

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou
جامعة مولود معمري
Faculté des Sciences Biologiques et des sciences Agronomiques
Département des Sciences Géologiques



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de
MASTER EN SCIENCES DE LA TERRE ET DE L'UNIVERS
Option : Ressources Minérales, Géomatériaux et Environnement

Par :
TIZA ASSIA
Thème :

**Caractérisation géochimique des phosphates du Djebel Onk
(Tébessa Sud)**

Encadré par : **Mme. IZRI.D**

Soutenu publiquement le 22/09/2024 devant le Jury composé de :

MR. ZEGHOUANE.H.	Maitre de conférences B à l'UMMTO	Président
M elle. GACI. N	Maitre assistante A à l'UMMTO	Examinatrice
Mme.DENDANE .M	Maitre assistante A à l'UMMTO	Examinatrice
Mme.IZRI. D	Maitre assistante A à l'UMMTO	Promotrice
Melle. FELTANE. S	Directrice générale de l'IAM	Co-promotrice

Promotion : 2023 /2024

Remerciement

En premier lieu, je désire exprimer ma profonde reconnaissance envers le Dieu Tout-Puissant, source de force et de guidance, de m'avoir accordé les ressources intérieures nécessaires - la force, le courage, la patience et la détermination pour mener à bien ce travail.

Mes remerciements les plus sincères vont à ma promotrice, Madame Izri, pour son soutien inestimable, ses précieuses connaissances qu'elle a généreusement partagées avec moi, ainsi que pour sa disponibilité constante. Sa guidance éclair

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à ma co-promotrice, Mademoiselle Feltane. Son accompagnement et son expertise ont été essentiels à l'aboutissement de ce travail. Sa disponibilité, ses conseils avisés et son soutien indéfectible ont enrichi ma réflexion et m'ont permis de surmonter de nombreux défis.ée a été un pilier essentiel de ce mémoire.

J'aimerais également exprimer mon appréciation envers tous les enseignants du département de géologie de l'université MOULOUD MEMMERY, dont les conseils éclairés et le dévouement ont enrichi mon parcours académique.

Un hommage particulier est rendu à tout le personnel de la mine de Djebel Onk (SOMIPHOS), en particulier au Directeur du complexe minier du Djebel Onk Mr. Aouich, Mr. Ali Mouhamed pour leur accueil chaleureux et leur précieuse assistance lors de ma période sur le terrain.

Je tiens à exprimer un sincère et infini remerciement à Mr. Bouteba pour son précieux soutien et sa contribution déterminante dans l'élaboration de la thématique de mon mémoire, en étroite collaboration avec mes encadreurs.

Je suis redevable à ma famille pour son soutien inestimable qui m'a insufflé le courage nécessaire pour surmonter les défis. Leur présence constante a été le fondement sur lequel j'ai bâti mes réussites actuelles.

En dernier lieu, je souhaite exprimer ma profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail. Leur implication et leur soutien ont été des éléments essentiels dans la concrétisation de ce travail, spécialement ma chère sœur Karima et mes chers amis Massilia, Céline et Zaki.

ASSIA

Dédicace

À ma chère mère,

Je te dédie ce mémoire, fruit de mes efforts et de mes aspirations, avec une profonde gratitude et un amour infini. Tu as été plus qu'une mère pour moi ; tu as été ma force, mon guide et ma source de motivation inépuisable. Alors que je franchis cette étape importante de ma vie académique, je te souhaite un prompt rétablissement. Que chaque mot écrit ici soit un témoignage de mon affection et de mes prières pour ta santé et ton bien-être.

À mon Cher père,

Ce n'est pas seulement avec des mots que je souhaite t'exprimer ma reconnaissance et mon amour, mais avec un profond sentiment sincère. Tu as été ma personne de référence, ma boussole et mon modèle tout au long de ce voyage. Ta sagesse, ton soutien inconditionnel et ton amour inébranlable ont été mes compagnons constants. Je tiens sincèrement à te remercier du fond du cœur pour tout ce que tu as fait pour moi.

À mes précieuses sœurs, [Karima] et [Inès], véritables supports de ma vie, votre présence lumineuse et vos encouragements constants ont été les moteurs de ma persévérance académique.

À mes frères [Samir] et [Hakim], mes compagnons d'armes et mes compagnons de route, je vous dédie ce mémoire en signe de reconnaissance éternelle pour votre confiance inébranlable et votre soutien indéfectible. Vous avez été les étoiles polaires qui ont guidé ma navigation vers le succès.

À mes amis et mes proches, qui ont été mes partenaires dans les moments de joie et dans les épreuves de ma vie. Ainsi mes camarades de la promotion R.M.G.E.

ASSIA

Résumé :

La région de Tébessa, située dans l'Atlas saharien oriental, présente une complexité géologique marquée par des formations triasiques affectées par une activité diapirique, notamment des marnes, du gypse et des dolomites. Au cours du Crétacé et de l'Éocène, des environnements marins ont favorisé le dépôt de calcaires, de marnes et de phosphates. Cette région abrite plusieurs gisements et indices de minerais de phosphates, parmi lesquels se distingue le gisement de Kef Essenoun (Dj. Onk).

Les phosphates de cette région se forment par l'accumulation de matière organique oxydée par des bactéries aérobies, libérant des nutriments dans l'eau. Ce processus est connu sous le nom de phosphatation et de glauconitisation. L'étude pétrographique menée à Tébessa Sud met en lumière un enrichissement notable en glauconie, favorisant des conditions confinées à tendances réductrices. Les analyses des échantillons révèlent la présence de pellets, de coprolithes et de bioblastes phosphatisés, soulignant l'origine marine des phosphates.

Ces gisements phosphatés se distinguent par leur forte concentration en terres rares telles que le cérium, le lanthane et le néodyme, particulièrement observée dans la couche principale P2 du Thanétien supérieur. Cette abondance en terres rares confère aux phosphates de Djebel Onk une valeur économique substantielle, fondamentale dans diverses industries technologiques.

Mots-Clés : Phosphates, Kef Essenoun (Dj. Onk), glauconitisation, économie, Pellets ,coprolithes, Cérium, lanthane, néodyme.

Abstract:

The Tébessa region, located in the eastern Saharan Atlas, exhibits a geological complexity characterized by Triassic formations influenced by diapiric activity, including marls, gypsum, and dolomites. During the Cretaceous and Eocene periods, marine environments facilitated the deposition of limestones, marls, and phosphates. This region is home to several deposits and indicators of phosphate minerals, among which the Kef Essenoun deposit stands out(Dj.Onk).

The phosphates in this region are formed by the accumulation of organic matter oxidized by aerobic bacteria, releasing nutrients into the water. This process is known as phosphatization and glauconitization. The petrographic study conducted in Tébessa Sud highlights a notable enrichment in glauconite, favoring confined conditions with reducing tendencies. The analyses of the samples reveal the presence of pellets, coprolites, and phosphatized bioclasts, highlighting the marine origin of the phosphates. These phosphate deposits are distinguished by their high concentration of rare earth elements such as cerium, lanthanum, and neodymium, particularly observed in the main P2 layer of the Upper Thanetian. This abundance of rare earths gives the phosphates of Djebel Onk substantial economic value, essential in various technological industries.

Keywords : phosphates, Kef Essenoun (Dj. Onk), glauconitization, economy, pellets ,coprolite, cerium, lanthanum, neodymium.

Agzul:

Tamnađt n Tibessa, ay d-yezgan deg Atlas n Tniri Tutrimt Tagmuđant (tacerqit), tettqeddim-d yiwen n uswir n tgemmi (Tajyulujit) aydeg ttwasemmant tgemmiwin n Trias ay yettwađuzan s leqdic n tdiapirit, ladya iyerruba n marl, n ljob d yidolumiten. Deg tallit n Cretaceous d Eocene, tiwennađin n yilel hemmlent atas asenqes n yizra n lhemmam, n marl d yifusfaten. Tamnađt-a tesea atas n tmezđiyin d yidrisen n tmezđiyin n ufusfat, gar-asant tmezđiyin n Kef Essenoun (Dj. Onk) ay d-yeffyen.

Ifusfaten deg temnađt-a ttwaxelqen-d s ussemres n tyawsiwin tiyel nawin ay tt-id-sbeddent tbaktiriyin tiyel nawin, dya d aya ay d-yessuffuyen ifarisen n tučcit deg waman. Tazrawt-a tettwassen s yisem n usfusfat d usfus n tglaukunit. Tazrawt n tzegwa ay d-yellan deg Tibessa n Wenzul tesskanay-d asnerni ay d-yellan s wazal-nnes deg glaukunya, yerna tetthemmil tignatin n themla n themla s tmuyliwin n usnefli. Tizrawin n tmuyliwin-a ssekent-d tilin n yiferdisen n tmezđiyin (pellets), n tmezđiyin (koprolit) d yiferdisen n tmezđiyin (bioklast) yettwasfusfaten, dya d aya ay d-yesskanayen azar n yilel n yifusfaten-a.

Tisfifin-a n ufusfat ttwaferqent s tyawsiwin-nsent timeqranin n wakal n tzegwa am cerium, lanthanum d neodymium, ladya deg uswir agejdan n P2 n Thanetian Ufella. Tuget-a n wakal n tmurt n Djebel Onk tefka-d azal adamsan ameqran i yifusfaten n Djebel Onk, d ayen yellan d llsas deg temguriwin titeknulujiyin yemgerraden.

Awal n tmezriwt :Ifusfaten, Kef Essenoun (Dj. Onk),aglukunit, , tadamsa, Pellets ,koprolit, cerium, lanthanum ,neodymium.

Sommaire :

Chapitre I : Généralités

I. Introduction.....	1
I.1 But du travail :.....	1
I.2 Méthodologie du travail :.....	2
I. 2. 1 Recherche bibliographique :	2
I .2.2 Travaux du terrain :.....	2
I .2.3 Travaux de laboratoire	2
II. Aperçu sur le phosphate :.....	2
I.1 Description des phosphates à l'échelle mondiale :	2
I.2 Description des phosphates à l'échelle africaine	3
II.2 Chimie des phosphates	4
II.3 Minéralogie des phosphates.....	4
II.4 Économie des phosphates et leurs utilisations :.....	5
III. Les phosphates en Algérie	6
III.1 Situation géographique de région de Tébessa	6
III.2 Situation géographique de la zone d'étude	7
III.3 Contexte Géologique	7
III.4 Caractéristiques Climatiques et végétales :.....	7
III .5 Historiques du complexe de Djebel Onk	8
Conclusion.....	9

Chapitre II : Géologie régionale et locale

Introduction	13
I. Litho-stratigraphie régionale	13
II. Géologie locale.....	15
II.1 Description des faciès	16
II.1.1 Crétacé :.....	16
II.1.1.1 Le Maestrichtien :.....	16
II.1.2 Le Paléocène	16
II.1.2.1 Le Danien	16
a. Le Danien inférieur :.....	16
b. Le Danien supérieur	16
II.1.2.2 Le Montien :	17
II.1.3 Thanétien :	17
II.1.3.1 Le Thanétien inférieur :	17
II.1.3.2 Le Thanétien supérieur :.....	17
a. La Couche basale :.....	17
b. La Couche principale :	17
c. La Couche sommitale :	18
II.1.3 L'Eocène :.....	18
II.1.3.1 L'Yprésien :.....	18
a. L'Yprésien inférieur :.....	18
b. L'Yprésien supérieur :.....	18
II.1.3.2 Le Lutétien :.....	18
a. Lutétien inférieur :.....	18
b. Lutétien supérieur :.....	18

II.5. Le Miocène :	18
II.1 Le Quaternaire :	19
II.2 Etude structurale	19
a. La tectonique Syn-Sédimentaire.....	20
b. La tectonique Post-Éocène Moyen et Anté-Miocène.....	20
c. Tectonique tardi-Miocène, Post-Burdigaliennne, à Pliocène-Pléistocène	20
II.3 Paléogéographie.....	21
III. Genèse des dépôts de phosphates sédimentaires	24
III.1 Processus de phosphatation et glauconitisation :	25
IV. Pétrographie.....	27
Conclusion.....	33
Chapitre III : caractérisation géochimique des phosphates du Djebel Onk	
I. Introduction	35
I.1 Eléments majeurs :	35
I.2 Les terres rares (ETRs)	35
I.2.1 Propriétés.....	36
a. Propriétés physico-chimiques des terres rares :.....	36
b. propriétés physiques :.....	36
c. Propriétés chimiques.....	37
d. Propriétés générales :.....	39
I.2.2 Domaines d'utilisation des terres rares	40
I.2.3. Le marché des terres rares.....	44
II. Partie analytique.....	44
II.1 Echantillonnage	45
II.2 Méthodes d'analyses	45
II.2.1 Analyses de la spectrométrie par fluorescence X (XRF)	45
II.2.2 Analyse chimique des éléments traces par Spectrométrie d'émission de plasma à couplage inductif :	46
II.3 Résultats des analyses.....	47
II.4 Interprétation et discussion	50
II.4.1 La distribution des éléments de terres rares (ETR)	50
II.4.2 Distribution des éléments importants : lanthane – Cérium – Néodyme.....	51
II.4.3 Distribution des valeurs les plus hautes et les plus basses des ETR	51
II.4.4 Intérêt économique des éléments de terres rares (ETR).....	53
Conclusion.....	54
Conclusion générale	56

Liste des Tableaux	Page
Tableau 1 : substitutions possibles dans la francolite. les substitutions importantes sont indiquées en gras (Jarvis et al., 1994).	4
Tableau 2 : Répartition des éléments de terres rares dans le tableau périodique selon Mendeleïev (1869).	36
Tableau 3 : Propriétés physiques des métaux stratégiques	37
Tableau 4 : Potentiels redox des terres rares en volts par rapport à l'ENH	38
Tableau 4.1 : Constantes de pks des sels d'hydroxydes des Etrs trivalents	39
Tableau 4.2 : Constantes de pks des sels d'hydroxydes des Etrs.	39
Tableau 5 : Utilisation des terres rares.	41
Tableau 6 : Concentration des éléments majeurs (oxydes) dans les phosphates de Kef Essennoun (Djebel Onk).	47
Tableau 7 : Analyse comparative des concentrations d'éléments terres rares (en ppm) entre différentes parties du Thanetien supérieur.	49
Tableau 8 : Contenance de la Σ Etrs stratégiques dans les trois couches phosphate	52
Tableau 9 : Concentration des terres rares dans Les phosphates Les plus intéressantes économiquement.	52
Tableau 10 : Cours mondial des terres rares	53

Liste des figures	Page
Figure 1 : Réserves mondiales de roches phosphatées. source : Us Geological Survey, 2010	3
Figure 2 : Principaux producteurs de phosphates en Afrique	3
Figure 3 : Situation géographique de wilaya de Tébessa.	6
Figure 4 : Carte topographique de Bir El Ater , Djebel Fououa (297) Bir El Ater Feuille n° 327-B14-C31 type 1922 .Ech 50 000	7
Figure 5 : Photo montrant la complexité géologique de l’afrique du nord, qui est composée de plusieurs unités structurales (D’après Durand Delga Et al, 1980).	13
Figure 6 : Log lithostratigraphique des monts du mellegue (D’apres Sami, 2004 – colonne de synthèse réalisée sur la base des travaux de Dubourdiou 1956 ; 1959 ; David 1956 ; Fleury ; 1969 ; Thibieroz et, Madre, 1976 ; Otmanine 1987 ; Bouzenoune ; 1993)	14
Figure 7 : Marnes argileuses feuilletées avec un filon de gypse	16
Figure 8 : Calcaire dolomitique lumachellique du Montion	17
Figure 9 : Montrant le niveau a silex dans L'ypresien	18
Figure 10 : Log lithostratigraphique de Djebel Onk par L.D. Visse (1951)	19
Figure 11 : Montrant un schéma panoramique des formations du site d'étude	20
Figure 12 : Coupes stratigraphiques et structurales des Flans Nord et Sud de Djebel Onk (Cielnsky et al, 1988).	21
Figure 13 : Situation paléogéographique des gisements de phosphate de la région de Djebel Onk a l'intérieur du bassin phosphate Gafsa – Metlaoui – Onk (D’après Buroillet et Oudin, 1980; Fourine, 1980; Sassi, 1974 Et 1980)	23
Figure 14 : Environnements de dépôts des phosphates formes marines et sous les mers sédimentaires. les dépôts épicontinentales (Pufahl and Groat, 2017).	24
Figure 15 : processus de phosphatogenese. (A) Environnement a upwellings ou la dégradation microbienne de la matière organique (C) dans le sédiment augmente la concentration en phosphate dissous dans l'eau interstitielle, provoquant la précipitation de la francolite. Cette précipitation est limitée en profondeur par la diffusion de F- dérive de l'eau de mer. (B) Rôle des oxyhydroxides de fer dans le pompage du phosphore et le maintien de concentrations élevées de cet élément qui permettront la précipitation de la francolite dans les environnements sans Upwellings (Pufahl & Groat, 2017).	25

Figure 16 : Diagramme de flux simplifié mettant en évidence les processus de glauconitisation et de phosphatation basés sur la littérature (par exemple porrenga, 1968 ; Odin et Letolle, 1980 ; Chabou- Mostefai, 1987 ; Rao et Coll., 1993 ; Baldermann et Coll., 2012 ; Auer et Coll., 2017)	26
Figure 17 : Les 14 lanthanides non radioactifs.	39
Figure 18 : Histogrammes des teneurs en éléments majeurs des couches phosphatées de bassin minier Kef Essennoun (Djebel Onk).	48
Figure 19 : Histogrammes montrant les variations des concentrations d'éléments de terres rares (en ppm) dans les strates du Thanétien supérieur de Kef Essennoun (Djebel Onk).	50

Liste des Planches	Page
Planche 1 : Photos démontrant le matériel phosphate de la couche basale (Thanétien supérieur) De Djebel Onk	28
Planche 2 : Photos présentant les divers composants de phosphorite présents dans les sous- couches de la couche principale du Thanétien supérieur.	30
Planche 3 : Photos montrant le matériel phosphate de la couche sommitale (Thanétien Supérieur) de Djebel Onk	32

Listes des abréviations

(ETRs) : Eléments de terres rares

°C : Degré Celsius

Al₂O₃ : Oxyde d'aluminium ou Alumine

Ba: Baryum

BPL: Bône Phosphate of Lime

BRGM : Bureau de recherches géologiques et minières.

CaO : Oxyde de calcium ou Chaux vive

Ce : Cérium

Cr : Chrome

Cs : Césium

Cu : Cuivre

Dy : Dysprosium

Er : Erbium

ERM : Entreprise de recherche minières.

Eu : Europium

Fe₂O₃ : Trioxyde de diferrum ou Oxyde ferrique

FERPHOS : l'Entreprise Nationale du Fer et du Phosphate.

G/T : Grammes par tonne

Ga : Gallium

Gd : Gadolinium

HCl : Acide chlorhydrique

HF : Acide fluorhydrique

HNO₃ : Acide nitrique

Ho : Holmium

ICP-OES : Spectrométrie d'émission optique à plasma à couplage inductif (Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry)

K₂O : Oxyde de potassium

Kg : Kilogramme

La : Lanthane

LPA : Lumière Polarisée et Analysée

LPNA : Lumière Polarisée et Non Analysée Les éléments chimiques :

Lu : Lutécium

mg : Milligramme

MgO : Oxyde de magnésium ou Magnésie

MnO : Oxyde de manganèse(II) ou Monoxyde de manganèse

Mo: Molybdène

MREE = middle rare earth elements

Na₂O : Oxyde de sodium

Nb : Niobium

Nd : Néodyme

Ni : Nickel

ORGM : Office National de la Recherches Géologiques et Minières.

P₂O₅ : Pentoxyde de phosphore ou Anhydride phosphorique

Pb : Plomb

PKs : logarithme négatif de la constante de solubilité

ppm : Parties par million

Pr : Praséodyme

Rb: Rubidium

Sb: Antimoine

Sc: Scandium

Sc : Scandium

SiO₂ : Dioxyde de silicium ou Silice

Sm : Samarium

Sn : Étain

SOMIPHOS : Société des Mines de Phosphates.

SONAREM : Société nationale de recherche et d'exploitation minière.

