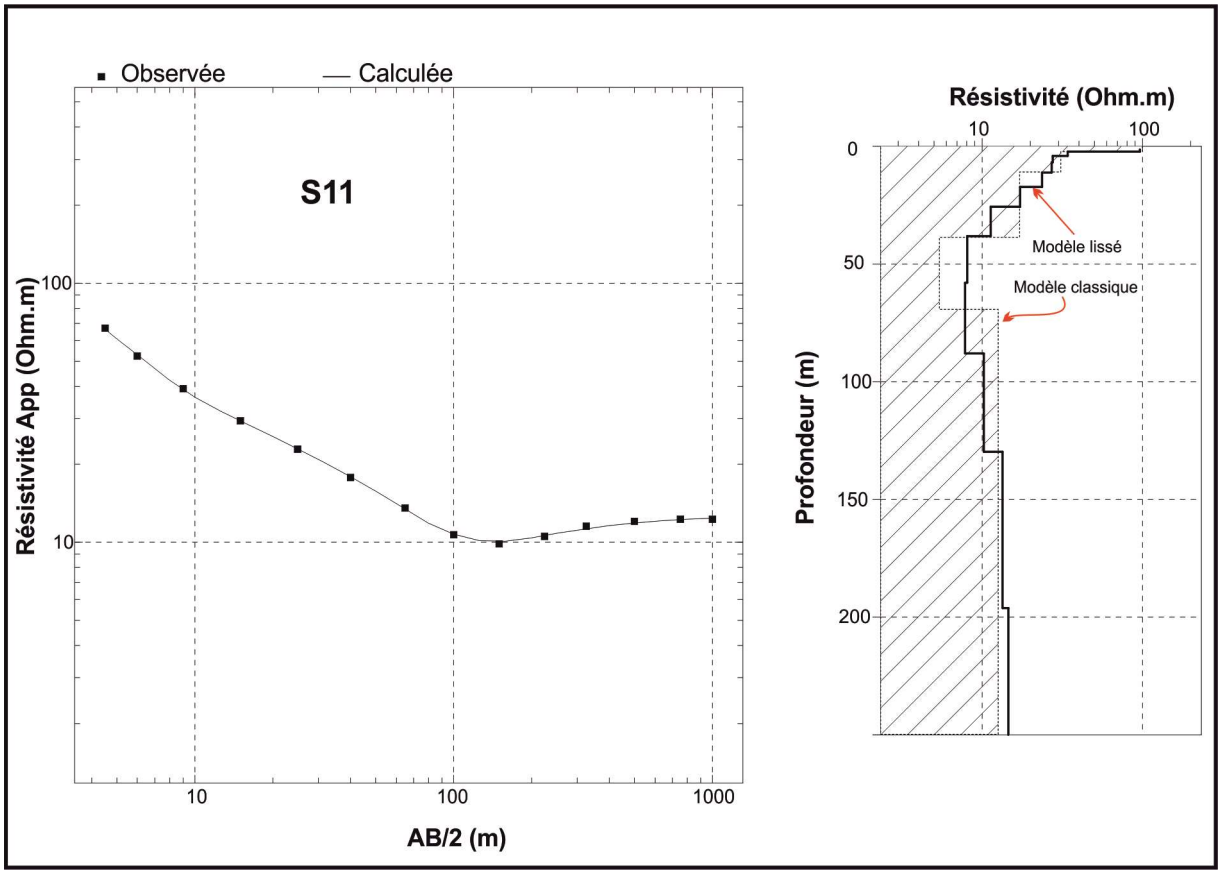


Figure 18: Exemple d'interprétation du SEV-PP 8 à l'aide du modèle classique et lissé.

E. <u>Interprétation de la coupe de résistivité du modèle lissé.</u>

La position de la coupe géo-électrique du modèle lissé est montrée sur la figure 19. La coupe géo-électrique est construite en tenant compte de la topographie réelle du terrain. Les valeurs vraies de la résistivité varient entre un minimum de 7 Ohm.m et un maximum de plus de 207 Ohm.m. Pour interpréter cette coupe en termes de géologie, on doit la comparer à la coupe géologique qui passe par le sondage mécanique S ML3. On peut avancer l'hypothèse que les maximums de résistivités sont associés aux calcaires de l'Aptien et peut être une partie du Trias composée de brèches dolomitiques.

Ainsi, à l'ouest de la crête, les maximums de résistivité corrèlent avec les affleurements et la partie profonde de l'Aptien. L'épaisseur apparente de l'Aptien semble très grande par rapport à la coupe géologique passant par le sondage mécanique SML.3. Ce ci est normal car les calcaires ont un pendage vers le NW et de ce fait leur épaisseur apparente est amplifiée. Le maximum de résistivité à l'est de la crête semble coïncider avec le Vraconien qui est composé de marno-calcaires.

