République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Cheikh 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 : **science de la terre et de l'univers**
Filière : **Géologie**
Option : **Géologie des bassins sédimentaires**

Thème:

Estimation des réserves du gisement de Bled El Hadba et établissement de coupes 3D

Présenté par:

Saadou Nihad

Devant le jury:

Président	Degaichia Amor	MCB	Université de Tébessa
Encadrant	Boubaya Djamel	PROF	Université de Tébessa
Examinateur	Hadjam Riad	MAA	Université de Tébessa

Juin 2025

Remerciement

Tout d'abord je voudrais remercier **ALLAH** - le tout puissant- qui m'a donné la force et la patience pour mener à bien ce travail. Sans Sa volonté, rien n'aurait été possible"ٱلْحَمْدُ لله" .

Je remercie du fond du cœur mes parents pour leur soutien et leur encouragement tout au long de mon parcours.

Je remercie sincèrement Mr. **Le Professeur BOUBAYA Djamel** pour son encadrement, sa disponibilité, et ses conseils tout au long de ce travail.

Mes très vifs remerciements s'adressent à l'ensemble des enseignants du département des Sciences de la Terre et de l'Univers de l'Université de CHAHID CHEIKH LAARBI TEBESSI-Tébessi.

En particulier mes remerciements s'adressent à mes enseignants formateurs en géologie des bassins sédimentaires : **Mr Dr DEGEICHIA Amor, Dr HADJAM Riad, Pr DEFAFLIA Nabil**.

Je tiens à remercier également tous les membres du comité de jury d'avoir accepté d'examiner ce modeste travail.

Dédicace

Je dédié ce modeste travail à :

À mes chères parents,

Vous êtes mon premier souffle et ma dernière prière, Vous êtes la lumière qui éclaire mes pas et l'abri où mon cœur se repose.

Papa **Abdelouaheb** force tranquille dans mes tempêtes, Maman **Nadia** douce mélodie de mes jours heureux.

À vous, qui avez semé en moi le courage et l'amour, je dédie ce travail, modeste fruit de vos sacrifices et de votre tendresse infinie. Que ces pages portent l'empreinte de votre dévouement et le reflet de votre amour inépuisable.

À mes chères sœurs,

Safa, **Malak**, **Rahma** et **Roukaia**, vous êtes plus que des sœurs, vous êtes un bout de mon âme, un refuge dans les tempêtes, un éclat de joie dans mes journées. Votre présence rend tout plus beau et chaque instant à vos côtés est un cadeau précieux.

À vous, je dédie ce travail, avec tout l'amour et la reconnaissance que je vous porte.

À mes chères amies,

Malak, **Fatima Zahra**, **Dounia**, **Aya**, et **Takwa**...

Vous n'êtes pas seulement des amies, vous êtes ma famille, mon soutien, mes sœurs d'âme. Avec vous, j'ai appris la vraie signification de l'amitié : le partage des rires, des larmes, des moments précieux et inoubliables.

Merci d'être une partie de ma vie, merci pour votre présence lumineuse et chaque instant passé ensemble. Je vous porte dans mon cœur pour toujours, et je souhaite que notre amitié reste forte et sincère à jamais.

SAADOU NIHAD

ملخص

تركز هذه الرسالة على تقدير احتياطيات طبقة الفسفات الرئيسية في رواسب بلاد الحدبة، الواقعة جنوب شرق تبسة، الجزائر. تستند كما أنتجت الدراسة مقاطع عرضية طبقية صخرية ثنائية الأبعاد، ومخططات سياج، ومخطط كتلي .الدراسة إلى تحليل حفرة حفر تُظهر النتائج . تجمع الأساليب المستخدمة بين تطبيق قاعدتي سيمبسون وشبه المنحرف لتقدير أحجام وكتل الفوسفات بدقة .ثلاثي الأبعاد مليون متر مكعب 78.4التي تم الحصول عليها حجمًا تقديريًا يبلغ حوالي 70.64 مليون متر مكعب باستخدام طريقة كريجينغ و تؤكد هذه النتائج الإمكانات . مليون طن على التوالي172 مليون طن و155باستخدام طريقة المسافة العكسية. وتبلغ الكميات المقابلة الاقتصادية الكبيرة للرواسب، وتساهم في فهم أفضل للجيولوجيا المحلية لدعم مشاريع التعدين المستدامة المستقبلية.

Abstract

This work focuses on estimating the reserves of the main phosphate layer of the de Bled El Hadba phosphate deposit, located southeast of Tebessa, Algeria. The study is based on the analysis of 28 drill holes. The study also produced 2D lithostratigraphic cross-sections, fence diagrams, and a 3D block diagram. The methods used combine the application of Simpson's and Trapezoidal rules to accurately estimate phosphate volumes and masses. The results obtained show an estimated volume of approximately 70.64 million m^3 using the Kriging method and 78.4 million m^3 using the inverse distance method. The corresponding tonnages are 155 million tons and 172 million tons, respectively. These results confirm the significant economic potential of the deposit and contribute to a better understanding of the local geology to support future sustainable mining projects.

Résumé

Ce travail porte sur l'estimation des réserves de la couche principale de phosphate du gisement de Bled El Hadba, situé au sud-est de la wilaya de Tébessa, Algérie. L'étude repose sur l'analyse de 28 sondages. L'étude a permis aussi d'établir des coupes lithostratigraphiques 2D, des coupes en clôture (fence diagram) et l'établissement d'un bloc digramme 3D. Les méthodes utilisées combinent l'application des règles de Simpson et du Trapèze afin d'estimer les volumes et les masses de phosphate avec précision. Les résultats obtenus montrent un volume estimé à environ 70.64 millions de m³ par la méthode du Kriging et à 78.4 millions de m³ par la méthode de l'inverse des distances. Les tonnages correspondants sont respectivement de 155 millions de tonnes et 172 millions de tonnes. Ces résultats confirment le potentiel économique important du gisement et contribuent à une meilleure compréhension de la géologie locale pour soutenir de futurs projets d'exploitation durable.

Mots clés : Bled El Hadba, Phosphate, réserves.

TABLE DES MATIERES

.....11
I. INTRODUCTION :.....1
II. ORIGINALITE ET OBJECTIF DE L'ETUDE :.....1
III. SITUATION GEOGRAPHIQUE DE LA REGION DE TEBESSA :.....2
IV. SITUATION GEOGRAPHIQUE DE LA ZONE D'ETUDE :.....2
I. INTRODUCTION :.....6
1. Litostratigraphie :.....6
A. Le trias :.....6
a. Le crétacé :.....6
b. Le Cenomanien :.....7
c. Le Turonien :.....7
d. Le Senonien :.....7
e. Le Miocène :.....7
f. Le Quaternaire :.....8
II. GEOLOGIE LOCALE :.....10
2. La stratigraphie :.....13
a. Quaternaire :.....13
b. Miocène :.....13
c. Yprésien :.....13
d. Thanétien :.....13
e. Selandien (ex: montien) :.....13
3. 14
4. La tectonique :.....15
a. L'anticlinal de Djebel Onng :.....15
b. Les failles normales :.....15
5. Les phosphates :.....15
a. Aperçu sur le phosphate :.....16
b. Description des phosphates à l'échelle mondiale :.....16
c. Description des phosphates à l'échelle africaine :.....16
d. Minéralogie des phosphates :.....16
e. Économie des phosphates et leurs utilisations :.....17
f. Les phosphates en Algérie :.....17
I. CALCUL DES RESERVES PAR LES ANCIENS TRAVEAUX :.....20
II. APERÇU SUR LE CALCUL DES RESERVES DES GISEMENTS MINIERS :.....21

III. CLASSIFICATION DES RESERVES (A1, A2, B, C1, C2) : 21
1. Catégorie A1 : 21
2. Catégorie A2 : 22
3. Catégorie B : 22
4. Catégorie C1 : 22
5. Catégorie C2 : 22
IV. CLASSIFICATION CONVENTIONNELLE : 22
1. Développé : 23
2. Prouvé 24
3. Probable 24
4. Possible 25
V. METHODES CONVENTIONNELLES DE CALCUL DES RESERVES : 25
1. Méthode des Polygones 25
2. Méthode des Triangles : 25
3. Méthode des Sections : 25
4. Méthode de l'Inverse des Distances (IDW) : 25
5. Méthode Géostatistique (Krigeage) : 26
VI. FACTEURS CLES INFLUENÇANT LE CALCUL : 26
VII. CLASSIFICATION-CADRE DES NATIONS UNIES : 26
VIII. LES VOLUMES PAR SURFER : 28
1. Règle du Trapèze Étendue (Extended Trapezoidal Rule) 28
2. Règle de Simpson Étendue (Extended Simpson's 1/3 Rule) 28
3. Règle de Simpson 3/8 Étendue (Extended Simpson's 3/8 Rule) 28
4. Considérations dans Surfer 29
I. CALCUL DES RESERVES DE LA COUCHE PRINCIPALE : 31
II. CALCUL DU VOLUME A PARTIR DES GRILLES : 32
1. Résultats de calcul du volume en utilisant la méthode de Kriging : 32
a. Surface supérieure (Upper Surface), le toit de la couche : 32
b. Surface inférieure (Lower Surface), le mur de la couche 32
2. Résultats de calcul du volume en utilisant la méthode Inverse distance : 33
III. CALCUL DE LA MASSE DES RESERVES : 35
IV. COUPES LITHO-STRATIGRAPHIQUES 37

Liste des figures

Figure 1 : Situation géographique de la zone d'étude 3
Figure 2 : Plan de situation de la zone d'étude sur le modèle numérique de terrain (SRTM, data) (A) vue d'ensemble (B) vue détaillée. Coordonnées WGS84 UTM zone 32N. 4
Figure 3 : Colonne stratigraphique synthétique des monts du Mellègue (d'après : Dubourdieu ...9
Figure 4 : carte géologique schématique de Bir el Ater 250 000 « modifiée par Saadou. N » 11
Figure 5 : Coupes géologiques à travers le gisement de Bled El Hadba (B.R.G.M, 1993) 12
Figure 6 : Log lithostratigraphique de Bled El Hadba (EREM, 1987) « modifiée par Saadou. N » 14
Figure 7 : systèmes de classification des réserves conventionnels montrant diverses catégories de réserves et de ressources basées sur une expérience géologique enrichie-une bonne option pour les petits acteurs de l'industrie minière (Swapan, K, H. 2018). 24
Figure 8 : Périmètre de la concession en coordonnées UTM, Nord Sahara 1959 zone 32N. 31
Figure 9 : carte de localisation des coupes et des diagrammes de clôture 37
Figure 10 : coupes litho-stratigraphiques bloc diagramme 3D.....38
Figure 11 : azimut de 185° et angle de pendage de 30° par rapport à l'horizontale.....39
Figure 12 : azimut de 245° et angle de pendage de 35° par rapport à l'horizontale. 40
Figure 13 : coupe stratigraphique 2D. 42
Figure 14 : coupe stratigraphique 2D. 43
Figure 15 : carte du toi des phosphates.....45
Figure 16 : carte isopach des phosphates.....46

Liste des tableaux

Tableau 1 : Example of United Nation Framework Classification (UNFC) Codification System. (Swapan, K, H. 2018).....28
Tableau 2 : Coordonnées de la concession concernée par le calcul des réserves. 31
Tableau 3 : Résumé de calcul des réserves par les deux méthodes 36

CHAPITRE I GENERALITE

CHAPITRE I GENERALITE

I. INTRODUCTION :

La région de Tébessa est comme pour ces richesses en ressources minérales. Le plus grand gisement du pays de phosphate de Bir el Ater est situé sur son territoire. Les données de 28 sondages sont utilisées pour estimer les réserves du gisement de Bled el Hadba, situé au SE de Bir el Ater.

Bien que les réserves aient été estimées par diverses méthodes, nous avons adopté une approche distincte pour recalculer ces dernières. Celle-ci repose sur une combinaison des méthodes des trapèzes et de Simpson. Contrairement aux techniques antérieures, cette approche ne recourt pas à une épaisseur moyenne du minerai, mais à une méthode d'intégration prenant en compte une épaisseur variable entre le toit et le mur de la couche minéralisée. Au lieu, elle utilise une technique intégrale entre les grilles du toit et du mur de la couche.

Ce mémoire est organisé en IV chapitres, qui abordent les différents aspects du thème étudié, ci-après :
Chapitre I : Généralités.

Chapitre II : Géologie de la région d'étude.

Chapitre III : calcul des réserves.

Chapitre IV : Résultats et discussions.

II. ORIGINALITE ET OBJECTIF DE L'ETUDE :

Le but de cette étude est d'estimer les réserves de phosphate du gisement de Bled El Hadba en se basant sur les données de sub-surface incluant 28 sondages mécaniques. Les réserves ont été déjà calculés par plusieurs chercheurs et organismes (EREM 1987, BRGM 1994, FERPHOS 2001)

Dans cette étude nous avons recalculés les réserves en se basant sur le technique de calcul de volume (surfer 25), cette méthode flexible utilise 3 techniques (Trapezoidal, Simpson's, Simpson's 3/8). Cette technique emploie une méthode intégrale et utilise une surface supérieure (Upper Grid) et une surface inférieure (Lower Grid). Cette méthode, utilise les épaisseurs réelles des couches et non l'épaisseur moyenne, comme il a été utilisé auparavent (Merbouti, 2008).

Ce travail a été réalisé en plusieurs étapes:

- Etablissement des cartes géologiques, des coupes géologiques et des logs litho stratigraphiques par CorelDRAW.
- Etablissement de coupe 3D des couches phosphatées avec Rockworks17.
- Calcul des volumes par Surfer25.

III. SITUATION GEOGRAPHIQUE DE LA REGION DE TEBESSA :

La région de Tébessa, située dans l'Atlas saharien oriental à environ 600 km au sud-est d'Alger, couvre une superficie de 13 878 km² et partage une frontière de 297 km avec la Tunisie, englobant 10 communes frontalières. Elle est délimitée par :

- La wilaya de Souk Ahras au nord.
- La wilaya Oum El Bouaghi et Khenchla à l'ouest.
- La wilaya El Oued au sud.
- La Tunisie à l'est.

D'un point de vue géographique, elle appartient à deux grandes régions : l'Atlas plissé, caractérisé par les monts de Nememchas et de Tébessa, où se trouvent des sommets remarquables tels que Djebel Ozmor (1 591 m), Djebel Kemakem (1 277 m) et Djebel Onk (1 358 m). La région comprend aussi les Hauts Plateaux (Darmoun, Safsaf El-Ouesra, Berzguel) et les hautes plaines (Morsott, Mechentel, Behiret Larneb, Gassés, Bhiret Thlidjene, etc.). Enfin, au sud, le domaine saharien présente une structure tabulaire dominée par le Plateau du Sahara.