Sr : Strontium

T : Tonne

Tb : Terbium

TiO₂ : Dioxyde de titane

Tm: Thulium

TPL: Total Phosphate as P (**PO₄³⁻**): ion phosphate

US \$: Dollar américain

V : Vanadium

XRF : Fluorescence X ou Fluorescence des rayons X (X-Ray Fluorescence)

Y : Yttrium

Yb : Ytterbium Les oxydes :

Zn : Zinc

Zr : Zirconium

Chapitre I : Généralités

I. Introduction

L'Algérie se manifeste comme l'un des pays les plus riches en phosphates. Ce territoire étendu, regorgeant de ressources naturelles, présente un potentiel minier important qui demeure largement inexploré. Par ailleurs, Les sous-sols algériens renferment une grande diversité de minéraux, où les phosphates constituent un facteur essentiel pour l'économie nationale et internationale. Les phosphates Algériens se démarquent tant par leur quantité que par leur qualité remarquable, ce qui accentue leur importance dans le dynamisme économique du pays.

Au cœur de ce potentiel minier se trouve la région de Tébessa, située à l'extrémité orientale de l'Algérie, Elle est célèbre pour abriter les gisements du Djebel Onk, qui constituent l'une des plus grandes réserves de phosphates du pays. Ces gisements sont d'une grande importance pour l'économie locale et nationale en raison de leur ampleur et de leur richesse. Cependant, il est essentiel d'approfondir l'analyse en réalisant une étude géochimique approfondie de ces phosphates. En effet, cette étude ne se limite pas à déterminer leur composition minérale, elle vise également à identifier les métaux stratégiques qu'ils pourraient contenir.

L'objectif de ce mémoire est de réaliser une approche géologique et géochimique Exhaustive des phosphates du Djebel Onk. L'accent sera mis sur la caractérisation géochimique des phosphates afin de détecter la présence de métaux stratégiques, tels que les terres rares. Ces éléments sont prépondérants pour les industries modernes, notamment dans les secteurs de haute technologie, de l'électronique et des énergies renouvelables. En intégrant ces métaux dans les chaînes de valeur de ces industries, l'Algérie pourrait non seulement valoriser ses ressources naturelles, mais aussi renforcer sa position économique sur le marché mondial.

Ce mémoire est organisé en III chapitres, qui abordent les différents aspects du thème étudié, ci-après :

Chapitre I : Généralités

Chapitre II : Géologie régionale et locale

Chapitre III : Caractérisation géochimique des phosphates du Djebel Onk

I.1 But du travail :

Ce mémoire a été effectué dans le cadre d'un master option « Ressources, Minérales-Géomatériaux et Environnement » sur la région du Djebel Onk, en Algérie.

Le travail a été subdivisée en deux parties. La première partie a porté sur l'aspect lithostratigraphique, pétrographique et minéralogique des dépôts phosphatés. La deuxième partie a consisté en Une étude géochimique analyses qualitative et quantitative des éléments majeurs, traces et terres rares, et une caractérisation géochimique des phosphates dans le but d'une plus-value économique.

Chapitre I : Généralités

I.2 Méthodologie du travail :

I.2.1 Recherche bibliographique :

- Consultation des thèses et mémoires, publications relatives aux gisements de Phosphates de Tébessa "Djebel Onk"
- Consultation des cartes géologiques sur le Djebel Onk.

I.2.2 Travaux du terrain :

Le travail sur terrain a consisté en un :

Un levé géologique sur les différents faciès présents au niveau du gisement de Kef Essenoun.

Un échantillonnage des différents couches de phosphates du gisement et l'encaissant de Kef Essenoun, le prélèvement a consisté en 08 échantillons, de bas en haut, pour couvrir tous les faciès présents, notamment les faciès phosphatés.

I.2.3 Travaux de laboratoire

- La réalisation de lames minces sur les différents Faciès.
- Des analyses chimiques " réalisés au niveau de l'ORGM de Boumedres"

II. 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 mondiale en raison de leur polyvalence et de leurs propriétés uniques. Ils sont utilisés dans divers secteurs, jouant un rôle indispensable non seulement dans l'agriculture, mais également dans les industries chimique, alimentaire, de traitement des eaux et surtout, dans le secteur minier. À l'échelle mondiale, des pays tels que la Chine, les États-Unis et le Maroc dominent la production de phosphates, tandis que le Maroc et la Tunisie sont des acteurs clés en Afrique. L'industrie minière des phosphates est un pilier économique pour de nombreux pays, générant des emplois et stimulant le développement des infrastructures. Par conséquent, une gestion efficace et durable des ressources en phosphate est essentielle pour maximiser leurs avantages économiques tout en répondant aux besoins industriels mondiaux.

II.1 Description des phosphates à l'échelle mondiale :

Les réserves mondiales de phosphates sont principalement concentrées au Maroc, qui détient une part importante de ces ressources. Cette répartition inégale rend de nombreux pays dépendants de quelques grands producteurs, ce qui peut entraîner des implications économiques et politiques significatives. Les principales réserves se trouvent en Afrique (Maroc, Sénégal, Togo, Afrique du Sud) et en Asie (Chine, Jordanie, Arabie Saoudite). Les États-Unis, la Chine, la Russie et le Brésil possèdent également des réserves importantes, mais en quantités bien inférieures à celles du Maroc. En Europe, les réserves sont relativement faibles, avec des gisements principalement en Finlande et en Russie. Face à cette concentration, la recherche de nouvelles sources et le développement de technologies de recyclage sont essentiels pour assurer une gestion durable des phosphates.

Chapitre I : Généralités

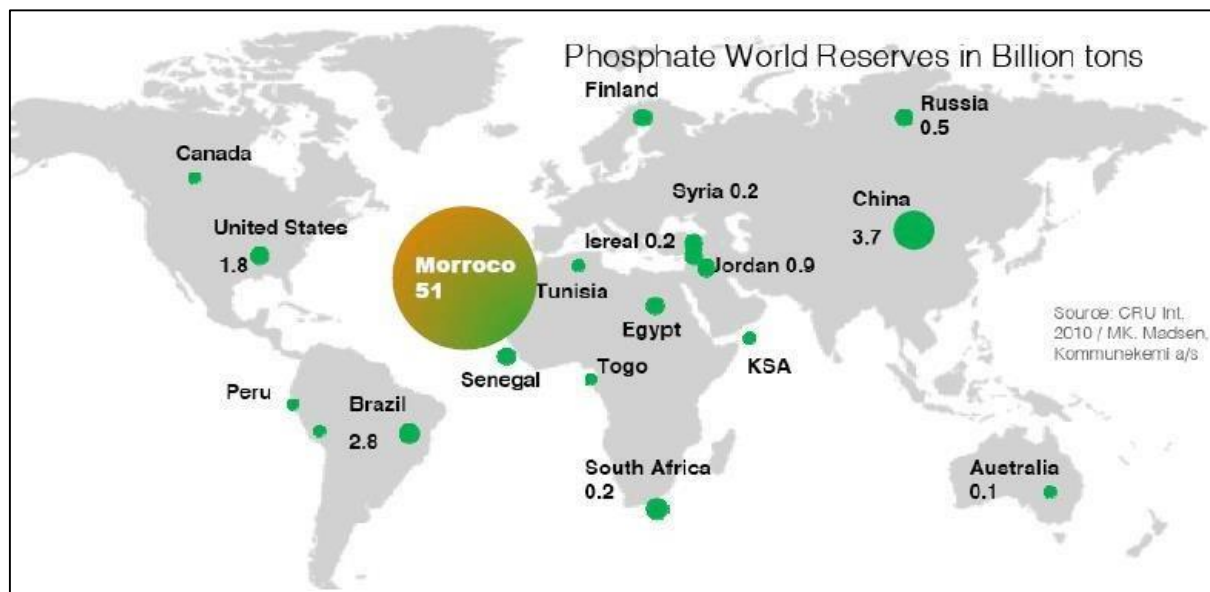


FIGURE 1 : RESERVES MONDIALES DE ROCHES PHOSPHATEES. SOURCE : US GEOLOGICAL SURVEY, 2010

II.2 Description des phosphates à l'échelle africaine

En Afrique, les phosphates constituent une ressource minière précieuse, avec des réserves importantes concentrées principalement dans quelques pays clés. Le Maroc se distingue comme le principal producteur et détenteur de réserves de phosphates en Afrique, notamment avec les gisements majeurs de Khouribga et Boucraa. D'autres pays africains, tels que le Sénégal, L'Algérie, le Togo et l'Afrique du Sud, (Fig 2) possèdent également des réserves notables et contribuent ainsi de manière substantiel au marché régional des phosphates.

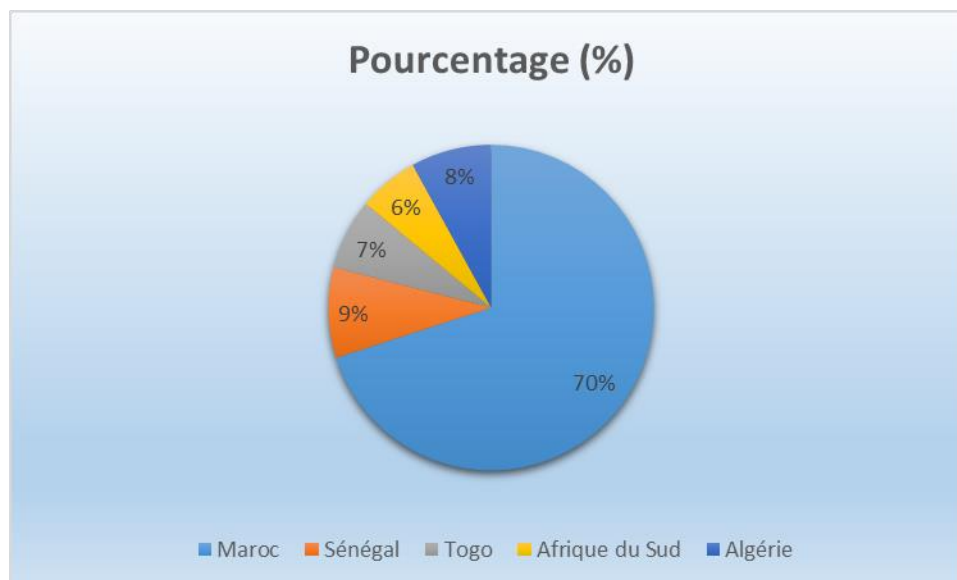


FIGURE 2 : PRINCIPAUX PRODUCTEURS DE PHOSPHATES EN AFRIQUE

II.3 Chimie des phosphates

La chimie des phosphates englobe l'étude des composés contenant l'ion phosphate (PO_4^{3-}) tels que les orthophosphates et les polyphosphates. Ces composés sont utilisés dans divers secteurs industriels, tels que la fabrication d'engrais, le traitement de l'eau et l'amélioration des détergents.

Chimiquement, les minerais phosphatés sont définis en fonction de leur teneur en P_2O_5 (ou en pourcentage de phosphate tricalcique (TPL ou BPL : Bône Phosphate of Lime), qui est considéré comme le produit de base (1 TPL = 2,185 P_2O_5). Les recherches géochimiques montrent que les éléments chimiques dans les minerais de phosphate sont associés à des phases minérales telles que les argiles, les carbonates, les apatites et la silice. L'analyse des composants de ces phases (comme P_2O_5 , MgO, CaO, SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , TiO_2 , Na₂O, K₂O) permet de déterminer la répartition des éléments et leur relation avec les phases minérales. Les éléments majeurs sont généralement associés aux principales phases minéralogiques, tandis que les pertes au feu sont principalement liées aux argiles et aux carbonates. Les éléments mineurs et traces se retrouvent dans les phases argileuses et phosphatées, avec les argiles contenant des éléments tels que Ba, Cr, Cs, Cu, Ga, Mo, Nb, Ni, Pb, Rb, Sb, Sn, Sc, Sr, V, Zn, Zr et les apatites contenant Ce, Dy, Er, Gd, Ho, La, Lu, Nd, Pr, Sm, Tb, Th, Tm, U, Y, Yb et Sr.

II.4 Minéralogie des phosphates

Les phosphates peuvent être de différentes origines : associés aux roches ignées, métamorphiques et sédimentaires. Notre étude traite des phosphates sédimentaires, dominés par la francolite. La francolite est un minéral authigénique de formule chimique générale $[\text{Ca}_{10-a-b}\text{Na}_a\text{Mg}_b(\text{PO}_4)_{6-x}(\text{CO}_3)_{x-y-z}(\text{CO}_3^*\text{F})_{x-y-z}(\text{SO}_4)_z\text{F}_2]$ (Jarvis et al., 1994).

Elle contient typiquement 32% de P_2O_5 , 52% de CaO et 4% de F, avec des proportions de $1,2 \pm 0,2\%$ de Na, $0,25 \pm 0,02\%$ de Sr, $0,36 \pm 0,03\%$ de Mg, $2,7 \pm 0,3\%$ de SiO_2 et $6,3 \pm 0,3\%$

Ion constituant	Ion de substitution
Ca^{2+}	Na^+ , K^+ , Ag^+ , Mg^{2+} , Sr^{2+} , Ba^{2+} , Cd^{2+} , Mn^{2+} , Zn^{2+} , Bi^{3+} , Sc^{3+} , Y^+ , REE^{3+} , U^{4+}
PO_4^{3-}	CO_3^{2-} , SO_4^{2-} , CrO_4^{2-} , $\text{CO}_3 \cdot \text{F}^{3-}$, $\text{CO}_3 \cdot \text{OH}^{3-}$, AsO_4^{3-} , VO_4^{3-} , SiO_4^{4-}
F^-	OH^- , Cl^- , Br^- , O^{2-}

TABEAU 1 : SUBSTITUTIONS POSSIBLES DANS LA FRANCOLITE. LES SUBSTITUTIONS IMPORTANTES SONT INDIQUEES EN GRAS (JARVIS ET al., 1994).

Chapitre I : Généralités

Les phosphates sédimentaires comprennent également des proportions variables de dahllite [$\text{Ca}_5(\text{PO}_4, \text{CO}_3)_3(\text{OH})$], un minéral semblable à l'hydroxyapatite, qui constitue les os, l'émail dentaire et la dentine (Zapanta LeGeros, 1981). En outre, d'autres minéraux phosphatés non apatitiques peuvent se former dans les phosphates sédimentaires, principalement des minéraux secondaires ferreux et alumineux résultant de l'altération du phosphate primaire (Lucas et al., 1980 ; Bonnot-Courtois & Flicoteaux, 1989 ; Jarvis et al., 1994). Ces minéraux incluent la millisite, la crandallite, la wavellite et la strengite (Lucas et al., 1980 ; Bonnot-Courtois & Flicoteaux, 1989 ; Jarvis et al., 1994). La composition minéralogique des phosphates sédimentaires comprend également des minéraux tels que la calcite, la silice, la dolomite, la glauconite, la pyrite, le gypse, les minéraux argileux (illite, kaolinite, palygorskite et smectite) et la matière organique (Jarvis et al., 1994).

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).

II.5 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.

Chapitre I : Généralités

III. Les phosphates en Algérie

Etude de cas : Gisement du Djebel Onk

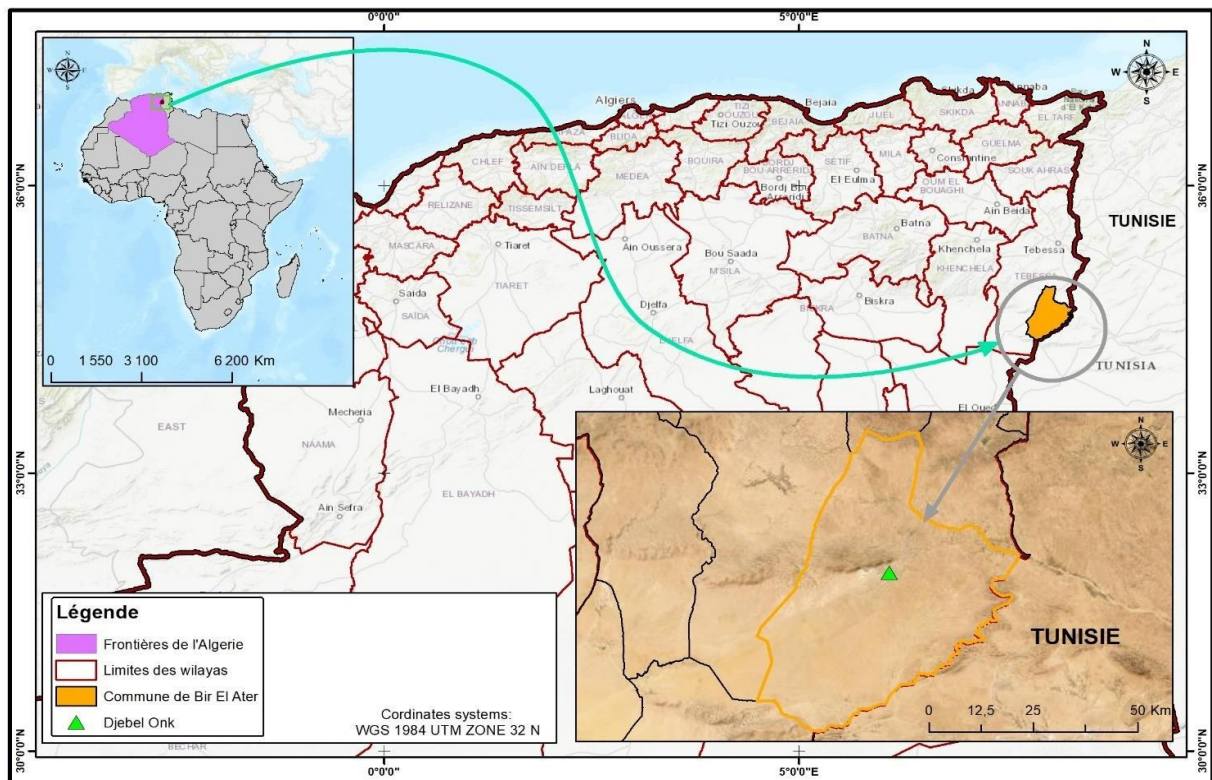
Les phosphates en Algérie sont essentiels pour le secteur minier et l'économie du pays. Parmi les gisements de haute qualité, celui du Djebel Onk est remarquable par sa taille et sa richesse en métaux stratégiques, ce qui en fait le sujet principal de notre étude. Localisé dans le sud-est de l'Algérie, Djebel Onk est très important pour l'économie nationale, en soutenant le développement industriel et en ajoutant à la diversité des ressources naturelles du pays.

III.1 Situation géographique de région de Tébessa

La région de Tébessa est située dans l'Atlas saharien oriental, à environ 600 km au sud-est d'Alger. Elle s'étend sur une superficie de l'ordre de 13 878 Km² et partage avec la Tunisie une frontière de 297 Km de long (10 communes frontalières), Elle est limitée :

- Au nord, par la wilaya de Souk Ahras,
- A l'ouest, par les wilayas d'Oum El Bouaghi et Khenchla,
- Au sud, par la wilaya d'El Oued,
- A l'est, par la Tunisie.

Sur le plan géographique, la wilaya de Tébessa appartient aux deux régions du nord, la région de l'Atlas à structure plissée formée par : Les monts Nememchas et Tébessa ont le plus haut sommet de sur 1 250 m (Djbel Ozmor : 1 591 m ; Djbel Kemakem : 1 277m et Djebel Onk : 1 358 m). La région englobe également les Hauts Plateaux (le plateau de Darmoun, Safsaf El-Ouesra, Berzguel) et les hautes plaines (Morsott, Mechentel, BehiretLarneb, Gassés, BhiretThlidjene, etc...) De plus le domaine saharien au Sud avec une structure tabulaire formée par le Plateau du Sahara. (Fig 3)



Source: Limites administratives de l'Algérie(2022) & Compilation de TIZA Assia (2024)

FIGURE 3 : SITUATION GEOGRAPHIQUE DE WILAYA DE TEBESSA.

Chapitre I : Généralités

III.2 Situation géographique de la zone d'étude :

Le district du Djebel Onk est situé à environ 100Km au Sud de la ville de Tébessa, à l'extrémité orientale de l'Atlas saharien près de la frontière Algéro-Tunisien. Il s'étend sur une longueur de 20kilomètres et une largeur de 3 kilomètres. Son point culminant, le Djebel Tarfaya, atteint 1198 mètres d'altitude. Ce bassin minier renferme plusieurs indices et cinq gisements :

- Gisement de Djemi-Djema ;
- Gisement du Djebel Onk Nord ;
- Gisement de Bled Hadba ;
- Oued Betita ;
- Gisement de Kef Essennoun.