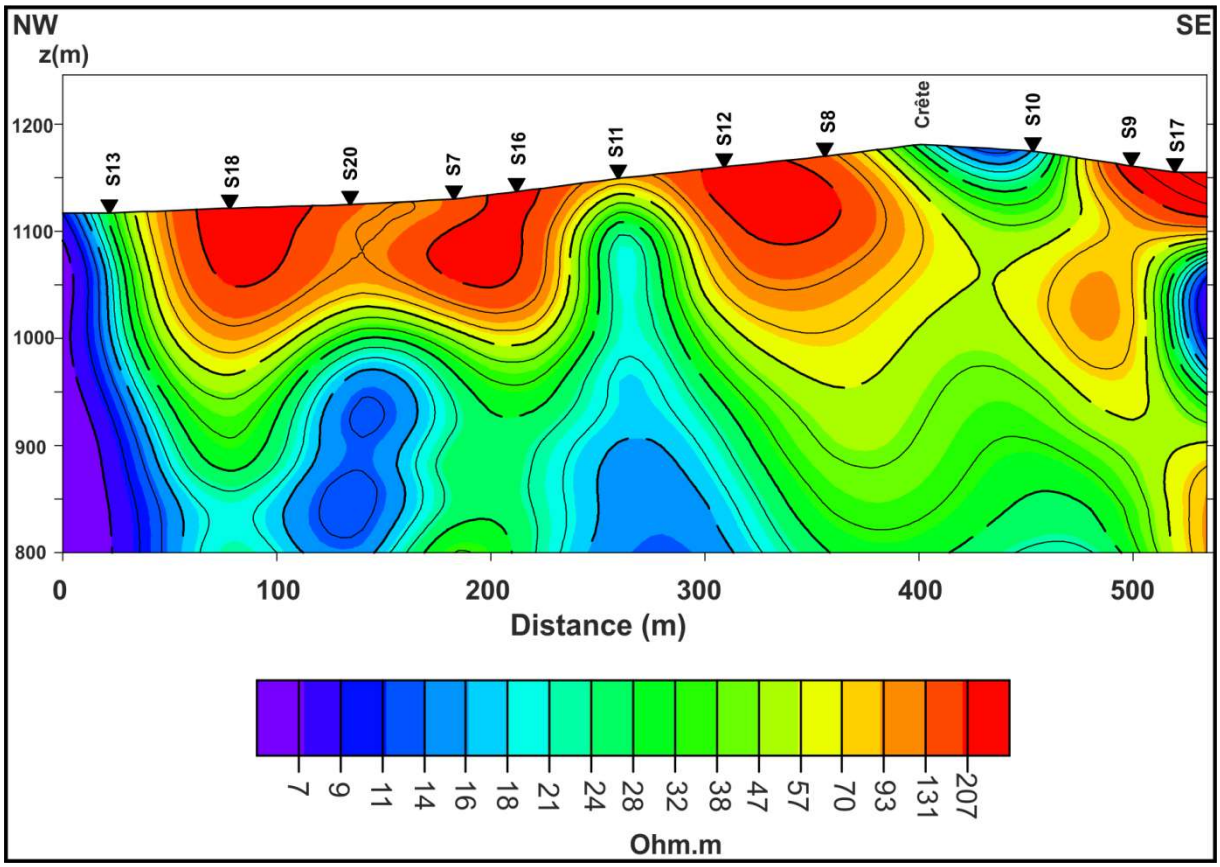


Figure 19: Interprétation de la coupe de résistivité du modèle lissé.

F. <u>Résultats du profilement électrique combiné (PEC)</u>

Le profilement électrique combiné a été réalisé sur le profil 6. La longueur du profil 590 m. Deux graphes de résistivité apparentes sont montrés sur le figure 20 la couleur rouge représente la valeur de la résistivité apparente (ρ_{AMN}) et la couleur bleu ciel représente celle de (ρ_{BMN}). Les résistivités apparentes sur les deux graphs varient entre des minimums de 2 ohm.m et un maximum de plus de 270Ω.m.

Ou remarque l'existence d'un décalage entre les pics de résistivités des deux graphes. Ce décalage est estimé à environs 80 m. le pic enregistré sur le graphe (ρ_{AMN}) est plus grand que celui enregistré sur le graphe (ρ_{BMN}). La puissance du pic résistant, semble être égale à 100 m. Si, on compare cette puissance avec la coupe du résultat du sondage mécanique S.ML3 de la figure 20, on remarque qu'elle

corresponde, à l'affleurement des calcaires de l'Aptien et des dolomies du Trias adjacent, les pics de résistivité intermédiaire, enregistrées respectivement entre les stations (29 à 39, (-1.9) à (-11), (-1) et (-19) à (-13)) sont attribués à des marno-calcaires et admettent des valeurs de résistivités entre (20-80Ω.m).

Au début et à la fin du profile, on remarque une coïncidence entre les valeurs (ρ_{AMN}) et (ρ_{BMN}). Il est probable qu'on ait sur des marnes, car les valeurs de la résistivité sont inférieures à 10 Ω.m.