IV. SITUATION GEOGRAPHIQUE DE LA ZONE D'ETUDE :

Le site étudié Bled El Hadba occupe une position périphérique dans le district de Bir El Ater wilaya de Tébessa, marquant la bordure orientale de l'Algérie. Son emplacement géographique (34,65°N, 8,16667°E, alt. 758 m) le place dans un contexte topographique de transition entre les localités adjacentes de Bled Frich et Bled Es Salb (figure 1).

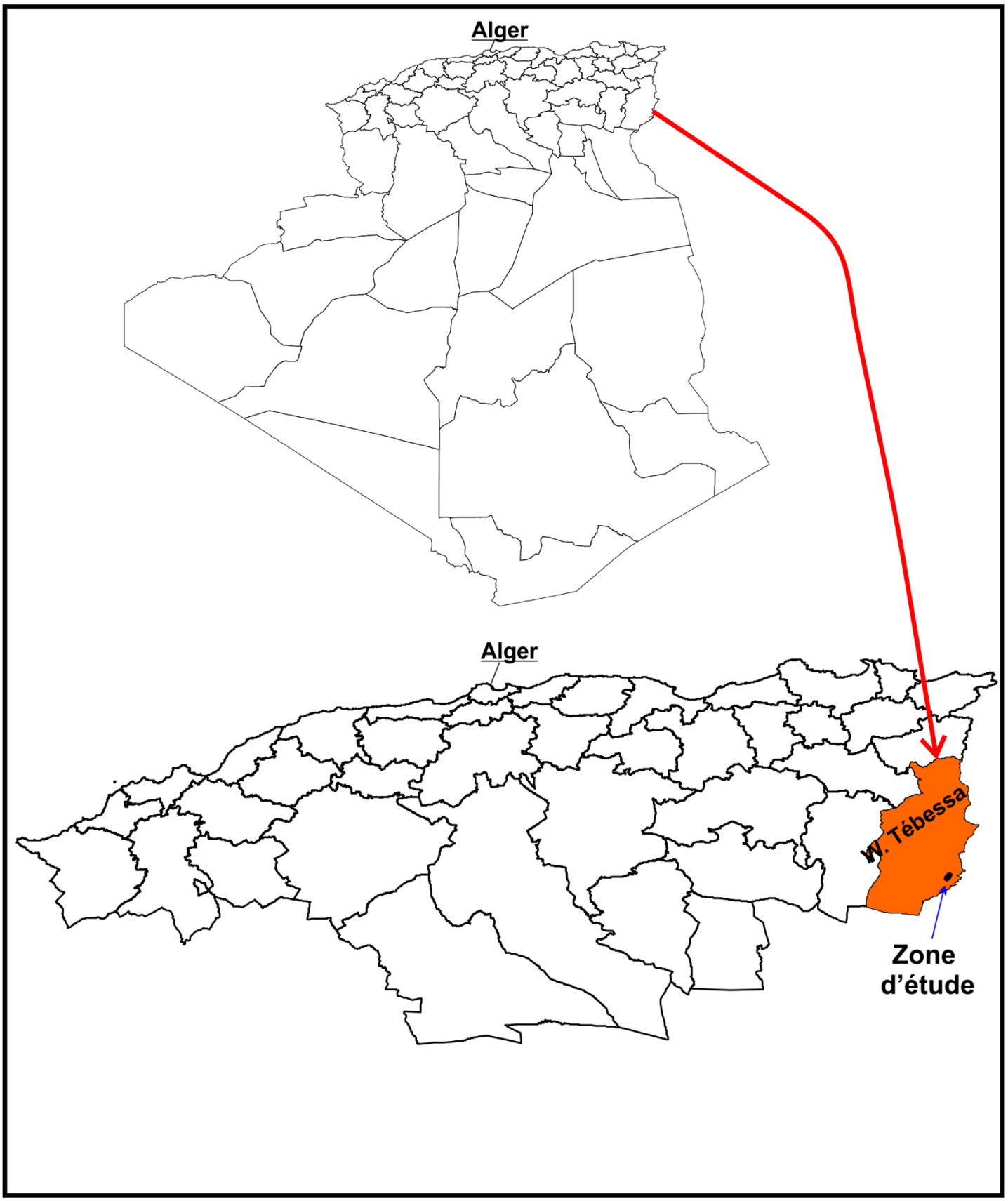


Figure 1 : Situation géographique de la zone d'étude.

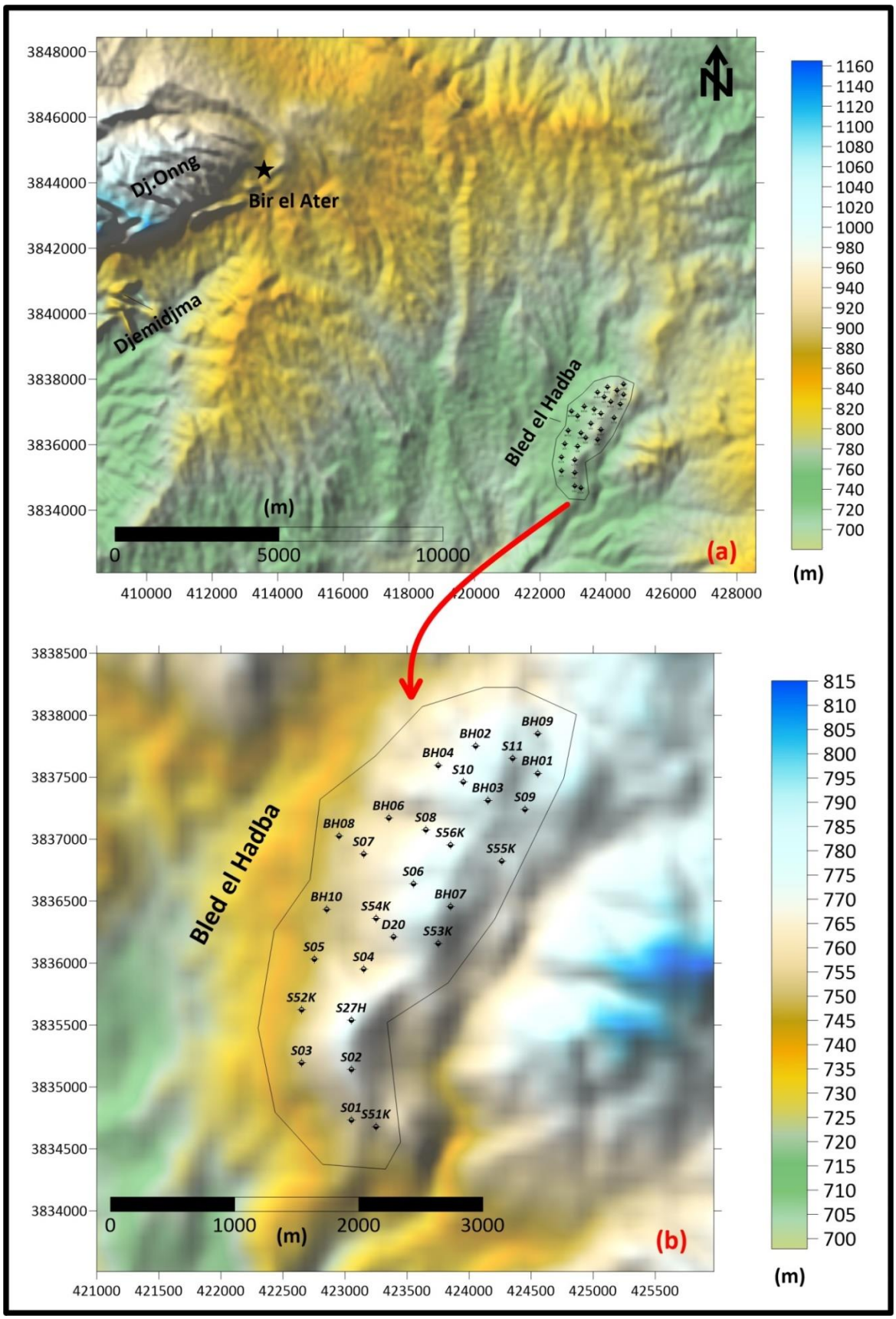


Figure 2 : Plan de situation de la zone d'étude sur le modèle numérique de terrain (SRTM, data) (A) vue d'ensemble (B) vue détaillée. Coordonnées WGS84 UTM zone 32N.

CHAPITRE II GEOLOGIE DE LA ZONE D'ETUDE

CHAPITRE II GEOLOGIE DE LA REGION D'ETUDE

I. INTRODUCTION :

Les Monts de Mellègue appartiennent à l'Atlas saharien, qui s'étend jusqu'en Tunisie sous le nom d'Atlas tunisien. Ils sont situés à mi-chemin entre Souk-Ahras (nord) et Tébessa (sud) (Dubourdieu, 1948).

Cette région des confins algériens est caractérisée par des formations géologiques du Trias diapirique, du Crétacé (Barrémien à Sénonien) et du Miocène. Son relief accidenté résulte principalement des calcaires aptiens et des paysages chaotiques du Trias (Dubourdieu, 1948).

Dans l'Atlas saharien oriental, les structures extrusives s'étendent sur plusieurs kilomètres selon une orientation NE-SW, avec une morphologie en dôme à cœur triasique (Aoudjehane et al., 1992). Ces formations triasiques ont été particulièrement étudiées dans le domaine atlasique, notamment dans la « zone des diapirs », située entre Tunis (Tunisie) et Tébessa (Algérie), où elles sont les plus abondantes (Perthuisot et al., 1998).

1. Litostratigraphie :

A. Le trias :

Le Trias, qui n'apparait qu'en diapirs, comprend des marnes multicolores à gypse qui emballent divers matériaux rocheux. Très salées, de teinte verte, rouge ou violette, les marnes sont un exemple typique du faciès lagunaire de l'étage, bien connu en Algérie (G. Dubourdieu, 1948). La puissance des dépôts triasiques peut dépasser 1000 m dans l'Atlas saharien (Alièv et al. 1971; Busson et Cornet, 1989).
Le faciès argilo-gypseux dolomitiques à diabases et micro diabases caractérise les séries triasiques supérieures, tandis que leur partie inférieure ne contient que du sel gemme. Les masses triasiques sont bordées par d'importantes formations calcaires, classiquement rapportées à l'Aptien et attribuées à une sédimentation récifale (G. Dubourdieu, 1956).

a. Le crétacé :

Le crétacé affleure largement dans les Monts du Mellègue. Il est représenté par des termes inférieurs et supérieurs :

1. **Crétacé inférieur :**

Dans notre région, il comprend les dépôts du: Barrémien, Aptien, Albien et Vraconien. Ces formations sont percées par les diapirs triasiques.

2. **Crétacé supérieur :**

Ces formations comportent les dépôts du : Cénomanien, Turonien et Sénonien.

b. Le Cenomanien :

Il est représenté par une série monotone de marnes grises et gris verdâtre à nombreux filons calcitiques. Dans les niveaux supérieurs, les marnes passent à des calcaires marneux à composants gréseux avec des intercalations de calcaires gréseux (0,1 à 0,3m). La puissance du Cénomanien varie entre 600 et 900m (A. Degaichia, 2014).

c. Le Turonien :

Le Turonien est très bien développé, son épaisseur peut atteindre 1000 m (G. Dubourdieu, 1956,1959). Il est constitué par des calcaires et marno-calcaires à la base avec de nombreuses empreintes d'Inocéramus. Ces calcaires et marno-calcaires sont suivis par une puissante formation de marnes argileuses riches en ammonites, huîtres, et divers lamellibranches (L. Sami, 2011).

d. Le Senonien :

Le Sénonien débute par une formation de calcaires marneux et de marnes du Sénonien inférieur de puissance ne dépassant pas les 300 m (G. Dubourdieu, 1959); suivi par une formation du Sénonien supérieur (Campanien-Maastrichtien), d'épaisseur variant de 200 à 600 m, visible au sud de Tébessa, qui débute par des calcaires marneux du Campanien qui passent à des marnes gypsifères et se terminent par des calcaires massifs à rognons de silex riches en Inocéramus du Maastrichtien (L. Sami, 2011).

e. Le Miocène :

Les dépôts miocènes reposent en discordance sur les formations plus anciennes et forment leur couverture. Ils sont composés de conglomérats, grès, argiles, marnes et calcaires lacustres. La puissance du Miocène varie de 50m à 200m. Les travaux de M. Hamimed (2004) indiquent la présence de trois unités miocènes (Burdigalien, Langhien-Serravalien, et Tortonien) et se traduisent par trois cycles eustatiques à conglomérats transgressifs, composés de cycles sédimentaires d'ordre2 ou 3 suivant la dynamique des nappes sédimentaires. Deux grands bassins sédimentaires miocènes sont identifiés : le bassin d'El Ma Labiod au Sud et le bassin d'El Aouinet-Meskiana au Nord (M. Hamimed, 2004; A. Degaichia, 2014).

f. Le Quaternaire :

Les plus anciennes formations continentales appartiennent au Quaternaire supérieur (G. Dubourdieu, 1959). Celui-ci est représenté essentiellement par des dépôts argileux et conglomératiques. Ces formations quaternaires constituent la plus grande partie du comblement du fossé d'effondrement Morsott-Tébessa dont l'épaisseur est estimée à plus de 170 m (L. Sami, 2011).

Il est à noter qu'aucun dépôt pliocène ou pléistocène ancien n'a été observé dans la région. Selon Dubourdieu (1956 et 1959), ce phénomène serait à mettre en relation avec une surrection régionale suivi d'une érosion intense à cette époque (L. Sami, 2011).