Ce dernier, qui est l'objet de notre étude, est situé sur le flanc méridional de Dj. Onk, à environ 09 Km au Sud-ouest de la ville de Bir El Ater. (Fig 4)

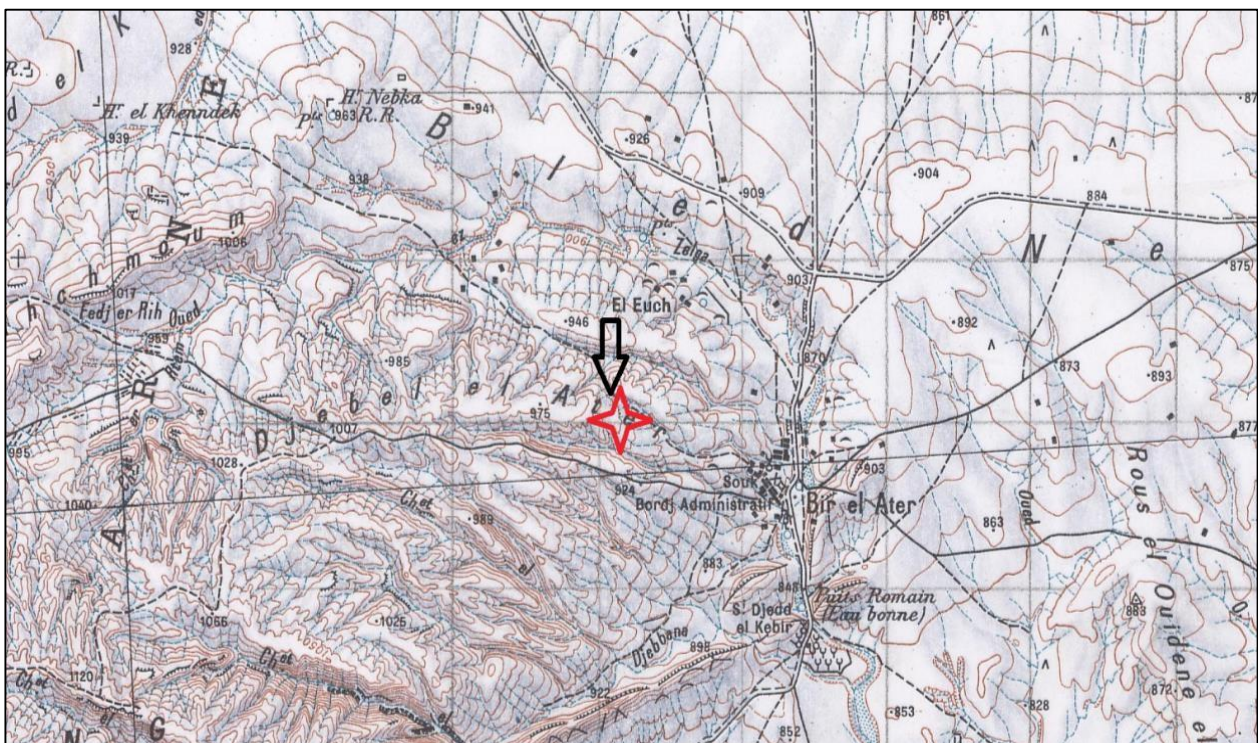


FIGURE 4 : CARTE TOPO DE BIR EL ATER, DJEBEL FOUOUA (297) BIR EL ATER ; INSTITUT NATIONAL GEOGRAPHIQUE 1952.

III.3 Contexte Géologique :

La région de Tébessa, située sur le territoire de l'Atlas saharien, se présente comme une chaîne de montagnes s'étendant d'ouest en est à travers la frontière Algéro-Tunisienne. Elle est strictement d'âge Crétacé à Miocène avec un recouvrement Quaternaire. Les intrusions triasiques ont déformé les roches encaissantes, ce qui a entraîné des inversions de pendage et des réductions d'épaisseur.

III.4 Caractéristiques Climatiques et végétales :

La wilaya de Tébessa, située entre les climats méditerranéen et continental, présente quatre zones climatiques :

Chapitre I : Généralités

- **Sub-humide** : 400-500 mm de pluie/an, limitée aux sommets des montagnes.
- **Semi-aride** : 300-400 mm de pluie/an, couvrant le nord avec des températures fraîches.
- **Sub-aride** : 200-300 mm de pluie/an, sur les plateaux steppiques.
- **Aride ou saharien doux** : moins de 200 mm de pluie/an, dans les plateaux Sud.
La végétation est dominée par des prairies et des graminées en été, et des forêts clairsemées en hiver.

III.5 Historiques des travaux de Djebel Onk :

L'histoire des travaux sur les phosphates Algéro-Tunisiens remonte au 18^{ème} siècle.

- C'est en 1873 que Philippe Thomas découvre des couches de phosphate près de Rass-El Ajoun au Sud-Ouest de la Tunisie.

- L'exploitation des phosphates de Dj. Dyr a débuté en 1893, suivie par celle du Kouif. Cependant, les conditions d'exploitation difficiles et les faibles teneurs en phosphore de Dj. Dyr ont conduit à son abandon en 1908. La mine d'El Kouif est ainsi devenue le principal producteur de phosphates de la région.

- En 1906-1907, M. Joleau a découvert le gisement de phosphate de Djebel Onk, situé au sud de la ville de Tébessa. Ce gisement est constitué de deux couches de phosphate, l'une située à Djemi-Djema et l'autre à Djebel Onk.

- Le gisement de phosphate de Kouif, situé à l'ouest de Djebel Onk, a été exploité par la société des phosphates de Constantine. La production a atteint 157 000 tonnes en 1918.

- La SON.AR.EM a repris l'exploitation du gisement d'El Kouif en 1963, après l'indépendance de l'Algérie. L'exploitation a duré jusqu'à la fermeture de la mine en 1979, soit une durée de 16 ans.

- La fermeture de la mine d'El Kouif a entraîné une intensification des recherches minières dans la région de Tébessa Sud. Des levés radiométriques aéroportés ont été effectués sur le bassin du Djebel Onk de 1961 à 1963. Ces levés ont été réalisés à la suite du succès de cette méthode dans l'Atlas Tellien, le long des affleurements de l'Eocène. Par ailleurs, les études ont été poursuivies par Ranchin (1963), qui a établi les cartes géologiques à l'échelle 1/5000.

- L'exploitation des gisements de phosphate de Djebel Onk a débuté en février 1965 à Djemi-Djema, par la Société de Djebel Onk. La mise en exploitation de la carrière a suscité un intérêt croissant pour la géologie de la région. Djebel Onk est alors devenu un objet d'étude pour de nombreux chercheurs, dont Chabou-Mostafai (1987) et Mezghache (1991).

- De 1985 à 1987, la FERPHOS a confié à l'EREM des travaux de recherche sur les gisements de phosphate de Djebel Onk. Ces travaux ont permis d'identifier de nouvelles réserves et ont été utilisés pour le développement de l'exploitation de ces gisements.

- La Société Nationale du Fer et des Phosphates (FERPHOS) a publié en 1989 un cahier des charges pour des études de développement du complexe minier de Djebel Onk.

- En 1993, le Bureau de recherche géologique et minière (BRGM) a fourni un rapport d'expertise géologique de tous les gisements de Djebel Onk.

- Dans les années 2010 et 2020, les recherches se sont concentrées sur les impacts environnementaux de l'extraction du phosphate. Les scientifiques ont exploré des méthodes d'exploitation minière durables et évalué l'impact écologique global.

Chapitre I : Généralités

- La SOMIPHOS (Société des Mines de Phosphate) est l'une des entreprises minières les plus remarquables en Algérie, chargée de l'exploitation et du traitement du phosphate. Elle joue un rôle essentiel dans le développement économique du pays. En 2018, elle a produit et exporté 1,6 million de tonnes de minerai de phosphate, ce qui en fait le cinquième plus grand exportateur mondial en termes de volume.

Conclusion

Le premier chapitre aborde la thématique des phosphates, des composés chimiques essentiels contenant l'ion phosphate (PO_4^{3-}), et leur importance dans divers secteurs industriels.

À l'échelle mondiale, la production de phosphates est dominée par des pays tels que la Chine, les États-Unis et le Maroc. Ce dernier est reconnu pour détenir les plus importantes réserves mondiales. En Afrique, le Maroc est le principal producteur, avec des gisements significatifs comme ceux de Khouribga et Boucraa. D'autres pays, tels que le Sénégal, le Togo et l'Afrique du Sud, sont également des producteurs importants.

La chimie élaborée des phosphates, qui inclut des composés tels que les orthophosphates et les polyphosphates, est fondamentale pour une gamme étendue d'applications industrielles.

Sur le plan minéralogique, les phosphates sédimentaires, en particulier ceux qui sont riches en francolite, révèlent une composition géochimique variée avec des éléments traces et des terres rares. Économiquement, les phosphates reposent principalement sur leur utilisation dans l'agriculture, les technologies de pointe et l'alimentation animale, ce qui contribue à la sécurité alimentaire et à l'innovation technologique.

En Algérie, le gisement de Djebel Onk, situé au sud de la ville de Tébessa et à l'extrémité orientale de l'Atlas saharien, près de la frontière Algéro-Tunisienne, constitue un exemple significatif de la richesse en phosphates du pays.

Ce gisement est réputé pour ses réserves de haute qualité, offrant une composition géochimique avantageuse qui en fait un atout stratégique majeur pour le développement économique national. Les phosphates de Djebel Onk présentent une concentration élevée en minéraux essentiels, ce qui les rend particulièrement précieux pour divers secteurs industriels.

Chapitre II : Géologie régionale et locale

Introduction

La région de Tébessa fait partie de l'Atlas saharien oriental et comprend les montagnes de Mellègue, c'est une chaîne montagneuse qui s'étend de l'est jusqu'à l'Atlas Tunisien.

Les précisions sur la géologie régionale et le contexte géodynamique de l'Atlas saharien oriental ont été détaillés suite aux travaux (eg : Burollet, 1956 ; Dubourdiou, 1956 ; 1959 et Vila, 1980, ...).

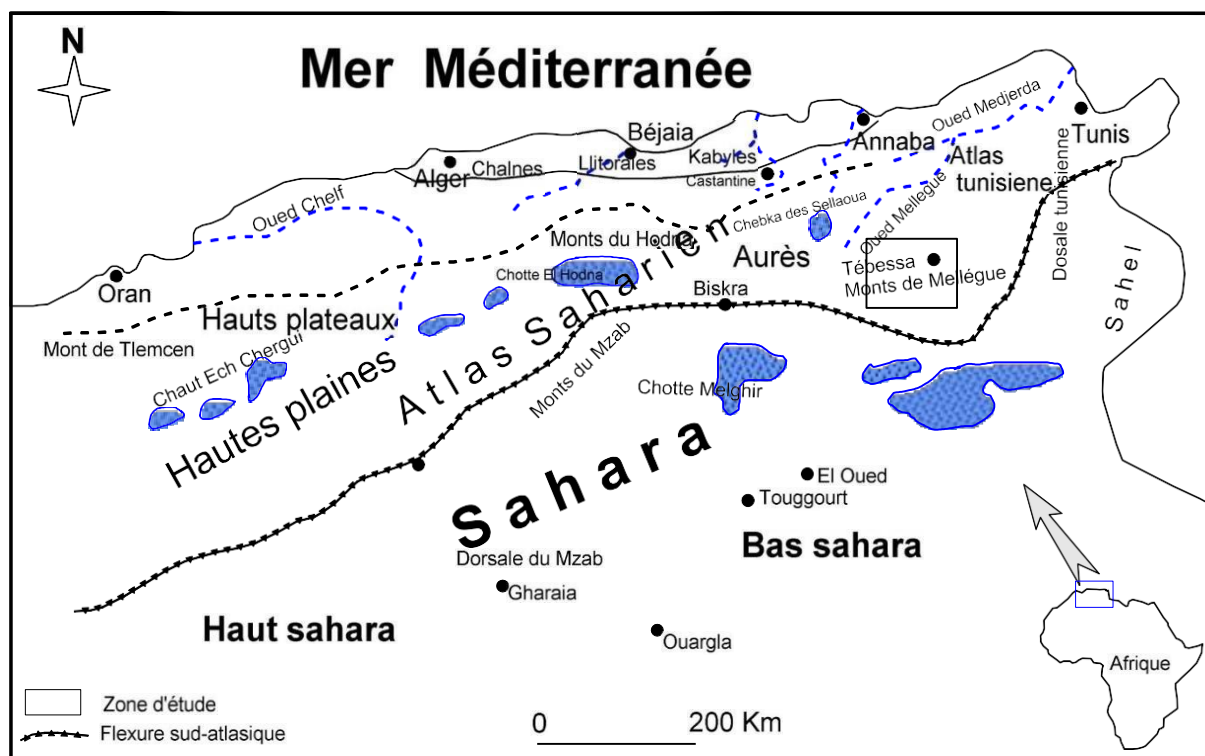


FIGURE 5 : CARTE MONTRANT LA COMPLEXITE GEOLOGIQUE DE L'AFRIQUE DU NORD, QUI EST COMPOSEE DE PLUSIEURS UNITES STRUCTURALES (D'APRES DURAND DELGA ET al, 1980).

I. Litho-stratigraphie régionale

À Tébessa, les formations géologiques affleurantes sont celles du Mésozoïque, du Cénozoïque et le Quaternaire. Les strates sédimentaires à l'affleurements sont de nature carbonatées et s'étendent du Trias au Miocène, le Jurassique est absent. Ces formations sont recouvertes par une couche superficielle Quaternaire. (Blès et Fleury, 1971). (Fig 6)

Le détail de la lithologie et de son découpage stratigraphique est basé sur la synthèse des travaux de plusieurs auteurs (Dubourdiou 1956 ; 1959 ; David 1956 ; Fleury, 1969 ; Thiéberoz et Madre, 1976; Rouvier, 1977 ; Perthuisot, 1978 ; Chikhi 1980; Otmanine 1987; Perthuisot, 1992 ; Bouzenoune, 1993 ; ...). La colonne lithostratigraphique suivante résume l'essentiel de ces résultats (Sami, 2004).

Chapitre II : géologie régionale et locale

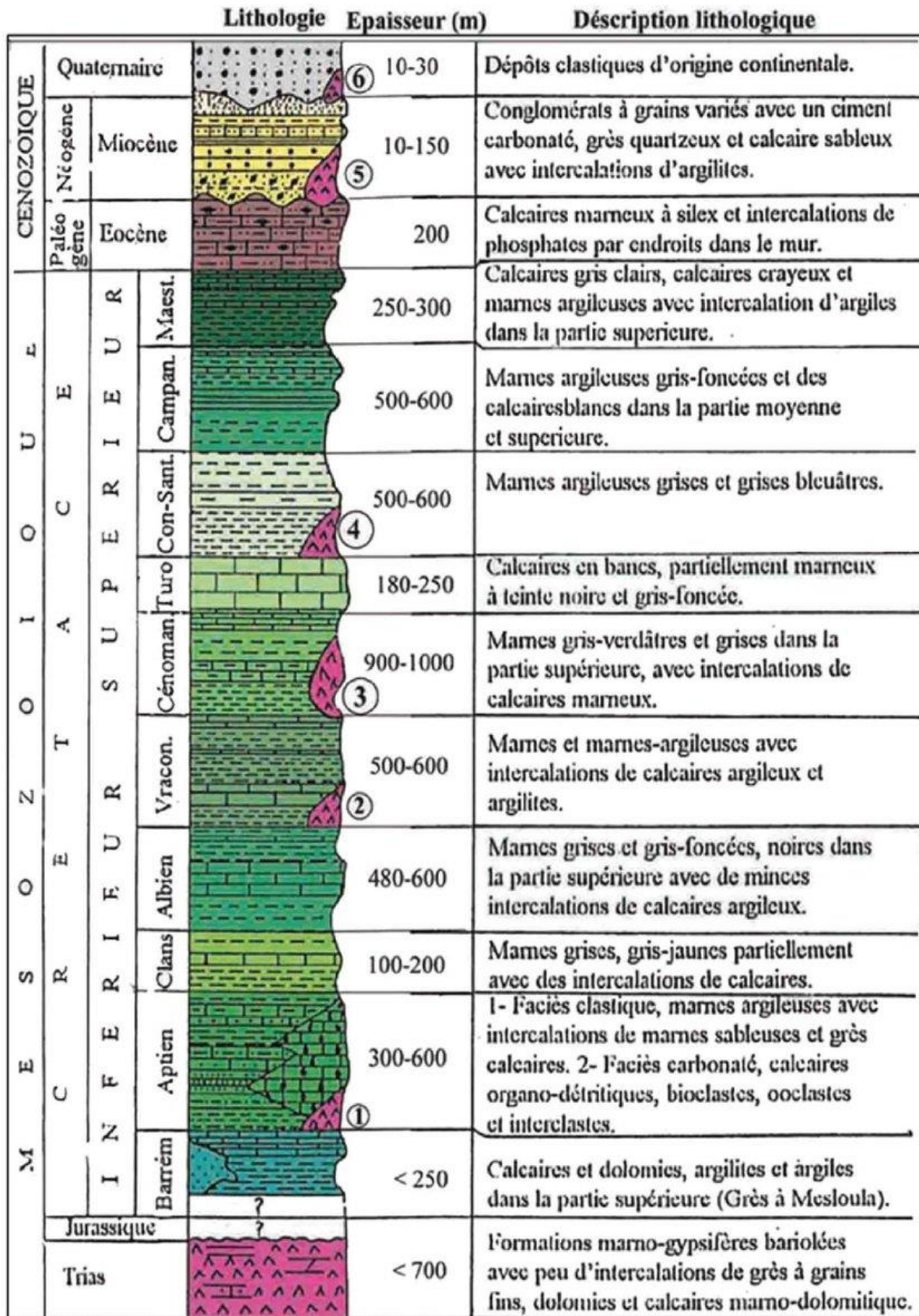


FIGURE 6 : LOG LITHOSTRATIGRAPIQUE DES MONTS DU MELLEGUE (D'APRES SAMI, 2004 – COLONNE DE SYNTHÈSE RÉALISÉE SUR LA BASE DES TRAVAUX DE DUBOURDIEU 1956 ; 1959 ; DAVID 1956 ; FLEURY ; 1969 ; THIBIEROZ ET, MADRE, 1976 ; OTMANINE 1987 ; BOUZENOUNE ; 1993)

Le Mésozoïque dans la région de Tébessa est représenté par les strates du Trias, du Jurassique et du Crétacé. Les strates triasiques, les plus anciennes à l'affleurement, incluent des faciès marno-gypseux, de la dolomite, du calcaire dolomitique, du grès remobilisé, et parfois des roches vertes. Les affleurements se trouvent notamment à l'Ouenza, Boukhadra, Mesloula et Hameimat Sud et Nord, avec des corps triasiques ayant généralement une forme elliptique orientée NE-SW (Dubourdiou, 1956 ; Masse et al., 1979 ; Masse et al., 1982). Les dépôts Jurassiques, bien que rares, ont été principalement rencontrés dans des sondages pétroliers, avec un lambeau de dolomie daté du Jurassique trouvé dans le diapir triasique de Hamimat Meskhouta (Dubourdiou, 1956 ; Chevenine et al., 1989).

Le Crétacé west largement distribué dans les monts du Mellègue, avec des formations du Barrémien, de l'Aptien, de l'Albien et du Vraconien présentes principalement dans les structures anticlinales, souvent en relation avec les diapirs du Trias.

Les formations Barrémiennes se trouvent dans de petits anticlinaux, avec des marnes grises ou jaunes et des calcaires marno-calcaires (Dubourdiou, 1956 ; Durozoy, 1956). Les formations aptiennes, bien développées, sont importantes pour les minéralisations ferrifères et polymétalliques (Dubourdiou, 1956). Les formations albiennes, principalement carbonatées, renferment une faune benthique caractéristique (Bouzenoune, 1993 ; Nedjari-Belahcène et Nedjari, 1984 ; Othmanine, 1987).

Le Crétacé supérieur comprend des dépôts du Cénomaniens, du Turonien, du Coniacien, du Santonien, du Campanien et du Maastrichtien, riches en fossiles marins, notamment en ammonites (Chevenine et al., 1989).