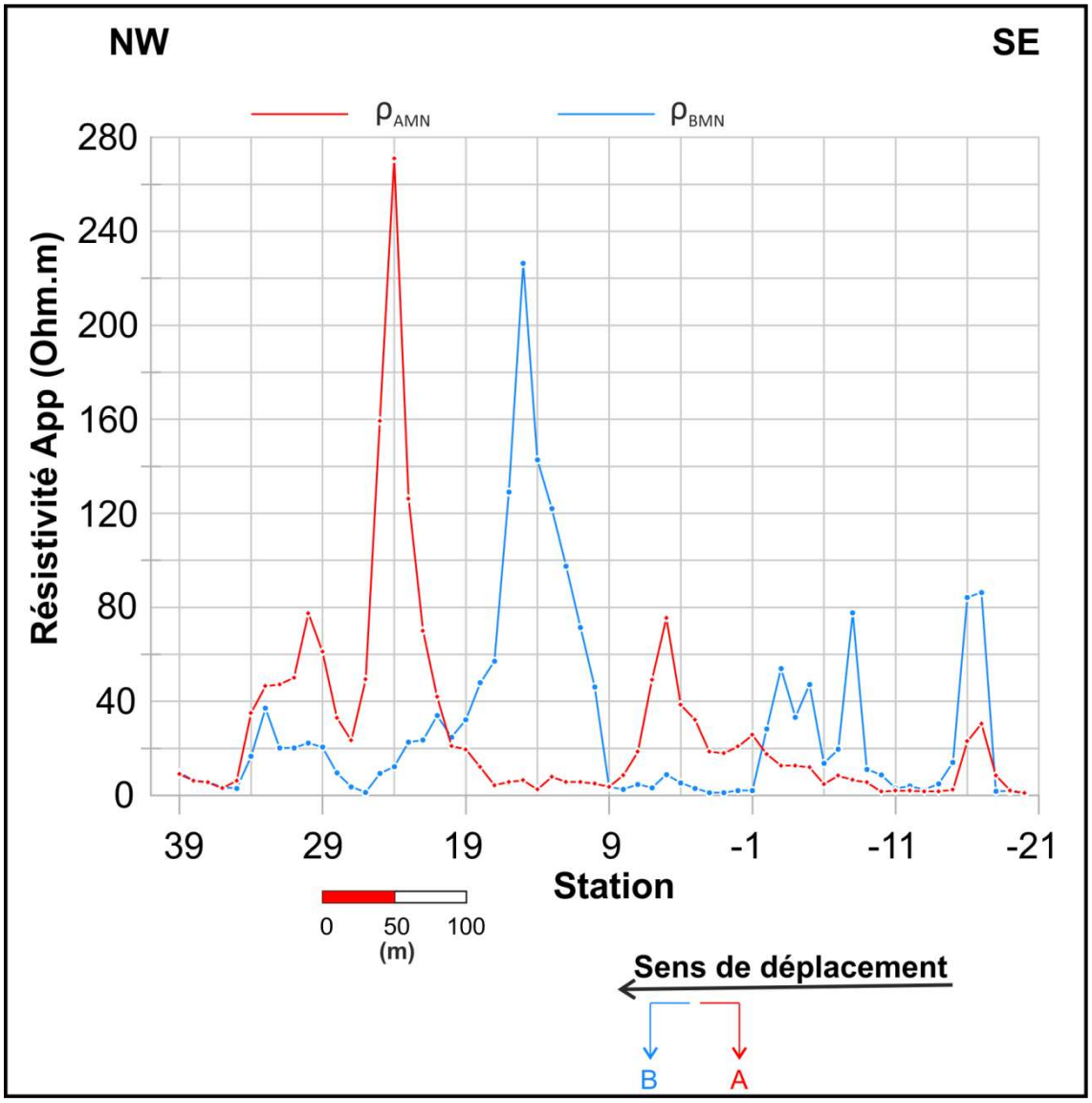


Figure 20: Résultats du profilement électrique combiné (PEC).

G. Interprétation des SEV-PP

Le SEV-PP est l'acronyme de sondage électrique vertical et polarisation provoquée sur certains SEV, nous avons, eu plus du paramètre résistivité mesuré le paramètre chargeabilité, caractéristique de la polarisation provoquée. Ce paramètre, va nous renseigner sur l'existence en profondeur de la

minéralisation sulfurée (malachite, azurite, cuivre, gris …etc.). La figure 21 montre un exemple d'interprétation de SEV-PP à l'aide du logiciel IPI2WIN de l'Université de Moscou (MSU), qui permet d'interpréter conjointement la résistivité et la chargeabilité (η) (Bobachev, 2003).

IPI2Win est capable de résoudre les problèmes direct et inverse des sondages électriques pour une variété de dispositifs couramment utilisés pour des contrastes de résistivité compris entre 0,0001 et 10 000.

Le problème direct est résolu grâce au filtrage linéaire. Ces filtres sont développés au Laboratoire de prospection électrique de surface, Département de géophysique, Faculté de géologie, Université d'État de Moscou, Moscou, Russie. Les filtres et l'implémentation de l'algorithme de filtrage, rigoureusement testés, permettent une résolution directe et précise des problèmes pour une large gamme de modèles, couvrant toutes les situations géologiques possibles.