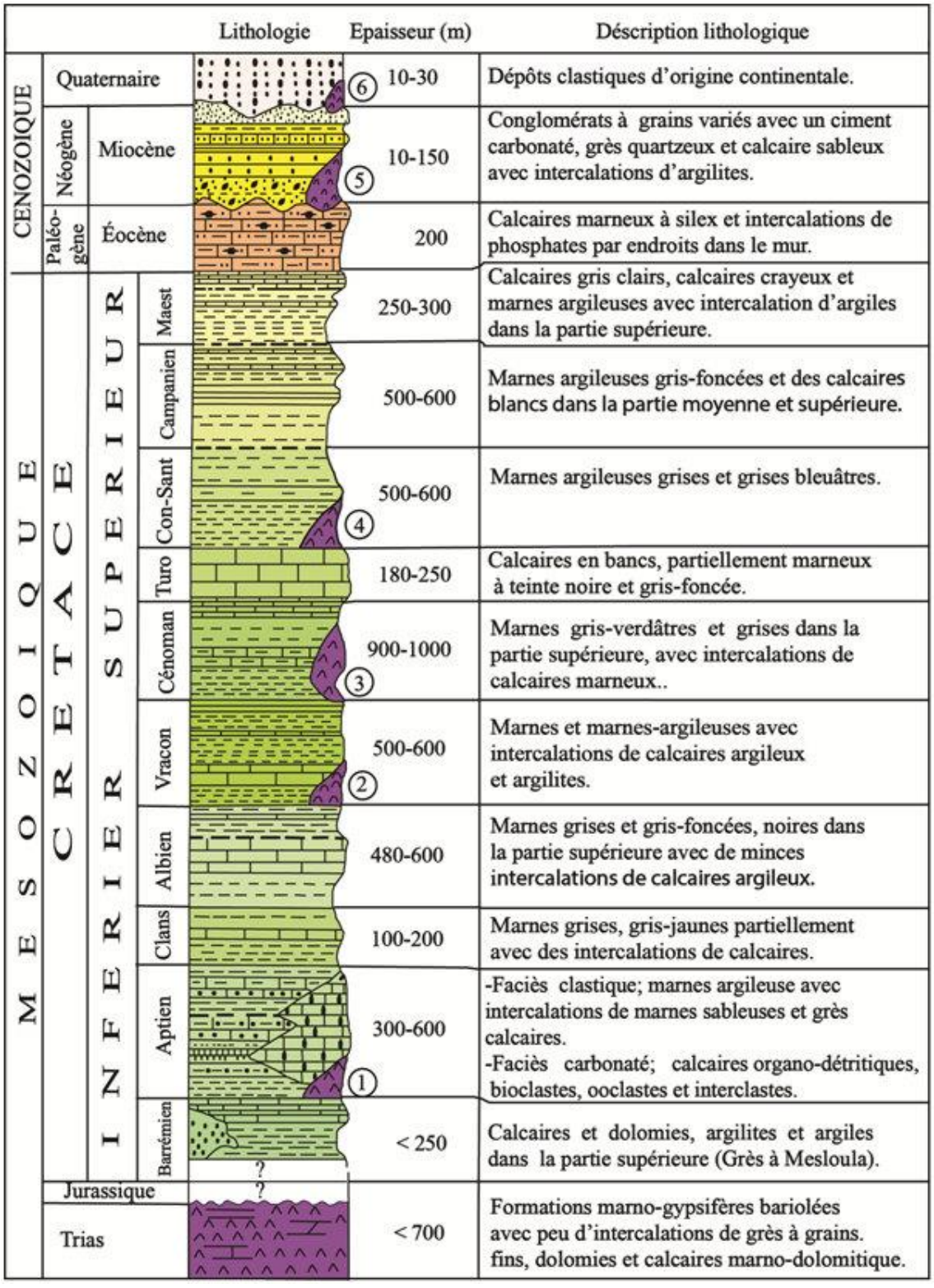


Figure 3 : Colonne stratigraphique synthétique des monts du Mellègue (d'après : Dubourdieu 1956, 1959 ; David 1956; Madre 1969 ; Fleury 1969 ; Thibieroz et Madre 1976 ; Chikhi, 1980 ; Otmanine 1987, Bouzenoune 1993 et Vila et al, 2000 ; in Sami, 2004) « modifiée par ABID. C»

II. GEOLOGIE LOCALE :

La région de Bir El Ater appartient à l'Atlas saharien et se distingue par une série de formations sédimentaires datant du Crétacé au Cénozoïque. Son substrat géologique est principalement constitué de roches marno-calcaires, gréseuses et phosphatées. Elle abrite le gisement de Djebel Onk et Bled El Hadba, l'un des plus grands d'Algérie, reconnu pour sa richesse en phosphate (P_2O_5 > 24 %). Sur le plan tectonique, la région présente des plis et des failles orientées NE–SW, témoignant des mouvements compressifs alpins (figure 4).

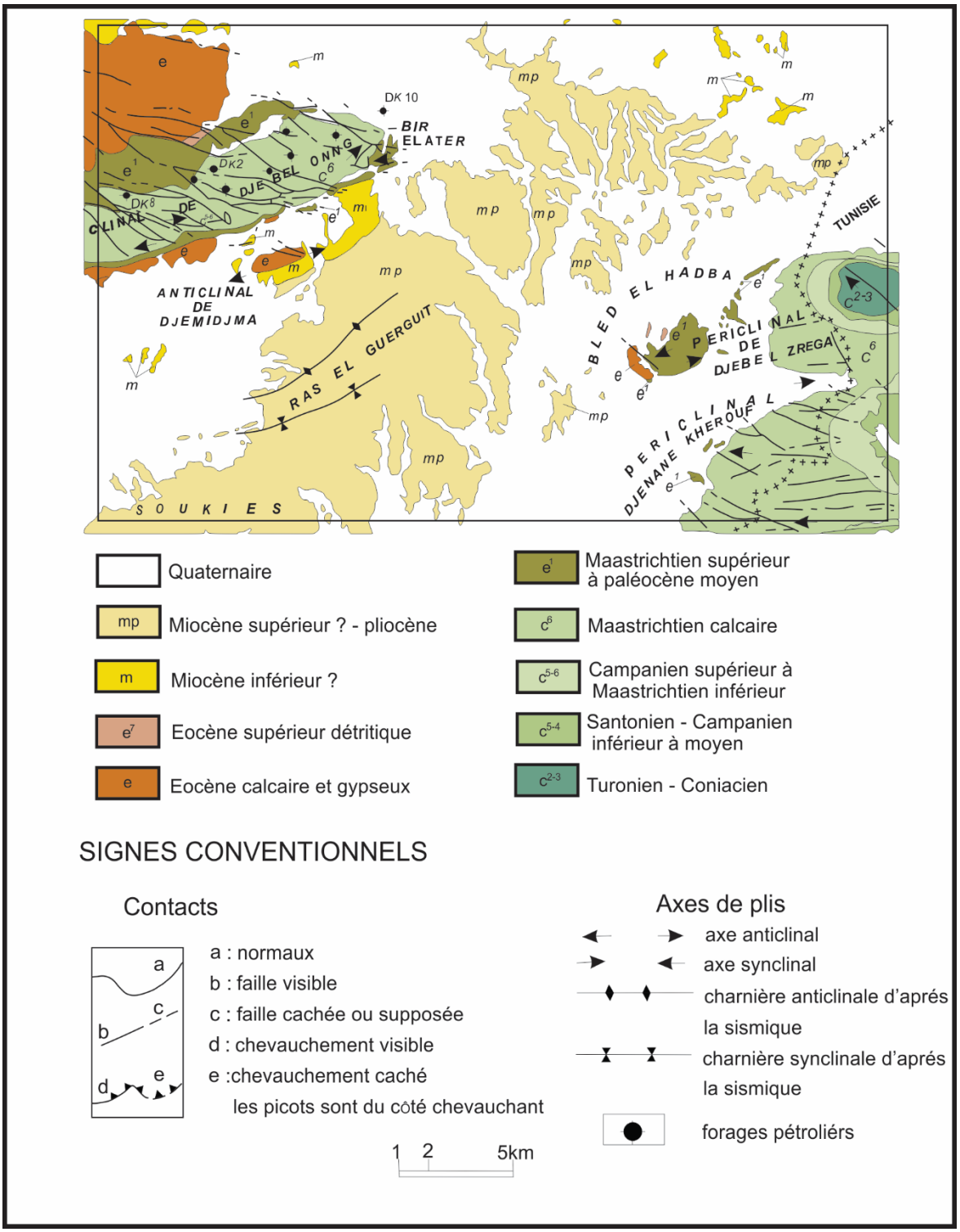


Figure 4 : carte géologique schématique de Bir el Ater 250 000 « modifiée par Saadou. N »

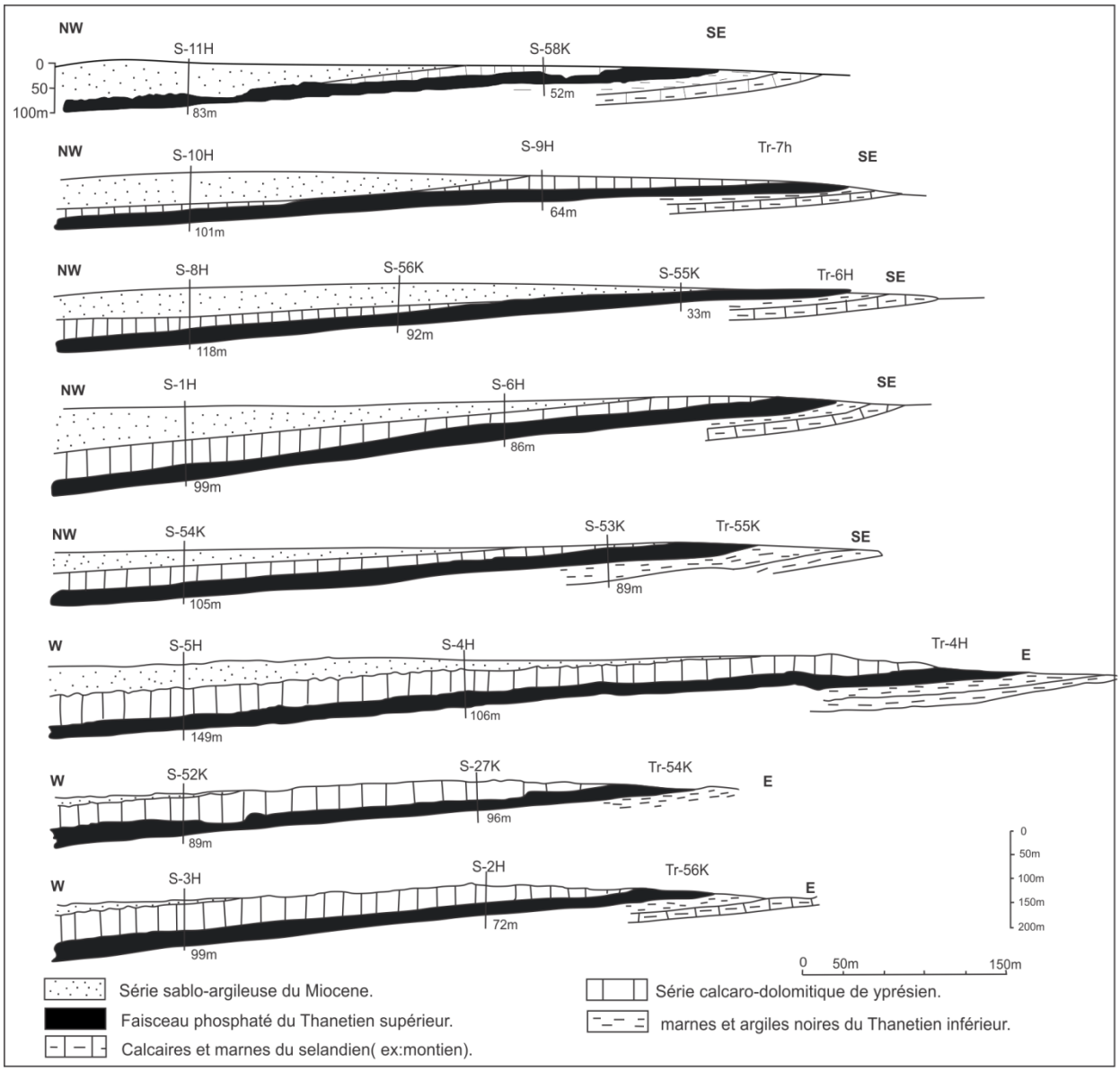


Figure 5 : Coupes géologiques à travers le gisement de Bled El Hadba (B.R.G.M, 1993)

≪ modifiée par Saadou .N≫

2. La stratigraphie :

a. Quaternaire :

Dans la zone d'étude le quaternaire occupe une vaste superficie ; les formations quaternaire sont représentés par occupent de vastes étendues dans la zone d'étude.

b. Miocène :

Les dépôts du Miocène reposent sur les diverses strates du Tertiaire ayant subi une érosion. Ils se composent de conglomérats, de sables blancs de granulométrie moyenne à fine, non calcaires, avec des intercalations d'argile, de schistes argileux, de grès blancs, de graviers et de galets.

c. Yprésien :

Il est caractérisé par une alternance de calcaires, de calcaires dolomitiques, d'intercalations phosphatées et de lits de silex noire.

d. Thanétien :

1. **Thanétien inférieur**

Le Thanétien inférieur se compose principalement de schistes marneux, présentant des intercalations carbonatées discontinues dans sa partie basale. Ces niveaux calcaires, d'épaisseur variable, renferment une faune de gastéropodes témoignant d'un environnement marin peu profond.

2. **Thanétien supérieur :**

Le dépôt phosphaté du Thanétien supérieur dans le gisement de Kef Essenoun est composé de trois sous-couches superposées (Prianet Cortiel, 1993).

e. Selandien (ex: montien) :

Il est composé de calcaire dolomitique et de lumachelles, avec des intercalations de marnes et de dolomie ; l'épaisseur de ces couches est d'environ de 100 m.