Le Cénozoïque est représenté par des formations du Paléocène, de l'Éocène, du Miocène et du Pliocène. Les formations éocènes comprennent des calcaires à silex et à nummulites, tandis que les dépôts Miocènes et pliocènes témoignent de l'activité tectonique et diapirique du Trias (Dubourdiou, 1956 ; Kowalski et al., 2000 ; Degaichia, 2014). Les dépôts Quaternaires continentaux, présents dans les plaines et vallées actuelles, sont composés de croûtes calcaires, de limons, d'éboulis, de cailloutis et de poudingues, avec une épaisseur variant de 10 à 30 mètres, illustrant l'évolution géologique continue de la région de Tébessa.

II. Géologie locale

Le site minier de Kef Essenoun, situé dans le Djebel Onk, est un important gisement mondial de phosphorite qui présente des différences notables par rapport au bassin tunisien des phosphorites de Gafsa-Metlaoui, notamment en termes de lithologies et de séquences sédimentaires, en particulier dans la formation des phosphorites. La séquence sédimentaire du Kef Essenoun s'étend sur environ 500 mètres, allant du Crétacé supérieur (Maastrichtien) à l'Éocène moyen (Lutétien). Les phosphorites, qui se trouvent dans la Formation de Chouabine, sont interstratifiées entre des marnes et des argiles du Thanétien inférieur, ainsi que des dolomies Yprésiennes. La couche phosphatée, d'une épaisseur d'environ 30 à 35 mètres, se divise en trois sous-couches (supérieure, principale et inférieure) en fonction de leurs teneurs en P_2O_5 et MgO. La sous-couche principale, qui fait l'objet de cette étude en raison de son enrichissement en grains de glauconite, présente une épaisseur de 25 à 30 mètres, une teneur élevée en P_2O_5 (24 à 28% en poids) et une faible teneur en MgO (moins de 4% en poids) (R. Kechiched. 2011).

II.1 Description des faciès :

Les investigations d'exploration menées par l'EREM en 1986, tel que rapporté par (Cielen skyetal.1988), ont permis de mieux définir la stratigraphie du gisement de Kef Essennoun.

II.1.1 Crétacé :

Les sédiments les plus anciens se trouvent au centre de l'anticlinal du Djebel Onk. Du point de vue tectonique, ces formations sont caractérisées par une grande irrégularité. Seuls les dépôts du Maestrichtien sont visibles en surface.

II.1.1.1 Le Maestrichtien :

Les dépôts de cet âge sont constitués de calcaires blancs massifs. Les calcaires sont denses et compacts, parfois ornés de traces fossiles. Ils sont entrecoupés de couches marneuse et se trouvent au centre de l'anticlinal de Djebel Onk. Le sommet présente une surface oxydée et perforée par l'érosion.

II.1.2 Le Paléocène :

Il se caractérise par des dépôts marins de grande épaisseur, atteignant environ 350 mètres.

II.1.2.1 Le Danien :

On peut diviser le Danien en deux parties en fonction de la composition des roches : le Danien inférieur et le Danien supérieur :

a. Le Danien inférieur :

Il se caractérise par des marnes argileuses feuilletées de couleur gris foncé, où l'on observe la présence de filons de gypse. En général, son épaisseur est d'environ 30 à 40 mètres. On y trouve également une présence de lumachelle bréchique beige.(Fig 7)

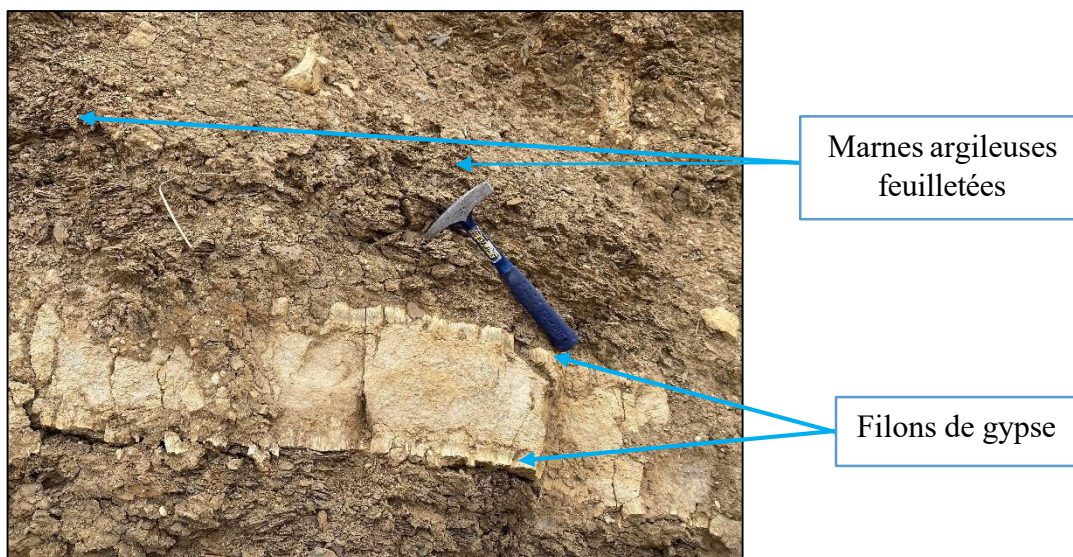


FIGURE 7 : MARNES ARGILEUSES FEUILLETEES AVEC UN FILON DE GYPSE

b. Le Danien supérieur :

Il est constitué de calcaires blancs durs, souvent très fins, avec des grains à peine visibles, et des cassures conchoïdales. Il alterne avec des marnes. Son épaisseur varie généralement de quelques dizaines de centimètres à un mètre.

II.1.2.2 Le Montien :

Il est composé de calcaire, de calcaire dolomitique et de lumachelles, avec des couches intercalaires de marnes et de dolomies. En moyenne, il a une épaisseur d'environ 100 mètres. (voir Fig)

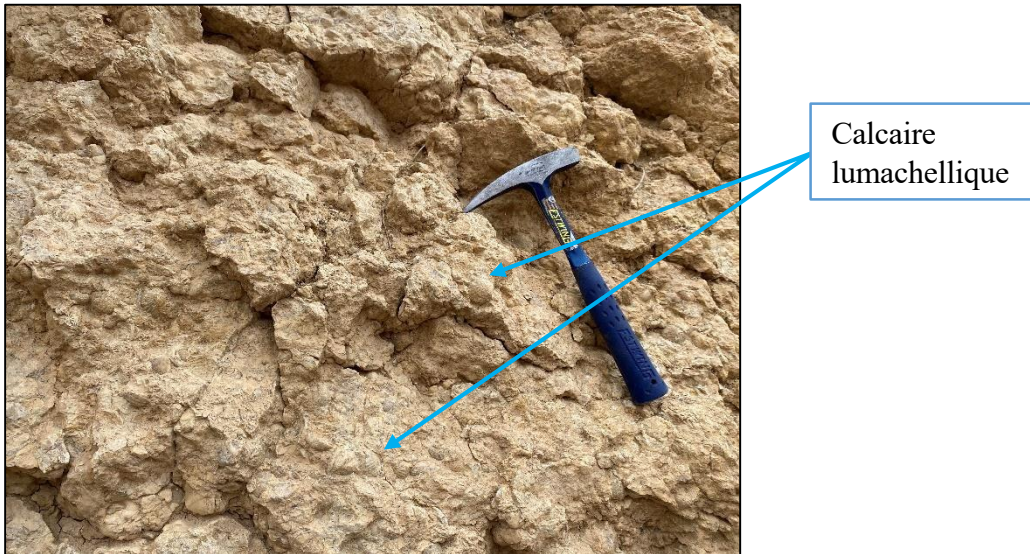


FIGURE 8 : CALCAIRE DOLOMITIQUE LUMACHELLIQUE DU MONTION

II.1.3 Thanétien :

Le thanétien, qui est l'horizon hôte de la minéralisation phosphatée bien développée à Kef Essenoun, est divisé en deux étages selon Visse (1951) : le Thanétien inférieur et le Thanétien supérieur.

II.1.3.1 Le Thanétien inférieur :

Le thanétien inférieur se caractérise par la présence de schistes marneux avec des intercalations irrégulières de calcaire renfermant des gastéropodes dans sa partie inférieure. Vers la partie supérieure, on trouve des phosphates en intercalations, parfois d'une épaisseur dépassant 1 mètre, associés à des calcaires lumachellicques contenant également des gastéropodes. Les marnes ont une épaisseur moyenne de 30 à 40 mètres.

II.1.3.2 Le Thanétien supérieur :

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

a. La Couche basale :

Cette couche est composée de deux fines couches de minerai phosphaté noir, entre lacées de marnes. Ces alternances ont des teneurs en P_2O_5 relativement basses, oscillantes entre (13 et 15%), tandis que les concentrations en MgO sont élevées, allant de (8 à 10%).

b. La Couche principale :

Cette strate, d'une épaisseur d'environ 30 à 35 mètres, est composée de minerais de phosphates noirs et beige, avec de légères intercalations de niveaux marno-calcaires.

Ces phosphates sont riches en glauconie. Elle se distingue par une forte concentration en P_2O_5 , pouvant dépasser les 30%, alors que les teneurs en MgO sont faibles, généralement inférieures à 5%. Elle représente l'horizon exploitable dans tous les gisements de Djebel Onk.

c. La Couche sommitale :

Cette strate est caractérisée par la présence de phosphates dolomitiques de couleur grise-noire, avec une épaisseur variant généralement de 1 à 10 mètres. Elle se caractérise par une concentration en P_2O_5 relativement basse, souvent inférieure à 18%, et des concentrations élevées en MgO , oscillant entre 6 et 11%. Cette couche renferme également des niveaux solidifiés au sommet.

II.1.3 L'Eocène :

II.1.3.1 L'Yprésien :

Il est en contact direct avec les dépôts du Thanétien et présente une épaisseur de 32 mètres. L'Yprésien est divisé en deux niveaux distincts : l'Yprésien supérieur et l'Yprésien inférieur.

a. L'Yprésien inférieur :

Il est composé de calcaires associés à des intercalations de phosphates, ainsi que de niveaux de silex noirs.

b. L'Yprésien supérieur :

Il est composé d'une alternance de calcaires, de calcaires dolomitiques, d'intercalations phosphatées et de lits de silex. (Voir Fig 9)

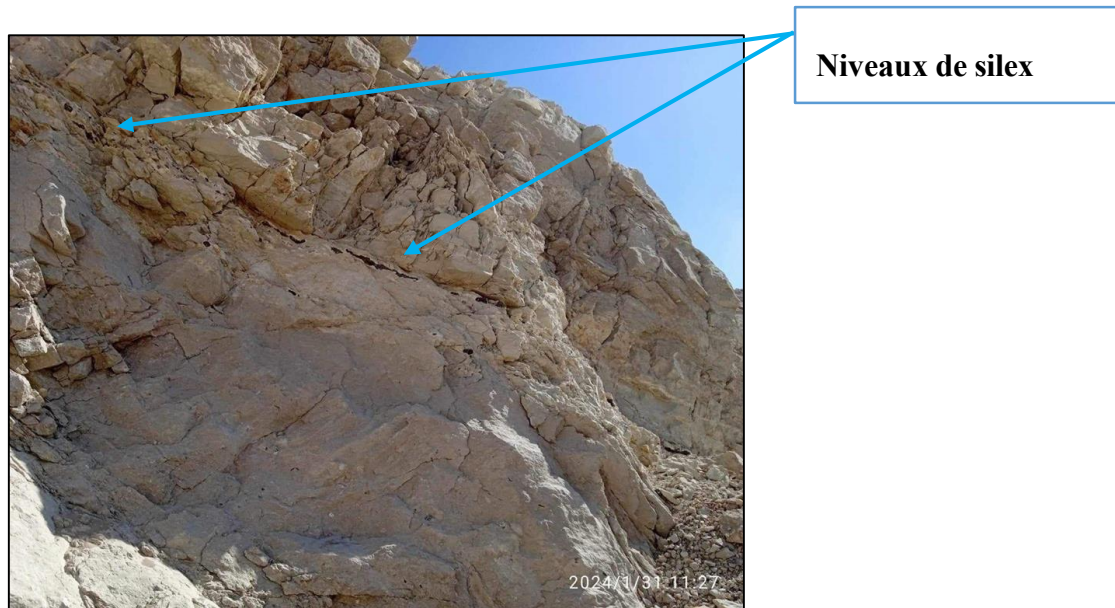


FIGURE 9 : MONTRANT LE NIVEAU A SILEX DANS L'YPRESIEN

II.1.3.2 Le Lutétien :

Le Lutétien a une épaisseur de 270 mètres et se subdivise en deux niveaux bien définis.

a. Lutétien inférieur :

Le Lutétien inférieur se caractérise par un changement de faciès, avec les premières couches constituées de marnes blanches tendres, entre coupées de calcaires dolomitiques. On y trouve également des géodes de quartz, de manière notable. Sa puissance varie de 40 à 50 mètres.

b. Lutétien supérieur :

Il est marqué par la présence de formations phospho-calcaires, ainsi qu'un faciès évaporitique composé de gypse qui peut atteindre une épaisseur de 65 mètres.

Chapitre II : géologie régionale et locale

II.5. Le 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.

II.1 Le Quaternaire :

Les formations quaternaires occupent de vastes étendues dans la zone d'étude, se caractérisant principalement par des éboulis de pente, des dépôts de sable, des graviers, des dépôts éoliens, ainsi que des dépôts alluviaux et fluviaux

QUATERNAIRE			Eboulis et formations alluvionnaires sableuses
MIOCENE	SUP (350m)		Sables, grès à grains grossiers
	MOY (250m)		Argiles, schistes argileux de couleur marron, bronze avec intercalation de sables blancs
	INF (100m)		Sables fins blancs avec des couches de grès et argiles
LUTETIEN	SUP (100m)		Niveau de gypse phospho calcaires Gypses avec interlits de marnes (évaporites)
	INF (40m)		Calcaires et dolomies avec géodes de quartz
YPRESIEN (70m)	SUP		Calcaires et dolomies avec lentille silex
	INF		Calcaires avec lentilles de silex et calcaire phosphaté
THANETIEN (80m)	SUP		Phosphates pseudolithiques, coprolithiques, a Glauconie
	INF		Marnes sombres schistifiées
MONTIEN (100m)			Minéralisation en Baryto-Célestine Calcaires avec bancs à Ostrea
			Niveau lumachellique
DANIEN	SUP (80m)		Alternance de calcaires et de marnes claires
	INF (35m)		Argiles noires avec niveau de gypse
MAESTRICHTIEN SUPERIEUR (200 m)			Niveau conglomérat bréchique
			Calcaires, calcaires noduleux de couleur blanche

FIGURE 10 : LOG LITHOSTRATIGRAPHIQUE DE DJEBEL ONK PAR L.D. VISSÉ (1951)

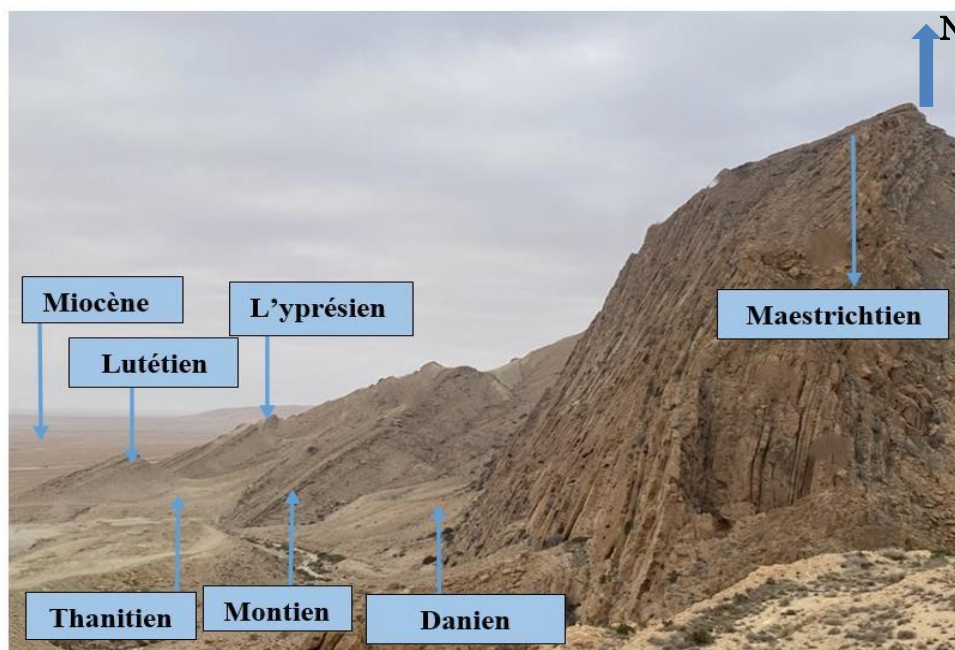


FIGURE 11 : MONTRANT UN SCHEMA PANORAMIQUE DES FORMATIONS DU SITE D'ETUDE D'APRES TIZA ASSIA (2024)

II.2 Etude structurale

Djebel Onk, situé à l'extrémité orientale de l'Atlas Saharien, est une zone géologiquement complexe marquée par une série d'anticlinaux et de synclinaux dissymétriques. La structure géologique du bassin de Djebel Onk - Gafsa - Métlaoui est organisée en une série de plis orientés principalement SW - NE, souvent faillés sur leurs flancs et affectés par des failles transversales orientées N 120° à N 140° E. L'anticlinal du Djebel Onk s'étend depuis les monts de Nememcha vers l'Est, formant une structure en périclinal sous les formations du Miocène, avec une orientation E – NE. Cet anticlinal présente une asymétrie marquée avec un pendage de 80° du côté méridional et de 10° du côté septentrional, atteignant son point culminant à 1198 m au Djebel Tarfaya. Une cuvette synclinale effondrée sépare les deux structures anticlinales du Djebel Onk et du Djebel Djemi-Djema, dont la largeur est d'environ 1 km. (Fig 12)

De plus, la zone d'étude a été marquée par trois phases tectoniques différentes, dans l'ordre chronologique :

a. La tectonique Syn-Sédimentaire

- Cette phase est marquée par une compression NW-SE pendant la sédimentation Paléogène.
- Elle a conduit à des ondulations et des failles syn-sédimentaires, ainsi qu'à des lacunes de sédimentation dans la série Paléocène-Éocène.
- L'ascension diapirique des évaporites triasiques, notamment au Paléocène-Eocène, est responsable de ces déformations précoces.

b. La tectonique Post-Éocène Moyen et Anté-Miocène

- Cette phase a débuté simultanément à l'émergence de la série au Lutétien supérieur, marquée par une phase majeure de plissement des Aurès et des déformations d'intensives transverses (N120° à N150°).
- La série du Crétacé supérieur à l'Éocène a été déstructurée en petits horsts et grabens, allongés dans la direction N170°E, affectés par l'érosion et la péné-planation anté- Miocène.

- L'anticlinal du Djebel Onk s'est formé pendant cette phase.

c. Tectonique tardi-Miocène, Post-Burdigalienne, à Pliocène-Pléistocène

- C'est la phase principale du plissement de l'Atlas Tunisien, avec la formation de vastes structures antiformes et synformes dans les séries Crétacées supérieure, Paléocène, Éocène et Miocène.
- Les horsts et grabens des structures antérieures ont été réactivés, formant des méga-plis tels que ceux de Djebel Onk et Djemi Djema.
- Cette tectogenèse a conduit à la configuration géologique actuelle du Djebel Onk.