Le problème direct de la chargeabilité est résolu à l'aide de l'équation de Komarov pour la chargeabilité apparente :

$$\boldsymbol{\eta_a = \frac{\rho_a - \rho_a^*}{\rho_a}}$$

La résistivité apparente $\rho_a$est estimée pour la section stratifiée avec les paramètres :

$$\{\rho_1 \ldots\ldots \rho_N, h_1 \ldots\ldots h_{N-1}\}$$

La résistivité apparente ρ_a^* est estimée pour la section stratifiée avec les paramètres :

$$\{\rho_1 (1- \eta_1) \ldots\ldots \rho_N(1- \eta_N), h_1 \ldots\ldots h_{N-1}\}.$$

Le problème inverse est résolu à l'aide d'une variante de l'algorithme de Newton du plus petit nombre de couches ou de l'algorithme de minimisation de l'ajustement régularisé utilisant l'approche de Tikhonov pour résoudre les problèmes mal posés. Une information a priori sur les profondeurs et les résistivités des couches peut être utilisée pour régulariser le processus de minimisation de l'erreur d'ajustement. Le problème inverse est résolu séparément pour chaque courbe de sondage.

La figure 21 représente 3 panneaux.

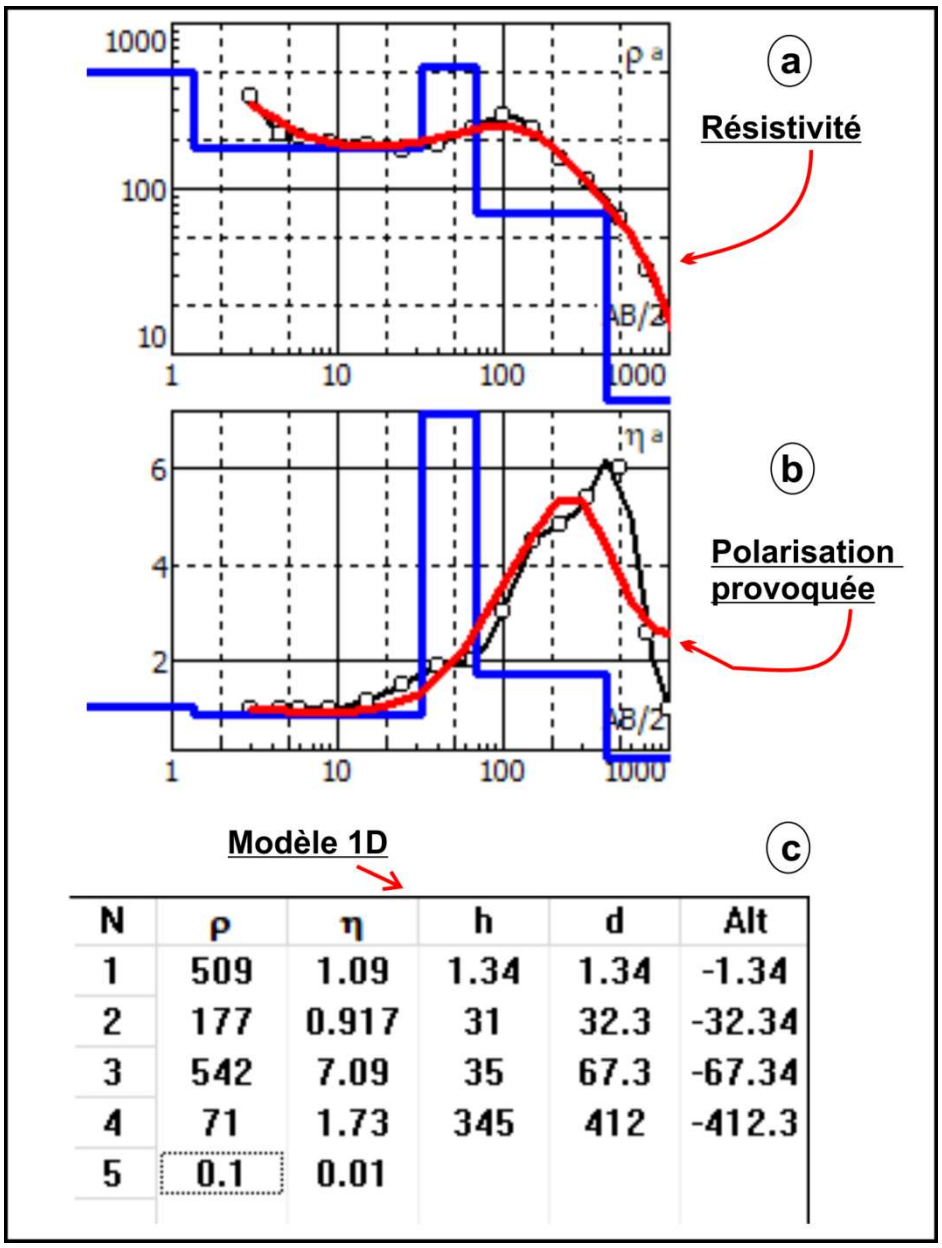
Le premier panneau (figure 21) montre l'interprétation de la résistivité en termes de modèle 1D. L'interprétation a permis de mettre en évidence 5 couches (fig. 21 (a)).