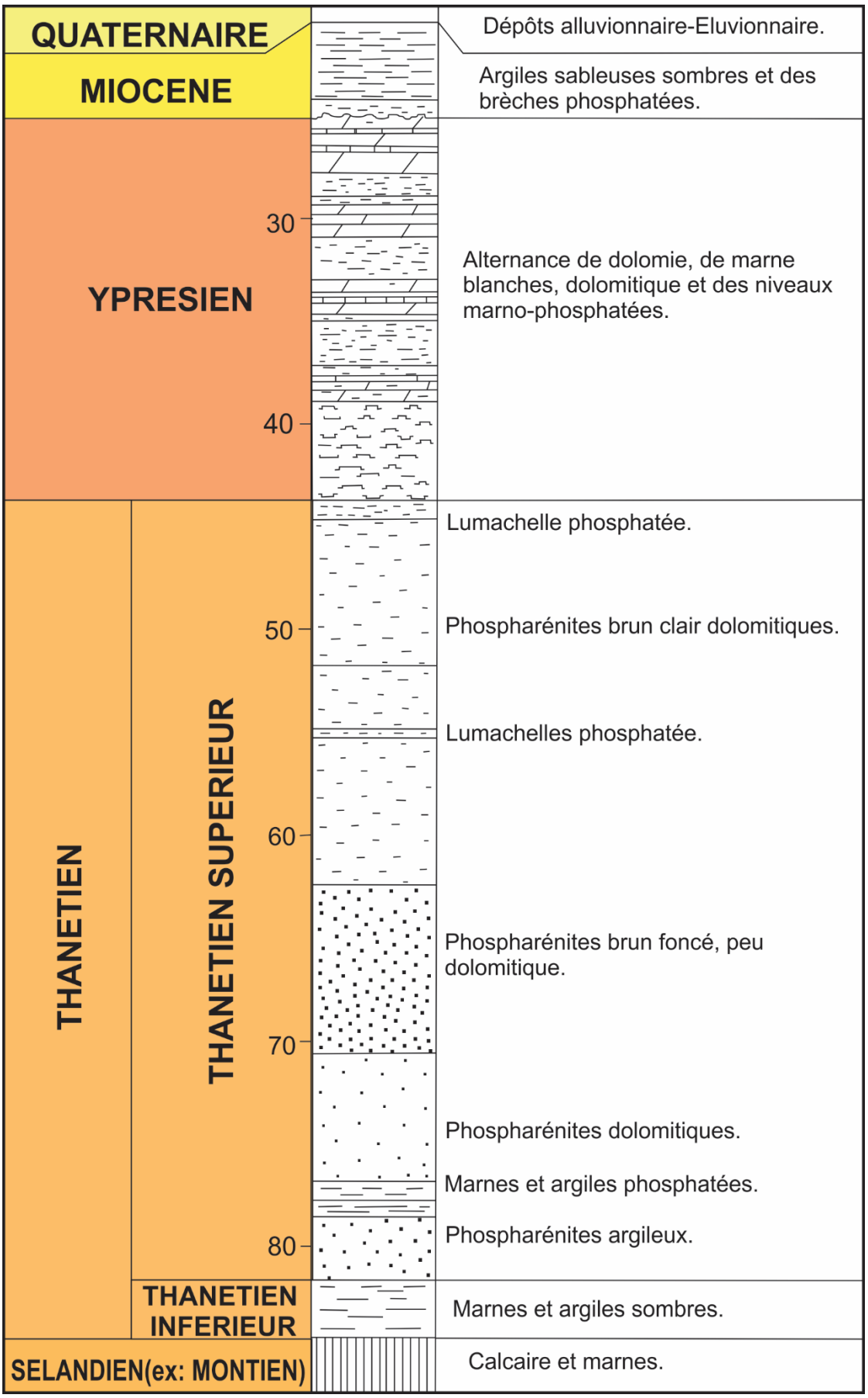


Figure 6 : Log lithostratigraphique de Bled El Hadba (EREM, 1987) « modifiée par Saadou. N »

4. La tectonique :

La structure tectonique la plus importante est surtout marquée par la partie orientale de l'anticlinal de Djebel Onng, formant avec le petit anticlinal déjeté de Djebel Djemidjma, sur une direction approximativement E-W, les reliefs les plus orientaux édifiés sur la branche septentrionale de la flexure Sud atlasique. (HADDOUCHE O. (1997).

a. L'anticlinal de Djebel Onng :

Formé essentiellement de calcaires maastrichtiens, le pli de Djebel Onng de direction E-W présente un flanc nord subtabulaire (5° à 15° N) peu déformé, tandis que le flanc Sud est redressé à 90° et par endroit renversé avec des pendages atteignant 30°.

Ce plis présente en plan un axe courbé, décalé au milieu de façon senestre. Sa terminaison périclinale est associée à un repli synclinal étroit, limité au Sud par une faille inverse à regard sud, tandis qu'à l'extrême bordure ouest, il s'agit d'un petit synclinal perché. . (HADDOUCHE O. (1997).

b. Les failles normales :

La partie orientale de Djebel Onng est plutôt découpée par des failles en ciseaux à jeu normal où normal dextre, soulignées par des pitchs très élevés (70° à 90°). C'est l'exemple des effondrements spectaculaires situés au Nord de Djebel El Ater.

Les failles E-W sont le plus souvent à jeu normal de faible rejet vertical et très localement inverses. Elles s'expriment beaucoup plus dans l'angle Nord-Ouest et Sud-Est de la feuille, ainsi que le long de la zone axiale de Djebel Onng, où elles se raccordent souvent aux directions NW-SE avec surtout des recoupements sans décalage. (HADDOUCHE O. (1997).

5. Les phosphates :

Dans les régions de Djebel Onng Nord, Kef es Sennoun et Bled El Hedba, les niveaux phosphatés représentent d'éventuelles ressources non négligeables, très peu ou pas exploitées pour l'instant ; L'ensemble du gisement de Djebel Djemidjma renferme des ressources géologiques en phosphates s'élevant à environ 150 Mt de minerai, dont environ 40 à 45 Mt ont été exploitées depuis 27 ans. La production annuelle actuelle, d'environ 2,3 à 2,5 Mt de minerai titrant 25 à 26% P_2O_5, alimente les installations de traitement et d'enrichissement de phosphate, attenantes à la carrière, produisant en moyenne 1,1 à 1.3 Mt de produits marchands par an, évacuées par le chemin de fer, via Tébessa, jusqu'au port de Annaba. (HADDOUCHE O. (1997)

a. Aperçu sur le phosphate :

Les phosphates, qui sont des sels ou des esters de l'acide phosphorique contenant l'ion phosphate (PO_4^{3-}), sont des composés chimiques d'une importance capitale en raison de leur polyvalence et de leurs propriétés uniques. Leur utilisation s'étend à de nombreux secteurs, jouant un rôle essentiel non seulement en agriculture, mais aussi dans les industries chimique, alimentaire, du traitement des eaux et, surtout, dans le domaine minier. À l'échelle mondiale, des pays comme la Chine, les États-Unis et le Maroc et Sahara occidental et dominent la production de phosphates, tandis que le Maroc et la Tunisie occupent une place stratégique en Afrique. L'industrie minière des phosphates constitue un moteur économique majeur pour de nombreux pays, favorisant la création d'emplois et le développement des infrastructures. Ainsi, une gestion efficace et durable des ressources en phosphate est indispensable afin d'optimiser leurs retombées économiques tout en répondant aux exigences industrielles mondiales.

b. Description des phosphates à l'échelle mondiale :

Les réserves mondiales de phosphates sont principalement concentrées au Maroc et Sahara occidental, qui détient une part significative de ces ressources. Cette distribution inégale rend de nombreux pays dépendants de quelques grands producteurs, ce qui peut engendrer des conséquences économiques et politiques majeures. Les principales réserves se situent en Afrique (Maroc et Sahara Occidental, Sénégal, Togo, Afrique du Sud) et en Asie (Chine, Jordanie, Arabie Saoudite). Les États-Unis, la Chine, la Russie et le Brésil disposent également de réserves notables, bien que nettement inférieures à celles du Maroc. En Europe, les ressources sont relativement limitées, avec des gisements principalement en Finlande et en Russie. Face à cette concentration, l'exploration de nouvelles sources et le développement de technologies de recyclage apparaissent comme des solutions essentielles pour garantir une gestion durable des phosphates.

c. Description des phosphates à l'échelle africaine :

En Afrique, les phosphates représentent une ressource minière précieuse, avec des réserves significatives concentrées dans quelques pays clés. Le Maroc et le Sahara Occidental se distinguent comme le principal producteur et détenteur de réserves, notamment grâce aux gisements majeurs de Khouribga et Boucraa. D'autres pays africains, tels que le Sénégal, l'Algérie, le Togo et l'Afrique du Sud, possèdent également des réserves notables et contribuent ainsi de manière substantielle au marché régional des phosphates. Cette répartition confère à ces nations un rôle stratégique dans l'approvisionnement et la dynamique économique du secteur.

d. Minéralogie des phosphates :

D'un point de vue géochimique, la composition en éléments majeurs des sédiments phosphatés reflète la somme des compositions de la francolite et des minéraux de gangue associés (Jarvis et al., 1994).

Les variations de concentration en éléments majeurs dans les phosphates sont principalement contrôlées par la nature des minéraux de la gangue (Nathan, 1984).

Les phosphates sédimentaires se distinguent par leur richesse relative en éléments traces, en particulier les terres rares (Altschuler, 1980 ; Jarvis et al., 1994). Cette richesse est facilitée par la structure cristalline de la francolite, qui permet de nombreuses substitutions chimiques avec ces éléments (Altschuler, 1980 ; Jarvis et al., 1994). En moyenne, une phosphorite contient 980 ppm de strontium, 736 ppm de terres rares et 120 ppm d'uranium (Altschuler, 1980). Les terres rares dans les phosphates sédimentaires montrent un signal géochimique caractéristique de l'eau de mer, offrant des informations sur les conditions d'oxydo-réduction lors de la formation des phosphates (Jarvis et al., 1994 ; Bau &Dulski, 1996).

e. Économie des phosphates et leurs utilisations :

Le marché des phosphates est principalement dominé par leur utilisation dans l'agriculture, où ils servent de fertilisants pour augmenter les rendements des cultures. Les engrais phosphatés sont essentiels en agriculture, fournissant les nutriments nécessaires à la croissance des plantes et contribuant ainsi à la sécurité alimentaire mondiale. De plus, les phosphates sont largement utilisés dans l'alimentation animale, améliorant la santé des animaux, renforçant leurs os et favorisant leur croissance, ce qui est crucial pour l'industrie de l'élevage.

Les phosphates jouent également un rôle important dans les technologies de pointe, notamment dans la fabrication des batteries des véhicules électriques. Les batteries au phosphate de fer et de lithium sont très appréciées pour leur stabilité thermique et leur sécurité accrue, ce qui les rend idéales pour une utilisation dans les véhicules électriques, où la fiabilité et la sécurité des batteries sont essentielles. Cette application des phosphates dans les technologies de pointe contribue à la transition vers des sources d'énergie plus propres et plus durables.(mémoire tizi)

f. Les phosphates en Algérie :

Etude de cas : Bled El Hadba.

Les phosphates constituent une ressource stratégique pour le secteur minier et l'économie algérienne. Parmi les gisements identifiés, celui de Bled El Hadba se distingue par ses caractéristiques géologiques exceptionnelles, incluant une teneur élevée en métaux stratégiques, justifiant son choix comme objet principal de cette étude. Situé dans la région orientale de l'Algérie, ce gisement présente un intérêt économique majeur, contribuant significativement au développement industriel national et à la diversification des ressources minérales du pays.

III. **HISTORIQUE DES TRAVEAUX DE BLED EL HADBA** :

- Travaux de prospection et d'évaluation des phosphates dans la région de Bir El Ater (EREM:1985/1987).
- Étude de développement du gisement de phosphate de djebel Onk: rapport d'expertise géologique + Annexes au rapport (BRGM/SOFREMINE 1994).
- Rapport géologique sur les travaux de prospection et d'évaluation du gisement de phosphate de Bled El Hadba, campagne 1998/1999 (CERAD/FERPHOS).
- Etude de recherche d'eau souterraine par méthode de géophysique électrique de Bled El Hadba (Bureau d'études, consulting et expertise judiciaire -HYDROGEOTOP/Tébessa).
- Plan d'exploitation préliminaire du gisement de phosphate de Bled El Hadba/zone Nord (CERAD/FERPHOS 2001).
- Etude d'impact sur environnement -station de services Bled El Hadba (cabinet d'études et d'expertises/Ferhi.M 2008).
- Etude de danger de Bled El Hadba (CERAD /SOMIPHOS 2008).
- Etude d'impact sur l'environnement de Bled El Hadba (CERAD /SOMIPHOS 2008).
- Plan d'exploitation du gisement de phosphate de Bled El Hadba – exploitation par Surface Miner du bloc Sud (CERAD /SOMIPHOS 2008).

CHAPITRE III CALCUL DES RESERVES

CHAPITRE III CALCUL DES RESEVES

I. CALCUL DES RESERVES PAR LES ANCIENS TRAVEAUX :

Le gisement de Bled El Hadba a fait l'objet de plusieurs campagnes de prospection et d'évaluation:

- En 1978 la SONAREM, avait réalisé neuf sondages (09) notés S-27k, S -51K à S-58K, suivant une maille de 400X 900 m, et une série de tranchées au niveau des affleurements (Tr.43k à Tr.55K).
- Les réserves géologiques estimées par cette campagne de recherche sont de:
    - Réserves probables (C1) 113 MT titrant à 19.58% en P_2O_5, pour une épaisseur moyenne de 31m.
    - Réserves possibles (C2) 129 MT avec 20.3%en P_2O_5,

    *Soit un Total de 242MT dont 60 MT seulement titrent plus de 23% en P_2O_5.

- En 1987, l'EREM avait réalisé onze (11) sondages, notés de S-1H à S-11H, en resserrant la maille de reconnaissance à 400 X 600m, sur une superficie de 4.6 km^2 et sept tranchées notées Tr-1 H à Tr-7 H.
- Les réserves géologiques estimées par cette campagne de recherche sont de 324MT en toute catégorie confondue.
    - Pour la couche principale les réserves sont de 204MT réserves probable et possible avec des teneuses moyenne en P_2O_5 variant entre 22.3% et 25.50% pour des teneurs en MgO de 2.50 à 3.60 %.
    - Les réserves des couches sommitale et basale sont de l'ordre de 120MT avec des teneurs en P_2O_5 inférieur à 20% et un MgO entre 5 et 8%.
- En 1993, le BRGM avait expertisé tout le gisement en utilisant les données déjà existante (sondages, levés géologiques…) tout en considérant de nouveaux paramètres pour l'estimation des réserves comme la division du faisceau phosphaté en trois couches (sommitale, principale, et basale), qui se distinguent principalement, par leurs teneurs en P_2O_5 et MgO , par leur texture ,et structure .

Les réserves géologiques trouvées par cette expertise sont d'environs 300MT.

- catégorie confondue avec une teneur en P_2O_5 de 21.32% et 5.79% en MgO. Elles sont réparties suivant les différentes couches comme suit:
    - la couche principale: 165.6 MT avec une teneur en P_2O_5 de 24.85% 53.4% en MgO.
    - La couche sommitale: 72.4 MT titrant de 15.90% en P_2O_5 et 9.26% en MgO.
    - La couche basale: 62 MT titrant de 18.25% en P_2O_5 et 7.93% en MgO.

- Par catégorie de ressources, le BRGM a estimé les ressources probables du gisement à 148 MT et possibles à 152 MT.
    - La superficie considérée pour cette expertise est de 4.5 km^2.
- En 1999 FERPHOS a lancé une campagne de prospection, en partenariat avec FERTIBERIA, plus détaillée de la partie Nord du gisement dans le but de certifier 100MT de phosphate en réserves prouvées (catégorie B) sur une surface de 2.61 km2.
    - Dix sondages ont été réalisés suivant une maille plus serrée de 400 X 250 m.
    - L'évaluation des réserves géologiques a été effectuée sur une superficie de 4.85 km^2 environ.
    - Les réserves géologiques globales du gisement sont de 319.7 MT avec une teneur moyenne en P_2O_5 de 21.65% et 5.27% en MgO.
    - * Les réserves Prouvées (B) sont de 103.1MT avec une teneur moyenne en P_2O_5 de 22.19% et 4.96% en MgO.
    - * Les réserve probables (C1) sont estimées à 156.6MT avec une teneur moyenne en P_2O_5 de 21.43% et 5.38% en MgO.
    - * Les réserves possibles (C2) sont estimées à 60 MT avec une teneur moyenne en P_2O_5 de 21.32% et 5.53% en MgO.