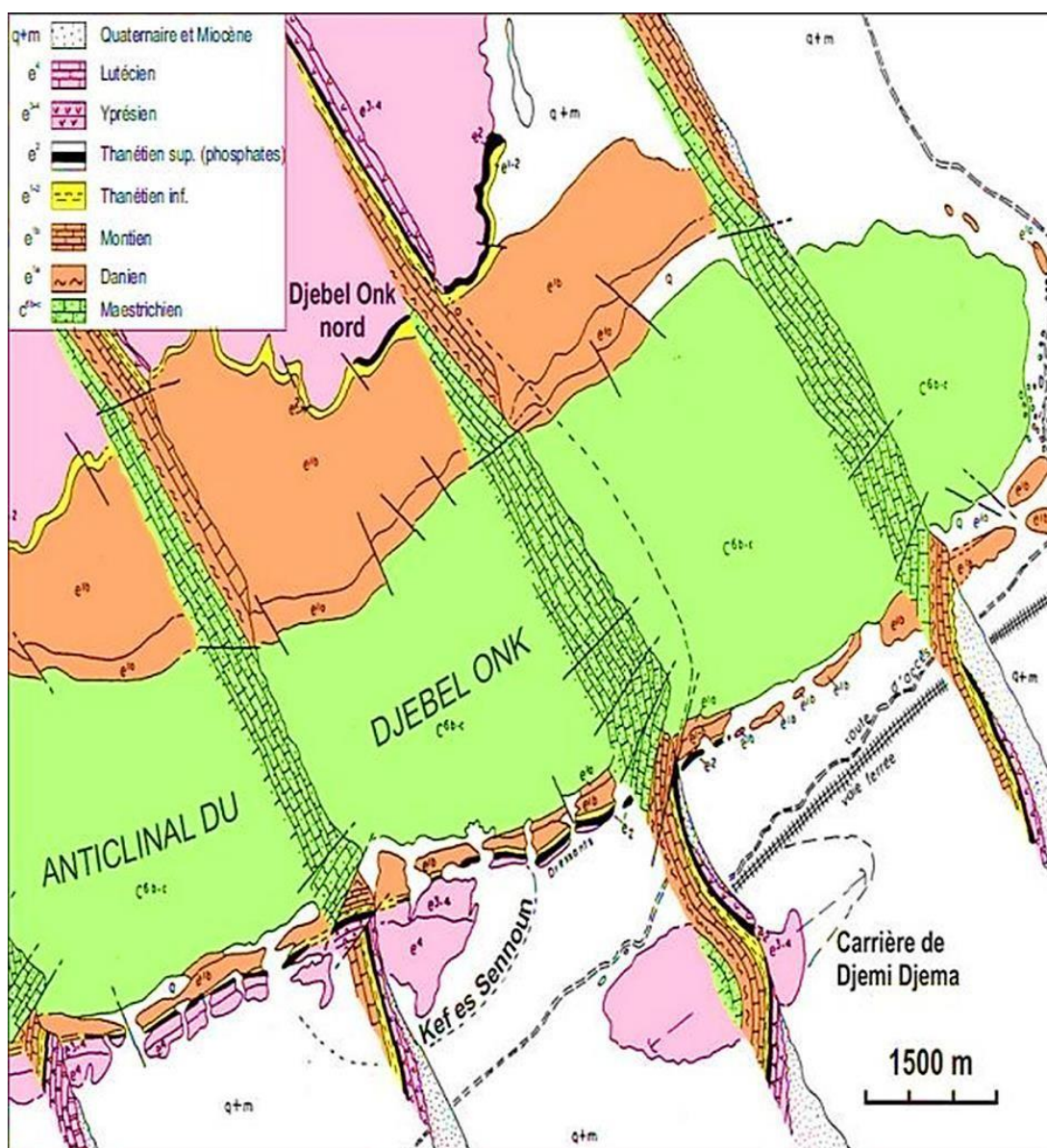


FIGURE 12 : COUPES STRATIGRAPHIQUES ET STRUCTURALES DES FLANS NORD ET SUD DE DJEBEL ONK (CIELNSKY ET AL, 1988).

II.3 Paléogéographie

La région du Djebel Onk, située dans le bassin de Gafsa-Metloui-Djebel Onk, présente une subsidence importante qui favorise l'accumulation de phosphate, bien que les niveaux de phosphate tricalcique y soient inférieurs à ceux de Metloui. Cette zone, entourée de montagnes,

était recouverte par une mer peu profonde au Paléocène supérieur-Éocène inférieur, (Voir Fig 13) et a connu plusieurs phases de développement géologique dans les sédiments. La progression s'est déroulée comme suit :

La période de sédimentation marine à Djebel Onk débute à la fin du bassin géosynclinal d'Afrique du Nord, s'étendant du Maestrichtien à l'Éocène supérieur. Pendant le Maestrichtien, il y a une subsidence lente et une sédimentation calme, marquant la transition orogénique entre le Maestrichtien et le Danien, qui marque la fin du cycle géosynclinal, avec une sédimentation argilo-carbonatée persistante.

Le Montien est caractérisé par une mer peu profonde qui favorise les dépôts d'huîtres. Au début du Thanétien, une régression marine entraîne des dépôts argilo-marneux, suivis d'une sédimentation avec des sédiments phosphatés.

Une phase régressive avec des remaniements de phosphate et des conglomérats de dolomie précède une transgression yprésienne caractérisée par des calcaires à silex. Le Lutétien voit une diminution de la profondeur du bassin, favorisant la formation de hauts-fonds et de lagunes. Les variations d'épaisseur et d'homogénéité de la couche phosphatée reflètent cette diversité paléogéographique, avec des épaisseurs maximales à Djemi-Djema et Kef Essennoun, caractérisant le sillon subsidant.

Période de sédimentation continentale à partir du Lutétien supérieur, les terrains du Djebel Onk commencent à émerger, marquant le début de cette période. L'Oligocène ne laisse aucune trace en raison de l'érosion anté-Miocène. Le Miocène-Pliocène est caractérisé par une intense sédimentation continentale avec des dépôts de sables, d'argiles et de conglomérats. Durant le Quaternaire, des produits d'érosion, tels que des colluvions, des alluvions et des éboulis de pente, se déposent le long des flancs et dans les vallées. Des traces claires mais courtes d'une glaciation du Pléistocène sont également bien conservées à Djebel Onk.

Chapitre II : géologie régionale et locale

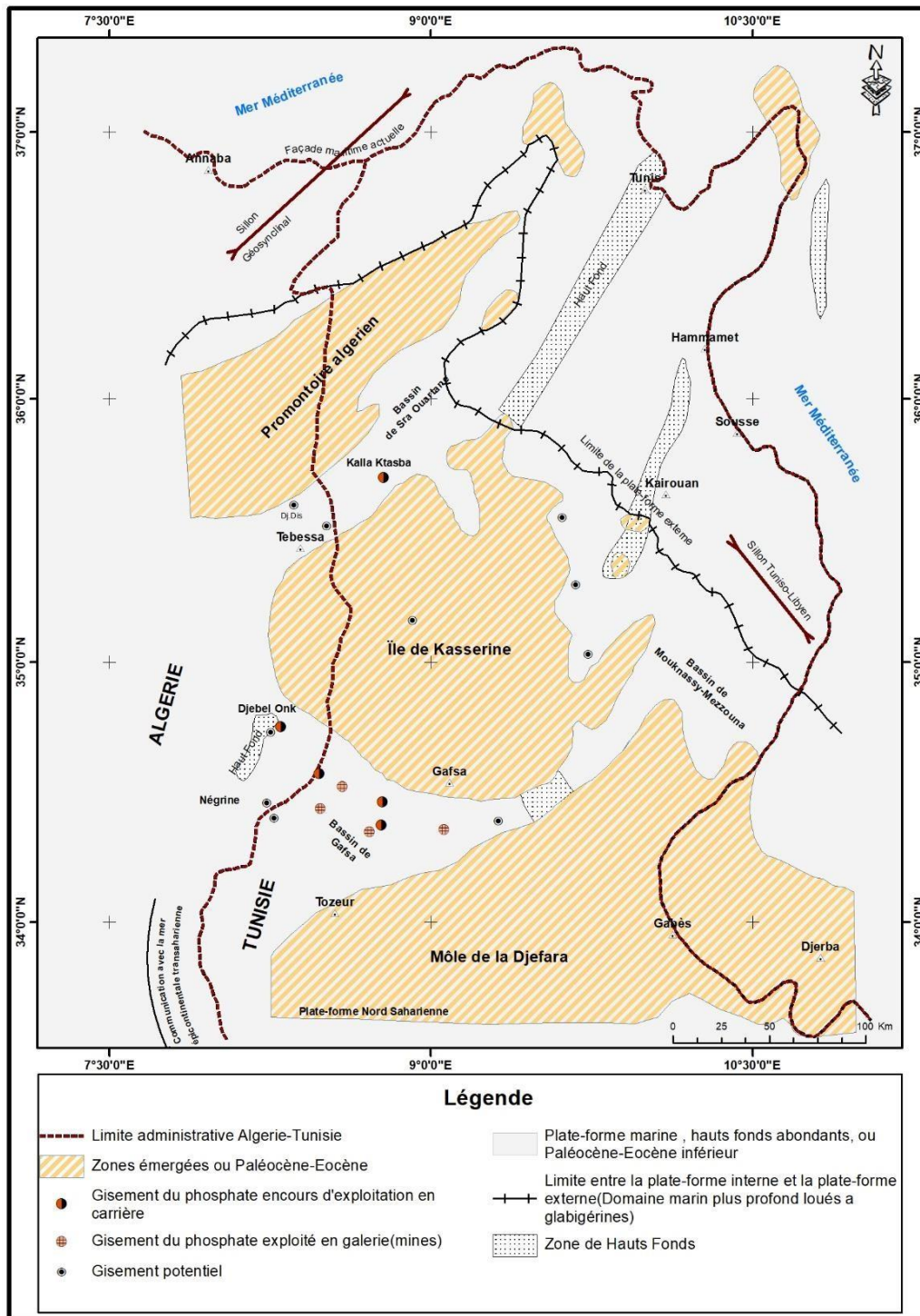


FIGURE 13 : SITUATION PALEOGEOGRAPHIQUE DES GISEMENTS DE PHOSPHATE DE LA REGION DE DJEBEL ONK A L'INTERIEUR DU BASSIN PHOSPHATE GAFSA – METLAOUI – ONK (D'APRES BUROLLET ET OUDIN, 1980; FOURINE, 1980; SASSI, 1974 ET 1980)

III. Genèse des dépôts de phosphates sédimentaires

La phosphatogenèse peut se produire dans une large gamme d'environnements sédimentaires, allant des bassins marginaux aux environnements marins profonds (Filippelli, 2011).

Cependant, les dépôts phosphatés majeurs au cours de l'histoire de la Terre se sont formés préférentiellement dans les marges continentales et les mers épicontinentales, situées dans des régions de basses latitudes caractérisées par des systèmes d'upwellings (Cook & McElhinny, 1979 ; Glenn & Arthur, 1988 ; Trappe, 1998 ; Pufahl & Groat, 2017). Au Précambrien, les phosphates se formaient dans des environnements côtiers péritidaux sans l'intervention des courants d'upwellings (Drummond et al., 2015 ; Pufahl & Groat, 2017). Les environnements phosphogéniques les plus productifs au Phanérozoïque sont alimentés par les nutriments, y compris le phosphore, grâce aux courants d'upwellings qui transfèrent les eaux profondes vers la marge de la plate-forme (Glenn et al., 1994 ; Föllmi, 1996 ; Filippelli, 1997 ; Pufahl & Groat, 2017).

Ces environnements sédimentaires favorables à l'accumulation de phosphates se caractérisent également par des taux de sédimentation relativement faibles, permettant une concentration plus importante des sédiments phosphatés.

De plus, la phosphatogenèse a été observée pendant les périodes de condensations stratigraphiques marquées par des taux de sédimentation très bas (Föllmi, 2016 ; Pufahl & Groat, 2017). (Fig 14)

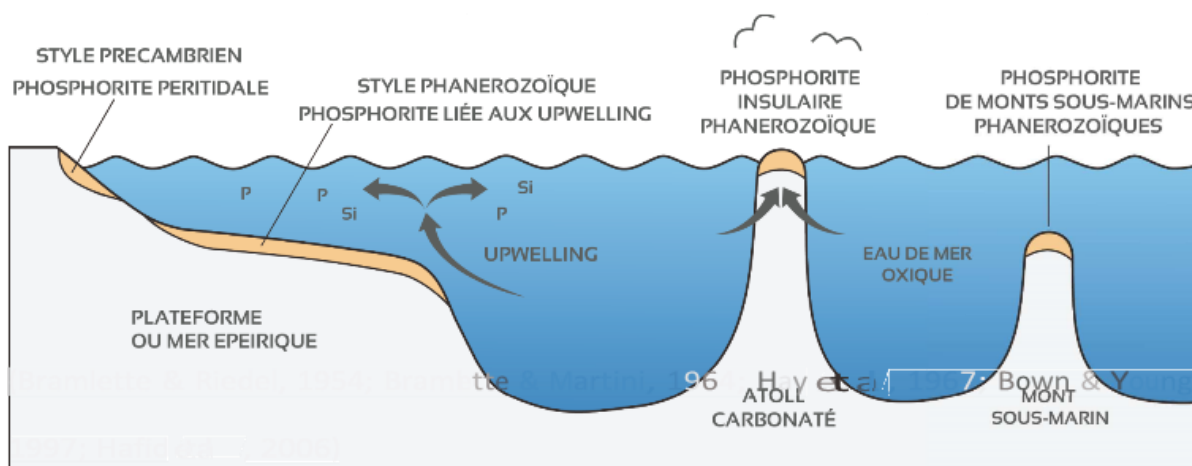


FIGURE 14 : ENVIRONNEMENTS DE DEPOTS DES PHOSPHATES FORMES MARINES ET SOUS LES MERS SEDIMENTAIRES. LES DEPOTS EPICONTINENTALES (PUFAHL AND GROAT, 2017).

De plus, La phosphatogenèse implique la précipitation de la francolite, un minéral phosphate, qui ne peut se produire directement dans l'eau de mer en raison de l'effet inhibiteur du magnésium (Jarvis et al., 1994). Pour cette raison, elle se déroule dans des microsystemes interstitiels où la précipitation directe de la francolite par saturation est possible (Jarvis et al., 1994). La libération du phosphore dans ces microsystemes est essentielle pour alimenter la

phosphatogénèse, impliquant des réactions d'oxydoréduction catalysées par des bactéries spécialisées (Krajewski et al., 1994 ; Arning et al., 2009). Cette activité microbienne contrôle la distribution du phosphore dissous et favorise la dissolution des débris squelettiques à phosphate (Krajewski et al., 1994). Une fois le phosphore concentré dans les pores du sédiment, la précipitation de la francolite peut se produire, tout comme la formation d'apatite, souvent par remplacement des carbonates de calcium par l'apatite (Froelich et al., 1988 ; Jarvis et al., 1994). Ces processus, documentés par divers chercheurs, aboutissent à la formation de minéraux phosphatés tels que la francolite, qui pompe les terres rares et d'autres éléments traces lors de sa formation (Jarvis et al., 1994). (Fig15)

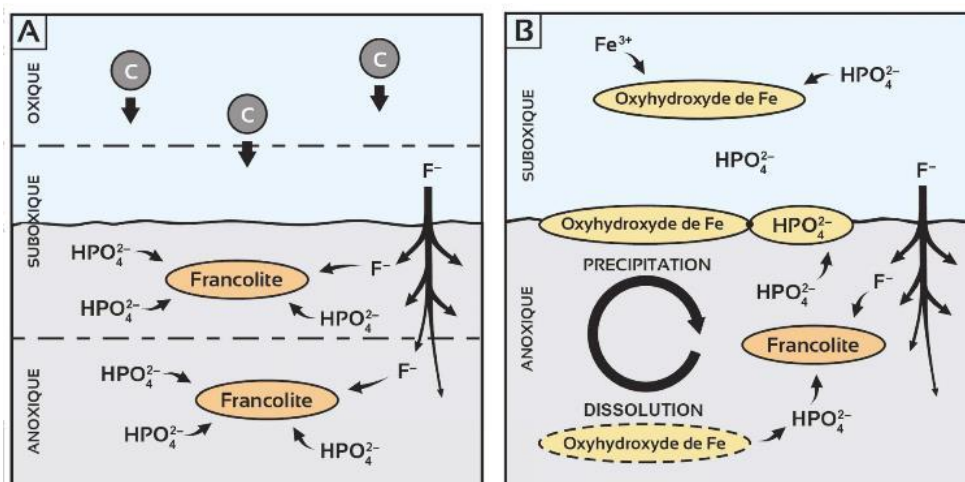


FIGURE 15 : PROCESSUS DE PHOSPHATOGÈNESE. (A) ENVIRONNEMENT A UPWELLINGS OU LA DEGRADATION MICROBIENNE DE LA MATIÈRE ORGANIQUE (C) DANS LE SÉDIMENT AUGMENTE LA CONCENTRATION EN PHOSPHATE DISSOUS DANS L'EAU INTERSTITIELLE, PROVOQUANT LA PRÉCIPITATION DE LA FRANCOLITE. CETTE PRÉCIPITATION EST LIMITÉE EN PROFONDEUR PAR LA DIFFUSION DE F- DERIVÉ DE L'EAU DE MER. (B) RÔLE DES OXYHYDROXYDES DE FER DANS LE POMPAGE DU PHOSPHORE ET LE MAINTIEN DE CONCENTRATIONS ÉLEVÉES DE CET ÉLÉMENT QUI PERMETTRONT LA PRÉCIPITATION DE LA FRANCOLITE DANS LES ENVIRONNEMENTS SANS UPWELLINGS (PUFAHL & GROAT, 2017).

III.1 Processus de phosphatation et glauconitisation :

Le processus de phosphatation et de glauconitisation commence par l'accumulation de matière organique (MO) entre la colonne d'eau et le fond marin. Cette matière organique est oxydée par des bactéries aérobies, libérant du dioxyde de carbone (CO₂) et d'autres nutriments dans l'eau. À une profondeur de 25 à 30 mètres, comme dans le dépôt de Kef Senoun, les sédiments sont exposés à la lumière du soleil.

Les courants ascendants transportent les sédiments et les particules en suspension vers la surface de l'eau. Les sédiments plus lourds se déposent rapidement, tandis que les particules plus fines restent en suspension plus longtemps, ce qui entraîne un triage naturel. Ce triage permet la libération d'éléments tels que le silicium (Si), l'aluminium (Al), le fer (Fe) et le potassium (K) des sédiments. Les conditions oxygénées de l'eau de mer maintiennent un bon niveau d'oxygène, essentiel à la formation de particules phosphatées et de glauconite. Les particules de glauconite, une fois repositionnées, présentent un léger enrichissement en terres rares moyennes (MREE) et une faible anomalie négative en Cérium (Ce), tandis que les particules phosphatées montrent une signature REE plus enrichie en MREE et une anomalie négative en Ce plus prononcée. Les

Chapitre II : géologie régionale et locale

boulettes fécales non phosphatées présentent une signature REE similaire à celle de l'eau de mer oxygénée.

Les REE proviennent principalement des sédiments, libérés dans l'eau par dissolution et altération, et l'eau profonde remontant des fonds marins apporte également des REE à la surface. Les organismes vivants jouent un rôle dans la concentration et la modification de la signature REE. Les ions phosphates (PO_4^{3-}) s'adsorbent sur les grains de sédiments, initiant ainsi la phosphatation. Les minéraux argileux s'agrègent autour des grains phosphatés, formant des noyaux de glauconite. Ces noyaux se développent en ajoutant des couches de silicate et de fer, formant des grains de glauconite matures. (Voir Fig 16)

Enfin, lors de la diagenèse, les sédiments subissent une compaction, une cimentation et une altération, et les ions phosphates peuvent être incorporés dans la structure cristalline de la glauconite, conduisant à une phosphatation ultérieure.