- La première couche de résistivité 509 Ωm et épaisseur (1.34 m).
- La deuxième couche de résistivité 177 Ωm et épaisseur (31 m).
- La Troisième couche de résistivité 542 Ωm et épaisseur (35 m).
- La Quatrième couche de résistivité 71 Ωm et épaisseur (345 m).
- La Cinquième couche de résistivité 0.1Ωm.

Le deuxième panneau montre l'interprétation de la polarisation provoquée en termes de modèle 1D. L'interprétation a permet de mettre en évidence 5 couches (fig. 21 (b)). :

- La première couche de chargeabilité 1.09 % et épaisseur (1. 34 m).
- La deuxième couche de chargeabilité 0.917 % et épaisseur (31 m).
- La troisième couche de chargeabilité 7.09 % et épaisseur (35 m).
- La quatrième couche de chargeabilité 1.73% et épaisseur (345 m).
- La Cinquième couche de chargeabilité 0.01%.

Le troisième panneau montre l'interprétation du tableau récapitulatif de résistivité, de chargeabilité, épaisseur, profondeur cumulative et altitude en termes des couches à modèle 1D. L'interprétation a permet de mettre en évidence 5 couches (fig. 21 (c)).



N	ρ	η	h	d	Alt
1	509	1.09	1.34	1.34	-1.34
2	177	0.917	31	32.3	-32.34
3	542	7.09	35	67.3	-67.34
4	71	1.73	345	412	-412.3
5	0.1	0.01			

Figure 21: Graphe d'interprétation de sondage électrique avec la polarisation provoquée (SEV-PP).

CONCLUSION GENERALE

Ce travail présente les résultats des études géologiques et géophysiques réalisées au niveau de l'anticlinal du Djebel Ed Dalaa, situé dans la région d'El Ma El Abiod (wilaya de Tébessa), faisant partie de l'Atlas saharien oriental. L'objectif principal était de réviser la structure géologique de la zone d'étude et d'évaluer son potentiel minéralogique.

La carte géologique schématique et la coupe structurale interprétative réalisées ont mis en évidence une série stratigraphique allant du Trias au Quaternaire, affectée par une tectonique complexe marquée par le diapirisme salifère triasique et les compressions postérieures.

Le sondage électrique vertical (SEV) a permis d'identifier plusieurs contrastes de résistivité, traduisant l'alternance de couches résistantes et conductrices, ainsi que la présence de structures favorables à la minéralisation.

La méthode de polarisation provoquée (PP) a mis en évidence des anomalies de chargeabilité qui indiquent des zones riches en minéraux sulfurés. Ces anomalies coïncident souvent avec des zones de fracturation ou des interfaces lithologiques propices à la circulation de fluides minéralisateurs.

Le profilement électrique combiné (PEC) a fourni une image plus détaillée des hétérogénéités superficielles du sous-sol et a permis de mieux cerner les zones conductrices.

Les coupes géo-électriques réalisées montrent des anomalies marquées à la fois par une faible résistivité et une forte chargeabilité, ce qui suggère un fort potentiel en barytine ou autres minéralisations associées.

Le sondage (SEV-PP S08) indique la présence de cinq couches distinctes, dont plusieurs présentent une forte chargeabilité, correspondant aux calcaires micritiques, calcaires argileux et marnes, soulignant des zones riches en substances minérales.

Le sondage mécanique SML3, quant à lui, a traversé deux niveaux riches en barytine, chacun d'une épaisseur de 5 m, encaissés dans des dolomies bréchiques du Trias.

En conclusion, l'intégration des données géologiques et géophysiques confirme l'existence d'un potentiel minier significatif dans la région du Djebel Ed Dalaa, en particulier en barytine.

Ce travail fournit une base solide pour orienter les futures campagnes de prospection et de valorisation des ressources minérales locales.