II. APERÇU SUR LE CALCUL DES RESERVES DES GISEMENTS MINIERS :

Le calcul des réserves minérales consiste à estimer la quantité et la qualité des minéraux économiquement exploitables dans un gisement. Cette estimation intègre des données géologiques, des paramètres techniques (méthodes d'extraction, traitement) et des facteurs économiques (coûts, prix des matières premières). Les réserves ne représentent qu'une partie des ressources minérales, qui incluent également les matériaux non économiquement viables ou non confirmés géologiquement.(Hartman, H. L., & Mutmansky, J. M. 2002),(Australasian Joint Ore Reserves Committee (JORC). 2012).

III. CLASSIFICATION DES RESERVES (A1, A2, B, C1, C2) :

Cette classification, issue du système soviétique/russe, se base sur le degré de confiance des données géologiques et la précision des paramètres techniques et économiques. Tout ce qui suit concernant (Rudenko, V. P., & Kazansky, V. I. 1971), (CRIRSCO. 2019) :

1. Catégorie A1 :

- **Confiance maximale** : Réserves détaillées et prêtes pour l'exploitation.
- Données issues de forages serrés, d'analyses en laboratoire, et de tests technologiques.

- Utilisées pour planifier l'exploitation à court terme.

2. **Catégorie A2 :**

- **Haute confiance** : Réserves confirmées par des forages et des études, mais moins détaillées qu'A1.
- Paramètres économiques et techniques validés, mais avec quelques incertitudes mineures.

3. **Catégorie B :**

- **Confiance moyenne** : Réserves estimées avec des forages moins denses.
- Les paramètres géologiques et techniques sont partiellement confirmés.
- Utilisées pour la planification à moyen terme.

4. **Catégorie C1 :**

- **Confiance faible** : Réserves extrapolées à partir de données limitées (forages espacés, modèles géologiques).
- Inclut des zones adjacentes aux réserves confirmées (A et B).
- Souvent utilisées pour des études de faisabilité préliminaires.

5. **Catégorie C2 :**

- **Ressources prospectives** : Estimations basées sur des données géologiques régionales ou des indices.
- Non confirmées par des forages, utilisées pour cibler de futures explorations.

IV. CLASSIFICATION CONVENTIONNELLE :

Tous mentionnées ci-dessous de (Swapan, K, H. 2018).

Le degré d'assurance dans les estimations de tonnage et de teneur peut être classé subjectivement en utilisant une terminologie pratique. L'augmentation de l'exploration géologique génère des niveaux de confiance élevés et une viabilité technico-économique. La catégorisation est généralement répartie entre les réserves économiques et les ressources conditionnelles sous-économiques. Les réserves de minerai économiques et les ressources sous-économiques sont ensuite subdivisées en Développées, Prouvées, Probables et Possibles.

Le système de classification aide l'investisseur dans la prise de décision pour la formulation de projets et les activités requises à différentes étapes. Ces termes reposent sur l'expérience et ont été éprouvés et largement acceptés au fil des ans. La terminologie est comparable à l'équivalent international utilisé par des systèmes comme l'USGS ou les classifications russes, telles que Mesuré, Indiqué et Inféré. Le schéma conventionnel ou traditionnel de classification des réserves/ressources comprend cinq catégories basées sur une information géologique/exploratoire décroissante : Développé, Prouvé, Probable, Autre minerai et Possible.

1. **Développé :**

Les réserves Développées, Positives ou Bloquées atteignent la catégorie la plus élevée et correspondent aux parties du gisement qui ont été exposées dans les quatre directions : le haut, le bas et les deux côtés. L'exposition en surface peut être mise au jour par des tranchées ou des puits d'essai à la surface des mines à ciel ouvert, ou être délimitée de tous côtés par des niveaux supérieurs et inférieurs, ainsi que par des montées et descentes latérales dans les mines souterraines. Avec un forage de définition ou de délimitation réalisé à des intervalles compris entre 30 et 15 mètres, tous les côtés sont échantillonnés.

Le bloc est alors prêt pour la préparation des chantiers d'abattage, le forage des trous de mine, le dynamitage et l'extraction du minerai. L'échantillonnage au point d'extraction est lancé afin d'attribuer une teneur de production aux chantiers d'abattage, de déterminer le ratio de mélange pour le stock, de procéder à la réconciliation en fonction d'une dilution supplémentaire et d'estimer les erreurs éventuelles. Le risque d'erreur concernant le tonnage et la teneur est minimal, avec un niveau de confiance estimé à environ 90 %.

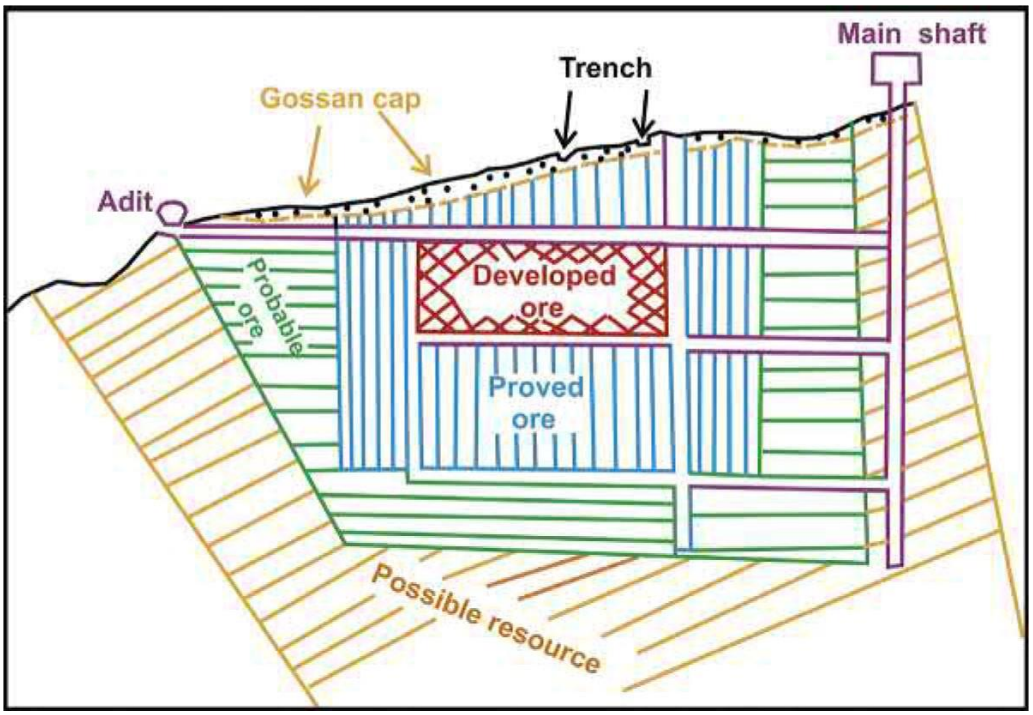


Figure 7 : systèmes de classification des réserves conventionnels montrant diverses catégories de réserves et de ressources basées sur une expérience géologique enrichie-une bonne option pour les petits acteurs de l'industrie minière (Swapan, K, H. 2018).

2. **Prouvé**

Les réserves Prouvées ou Mesurées sont estimées sur la base d'échantillons prélevés à partir d'affleurements, de tranchées, de niveaux de développement et de forages au diamant. L'intervalle de forage est de 200 m, voire 400 m pour les gisements sédimentaires simples en couches (veines de charbon, lignite, bauxite et minerai de fer) dont la continuité est attendue le long du pendage et du rejet, à l'exception des dislocations structurelles. L'intervalle d'échantillonnage est de 50 m par 50 m pour les gisements de métaux de base.

Le gisement est soit exposé par des tranchées ou des puits d'essai dans le cas des mines à ciel ouvert, soit par le développement d'un ou deux niveaux pour les forages souterrains. Le forage de délimitation des chantiers et l'échantillonnage se poursuivent afin d'améliorer la catégorie vers celle des réserves développées. Le niveau de confiance dans l'estimation est d'environ 80 %.

3. **Probable**

L'estimation des réserves de minerai Probables ou Indiquées repose essentiellement sur un échantillonnage à large espacement et sur des forages de surface et souterrains réalisés à des intervalles compris entre 100 et 400 mètres, en fonction de la complexité de la minéralisation. L'ouverture des gisements par des puits d'essai ou des niveaux souterrains n'est pas obligatoire pour atteindre cette catégorie. Le niveau de confiance dans l'estimation est d'environ 70 %.

La somme des réserves de minerai Développées, Prouvées et Probables est appelée la catégorie Démontrée. Une réserve destinée à un projet en phase de décision d'investissement devrait contenir environ 60 % de ressources dans la catégorie Démontrée**.**

4. Possible

Les ressources minérales Possibles ou Inférées sont basées sur quelques échantillons dispersés d'informations concernant l'extension du gisement minéral selon son pendage et son rejet. Il existe des preuves suffisantes d'un environnement minéralisé au sein d'un cadre géologique général, avec un niveau de confiance d'environ 50 %. La ressource possible servira de remplacement durable aux réserves de minerai épuisées.

V. METHODES CONVENTIONNELLES DE CALCUL DES RESERVES :

Les méthodes traditionnelles reposent sur des approches géométriques ou statistiques, adaptées aux données disponibles et au type de gisement par (Annels, A. E. 1991), (Sinclair, A. J., & Blackwell, G. H. 2002), (David, M. 1988) :

1. Méthode des Polygones

- Chaque forage définit un polygone d'influence (ex. carré, hexagone).
- La teneur du polygone est assimilée à celle du forage central.
- Avantage : Simple et rapide.
- Inconvénient : Ignore les variations entre forages.

2. Méthode des Triangles :

- Le gisement est divisé en triangles reliant trois forages.
- La teneur est interpolée linéairement entre les points.
- Utilisation : Adaptée aux gisements irréguliers.

3. Méthode des Sections :

- Le gisement est découpé en sections verticales ou horizontales.
- Les réserves sont calculées par section (surface × épaisseur × densité).
- Exemple : Gisements stratiformes (charbon, couches sédimentaires).

4. Méthode de l'Inverse des Distances (IDW) :

- La teneur d'un bloc est pondérée par l'inverse de la distance aux forages voisins.

- Avantage : Plus précise que les polygones pour des données denses.

5. **Méthode Géostatistique (Krigeage) :**

- Utilise des modèles statistiques pour interpoler les teneurs en intégrant la variabilité spatiale.
- Avantage : Optimise l'estimation des incertitudes.
- Considérée comme conventionnelle dans les systèmes modernes.

VI. FACTEURS CLES INFLUENÇANT LE CALCUL :

- Données géologiques : Densité des forages, qualité des échantillons.
- Paramètres économiques : Prix du minerai, coûts d'extraction, seuil de coupure (*cut-off grade*).
- Contraintes techniques : Méthode d'exploitation (ciel ouvert vs souterrain), récupération métallurgique.

Par (Torries, T. F. 1998), (SME. 2019)

VII. CLASSIFICATION-CADRE DES NATIONS UNIES :

Le système **UNFC** (United Nations Framework Classification) est une évolution récente dans la catégorisation des réserves (E/2004/37-E/ECE/1416, février 2004) (**UNFC**, 2004). Ce schéma accorde une importance égale aux trois critères suivants : **exploration**, **investissement** et **rentabilité** des gisements minéraux. Son format repose sur :

1. Le stade d'exploration géologique et d'évaluation.
2. Le stade d'étude de faisabilité.
3. Le degré de viabilité économique.

Le modèle est représenté par plusieurs cubes (4 × 3 × 3 blocs) définis selon trois axes : géologique (G), faisabilité (F) et économique (E). Les trois mesures de prise de décision pour l'estimation des ressources sont ensuite spécifiées par ordre décroissant.

Axe géologique (G) :

1. Exploration détaillée.
2. Exploration générale.

3. Prospection.
4. Reconnaissance.

Axe de faisabilité (F) :

1. Étude de faisabilité et rapport minier.
2. Étude préliminaire de faisabilité.
3. Étude géologique.

Axe économique (E) :

1. Économiquement viable.
2. Potentiellement économique.
3. Intrinsèquement économique.

Le schéma est présenté sous une perspective en 3D, avec une codification numérique simplifiée facilitant le traitement digital des informations. Chaque classe codifiée (Tableau 1) correspond à un ensemble spécifique de stades d'évaluation avec une viabilité économique associée. Ce système est conçu pour être internationalement compréhensible, communicable et accepté au-delà des frontières nationales dans un contexte de globalisation économique.

Tableau 1 : Example of United Nation Framework Classification (UNFC) Codification System. (Swapan, K, H. 2018)

Economic Axis	Feasibility Axis	Geological Axis	Code
Economic	Feasibility study and mining report	Detailed exploration	111
Economic	Prefeasibility study	Detailed exploration	121
Economic	Prefeasibility study	General exploration	122
Potentially economic	Feasibility study and mining report	Detailed exploration	211
Potentially economic	Prefeasibility study	Detailed exploration	221
Potentially economic	Prefeasibility study	General exploration	222
Intrinsically economic	Geological study	Detailed exploration	331
Ntrinsically economic	Geological study	General exploration	332
Intrinsically economic	Geological study	Prospecting	333
Intrinsically economic	Geological study	Reconnaissance	334

VIII. LES VOLUMES PAR SURFER :

1. Règle du Trapèze Étendue (Extended Trapezoidal Rule)

- Principe : Extension bidimensionnelle de la règle du trapèze, qui approxime l'intégrale en divisant la zone en trapèzes dans les deux directions (x et y).

2. Règle de Simpson Étendue (Extended Simpson's 1/3 Rule)

- Principe : Utilise des paraboles pour approximer la surface dans chaque direction. Nécessite un nombre pair d'intervalles en x et y.

3. Règle de Simpson 3/8 Étendue (Extended Simpson's 3/8 Rule)

- Principe : Utilise des cubiques pour l'approximation. Nécessite un nombre d'intervalles multiple de 3 en x et y.

4. Considérations dans Surfer

- Grille régulière : Les méthodes supposent un espacement constant (Δx, Δy). Surfer génère une telle grille à partir de données échantillonnées.
- Adaptation aux contraintes :
    - Si la grille ne respecte pas les conditions (p. ex., nombre d'intervalles impair pour Simpson 1/3), Surfer peut :
        - Rejeter la méthode,
        - Utiliser un mélange de règles (p. ex., Simpson 1/3 + 3/8),
        - Interpoler pour ajuster la grille.
- Choix de la méthode :
    - **Trapèze** : Robustesse, faible précision.
    - **Simpson** : Précision élevée si la fonction est lisse et les conditions respectées.