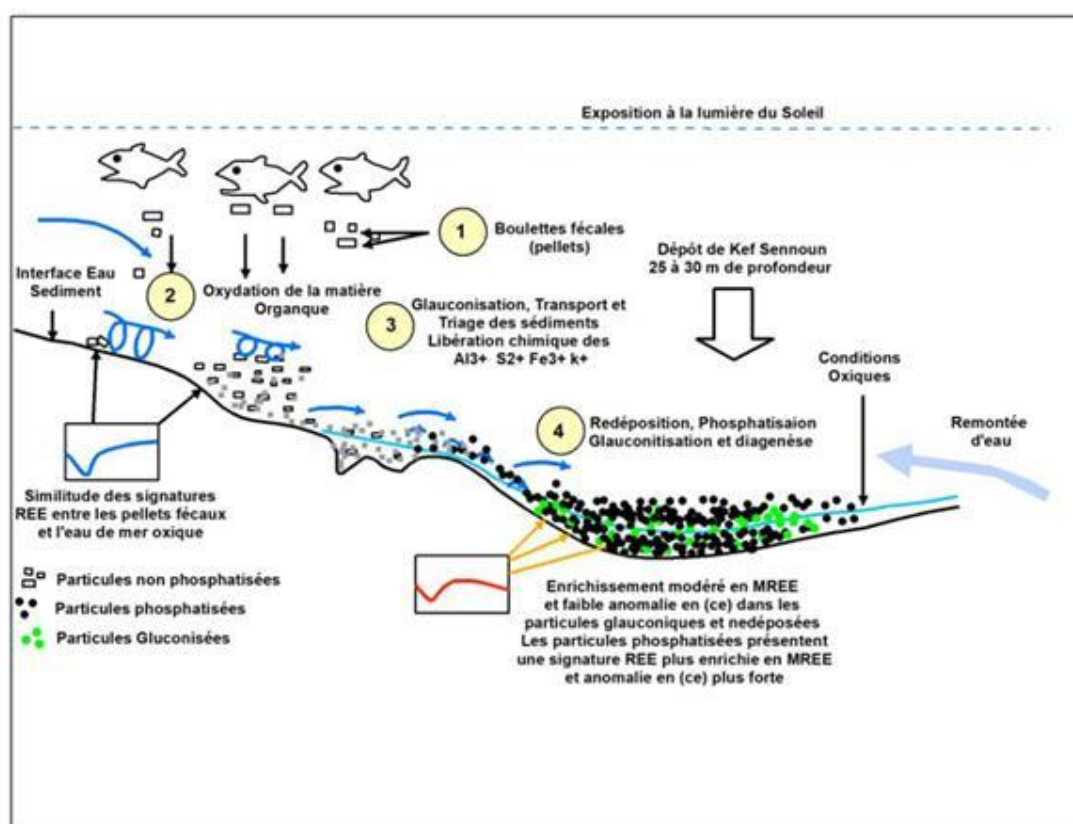


FIGURE 16 : DIAGRAMME DE FLUX SIMPLIFIÉ METTANT EN ÉVIDENCE LES PROCESSUS DE GLAUCONITISATION ET DE PHOSPHATATION BASÉS SUR LA LITTÉRATURE (PAR EXEMPLE PORRENGA, 1968 ; ODIN ET LETOLLE, 1980 ; CHABOU-MOSTEFAL, 1987 ; RAO ET COLL., 1993 ; BALDERMANN ET COLL., 2012 ; AUER ET COLL., 2017)

IV. Pétrographie

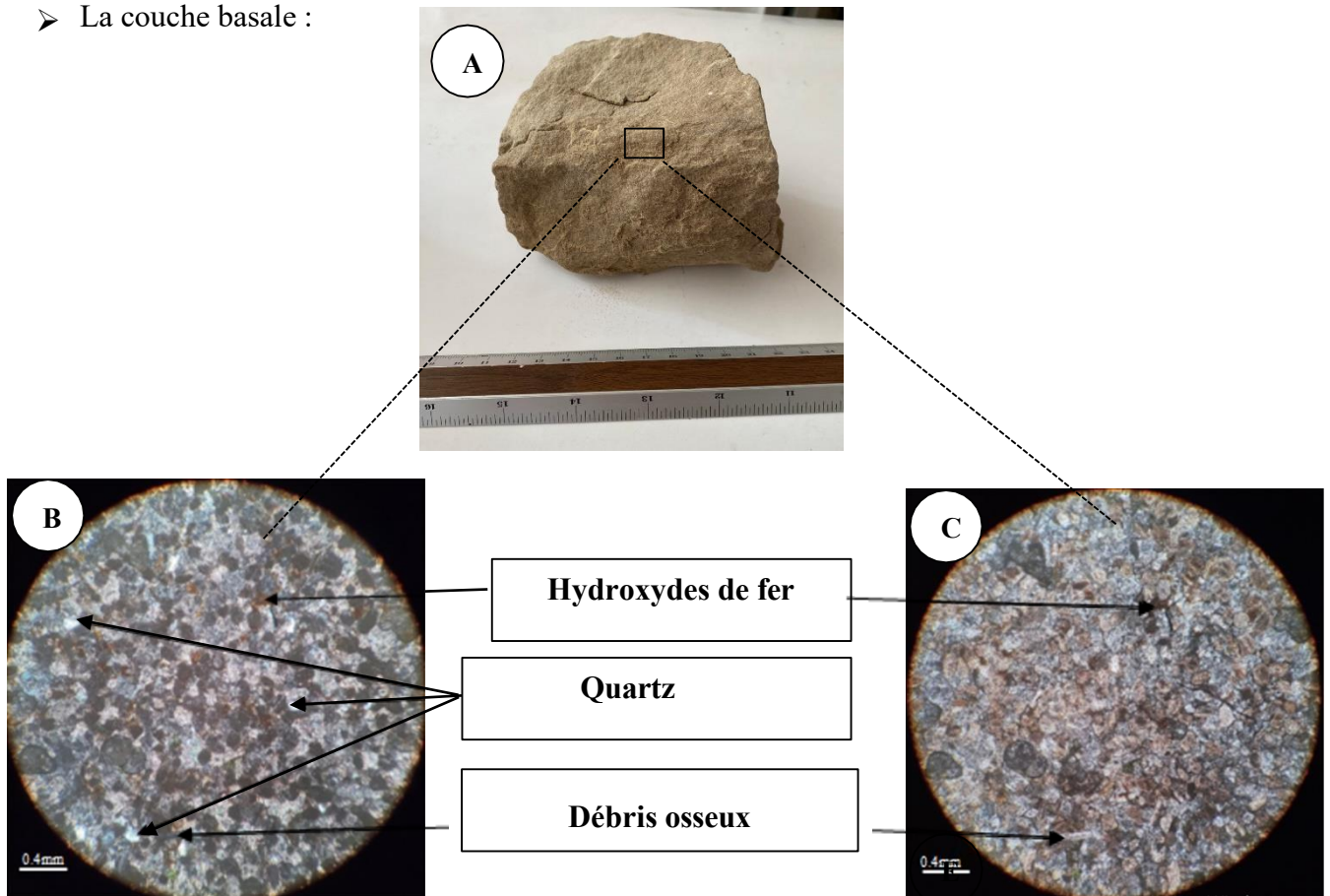
Description :

L'étude pétrographique montre une phosphorite principalement constituée d'une exogangue représentée par de la dolomite, du quartz, de la glauconite, des oxydes et hydroxydes de fer. Cette exogangue contient un matériel phosphaté, qui se manifeste par la présence de pellets de phosphate et de débris osseux.

La dolomite est sous forme losangique et de taille variant entre 0.05 et 0.3mm. Elle est par endroits associée à des pellets de glauconite de forme émoussée à subémoussée et de couleur verte, de dimension allant de 0.02 à 0.1mm. Des grains de forme anguleuse à subanguleuse de quartz sont également observés dans l'exogangue, de taille variant de 0.05 à 0.2mm.

Etude des lame-mince :

➤ La couche basale :



Chapitre II : géologie régionale et locale

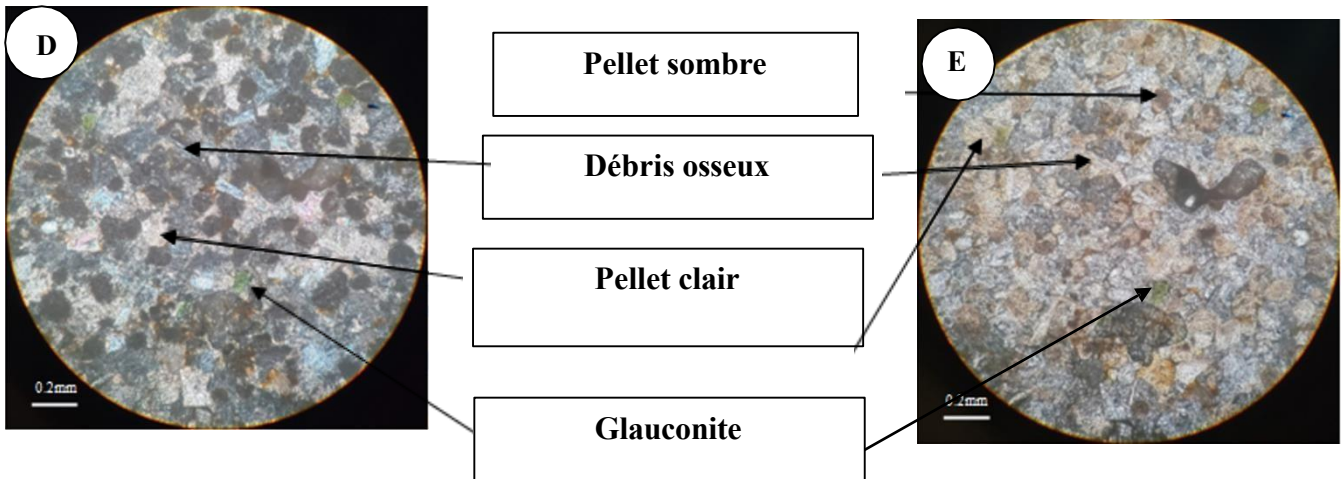


PLANCHE 1 : PHOTOS DEMONTRANT LE MATERIEL PHOSPHATE DE LA COUCHE BASALE (THANITIEN SUPERIEUR) DE DJEBEL ONK D'APRES TIZA ASSIA (2024)

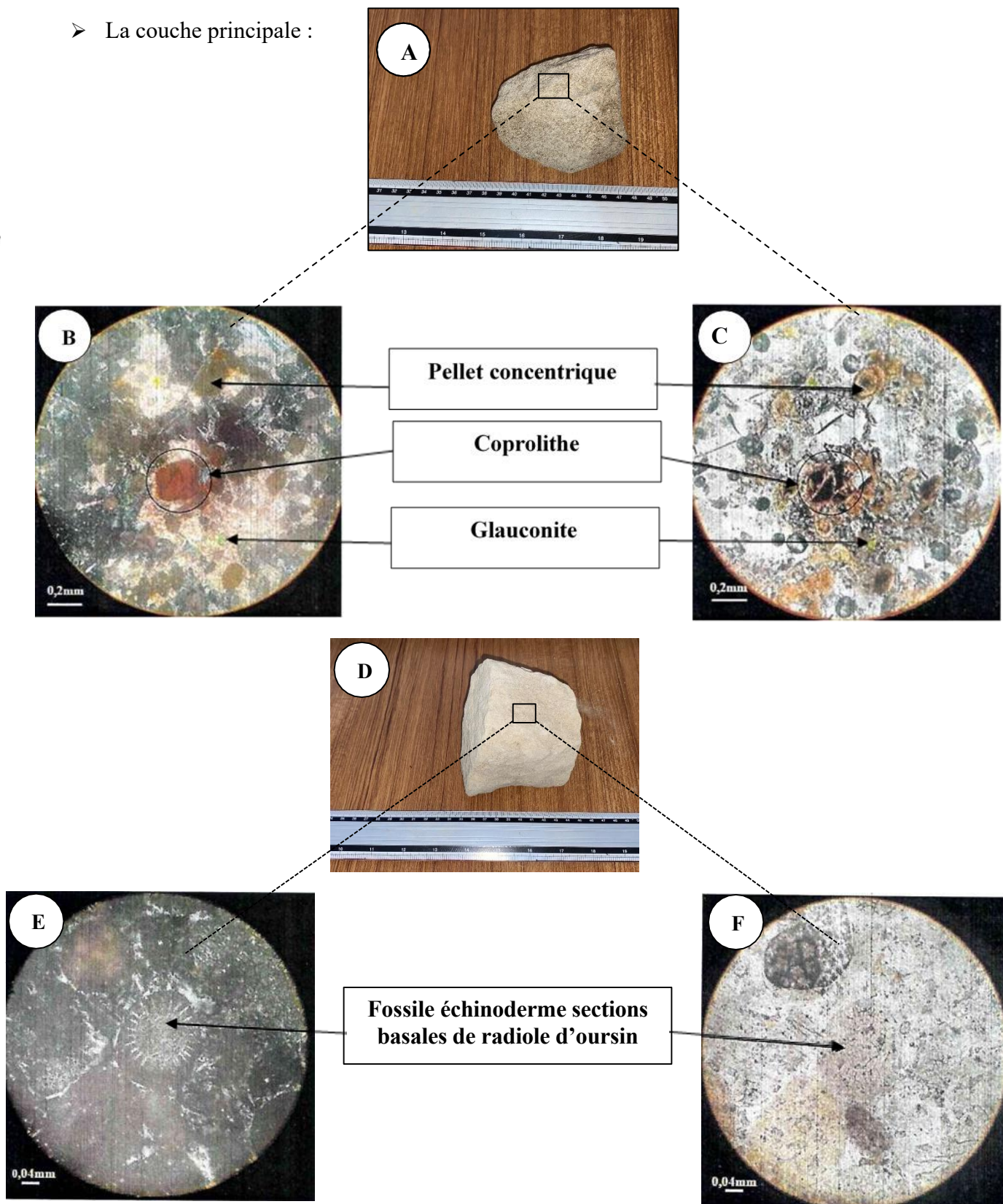
- (A)** Vu Macroscopique de la couche basale du Thanitien supérieur Dolomie phosphatée
(B ; C) les hydroxydes se présentent en enduit, pigmentant légèrement la roche d'une couleur rougeâtre (LPA et LPNA x6.3)
(D ; E) Présence de quelques pellets sombres montrent un cortex de couleur claire et d'autres une alternance de couleur (LPA et LPNA x10).

Chapitre II : géologie régionale et locale

Description :

L'échantillon montre une roche sédimentaire, il s'agit d'une phosphorite dolomitisée de structure friable. Elle est composée principalement d'un matériel phosphaté représenté par des pellets de phosphates, des coprolithes, des débris osseux et quelques formes fossilifères, cimentés par une exogangue argilo-carbonatée formée principalement par la dolomite et la glauconite, notant la présence de quartz et de rares cristaux de zircon .

➤ La couche principale :



Chapitre II : géologie régionale et locale

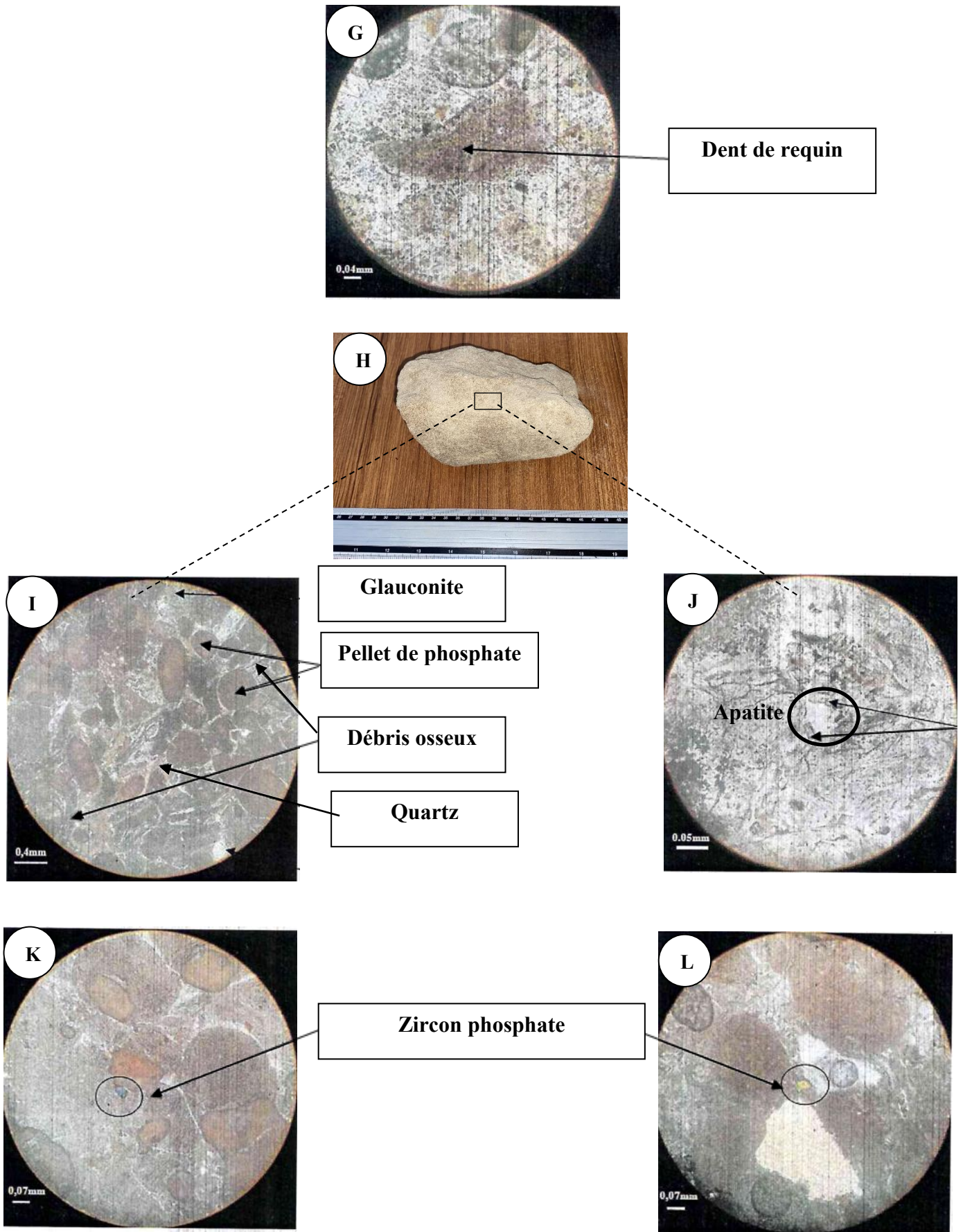


PLANCHE 2 : PHOTOS PRESENTANT LES DIVERS COMPOSANTS DE PHOSPHORITE PRESENTS DANS LES SOUS- COUCHES DE LA COUCHE PRINCIPALE DU THANITIEN SUPERIEUR D'APRES TIZA ASSIA (2024)

Chapitre II : géologie régionale et locale

(A) Vu macroscopique la sous couche basale de la couche principale Thanitien Supérieur.

(B ; C ; D) les pellets de phosphates sont de forme arrondie, sub-arrondie à ovoïdale, de taille comprise entre 0,05 et 0,2 mm (LPA et LPNA GX10), montrant une alternance de couleur en structure concentrique.

Coprolithes sont observés avec une forme généralement irrégulière et une dimension atteignant 0,8 mm, sont traversés par des micro-fractures, Des glauconites observées dans exogangue de couleurs verdâtre.

(D) Vu macroscopique la partie médiane de la couche principale Thanitien supérieure

(E ; F ; G) Les fossiles montrent des formes diverses, ils sont représentés principalement par des échinodermes en structure radiée, de dimension de 0,2 mm (LPA et LPNA Gx25). On note également la présence de dents de requin de taille de 0,5 mm composées d'apatite (LPNA GX25).

(H) Vu macroscopique sous couche sommitale de la couche principale Thanitien Supérieur.

(I) L'ensemble est cimenté par une exo-gangue formée par la calcite sous forme micritique à microsparitique. Elle est associée à une glauconite sous forme de pellet de couleur verdâtre et de taille comprise entre 0,05 et 0,5 mm, une dolomite sous forme de losange de taille moyenne de 0,1 mm (LPA GX6,3). Les débris osseux présentent une forme filamenteuse, ils sont plissés et parfois fracturés avec une dimension qui varie de 0,1 à 0,7 mm.

(J) A fort grossissement, une apatite microcristalline apparaît dans les interstices ; de forme prismatique et de taille ne dépassant pas 0,05 mm (LPNA GX40).

(K ; L) présence de quelques microcristaux de zircon phosphate de forme prismatique et de taille ne dépassant pas 0,05 mm. Les minéraux opaques sont de forme automorphe de taille qui varie de 0,05 à 0,1 mm (LPA GX16)

Description :

L'échantillon montre une phosphorite dolomitisée qui est constituée principalement d'un matériel phosphaté représenté par des pellets de phosphates, des coprolithes, des débris osseux et quelques formes fossilifères. Cet ensemble est cimenté par une exogangue carbonatée composée de dolomite, glauconite, quartz, quelques minéraux opaques et hydroxydes de fer en enduit.