BIBLIOGRAPHIE

1. **Aliev, M. M., Aitlooussine, N., & Benolloherit, A. (1971).** Structures geologiques et perspectives en petrole et en gaz des Atlas Algeriens. SONATRACH report, Algeria, 203.
2. **ALLOUANI, M. R., & SOUALHIA, I. E. (2022).** Prospection géophysique par gravimétrie et par résistivité et par polarisation provoquée: Cas des secteurs d'El Fedj et d'Oum Sbâa (Boukhadra, Tébessa) (Doctoral dissertation, Université Larbi Tébessi-Tébessa).
3. **Aoudjehane, M., Bouzenoune, A., Rouvier, H., & Thibieroz, J. (1992).** Halocinèse et dispositifs d'extrusion de trias dans l'Atlas saharien oriental (NE Algérien). Géologie Méditerranéenne, 19(4), 273-286p.
4. **Benkhedda, A. B. D. E. L. H. A. K. I. M., Defaflia, N., Cherif, A. M. I. N. E., Naimi, M. N., Mazouz, E. H., & Palma-Ramírez, A. R. T. U. R. O. (2021).** Shallow marine trace fossils from the Middle Miocene of the Tebessa Basin (NE Algeria) and their palaeonvironmental implications. Revista Brasileira de Paleontologia, 24(4), 323-335.
5. **Blés J. L. (1969).** Contribution à l'étude de déformations cassantes de la feuille Morsott (SE Constantinois-Alger). Les micros fracturations et leur relation avec les failles et les plis. Publications de service géologique de l'Algérie. (Série N°11), Bulletin N°39, pp. 7-17.
6. **Bobatchev, A. (2002).** IPI2Win Software for Vertical Electrical Sounding (VES) Data Interpretation. Moscow State University, Russia.
7. **Boufaa, K., Zerdazi, A., & Morel, F. (1996).** Nouvelles données sur la tectonique plio-quaternaire de l'Atlas saharien (Algérie). Comptes Rendus de l'Académie des Sciences.
8. **Bouzenoune, A. (1993).** Minéralisations péridiapiriques de l'Aptien calcaire: les carbonates de fer du gisement hématitique de l'Ouenza (Algérie orientale) (Doctoral dissertation, Paris 6), 206p.
9. **Busson, G., et Cornee A. (1989).** Quelques données sur les antécédents climatiques du sahara: la signification des couches détritiques rouges et des évaporites du Trias et du Lias- Dogger. Bull. Soc. Géol. France (8), V. 1, pp. 3-11.
10. **Boubaya, D. (2020).** Cours online de géophysique, université de Tébessa.
11. **Castany, G. (1954).** Les bassins sédimentaires de l'Algérie orientale. Bulletin du Service de la Carte Géologique de l'Algérie.
12. **Abiod, C. (2021).** Etude géologique et géophysique des Hameimats (Fossé d'effondrement de Morsott) (Doctoral dissertation).

13. **Chapellier, D. (2000).** Prospection électrique de surface. Cours oneline de géophysique de l'Université de Lausanne, Suisse.
14. **Chelidze, T. L., & Gueguen, Y. (1999).** Electrical spectroscopy of porous rocks: a review—I. Theoretical models. Geophysical Journal International, 137(1), 1-15.
15. **Chouteau, M., & Giroux, B. (2006).** Géophysique appliquée à l'exploration minière. Presses de l'Université du Québec.
16. **Constable, S.C., Parker, R.L., & Constable, C.G. (1987).** Occam's Inversion: A Practical Algorithm for Generating Smooth Models from Electromagnetic Sounding Data. Geophysics, 52(3), 289-300. (Article fondateur sur la méthode d'inversion d'Occam pour les modèles lissés).
17. **David L. (1953).** L'âge Pliocène d'une partie des formations continentales de la région de Souk Ahras. pp216-218.
18. **Degaichia, A. (2014).** Sédimentologie et Paléoenvirennements des sédiments du Pliocène du fossé d'effondrement de Tébessa et ses abords (Atlas saharien oriental, NE de l'Algérie). Thèse de Doctorat. 213p.
19. **Djebari, H. (2011).** ressources et essai de gestions intégrées des eaux du bassin d'EL MA EL Abiod, w. de Tébessa, nord-est algérien.
20. **Dubois, J. D. (2011).** Gnose et manichéisme. Annuaire de l'École pratique des hautes études (EPHE), Section des sciences religieuses. Résumé des conférences et travaux, (118), 151-156. (G. Dubourdieu, 1952).la notice géologique feuille 151 Bou Khadra.
21. **Dubourdieu, G. (1948).** Notice explicative de la carte géologique de Djebel Ouenza (125) au 1 : 50 000.
22. **Dubourdieu, G. Et Durozoy G. (1950).** Observations tectoniques dans les environs de Tébessa et de l'Ouenza (Algérie). Bulletin du service Géologique de France, 5ème série, t. XX, pp.257-266.
23. **Dubourdieu, G. G. (1956).** Étude géologique de la région de l'Ouenza:(confins Algéro Tunisiens). 1. Texte. Service de la carte géologique de l'Algérie, 659p.
24. **Durozoy G. (1947).** Captage d'El Ma El Abiod. Implantation des sondages de reconnaissances. Arch. Au S. C H. rapport du 28/3/1947.Alger.
25. **Durozoy G. (1948) .**Alimentation en eau de Tébessa. Arch. Au S.C.H rapport du 29/1/1948.Alger.
26. **Durozoy, G. (1949).** Rapport sur la géologie de la plaine d'El Ma El Abiod (18 avril 1949). Archives du Service Géologique de l'Algérie.