CHAPITRE IV RESULTATS ET DISCUSSIONS

CHAPITRE IV RESULTATS ET DISCUSSIONS

I. CALCUL DES RESERVES DE LA COUCHE PRINCIPALE :

Le secteur concerné par le calcul des réserves est celui de l'ancienne concession d'après le journal officiel N°40 du 20 septembre 1989.

Tableau 2 : Coordonnées de la concession concernée par le calcul des réserves.

NN	UTM NORD SAHARA 1959			Lambert Nord Algérie	
	X	Y	Zone	X	Y
1	421859	3833944	32N	999250	163975
2	424342	3837335	32N	1001510	167520
3	425769	3836312	32N	1003000	166590
4	423357	3832149	32N	1000860	162280

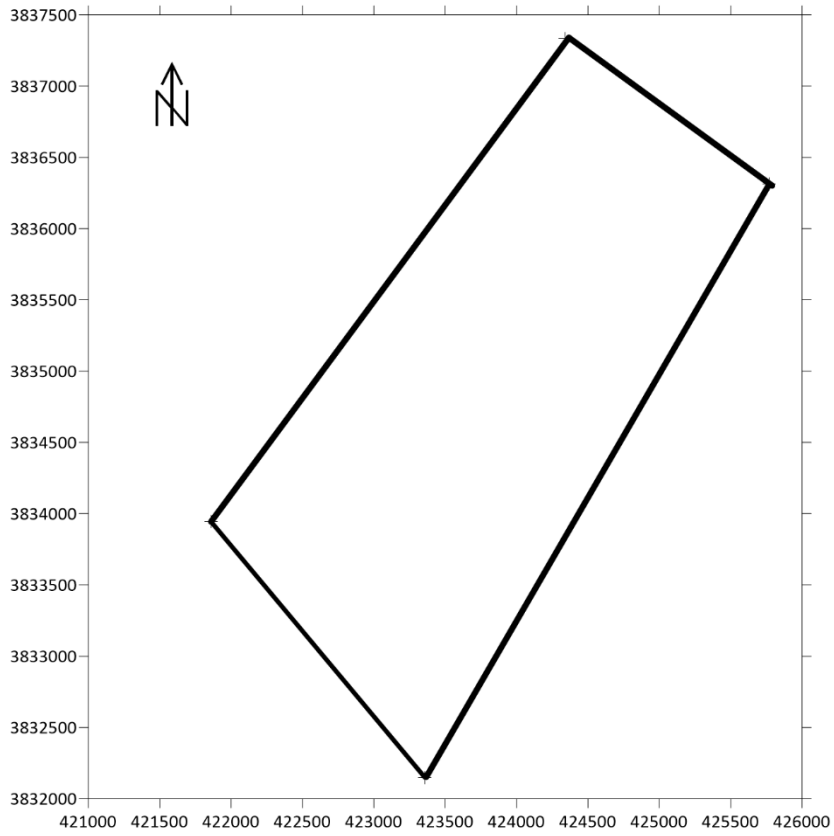


Figure 8 : Périmètre de la concession en coordonnées UTM, Nord Sahara 1959 zone 32N.

II. CALCUL DU VOLUME A PARTIR DES GRILLES :

Avant de calculer les réserves de la couche principale, nous avons commencé par calculer le volume entre le mur et le toit de la couche phosphatée. Ce volume a été calculé automatiquement à l'aide de trois méthodes intégrales (Surfer V.25).

1. Résultats de calcul du volume en utilisant la méthode de Kriging :

a. Surface supérieure (Upper Surface), le toit de la couche :

Taille de la grille (Grid Size): 308 rows x 191 columns

X Minimum: 422700

X Maximum: 424600

X Spacing: 10

Y Minimum: 3834372

Y Maximum: 3837444

Y Spacing: 10

Z Minimum: 571.81310045222

Z Maximum: 774.97922838382

b. Surface inférieure (Lower Surface), le mur de la couche

Grid Size: 308 rows x 191 columns

X Minimum: 422700
X Maximum: 424600
X Spacing: 10

Y Minimum: 3834372
Y Maximum : 3837444
Y Spacing: 10

Z Minimum : 555.80800846574
Z Maximum: 766.72681098823

Volumes:

Align Grids Using: XY coordinates

Master Grid: Upper Surface

Z Scale Factor: 1

Total Volumes by:

Trapezoidal Rule: 70640566.679781

Simpson's Rule: 70645290.303546

Simpson's 3/8 Rule: 70644785.78175

Cut & Fill Volumes

Positive Volume [Cut]: 70640566.679782

Negative Volume [Fill]: 0

Net Volume [Cut-Fill]: 70640566.679782

2. **Résultats de calcul du volume en utilisant la méthode Inverse distance :**

Upper Surface

Grid Size: 308 rows x 191 columns

X Minimum: 422700
X Maximum: 424600
X Spacing: 10

Y Minimum: 3834372
Y Maximum: 3837444
Y Spacing: 10

Z Minimum:	580.5653556561
Z Maximum:	762.17227825941

Lower Surface

Grid Size:	308 rows x 191 columns
X Minimum:	422700
X Maximum:	424600
X Spacing:	10
Y Minimum:	3834372
Y Maximum:	3837444
Y Spacing:	10.00651465798
Z Minimum:	563.77058104838
Z Maximum:	750.71500559746

Volumes

Align Grids Using:	XY coordinates
Master Grid:	Upper Surface
Z Scale Factor:	1

Total Volumes by:

Trapezoidal Rule:	78401345.777656
Simpson's Rule:	78405627.039411
Simpson's 3/8 Rule:	78405094.177256

Cut & Fill Volumes

Positive Volume [Cut]: 78401345.777656
Negative Volume [Fill]: 0
Net Volume [Cut-Fill]: 78401345.777656

III. CALCUL DES RESERVES :

La masse des réserves a été estimée à partir du volume déterminé par modélisation géologique à l'aide du logiciel Surfer. Le volume V obtenu est multiplié par la densité moyenne du matériau (ρ) afin d'obtenir la masse des réserves.

La formule utilisée est la suivante :

$$M=\rho \times V$$

M : la masse des réserves (en tonnes)

ρ : la densité moyenne du gisement (en Kg/m³)

V : le volume du gisement (en m³)

La densité moyenne a été déterminée à partir des valeurs de référence disponibles ou des analyses de laboratoire effectuées sur des échantillons prélevés sur le site. Cette méthode permet ainsi de convertir le volume estimé en masse, facilitant l'évaluation quantitative des ressources disponibles dans le gisement de Bled El Hadba. La densité moyenne des phosphates utilisée dans les calculs est :
2200 Kg.m $^{-3}$

La masse total des phosphates (la méthode de Kriging) :

$$M=\rho \times V$$

M= 2200 × 70640566.679782 = 155 409 246 695.5204 Kg = 155 409 246. 6955204 Tonnes

M=155.4 MT

La masse total des Phosphates (la méthode Inverse distance) :

M=ρ×V

M=2200 × 78401345.777656 = 172482960710.8432 Kg = 172482960.7108432 Tonnes

M=172.5 MT

Calcul des réserves en P_2O_5 et MgO

Les teneurs moyennes de la couche principale pour P_2O_5 et MgO sont respectivement : 22% et 3%.

Les réserves en P_2O_5 et MgO de la couche principale sont calculés par le produit du tonnage et la teneur :

Méthode Kriging:

M (P_2O_5) = 155.4 X 0.22 = 34.2 MT

M (MgO) = 155.4 X 0.03 = 4.66 MT

Méthode Inverse distance:

M (P_2O_5) = 172.5 X 0.22 = 38 MT

M (MgO) = 172.5 X 0.03 = 5.2 MT

Tableau 3 : Résumé de calcul des réserves par les deux méthodes

Méthode de griding	Grid	Total	P2O5	MgO
Kriging	10X10	155.4 MT	34.2 MT	4.66 MT
Inverse Distance to a power	10X10	172.5 MT	38 MT	5.2 MT

Discussion :

En utilisant les mêmes données c'est-à-dire 28 sondages, Merbouti (2008) a trouvé un tonnage total pour la couche principale de 164.35 MT. Le volume qu'a utilisé Merbouti a été calculé par le logiciel français GDM (Geological Data Managment). Les réserves en P2O5 et MgO sont respectivement 36.5 et 6.5 MT pour des teneurs de 22% et 4%. Les réserves ainsi calculées par notre méthode sont donc très proches de celles calculées par Merbouti.

Notons que la méthode Inverse Distance to à power tend à surestimer les réserves de la couche principale des phosphates.

IV. COUPES LITHO-STRATIGRAPHIQUES

Dans cette partie de l'étude, nous avons établi des coupes litho-stratigraphiques en nous appuyant sur les données des 28 sondages réalisés dans la zone d'étude.

La localisation des coupes est illustrée sur la figure 9 Les coupes 2D sont représentées en bleu, tandis que les coupes en diagramme en clôture « Fence diagram » sont indiquées en noir.

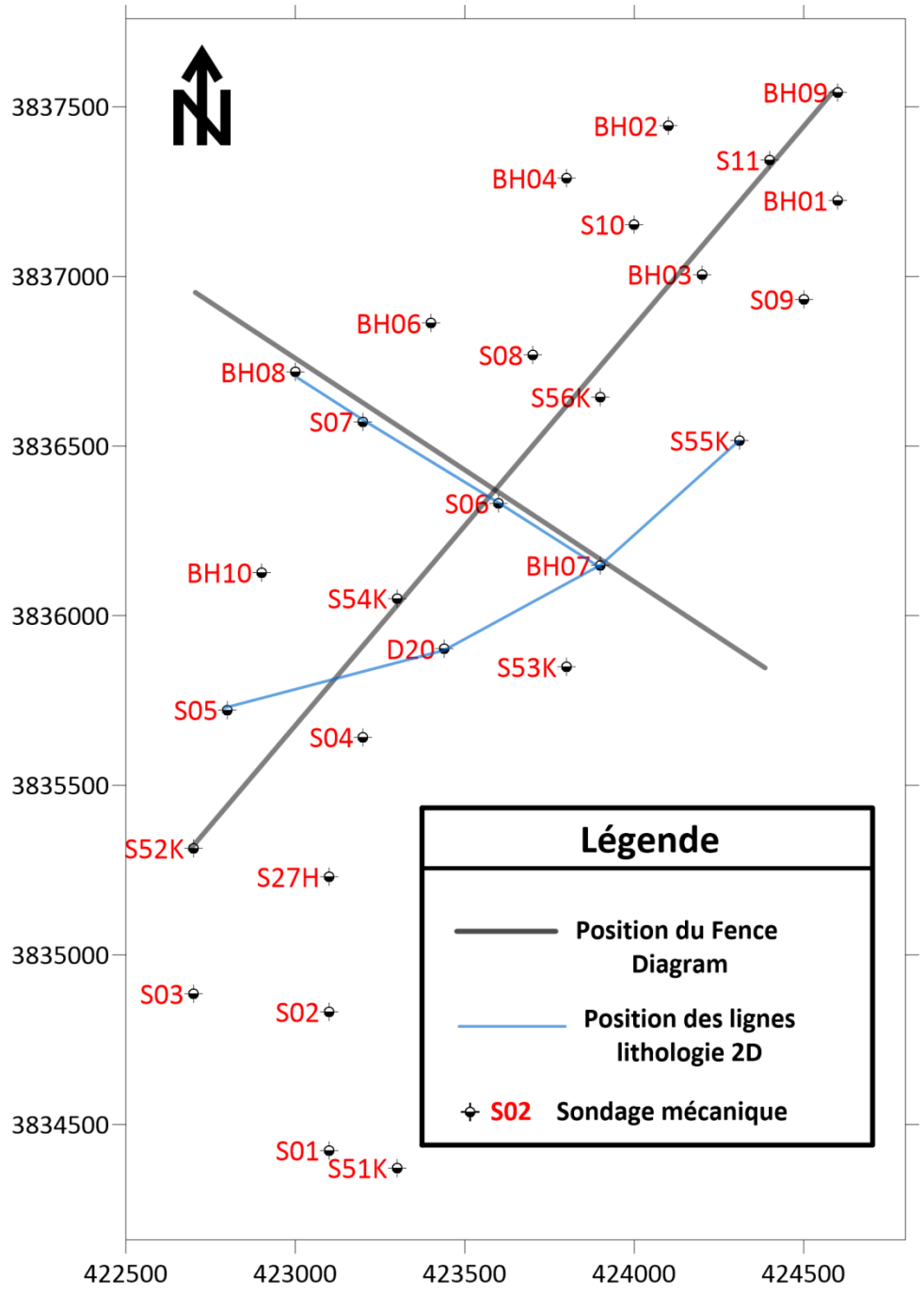
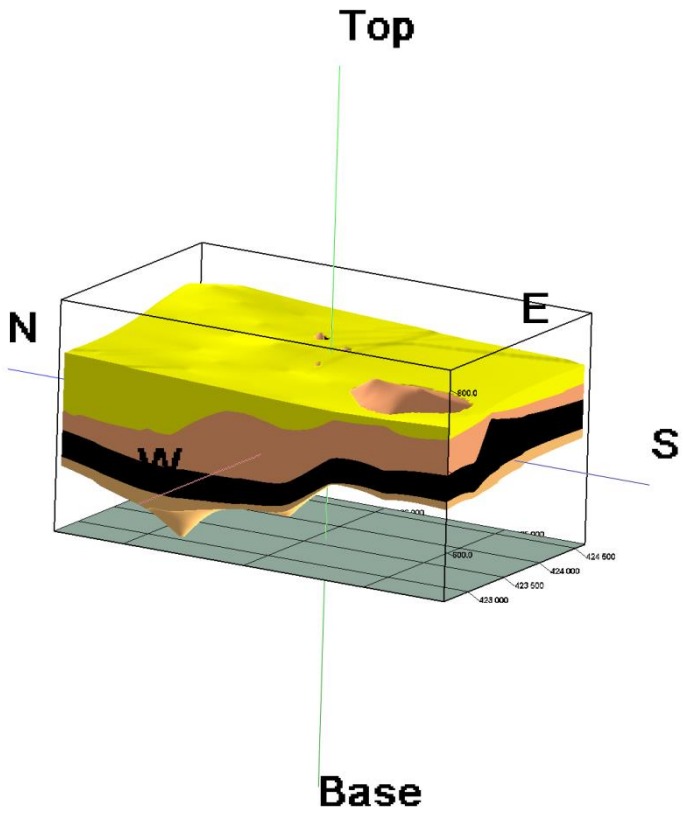


Figure 9 : carte de localisation des coupes et des diagrammes de clôture

Le bloc-diagramme 3D de la figure 10 (vue du sud-ouest) met en évidence, en surface, un affleurement dominant des formations miocènes. Quelques minces affleurements de l'Yprésien supérieur, composés de dolomies et de calcaires, sont également observés. Il est important de souligner que, hormis ces affleurements localisés, l'Yprésien supérieur est majoritairement masqué par les dépôts miocènes.