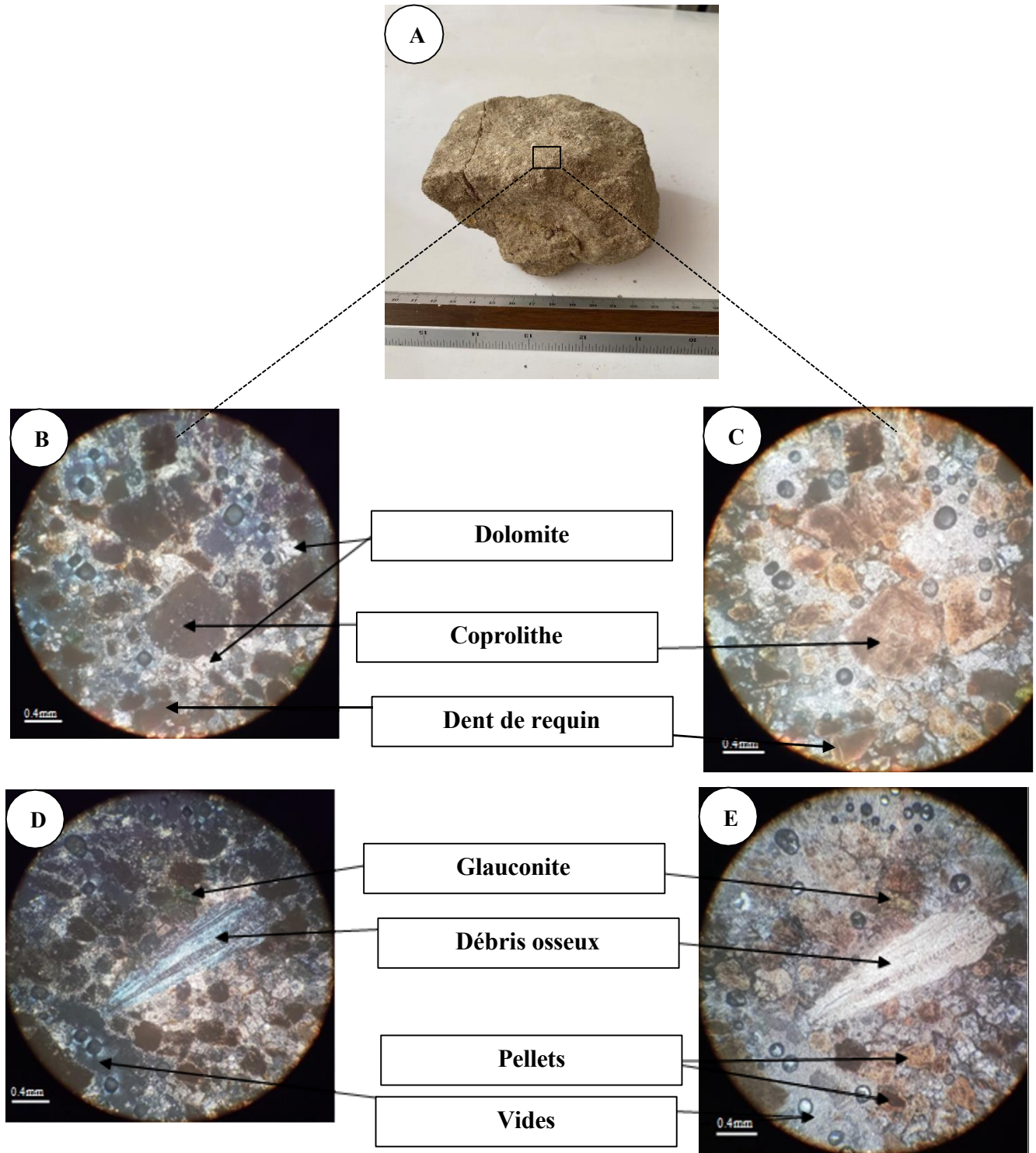


PLANCHE 3 : PHOTOS MONTRANT LE MATERIEL PHOSPHATE DE LA COUCHE SOMMITALE (THANITIEN SUPERIEUR) DE DJEBEL ONK D'APRES TIZA ASSIA (2024)

- (A) Vu Macroscopique de la couche sommitale de Thanitien supérieur phosho-calcaire.
- (B ; C) Les coprolithes, sous forme irrégulière, sont de teinte sombre et de taille atteignant 4mm. Ces coprolithes sont traversés par des microfissures (LPA et LPNA x6.3).
- (D ; C) Les débris osseux observés sont de forme allongée à structure interne filamenteuse (LPA et LPNA x6).

Conclusion

La région de Tébessa, située dans l'Atlas saharien oriental, présente une grande diversité géologique, avec des formations sédimentaires allant du Mésozoïque au Cénozoïque. À l'échelle locale, dans le bassin de Gafsa-Métlaoui-Onk, les formations du Djebel Onk et de Kef Sennoun révèlent une structure géologique détaillée des dépôts phosphatés du Thanétien. Cette structure est influencée par un cadre tectonique dynamique marqué par des plis et des failles. Les dépôts phosphatés, qui sont riches en phosphorites, résultent de processus de phosphatation et de glauconitisation dans un environnement marin peu profond.

L'analyse paléogéographique permet de reconstituer l'évolution des environnements de dépôt, tandis que l'analyse pétrographique des échantillons de roche révèle une distribution variée de composants tels que les coprolithes, les pellets de phosphates, la glauconite et les débris osseux. Cela reflète des conditions de dépôt diversifiées et des processus diagenétiques complexes.

Chapitre III : caractérisation géochimique des phosphates du Djebel Onk

I. Introduction

Les phosphates présents à Djebel Onk, dans la région de Tébessa Sud, ont fait l'objet de recherches approfondies qui ont considérablement enrichi notre compréhension de leur géochimie, grâce aux études notables menées par Chabou-Mostfai (1987), Cielsky et Benchernine (1987), ainsi que Daas-Amiour (2012). Dans ce contexte, l'objectif principal de notre étude est de caractériser géochimiquement les phosphates du Djebel Onk afin d'identifier les terres rares qu'ils contiennent et d'évaluer leur valeur ajoutée. En analysant en détail la composition des phosphates, nous cherchons à révéler les concentrations remarquables d'éléments de terres rares, augmentant ainsi leur valeur économique. Cette caractérisation stratégique est destinée à optimiser leur valorisation économique.

I.1 Eléments majeurs :

En géochimie, les éléments majeurs font référence aux constituants les plus abondants de la croûte terrestre et des matériaux géologiques. Ils sont généralement présents à des concentrations supérieures à 1 % de la masse totale. Ces éléments sont exprimés en oxydes tels que SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , FeO , MgO , MnO , CaO , Na_2O , K_2O et P_2O_5 .

Ils jouent un rôle fondamental dans la composition et la structure des roches et des minéraux. De plus, leur distribution fournit des informations précieuses sur les processus géologiques qui ont façonné la Terre. Ces éléments se combinent pour former les minéraux silicatés, qui constituent la majorité des roches de la croûte terrestre.

I.2 Les terres rares (ETRs)

Selon l'Union Internationale de Chimie Pure et Appliquée (IUPAC), les éléments des terres rares (ETR), communément appelés terres rares, regroupent 17 métaux chimiquement similaires, incluant le groupe des Lanthanides, le Scandium (Sc) et l'Yttrium (Y). Les Lanthanides comprennent 15 éléments chimiques dont le numéro atomique varie de 57 à 71 : le Lanthane (La), le Cérium (Ce), le Praséodyme (Pr), le Néodyme (Nd), le Prométhium (Pm), le Samarium (Sm), l'Europium (Eu), le Gadolinium (Gd), le Terbium (Tb), le Dysprosium (Dy), l'Holmium (Ho), l'Erbium (Er), le Thulium (Tm), l'Ytterbium (Yb) et le Lutécium (Lu). Le Scandium, avec le numéro atomique 21, et l'Yttrium, avec le numéro atomique 39, appartiennent aux métaux de transition du groupe 3. Ces deux éléments sont également considérés comme des ETR. En raison de leurs caractéristiques chimiques et physiques similaires à celles des Lanthanides, ainsi que de leur association étroite avec ces métaux dans les indices minéralisés (McLennan et Taylor, 2012 ; Jaireth et al., 2014). (Tabl2)

Chapitre III : caractérisation géochimique

																		Sc : scandium				Pm : prométhium				Ho : holmium											
																		Y : yttrium				Sm : samarium				Er : erbium											
																		La : lanthane				Eu : europium				Tm : thulium											
																		Ce : cérium				Gd : gadolinium				Yb : ytterbium											
																		Pr : praséodyme				Tb : terbium				Lu : lutétium											
																		Nd : néodyme				Dy : dysprosium															
1	H																	2		He																	
3	Li	4	Be															5	B	6	C	7	N	8	O	9	F	10	Ne								
11	Na	12	Mg															13	Al	14	Si	15	P	16	S	17	Cl	18	Ar								
19	K	20	Ca	21	Sc	22	Ti	23	V	24	Cr	25	Mn	26	Fe	27	Co	28	Ni	29	Cu	30	Zn	31	Ga	32	Ge	33	As	34	Se	35	Br	36	Kr		
37	Rb	38	Sr	39	Y	40	Zr	41	Nb	42	Mo	43	Tc	44	Ru	45	Rh	46	Pd	47	Ag	48	Cd	49	In	50	Sn	51	Sb	52	Te	53	I	54	Xe		
55	Cs	56	Ba	57-71		72	Hf	73	Ta	74	W	75	Re	76	Os	77	Ir	78	Pt	79	Au	80	Hg	81	Tl	82	Pb	83	Bi	84	Po	85	At	86	Rn		
87	Fr	88	Ra	89-103		104	Rf	105	Db	106	Sg	107	Bh	108	Hs	109	Mt	110	Ds	111	Rg	112	Cn	113	Uut	114	Uuq	115	Uup	116	Uuh	117	Uus	118	Uuo		
																		Terres rares légères (LREE)										Terres rares lourdes (HREE)									
Lanthanides				57	La	58	Ce	59	Pr	60	Nd	61	Pm	62	Sm	63	Eu	64	Gd	65	Tb	66	Dy	67	Ho	68	Er	69	Tm	70	Yb	71	Lu				
Actinides				89	Ac	90	Th	91	Pa	92	U	93	Np	94	Pu	95	Am	96	Cm	97	Bk	98	Cf	99	Es	100	Fm	101	Md	102	No	103	Lr				

TABLEAU 2 : REPARTITION DES ÉLÉMENTS DE TERRES RARES DANS LE TABLEAU PÉRIODIQUE SELON MENDELEÏEV (1869).

I.2.1 Propriétés

a. Propriétés physico-chimiques des terres rares :

Les terres rares sont classées dans le 3ème groupe III_B du tableau périodique en raison de leurs propriétés chimiques distinctes qui les rendent précieuses pour divers domaines technologiques. La plupart de ces éléments ont une apparence argentée ou grisâtre, sauf le Praséodyme (Pr) et le Néodyme (Nd) qui ont une teinte jaune pâle. Ces métaux se distinguent par leurs points de fusion élevés et leurs caractéristiques magnétiques, ainsi que par leurs réactions chimiques spécifiques, ce qui les rend indispensables pour de nombreuses applications industrielles et technologiques avancées.

b. Propriétés physiques :

Les terres rares possèdent une diversité de propriétés physiques qui influencent leur utilisation dans différentes technologies. La plupart des lanthanides, à l'exception du Cérium (Ce), de l'Europium (Eu) et de l'Ytterbium (Y), ont un point de fusion qui augmente avec leur numéro atomique, bien que cette tendance ne soit pas uniforme pour les points d'ébullition. Ces caractéristiques ont une influence significative sur les méthodes de préparation et de purification qui sont souvent effectuées à l'aide de coûteux agents réducteurs tels que les chlorures ou les fluorures.

Selon Gschneidner et Daane (1988), cette variation des points de fusion est due à l'hybridation des orbitales électroniques, et d'autres facteurs tels que la densité jouent également un rôle vital. En effet, la densité des lanthanides est généralement supérieure à 5 g/cm³, bien qu'il y ait des exceptions telles que le Gadolinium (Gd) et le Terbium (Tb), qui se distinguent par leurs propriétés de résistivité. Par exemple, l'Ytterbium affiche la conductivité la plus élevée de la série, tandis que le Gadolinium présente une conductivité relativement plus faible parmi les terres rares.

Élément	Densité (g/cm ³)	Point de fusion (°C)	Point d'ébullition (°C)	Résistivité (25 °C) (10 ⁴ Ω cm)
Sc	2,985	1538	2730	066
Y	4,472	1502	2630	053
La	6,166	0920	3470	057
Ce	6,773	0793	3468	075
Pr	6,475	0935	3017	068
Nd	7,003	1024	3210	064
Pm	6.260	1042	3000	075
Sm	7,536	1072	1670	092
Eu	5,245	0826	1430	081
Gd	7,886	1312	2800	134
Tb	8,253	1356	2480	116
Dy	8,559	1407	2330	091
Ho	8,780	1461	2490	094
Er	9,054	1497	2420	086
Tm	9,318	1545	1720	090
Yb	6,972	0824	1320	028
Lu	9,840	1652	3330	068

TABLEAU 3 : PROPRIETES PHYSIQUES DES METAUX STRATEGIQUES.

c. Propriétés chimiques

➤ Comportement des terres rares en milieu aqueux

Dans les solutions aqueuses, les terres rares agissent comme de bons réducteurs, libérant facilement leurs électrons pour former des ions trivalents (3+).

Cependant, certains ETRs, tels que Ce, Pr, Tb, Sm, Eu, et Yb, peuvent aussi se stabiliser à des degrés d'oxydation supérieurs (4+) ou inférieurs (2+). Par exemple, on trouve des couples comme (Ce³⁺, Ce⁴⁺), (Pr³⁺, Pr⁴⁺), (Tb³⁺, Tb⁴⁺), (Sm²⁺, Sm³⁺), (Eu²⁺, Eu³⁺), et (Yb²⁺, Yb³⁺). Ces variations permettent des séparations par réactivité d'oxydoréduction, en utilisant des agents oxydants ou réducteurs spécifiques en fonction de leurs potentiels redox en milieu aqueux.

Chapitre III : caractérisation géochimique

Elément	IV → III	III → II	III → 0	II → 0
Sc	/	/	- 2,077	/
Y	/	/	- 2,372	/
La	/	/	- 2,379	/
Ce	1,720	/	- 2,336	/
Pr	3,200	- 3,100	- 2,353	- 2,000
Nd	/	- 2,700	- 2,323	- 2,100
Pm		- 2,600	- 2,300	- 2,200
Sm	/	- 1,550	- 2,304	- 2,680
Eu	/	- 0,360	- 1,991	- 2,812
Gd	/	/	- 2,279	/
Tb	3,100	/	- 2,280	/
Dy	/	- 2,600	- 2,295	- 2,200
Ho	/	- 2,800	- 2,330	- 2,100
Er	/	- 2,300	- 2,331	- 2,000
Tm	/	- 2,200	- 2,319	- 2,400
Yb	/	- 1,050	- 2,190	- 2,760
Lu	/	/	- 2,280	/

TABLEAU 4 : POTENTIELS REDOX DES TERRES RARES EN VOLTS PAR RAPPORT A L'ENH.

➤ **Formations complexes :**

Les terres rares forment des complexes avec des ligands organiques ou inorganiques. Les complexes organiques incluent généralement des structures carboxyliques, comme l'EDTA, l'acide oxalique et l'acide malique. Les complexes inorganiques, quant à eux, tendent à former de grands ions positifs.

➤ **Formation des sels insolubles :**

Les terres rares trivalentes forment des sels d'hydroxydes peu solubles dans l'eau, comme indiqué par les valeurs de leurs constantes de produit de solubilité (pKs). Un pk plus élevée signifie une solubilité plus faible, favorisant ainsi la formation de précipités insolubles. Cette propriété est utilisée pour séparer et purifier les terres rares en précipitant sélectivement leurs hydroxydes.

De plus, les terres rares à d'autres degrés d'oxydation, tels que Ce(IV), Pr(II), Sm(II) et Yb(II), forment des hydroxydes encore moins solubles, renforçant ainsi leur tendance à précipiter. Ces différences de solubilité en fonction du degré d'oxydation permettent d'ajuster les conditions de précipitation pour une séparation plus efficace des éléments des terres rares.

Chapitre III : caractérisation géochimique

Ln(OH)_3 (s)	Sc	Y	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu
pKs	26,3	23,2	20,7	21,2	21,5	23,1	24,5	25,4	25,6
Ln(OH)_3 (s)	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	
pKs	25,7	25,5	25,6	25,9	24,9	27,0	25,0	26,1	

TABLEAU 4.1 : CONSTANTES DE PKS DES SELS D'HYDROXYDES DES ETRS TRIVALENTS

Sel	Ce(OH)_4	Pr(OH)_2	Sm(OH)_2	Yb(OH)_2
pKs	54,8	80,7	47,2	38,3

TABLEAU 4.2 : CONSTANTES DE PKS DES SELS D'HYDROXYDES DES ETRS.

d. Propriétés générales :

Ce sont des métaux brillants qui ont un éclat argenté, mais qui s'oxydent rapidement lorsqu'ils sont exposés à l'air libre (Fig 17). Leur dureté augmente avec leur numéro atomique croissant. Leurs points de fusion et d'ébullition sont élevés, comparables à ceux des métaux de transition. En réagissant avec la plupart des non-métaux, ils peuvent brûler vigoureusement dans l'air. Cette caractéristique est exploitée dans les allumeurs à pierre, qui utilisent un alliage de Lanthanides appelé mischmétal.



FIGURE 17 : LES 14 LANTHANIDES NON RADIOACTIFS.

Dans le cadre des projets de service public du BRGM, les recherches soulignent que les Lanthanides, l'Yttrium et le Scandium sont des métaux grisâtres à l'état pur, à l'exception de l'Europium et de l'Ytterbium qui tendent vers une teinte jaune pâle. Les lanthanides ont une densité moyenne allant de 5,24 pour l'Europium à 9,84 pour le Lutétium, tandis que l'yttrium est relativement léger avec une densité de 4,47. Leur température de fusion varie de 799 °C pour le Cérium à 1 663 °C pour le Lutétium.

Les propriétés spectrales des éléments des terres rares sont remarquables, tant en absorption (coloration) qu'en émission (luminescence), utilisées dans les applications de luminophores (écrans, éclairage) et de lasers. Les ions d'Yttrium, d'Europium (rouge et bleu), de Terbium et de Thulium (vert), ainsi que de Cérium (jaune), sont largement utilisés à cet effet. De plus, plusieurs terres rares présentent des propriétés magnétiques importantes, à l'origine de leur utilisation dans les aimants permanents de haute performance tels que le Samarium-Cobalt et le Néodyme-fer-bore.

Sous forme métallique, les terres rares ont tendance à s'oxyder plus ou moins rapidement à l'air ambiant, bien que les éléments les plus lourds soient relativement stables en milieu sec. Ils ont principalement un degré d'oxydation de +III, avec quelques exceptions telles que Eu et Sm qui peuvent atteindre +II, et Ce, Pr, Tb qui peuvent aller jusqu'à +IV. En milieu naturel, les terres rares se trouvent sous forme de cations trivalents (trications). Pour les Lanthanides, le rayon du trication diminue avec l'augmentation du numéro atomique, tandis que celui de l'Yttrium est proche de celui des Lanthanides lourds.

Les propriétés chimiques des terres rares sont remarquablement homogènes, notamment en solution où le rayon ionique a peu d'influence. Bien que les différents éléments des terres rares puissent se substituer les uns aux autres dans leurs minéraux, les structures cristallines de certains minéraux comme la monazite ou la bastnaesite sont plus favorables aux éléments avec des rayons ioniques de l'ordre de 113 à 122 pm, favorisant ainsi Ce, La, Nd et Pr. D'autres minéraux comme le xénotime ou la gadolinite sont mieux adaptés aux rayons ioniques de l'ordre de 103 à 110 pm, avec une dominante d'Yttrium partiellement substitué par des Lanthanides plus lourds tels que Tb, Dy et autres.

Enfin, les terres rares n'ont pas de rôles biologiques connus et ne présentent pas de toxicité aux doses d'exposition habituelles.