27. **Durozoy, G. (1956).** Carte géologique de Tébessa au 1/200 000. Notice explicative. Service Géologique de l'Algérie.
28. **Edwards, L. S. (1977).** A modified pseudosection for resistivity and induced-polarization. Geophysics, 42(5), 1020–1036.
29. **Electrorazvedka. (1980).** Méthodes électriques de prospection géophysique. (Traduit du russe). Institut de prospection géophysique, Moscou.
30. **Fleury J.J. (1969).** Stratigraphie du Crétacé et de l'Eocène (Aptien à Lutétien) de la feuille 1/50.000 Morsott, N° 178. Publ. Serv. Géol. Alg. Nlle Série, Bull. N°39, pp. 145-157.
31. **Florsch, N, Camerlynck, C, & Revil, A. (2012).** Direct estimation of the distribution of relaxation times from induced-polarization spectra using a Fourier transform analysis. Near Surface Geophysics, 10(6), 517-531.
32. **Florsch, N., & Muhlach, F. (2018).** Géophysique appliquée pour tous 1: Méthodes électriques (Vol. 1). ISTE Group.
33. **Gazoty, A.Fiandaca, G.Pedersen, J.Auken, E.Christiansen, A. V. (2012).** Mapping of landfills using time-domain spectral induced polarization data: the Eskelund case study. Near Surface Geophysics, 10(6), 575-586.
34. **Glover, P. W. J. (2015).** 11.04–Geophysical Properties of the Near Surface Earth: Electrical Properties. Treatise geophys, 89-137.
35. **Guefaifia O. (1996).** Contribution à l'étude hydrogéologique de la nappe Aquifère d'El Ma El abiod. Thèse de Magistère Univers. Annaba, 143p.
36. **Hamimed, M. (2004).** Étude sédimentlogique et palégéographie des sédiments Miocènes au pays du Nord-est de l'Atlas Saharien des confins algéro-tunisiens. Thèse de doctorat d'état. Université de Constantine, Algérie, 223p.
37. **Hamimed, M., Defaflia, N., Gouaidia, L., Abdessadok, S., & Djerrab, A. (2015).** Approche Stratigraphique et Sedimentologique de Terrasses Alluviales Quaternaires du Site de Ben Hliem Sud-Ouest de Tébessa, (Algérie). European Journal of Scientific Research, 129(4), 395-409.
38. **Idir, M. M., & Hamida, D. I. A. B.** le fer et manganese en algerie: perspectives de développement et de valorisation.
39. **Jouzein, A. (1962).** Paléogéographie de l'Aptien en Tunisie centrale. Notes du Service Géologique de Tunisie.
40. **Khadri, S, Ahmed, M., & Bouzidi, Y. (2022).** Schlumberger array resistivity modeling in layered media. Journal of Applied Geophysics, 205, 104742.

41. **Kowalski W.M. (1997).** Les stades d'effondrement du graben de Tébessa (confins Algero-Tunisien) et la tectonique plicative plio-quaternaire. Bull.Soc. Hist. Nat. Pays de Montbéliard, France.
42. **Kowalski, W. M., Vila, J. M., & Zerdazi, A. (1996).** Tectonique polyphasée du Djebel Bouroumane (Atlas saharien, Algérie). Bulletin de la Société Géologique de France.
43. **Laffite R. (1939).** Etude géologique de l'Aurès. Pub. Serv. Carte géol. Algérie. Bulletin, n 5, 451 p, Alger.
44. **Lekrine, Y. (2015).** Hydrodynamisme et minéralisation du complexe aquifère du bassin frontalier d'El Ma El Abiod Wilaya de Tebessa (SE Algérien). Université Mentouri de Constantine, Mémoire de Master, 157p.
45. **Leroy, M., Gueydan, F., & Dauteuil, O. (2008).** Uplift and strength evolution of passive margins inferred from 2-D conductive modelling. Geophysical Journal International, 172(1), 464-476.
46. **Lesmes, D. P., & Morgan, F. D. (2001).** Dielectric spectroscopy of sedimentary rocks. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 106(B7), 13329-13346.
47. **Loke, M. H., & Barker, R. D. (1994, June).** Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections. In 56th EAEG Meeting (pp. cp-47). European Association of Geoscientists & Engineers.
48. **Marescot, L., Monnet, R., & Chapellier, D. (2008).** Resistivity and induced polarization surveys for slope instability studies in the Swiss Alps. Engineering Geology, 98(1-2), 18-28.
49. **Marshall, D. J., & Madden, T. R. (1959).** Induced polarization, a study of its causes. Geophysics, 24(4), 790-816.
50. **Masse, P. & Thieuloy, J. P. (1979).** Précisions sur l'âge des calcaires et des formations associées de l'Aptien du Sud-Est constantinois (Algérie). Conséquences paléogéographiques. Bull. Soc. Géol. Fr, vol.7, n°1, pp. 65-71.
51. **Merriam, J. B. (2007).** Induced polarization and surface electrochemistry. Geophysics, 72(4), F157-F166.
52. **Orellana, E.** & **Mooney, H.M. (1966).** Master Tables and Curves for Vertical Electrical Sounding over Layered Structures. Interciencia, Madrid. (Ouvrage de référence pour les abaques classiques d'interprétation des SEV)
53. **Perthuisot, V. & Rouvier, H. (1988).** Les relations métal-soufre-eau hydrocarbures microorganismes et la genèse des concentrations de sulfures et de soufre des diapirs évaporitiques. In: H. Pélissonier & J. F. Sureau (éds) : Mobilité et concentration des métaux de

base dans les couvertures sédimentaires : Manifestations, mécanismes, prospection. Document du BRGM, n°183, pp. 269-278.