.

Figure 10 : Bloc diagramme 3D.

Deux coupes 3D sous forme de diagrammes de clôture « fence diagrams » sont présentées sur les figures 11 et 12, selon les paramètres de visualisation d'azimut et d'angle de pendage (angle par rapport à l'horizontale).

Ces diagrammes se composent de deux lignes d'intersection se croisant à proximité du sondage S06 (voir figure 880). La ligne de clôture orientée NE-SO (Nord-Est/Sud-Ouest) s'étend sur environ 4 936 mètres, tandis que celle orientée NW-SE (Nord-Ouest/Sud-Est) mesure 3 030 mètres.

Le diagramme de clôture met clairement en évidence la continuité de la couche de phosphate. Celle-ci est recouverte par des formations miocènes dans la partie nord-est (NE), alors que sur le reste de la zone, elle est surmontée par les formations du Thanétien supérieur.

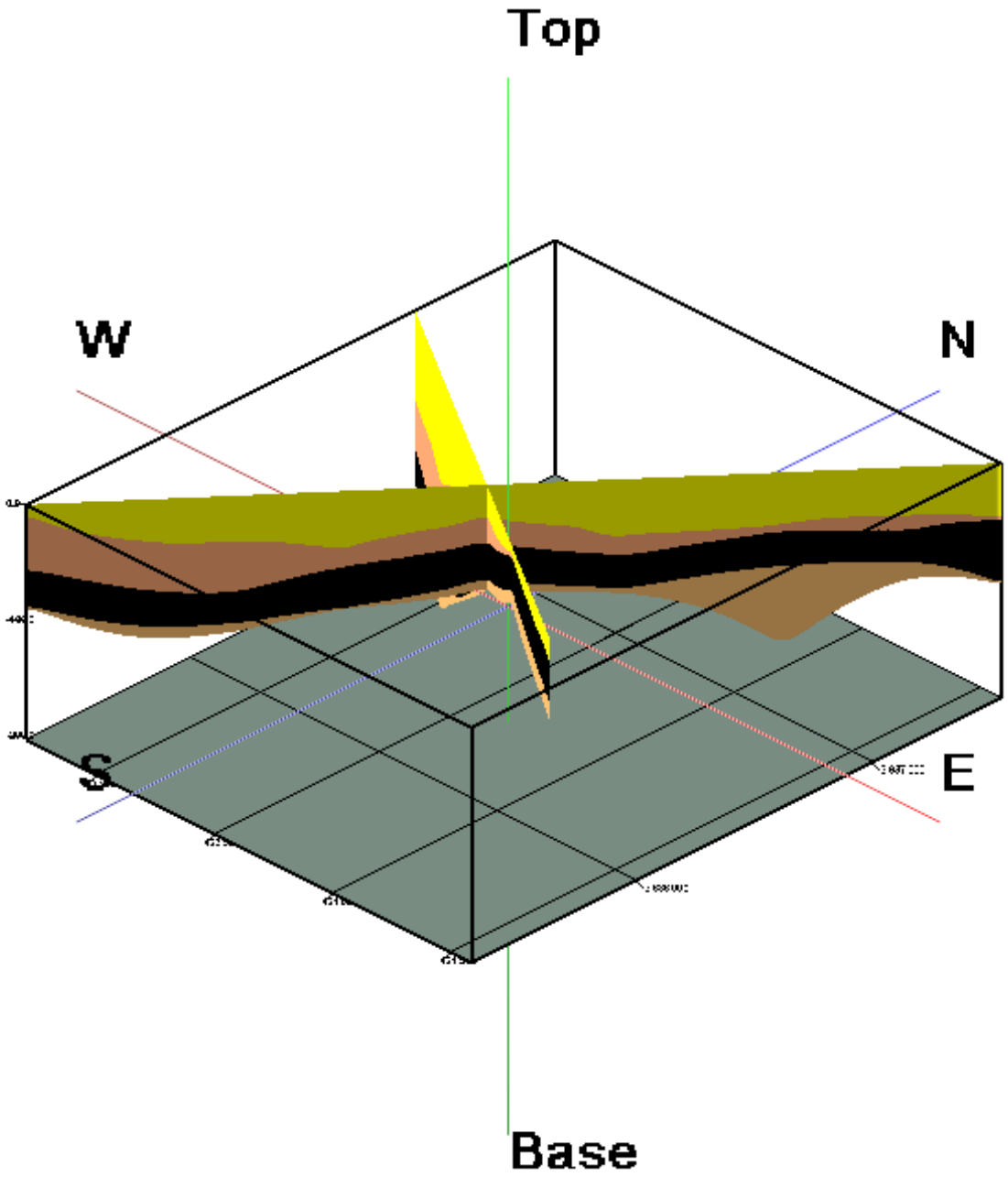


Figure 11 : Coupe en cloture, azimut de 185° et angle de pendage de 30° par rapport à l'horizontale.

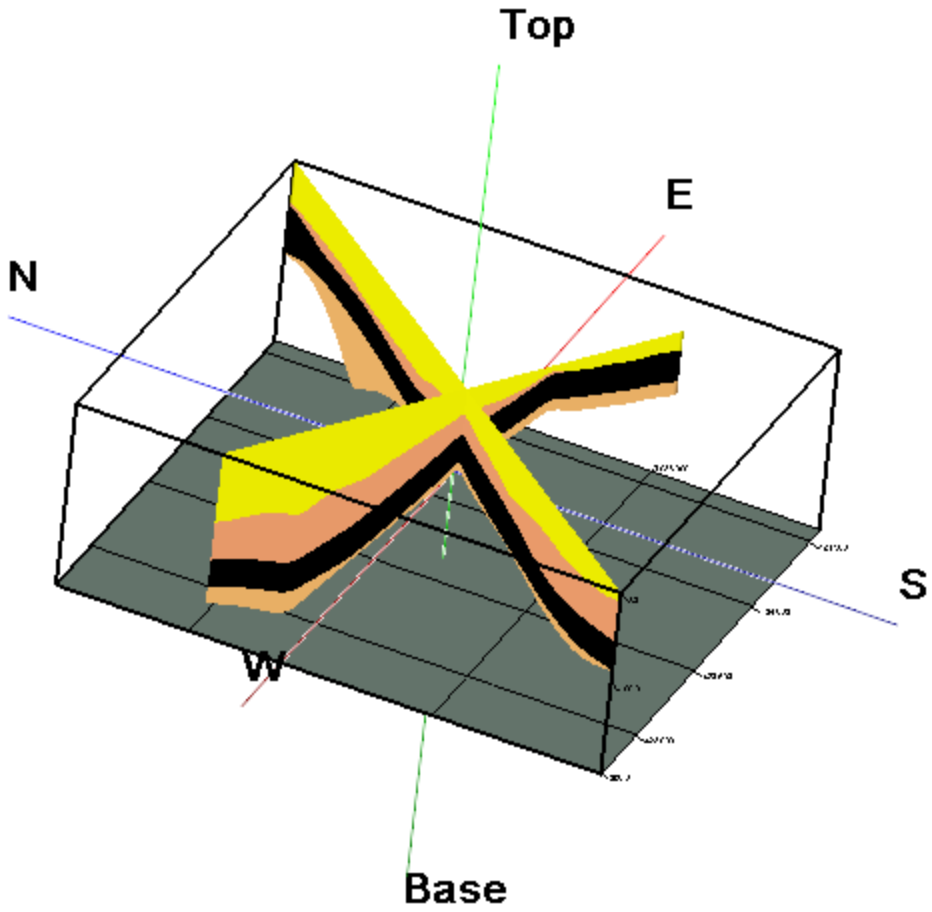


Figure 12 : Coupe en cloture, azimut de 245° et angle de pendage de 35° par rapport à l'horizontale.

La figure 13 présente une coupe litho-stratigraphique 2D traversant les sondages BH08, S07, S06 et BH07. Cette coupe révèle un enfoncement progressif des formations anté-miocènes vers le nord-ouest. En surface, seul le Miocène affleure, avec une puissance croissante vers le nord-ouest, liée à l'enfoncement des couches sous-jacentes dans cette direction. Le recouvrement stérile atteint jusqu'à 150 m à l'aplomb du sondage BH08, contre seulement quelques mètres au niveau du sondage S07.

Une seconde coupe, interceptant la première au niveau du sondage BH07, est illustrée par la figure 14. Orientée NE-SW, elle regroupe les sondages S05, D20, BH07 et S55K. Cette coupe confirme une augmentation d'épaisseur du recouvrement Miocène et de l'Yprésien supérieur vers le sud-ouest, cohérente avec les données géologiques de surface indiquant un enfoncement des formations dans cette direction. Le recouvrement stérile culmine à 40 m près de S05, puis diminue progressivement vers les autres sondages.

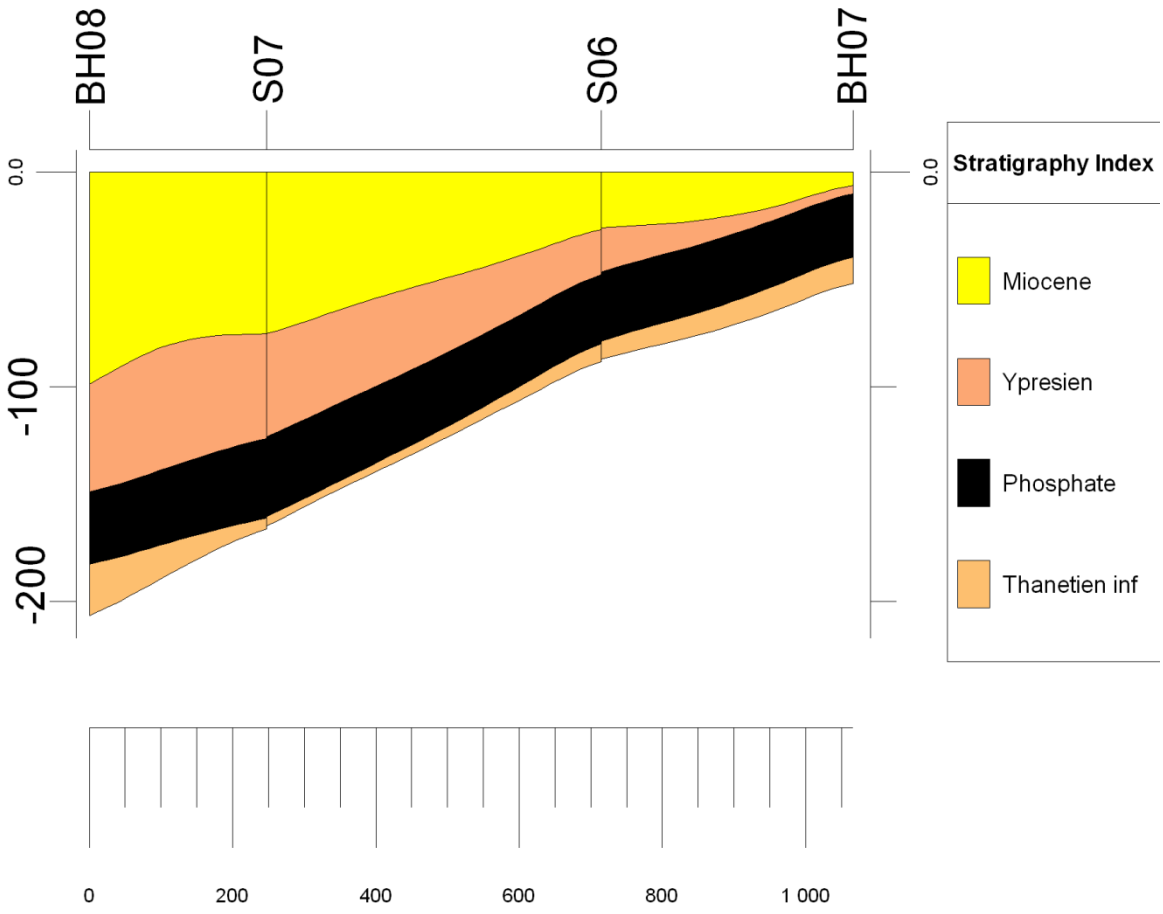


Figure 13 : coupe stratigraphique 2D.

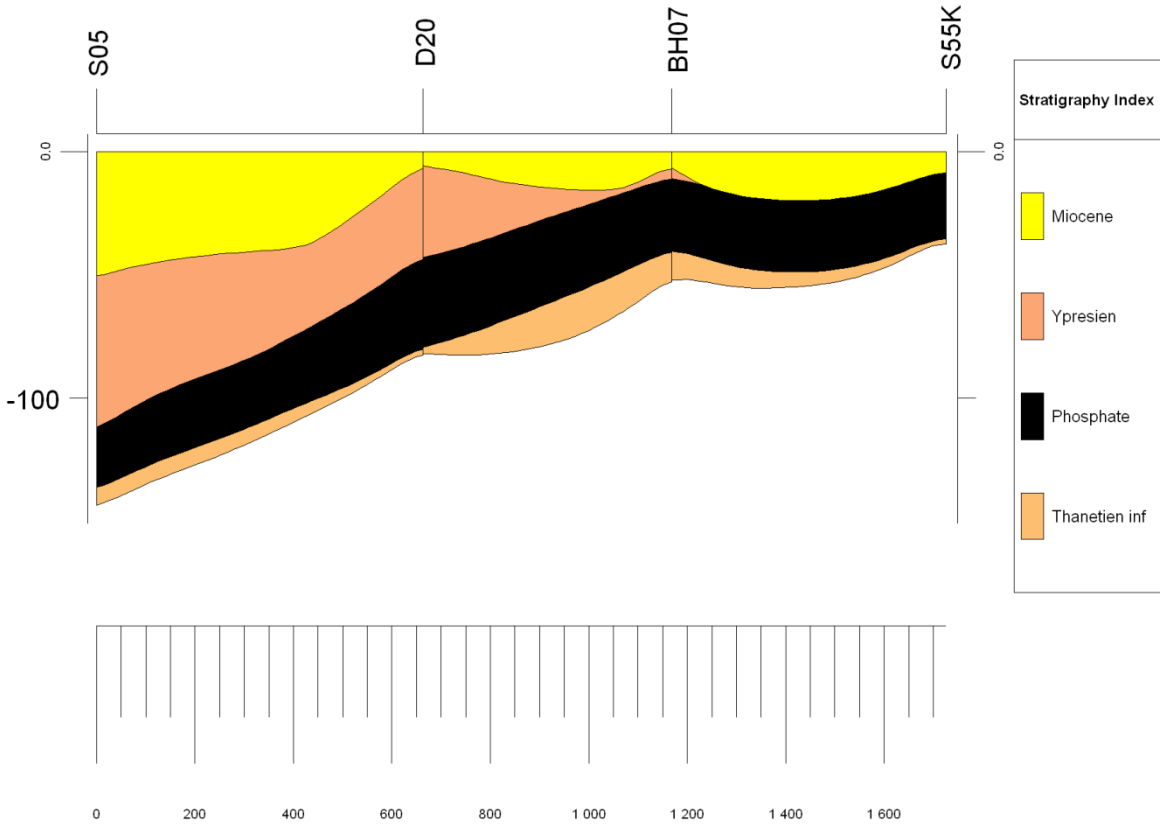


Figure 14 : coupe stratigraphique 2D.

Carte du toit des phosphates :

La figure(15) représente le toit des phosphates (couche sommitale) à partir des têtes des sondages. Le toit de la couche phosphatée varie entre au minimum de mois de 10m et une profondeur maximale de 150m. On remarque que le toit de cette couche s'enfance en allant vers le NW. La profondeur maximale est enregistrée au niveau des sondages, BH08, BH06, BH10, S05 et S07.

Les sondages S52K, S04, S54K, S06, S56K, S08, S10, BH04 et BH02 ont des profondeurs intermédiaires (70 à 100 m). Quant aux sondages situées sur la partie NE et SE ont des profondeurs inférieur à 50m.

Carte isopach :

La carte en isopach illustrée su la figure(16) montre que l'épaisseur de la formation phosphatée (totale) varie entre un minimum 18 m et un maximum de >70 m. L'épaisseur maximale est enregistrée au niveau des sondages S51K et S27H. La couleur bleu sur le palette de couleur montre qui à cet endroit, l'épaisseur des phosphates est minimale. Toutefois une bande NS regroupent les sondages S51K, S27H, S53K d'épousé important. De part et d'autre de cette bande, l'épaisseur domine.

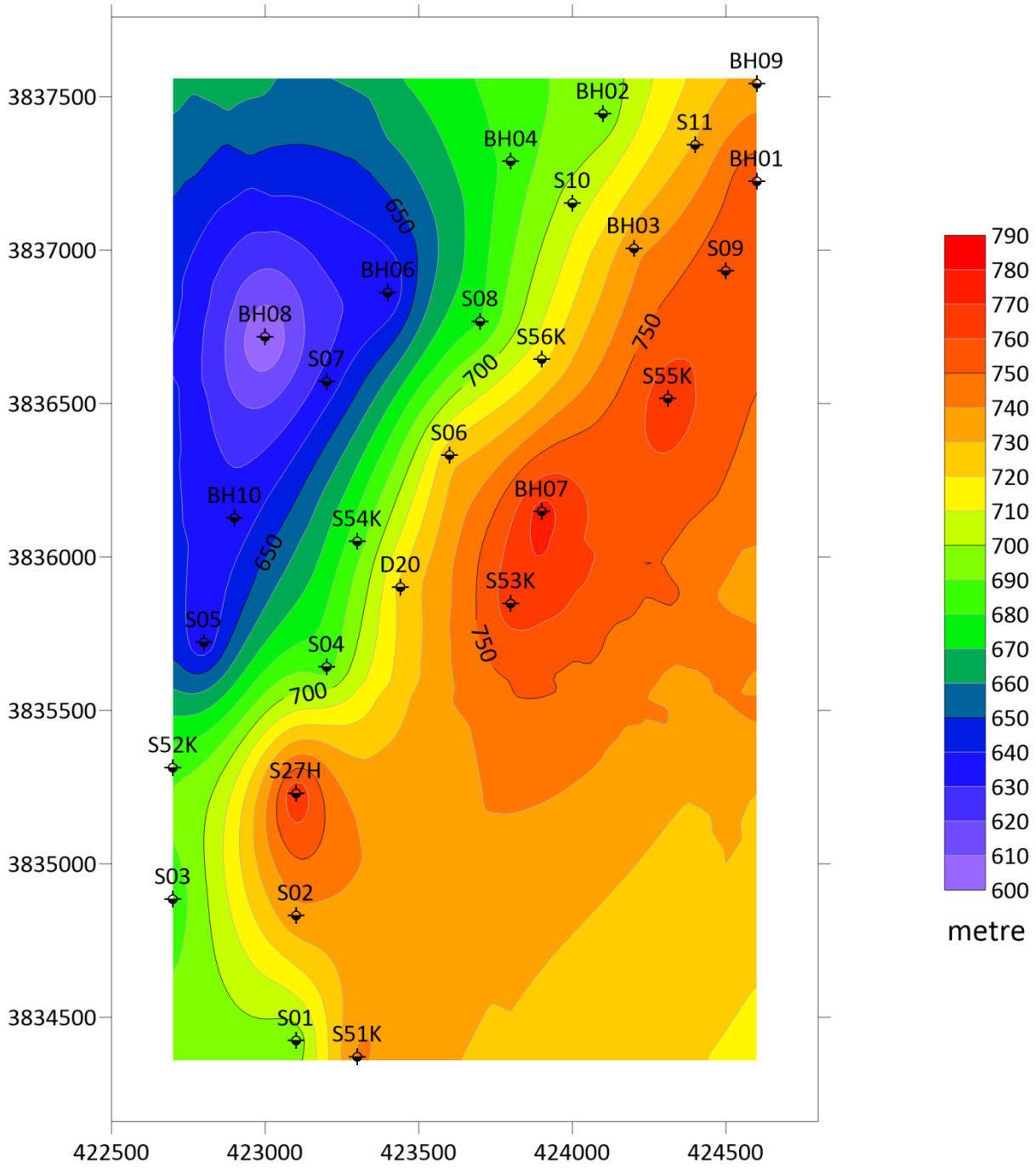


Figure 15 : carte du toi des phosphates.

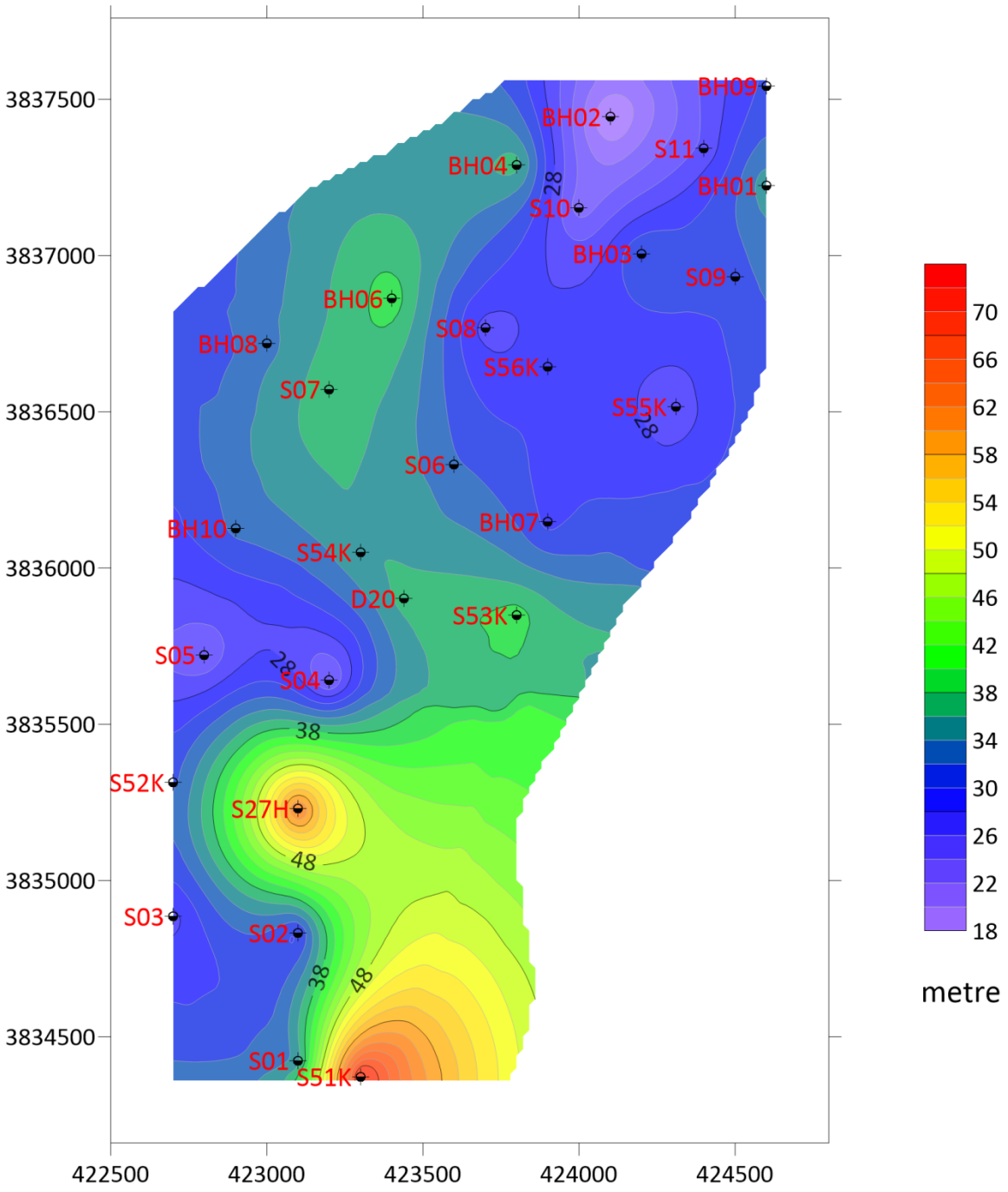


Figure 16 : carte isopach des phosphates.

CONCLUSION :

Le présent mémoire a permis d'estimer avec précision les réserves du gisement de Bled El Hadba, situé au sud-est de la wilaya de Tébessa, en se basant sur une méthodologie moderne et rigoureuse. À travers l'intégration des données issues de 28 sondages, l'élaboration des coupes litho-stratigraphiques et l'application des méthodes numériques via les logiciels Surfer et Rockworks17, une modélisation 3D a été réalisée, offrant une vision détaillée de la géométrie du gisement.

Les résultats obtenus confirment l'importance économique de ce gisement, qui présente des teneurs intéressantes en P_2O_5 et un potentiel d'exploitation significatif. La méthodologie utilisée, alliant les règles intégrales de Simpson et de Trapèze, a permis une estimation précise et fiable des volumes et des masses exploitables, démontrant l'intérêt d'une approche technique avancée dans l'évaluation des réserves minières.

En conclusion, cette étude contribue à enrichir les connaissances géologiques de la région, tout en offrant une base solide pour les projets d'exploitation futurs et la valorisation des ressources minérales stratégiques de l'Algérie.

Bibliographie :

Alièv et al. (1971). Structures géologiques et perspectives en pétrole et en gaz des atlas algériens. Rapport inédit. SONATRACH, Tome 2.

Annels, A. E. (1991). Mineral Deposit Evaluation: A Practical Approach. Springer. Détaille les méthodes géométriques (polygones, sections) et leur application aux gisements stratiformes.

Australasian Joint Ore Reserves Committee (JORC). (2012). JORC Code: Australasian Code for of Exploration Results, Mineral Resources and Ore Reserves.

Blès J. L & Fleury J. J. 1971. Carte géologique au 1/50.000e, feuille de Morsott, n°178. Publication du Service de géologique de l'Algérie.

Busson, G., & Cornet, A. (1989). Le Trias évaporitique d'Algérie : caractéristiques pétrographiques et implications géodynamiques Bulletin de la Société Géologique de France, Série 8, t. V, n°5, pp. 923-936.

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.

CRIRSCO (Committee for Mineral Reserves International Reporting Standards). (2019).

David, M. (1988). Handbook of Applied Advanced Geostatistical Ore Reserve Estimation. Elsevier. Analyse comparative des méthodes d'estimation, y compris le krigeage et les approches conventionnelles.

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.

Dubourdieu, G. (1948). Étude géologique de la région des Chotts (Sud Constantinois et Sud Algérois). Bulletin du Service de la Carte Géologique de l'Algérie, 2e série, n°17, 484 p.

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.

HADDOUCHE O. (1997) - Notice explicative détaillée de la carte géologique à 1/50 000 DE L'Algérie, feuille n° (327), Bir El Ater, 23p Publ. Serv. Algérie. Alger

Hamimed, M. (2004). Étude sédimentlogique et paléogéographie 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.

Hartman, H. L., & Mutmansky, J. M. (2002). Introductory Mining Engineering (2nd ed.). Wiley. Un manuel de base expliquant les principes de l'estimation des réserves, intégrant les aspects géologiques et économiques.

Journel, A. G., & Huijbregts, C. J. (1978). Mining Geostatistics. Academic Press. Ouvrage classique pour comprendre l'interpolation spatiale et la modélisation des incertitudes.

Krige, D. G. (1951). A Statistical Approach to Some Basic Mine Valuation Problems on the Witwatersrand. Journal of the Chemical, Metallurgical and Mining Society of South Africa. Article fondateur sur le krigeage, base des méthodes géostatistiques modernes.

Merbouti, M. 20008. Utilisation du GDM pour le calcul des réserves minières. Mémoire de d'ingénieur d'état. Ecole Nationale Polytechnique, Alger.

Rudenko, V. P., & Kazansky, V. I. (1971). Classification and Calculation of Reserves of Mineral Deposits. Nedra. (En russe) Ouvrage de référence sur le système soviétique de classification des réserves (A1 à C2).

Sami, L. (2011). Caractérisation Géochimiques des fluides minéralisateurs des confins algéro-tunisiens. Thèse, USTHB, 179p.

Sinclair, A. J., & Blackwell, G. H. (2002). Applied Mineral Inventory Estimation. Cambridge University Press. Couvre les méthodes classiques (IDW, triangles) et les bases de la géostatistique.

SME (Society for Mining, Metallurgy & Exploration). (2019). Mineral Resource and Ore Reserve Estimation: The AusIMM Guide to Good Practice (2nd ed.). Guide pratique intégrant les paramètres techniques et économiques dans les calculs de réserves.

Swapan, K, H. (2018). Mineral exploration principles and applications. Elsevier.

Torries, T. F. (1998). Evaluating Mineral Projects: Applications and Misconceptions. SME. Explique l'impact des coûts d'extraction, du cut-off grade et des prix des matières premières sur l'estimation des réserves.