54. **Revil, A., & Florsch, N. (2010).** Determination of permeability from spectral induced polarization in granular media. Geophysical Journal International, 181(3), 1480-1498.
55. **Revil, A., Abdel Aal, G. Z., Atekwana, E. A., Mao, D., & Florsch, N. (2015).** Induced polarization response of porous media with metallic particles—Part 2: Comparison with a broad database of experimental data. Geophysics, 80(5), D539-D552.
56. **Rouabhia A. (2006) .**Vulnérabilité et risque de pollution des eaux souterraines de la nappe des Sables miocène de la plaine d'El Ma El Abiod. N.E Algérie. Thèse de doctorat en sciences, 210p,Université d'Annaba, Algérie.
57. **Rouabhia, A., Baali, F., Fehdi, C., Abderrahmane, B., & Djamel, B. (2011).** Hydrogeochemistry of groundwaters in a semi-arid region. El Ma El Abiod aquifer, Eastern Algeria. Arabian Journal of Geosciences, 4(5-6), 973-982.
58. **Sami, L. (2011).** Caractérisation Géochimiques des fluides minéralisateurs des confins algéro-tunisiens. Thèse, USTHB, 179p.
59. **Schlumberger, C. (1920).** Etude sur la prospection electrique du sous-sol. Gauthier-Villars.
60. **Slater, L., Ntarlagiannis, D., & Wishart, D. (2006).** On the relationship between induced polarization and surface area in metal-sand and clay-sand mixtures. Geophysics, 71(2), A1-A5.
61. **Smati, A. (1986).** Les gisements de Pb-Ba et de Fe du djebel Slata (Tunisie du centrenord) : Minéralisations épigénétiques dans le Crétacé néritique de la bordure d'un diapir de Trias. Gisement de Sidi Amor Ben Salem et de Slata fer. Thèse Doct. 3ème cycle, Lab. Géol. Appl., Univ. P. Et M. Curie, Paris VI, 250 p.
62. **Salhi, S. (2021).** Actualisation des données hydrogéologiques et hydrochimique de la nappe des sables du miocène d'EL MALBIOD, Tébessa NE Algérien (Doctoral dissertation).
63. Telford, W. M., Telford, W. M., Geldart, L. P., & Sheriff, R. E. (1990). Applied geophysics. Cambridge university press.
64. **Titov, K., Komarov, V., Tarasov, V., & Levitski, A. (2002).** Theoretical and experimental study of time domain-induced polarization in water-saturated sands. Journal of applied geophysics, 50(4), 417-433.
65. **Titov, V. S., Hornig, G., & Démoulin, P. (2002).** Theory of magnetic connectivity in the solar corona. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 107(A8), SSH-3.
66. **UGF-BRNO (1971).** Carte des systèmes de failles de la région d'El Ma El Abiod. Rapport technique.

67. **Vaudelet, P., Revil, A., Schmutz, M., Franceschi, M., & Bégassat, P. (2011).** Induced polarization signatures of cations exhibiting differential sorption behaviors in saturated sands. Water Resources Research, 47(2).
68. **Vila J. M. (1980).** La chaîne alpine d'Algérie orientale et des confins Algéro-tunisiens. Thèse Doc. Sc. Nat. Univ. P. et M. Curie, Paris VI, 450 p.
69. **Vila, J. M. (2001).** les avantages d une approche multi-sources (biostratigraphie, sédimentologie, forages, profils sismiques et gravimétrie) pour l'étude de l'halocinèse crétacée (" glaciers de sel", tectonique en radeaux et dômes de sel) et de l'halotectonique tertiaire (plissement des" glaciers de sel", genèse des dômes de sel-plis), des confins algéro-tunisiens. bulletin du service géologique de l'algérie, 12(2), 129-167.
70. **Vila, J. M. 1980.** La chaîne alpine d'Algérie orientale et des confins algéo-tunisiens. Thes.Univ. Paris, 663p.
71. **Vinegar, H. J., & Waxman, M. H. (1984).** Induced polarization of shaly sands. Geophysics, 49(□, 1267- 1287.
72. **Wong, J. (1979).** An electrochemical model of the induced-polarization phenomenon in disseminated sulfide ores. Geophysics, 44(7), 1245-1265.
73. **Zahra, D. F., & Eddine, A. H. (2023).** Etude gravimétrique et Géo-électrique de l'Anticlinal d'Essouabaa (Doctoral dissertation, Université Echahid Chikh Larbi Tébessa-Tébessa).
74. **Zerdazi, A. (1990).** Évolution structurale de l'Atlas saharien oriental. Thèse de doctorat, Université de Besançon.