I.2.2 Domaines d'utilisation des terres rares

Les divers éléments des Terres Rares trouvent une large gamme d'applications dans différents secteurs, avec des marchés de tailles et de tonnages variés. Les principaux domaines d'utilisation sont résumés dans le tableau ci-dessous :

Chapitre III : caractérisation géochimique

Elément	Symbol e	Utilisations
Scandium	Sc	Alliages légers aluminium-scandium : aéronautique militaire; additif (ScI ₂) dans les lampes aux halogénures métalliques; ⁴⁶ Sc : traceur radioactif dans les raffineries.
Yttrium	Y	Lasers : Grenat d'yttrium et d'aluminium (YAG) dopé aux lanthanides ⁶ (Nd, Ho, Er, Tm, Yb); vanadate YVO ₄ dopé avec Eu : luminophores rouges (TV), dopé avec Nd : lasers, dopé avec Ce ³⁺ : LED GaN; ampoules fluocompactes; oxyde mixte de baryum, de cuivre et d'yttrium (YBCO) : supraconducteurs haute température; zircone cubique stabilisée par l'yttrium (YSZ) : céramiques conductrices réfractaires; grenat de fer et d'yttrium (YIG) : filtres micro-onde; bougies d'allumage; ⁹⁰ Y : traitement du cancer.
Lanthane	La	Batteries nickel-métal hydrure; verres d'indice de réfraction élevé et de faible Dispersion; laser (YLaF); verres fluorés; stockage de l'hydrogène.
Cérium	Ce	Agent chimique oxydant; poudre de polissage du verre (CeO ₂); colorant jaune des verres et des céramiques; décoloration du verre; catalyseurs : revêtements de four auto- nettoyants, craquage des hydrocarbures, pots d'échappement; YAG dopé au Ce : luminophore jaune vert pour les diodes électroluminescentes; Manchons à incandescence.
Scandium	Sc	Alliages légers aluminium-scandium : aéronautique militaire; additif (ScI ₂) dans les lampes aux halogénures métalliques; ⁴⁶ Sc : traceur radioactif dans les raffineries.
Yttrium	Y	Lasers : Grenat d'yttrium et d'aluminium (YAG) dopé aux lanthanides ⁶ (Nd, Ho, Er, Tm, Yb); vanadate YVO ₄ dopé avec Eu : luminophores rouges (TV), dopé avec Nd : lasers, dopé avec Ce ³⁺ : LED GaN; ampoules fluocompactes; oxyde mixte de baryum, de cuivre et d'yttrium (YBCO) : supraconducteurs haute température; zircone cubique stabilisée par l'yttrium (YSZ) : céramiques conductrices réfractaires; grenat de fer et d'yttrium (YIG) : filtres micro-onde; bougies d'allumage; ⁹⁰ Y : traitement du cancer.
Lanthane	La	Batteries nickel-métal hydrure; verres d'indice de réfraction élevé et de faible Dispersion; laser (YLaF); verres fluorés; stockage de l'hydrogène.
Cérium	Ce	Agent chimique oxydant ; poudre de polissage du verre (CeO ₂) ; colorant jaune des verres et des céramiques ; décoloration du verre ; catalyseurs : revêtements de four auto-nettoyants, craquage des hydrocarbures, pots d'échappement ; YAG dopé au Ce : luminophore jaune vert pour les diodes électroluminescentes; Manchons à incandescence.
Holmium	Ho	Lasers chirurgicaux infrarouges; colorant rose des verres; standard de calibration en spectrophotométrie; Aimants permanents.
Erbium	Er	Lasers infrarouges (dentisterie); Amplificateurs à fibre; colorant rose des verres et des céramiques.

Chapitre III : caractérisation géochimique

Thulium	Tm	Luminophores bleus pour écrans renforçateurs de rayons X; supraconducteurs haute température; lasers YAG infrarouges; 170Tm : curiethérapie, radiographie portable.
Ytterbium	Yb	Lasers proche infrarouge; horloge atomique; acier inoxydable; 169Yb : radiographie portable.
Lutécium	Lu	Détecteurs en tomographie par émission de positons; tantalite LuTaO4 hôte de luminophores pour électrons et rayons X.

TABLEAU 5 : UTILISATION DES TERRES RARES.

D'après les informations disponibles dans la documentation du BRGM, les aimants permanents sont des composants essentiels dans de nombreux dispositifs tels que les moteurs, les générateurs électriques et les systèmes électroacoustiques. Ils se distinguent par leurs performances magnétiques élevées tout en permettant une réduction significative du poids et du volume des équipements. Cette optimisation permet non seulement de réaliser des économies en termes de poids, mais favorise également la miniaturisation, ce qui est un avantage considérable pour des secteurs tels que l'énergie éolienne, l'industrie automobile, la défense, ainsi que les technologies des microordinateurs et des appareils mobiles.

Les aimants Sm-Co, développés à partir des années 1970, sont réputés pour leur exceptionnelle résistance à la démagnétisation, en particulier à haute température, avec une. La production mondiale de ces aimants était estimée à 1 300 tonnes en 2014.

Les aimants Nd-Fe-B, composés de Nd₂Fe₁₄B et développés à partir de 1982, dominent actuellement le marché en raison de leur coût compétitif et de leurs excellentes propriétés de magnétisation et de rémanence. L'addition out de dysprosium ou éventuellement de terbium renforce leur capacité à maintenir leur magnétisme à des températures élevées, permettant une utilisation jusqu'à plus de 200 °C. La production mondiale de ces aimants atteignait 79 500 tonnes en 2014.

À ce jour, aucune alternative n'a égalé les performances magnétiques à court terme des aimants Nd-Fe-B pour des tailles et des masses similaires. Cependant, l'intégration de dysprosium, représentant de 5 à 11% de la masse totale des aimants, est coûteuse et soumise à des risques d'approvisionnement, ce qui incite de nombreux industriels à chercher des solutions alternatives.

La demande en terres rares pour les aimants permanents a connu une croissance continue depuis la fin des années 1990, à l'exception de quelques années comme 2009 et 2011-2012. Cette tendance devrait se maintenir avec une croissance prévue d'environ 7% par an dans les années à venir.

Les poudres de polissage représentent près d'environ 15% de la consommation mondiale de terres rares, mais seulement moins de 5% en valeur, car elles utilisent principalement les éléments les moins coûteux. Le dioxyde de Cérium (CeO₂) est reconnu comme l'une des meilleures poudres de polissage pour le verre, constituant l'application principale du Cérium au niveau qui est la principale application du Cérium à l'échelle mondiale.

L'oxyde de mischmétal, un mélange de terres rares légères non séparées, est également couramment utilisé en raison de son faible coût et de sa simplicité de production.

La majorité du marché des poudres de polissage est destinée aux écrans plats de téléviseurs, ordinateurs, smartphones et tablettes, dont la production a fortement augmenté

au cours de la dernière décennie.

La catalyse du craquage des pétroles lourds en lit fluide (Fluid Cracking Catalyst, FCC) consomme environ 13% des terres rares, principalement du lanthane.

La catalyse automobile utilise environ 13% du cérium mondial. Les pots catalytiques sont composés d'une chambre en acier inoxydable contenant un ou plusieurs monolithes en céramique en "nid d'abeille" tapissés d'alumine et d'oxyde de cérium (CeO_2), revêtus de microparticules de métaux du groupe du platine (Pt, Pd, Rh). La généralisation des réglementations anti-pollution en dehors de l'Europe, notamment en Asie, ainsi qu'une augmentation de la production automobile mondiale, devrait continuer à soutenir la demande en cérium pour cette application, renforcée par des prix bas et des excédents significatifs de cet élément.

Les batteries NiMH (Nickel Métal Hydrure) utilisent une électrode négative composée d'un alliage de lanthane et de pentanickel (LaNi_5). Ces batteries rechargeables, qui ont remplacé les batteries au nickel-cadmium à la fin des années 1990, sont aujourd'hui présentes dans de nombreux appareils électroniques portables ainsi que dans les premiers véhicules hybrides. En 2012, la demande en terres rares pour les batteries NiMH s'élevait à 9 460 tonnes d'oxydes de terres rares (OTR). Cette demande devrait diminuer avec la transition progressive vers les batteries lithium-ion, un changement déjà entamé par plusieurs constructeurs, tels que Toyota avec les nouvelles versions de sa Prius hybride.

Les alliages métallurgiques, en dehors des batteries NiMH, représentent 11% de la consommation mondiale de terres rares. L'alliage LaNi_5 , qui peut absorber jusqu'à 400 fois son volume en hydrogène, est utilisé pour le stockage de ce dernier. Le mischmétal (un alliage de terres rares légères non ou partiellement séparées, telles que Ce-La ou Ce-La-Nd-Pr) est principalement utilisé dans l'industrie sidérurgique, permettant la désoxydation et la désulfuration de l'acier à des teneurs de 0,1 à 0,2%. Des alliages de magnésium et d'aluminium, ainsi que des superalliages destinés aux industries aéronautique, nucléaire et militaire, intègrent également des terres rares. La demande en terres rares pour les alliages métallurgiques devrait rester relativement stable.

Les industries du verre et des céramiques consomment environ 1% des terres rares, principalement pour la coloration, la décoloration, la résistance au brunissement, l'augmentation de l'indice de réfraction optique et la protection contre les rayons UV. La demande dans ce secteur devrait croître de quelques pourcents par an.

Les luminophores, des substances qui émettent de la lumière lorsqu'elles sont excitées par des électrons (comme dans les tubes cathodiques), des photons ou d'autres particules, utilisent les propriétés de luminescence de nombreux lanthanides. Ces matériaux sont essentiels pour la fabrication de luminophores utilisés dans les écrans de télévision, les ordinateurs et d'autres appareils électroniques, ainsi que dans les éclairages domestiques, publics et commerciaux (lampes fluocompactes, enseignes publicitaires, etc.). En 2012, ce marché représentait 7% de la consommation mondiale de terres rares.

I.2.3 Le marché des terres rares

Le marché des terres rares connaît une forte croissance en raison de la demande croissante de produits contenant des terres rares (ETR), ce qui entraîne des tensions économiques et géopolitiques. Depuis la fin du 19^e siècle, où le cérium était utilisé dans les manchons à gaz, jusqu'aux années 1970, les terres rares aux propriétés optiques exceptionnelles ont été largement utilisées pour les écrans couleur et la technologie laser. D'autres terres rares, grâce à leur magnétisation, leur durabilité et leur capacité de miniaturisation, sont devenues essentielles dans la fabrication de nombreux appareils électroniques tels que les haut-parleurs, les équipements d'imagerie médicale, les générateurs éoliens, les disques durs et les moteurs électriques à haute efficacité.

Selon le dossier "Enjeux des géosciences" du BRGM, la demande en terres rares est principalement concentrée sur quatre éléments : le néodyme, le praséodyme, et dans une moindre mesure le dysprosium et le terbium pour des applications de haute performance. Ces éléments sont cruciaux pour les véhicules électriques et les nouvelles technologies de production d'énergie notamment les éoliennes, où des moteurs et générateurs compacts et légers sont indispensables. Par exemple, un aimant de 100 grammes contenant du néodyme a la même capacité qu'un aimant classique de 1 kg sans néodyme.

Dans le secteur militaire, les terres rares améliorent les systèmes de guidage de missiles, les performances des blindages et les capacités des sonars lorsqu'elles sont ajoutées à d'autres métaux. En 2020, la production minière de terres rares était estimée à environ 200 000 tonnes, avec une consommation industrielle de 190 000 tonnes pour un marché mondial de 2,2 milliards de dollars.

Face à la dépendance ou pour profiter du marché, plusieurs pays ont investi dans l'extraction des terres rares. Les États-Unis ont rouvert le gisement de Mountain Pass, produisant environ 38 000 tonnes d'oxydes de terres rares en 2020, tandis que la Birmanie en a produit environ 30 000 tonnes. Le monopole de la Chine sur la production primaire a diminué, représentant 57% de la production mondiale en 2020, contre 82% en 2017. Cependant, la Chine reste dominante dans la transformation des terres rares grâce à une chaîne de production bien développée et très rentable.

D'autres pays, notamment l'Australie, les États-Unis et l'Europe, concentrent leurs efforts sur le développement de capacités de raffinage compétitives, avec des installations prévues d'ici 2030. La consommation mondiale de terres rares a plus que doublé en vingt ans et pourrait augmenter de 8% par an dans les prochaines années en raison de la croissance des ventes de voitures électriques, des plans énergétiques favorisant l'éolien, et de l'expansion de l'électronique et de la robotique.

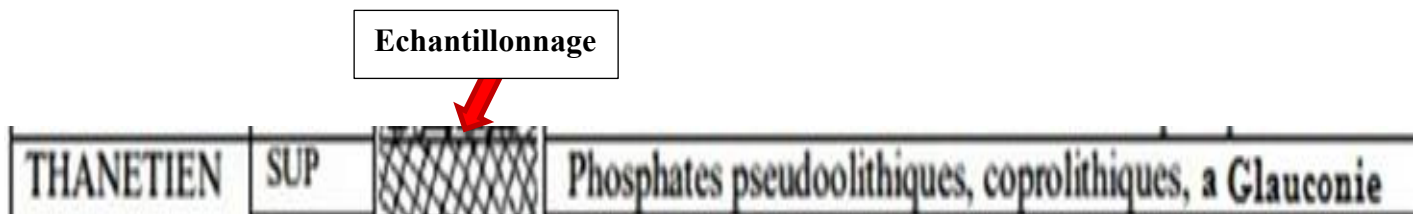
II. Partie analytique

Les échantillons prélevés sur le terrain ont fait l'objet d'une série d'analyses visant à caractériser leurs cortèges géochimiques. Dans cette partie, nous présenterons les différentes méthodes d'analyse utilisées, comprenant les techniques spectroscopiques. Les résultats obtenus ont fait l'objet d'une interprétation, suivis d'une discussion en vue de la mise en valeur des implications de ces résultats, en mettant en lumière le potentiel de gisement de phosphates du Djebel Onk.

II.1 Echantillonnage

Les minerais phosphatés de Tébessa Sud ont été échantillonnés dans la mine de Kef Essenoun, et dans le bassin minier de Djebel Onk. Au total, huit échantillons ont été prélevés : six provenant de la couche principale (P2, P2a, P2b, P2c, P2d, P2e), un de la couche sommitale (P3) et un de la couche basale (P1). Il est important de noter que les échantillons ont été prélevés de manière systématique, du bas vers le haut, afin de suivre l'évolution verticale et de couvrir les différents types de faciès rencontrés, à savoir argileux, carbonatés et siliceux.

COUCHES	Thanetien supérieur partie basale	Thanetien supérieur partie principale						Thanetien supérieur partie sommitale phospho-calcaire
	N° D'échantillon	P1	P2a	P2b	P2c	P2d	P2e	P2f



II.2 Méthodes d'analyses

II.2.1 Analyses de la spectrométrie par fluorescence X (XRF)

La spectrométrie de fluorescence X (XRF) a été utilisée pour analyser les échantillons de minerais de phosphates. Les analyses ont été réalisées à l'aide de l'équipement de spectrométrie de fluorescence X PANalytical AXIOS Minerals. Au niveau du laboratoire de l'ORGM de Boumerdès.

La préparation des échantillons pour l'analyse chimique par spectrométrie de fluorescence X (XRF) commence par le prélèvement d'échantillons solides de manière représentative, suivie du broyage pour obtenir une poudre homogène. Cette poudre est ensuite compressée en pastilles. Afin d'assurer des mesures précises.

L'instrument XRF est calibré à l'aide de solutions étalons de concentrations connues, préparées à partir de substances hautement pures. Lors de l'analyse, les pastilles sont placées dans la chambre d'analyse de l'instrument, où elles sont irradiées par des rayons X. Cette irradiation excite les électrons des atomes de l'échantillon, ce qui entraîne l'émission de rayons X fluorescents caractéristiques de chaque élément présent. Ces rayons sont détectés et analysés par un logiciel, qui compare les spectres observés à une bibliothèque de spectres de référence afin de déterminer les concentrations des éléments. Enfin, les intensités des raies spectrales sont converties en concentrations en comparant les signaux mesurés aux courbes de calibration, et un rapport détaillant les concentrations des éléments majeurs est généré, exprimé en pourcentage ou en concentration massique (ppm ou µg/g).

II.2.2 Analyse chimique des éléments traces par Spectrométrie d'émission de plasma à couplage inductif :

Les minerais de phosphates ont été soumis à une analyse par spectrométrie de plasma à couplage inductif. Ces analyses ont été effectuées par un ICP-OES de type Agilent Technologies 5900.

L'analyse chimique des terres rares par spectrométrie d'émission de plasma à couplage inductif (ICP-OES) suit un protocole rigoureux pour garantir la précision et la fiabilité des résultats. Le processus commence par la préparation de l'échantillon, qui nécessite souvent une digestion acide (par exemple, avec HNO₃, HCl ou HF) pour dissoudre les échantillons solides. L'échantillon dissous est ensuite transformé en un aérosol fin par un nébuliseur, puis transporté dans un plasma d'argon généré par un champ de radiofréquence. Le plasma atteint des températures de 8000-10000 K, ce qui atomise et excite les éléments présents.

Les atomes excités des terres rares émettent de la lumière à des longueurs d'onde caractéristiques lorsqu'ils reviennent à leur état fondamental. Cette lumière est ensuite dirigée vers un spectromètre, qui disperse la lumière en fonction de sa longueur d'onde.

Les intensités des raies d'émission sont mesurées par des détecteurs, tels que des photomultiplicateurs ou des détecteurs CCD, et sont proportionnelles aux concentrations des éléments dans l'échantillon. Des solutions étalons sont utilisées pour calibrer l'instrument, et des corrections sont appliquées pour les interférences spectrales et non spectrales. Ce protocole permet une analyse précise et rapide des terres rares, comme détaillé par Marguí et al. (2009) et Balaram (2019).

II.3 Résultats des analyses

Dans le cadre de l'étude géochimique des phosphates du Djebel Onk, en particulier dans le bassin minier du Kef Essennoun, plusieurs analyses ont été effectuées pour déterminer la concentration des éléments majeurs (oxydes) et des terres rares dans les couches phosphatées. Les résultats obtenus sont présentés de manière synthétique dans des tableaux et illustrés par des histogrammes, ce qui permet une visualisation claire des variations chimiques entre les différentes strates.

- **Résultats des concentrations des oxydes :**

Couche	N° D'échantillon	P ₂ O ₅	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	F ₂ O ₃	K ₂ O	TiO ₂	MnO
Thanetien supérieur partie basale	P1	17,68	33,71	11,98	3,67	3,98	0,18	0,32	<0,05	<0,05
Thanetien supérieur partie principale	P2a	20.2	37.18	6.39	6.5	3.24	0.14	0.22	<0,05	<0,05
	P2b	19.4	37.14	6.01	6.4	3.2	0.190	0.16	<0.045	<0.055
	P2c	18.9	38	11.4	5.8	3.5	0.190	0.33	<0.040	<0.042
	P2d	20.01	37	10	5.2	3.6	0.175	0.29	<0.046	<0.0499
	P2e	19.8	36.81	8.5	5.1	3.8	0.1935	0.27	<0.048	<0,05
	P2f	18.9	36.90	6.7	4.9	3.4	0.190	0.31	<0.05	<0.05
Thanetien supérieur partie sommitale phospho- calcaire	P3	20,93	37,19	6,39	6,77	3,24	0,14	0,22	<0.05	<0.05

TABLEAU 6 : CONCENTRATION DES ELEMENTS MAJEURS (OXYDES) DANS LES PHOSPHATES DE KEF ESSENNOUN (DJEBEL ONK).

Le tableau ci-dessus met en évidence les concentrations d'oxydes majeurs dans différents échantillons de phosphates du Thanetien supérieur. Les principaux oxydes analysés comprennent le P₂O₅, le CaO, le SiO₂, l'Al₂O₃, le MgO, le Na₂O, le F₂O₃, le K₂O, le TiO₂ et le MnO. Les échantillons présentent des teneurs élevées en P₂O₅ (entre 17,68% et 20,93%), ce qui reflète la richesse en phosphates, essentielle pour évaluer la qualité et l'utilité industrielle de ces dépôts. La forte concentration en CaO (entre 33,71% et 38%) indique une abondance de carbonates, principalement sous forme de calcite et de dolomite, ce qui est typique des phosphates sédimentaires.

Les teneurs en SiO₂ (de 6,01% à 11,98%) et en Al₂O₃ (de 3,67% à 6,77%) varient considérablement, ce qui signale la présence de minéraux silicatés et argileux provenant de différentes sources géologiques ou processus de dépôt. Le MgO (de 3,2% à 3,98%) reste relativement stable, ce qui suggère une dolomitisation constante au sein des échantillons. Les oxydes mineurs, tels que le Na₂O, le F₂O₃, le K₂O, le TiO₂ et le MnO, sont présents en faibles concentrations (souvent <0,05%), soulignant ainsi leur rôle secondaire dans la composition globale des phosphates étudiés.

Chapitre III : caractérisation géochimique

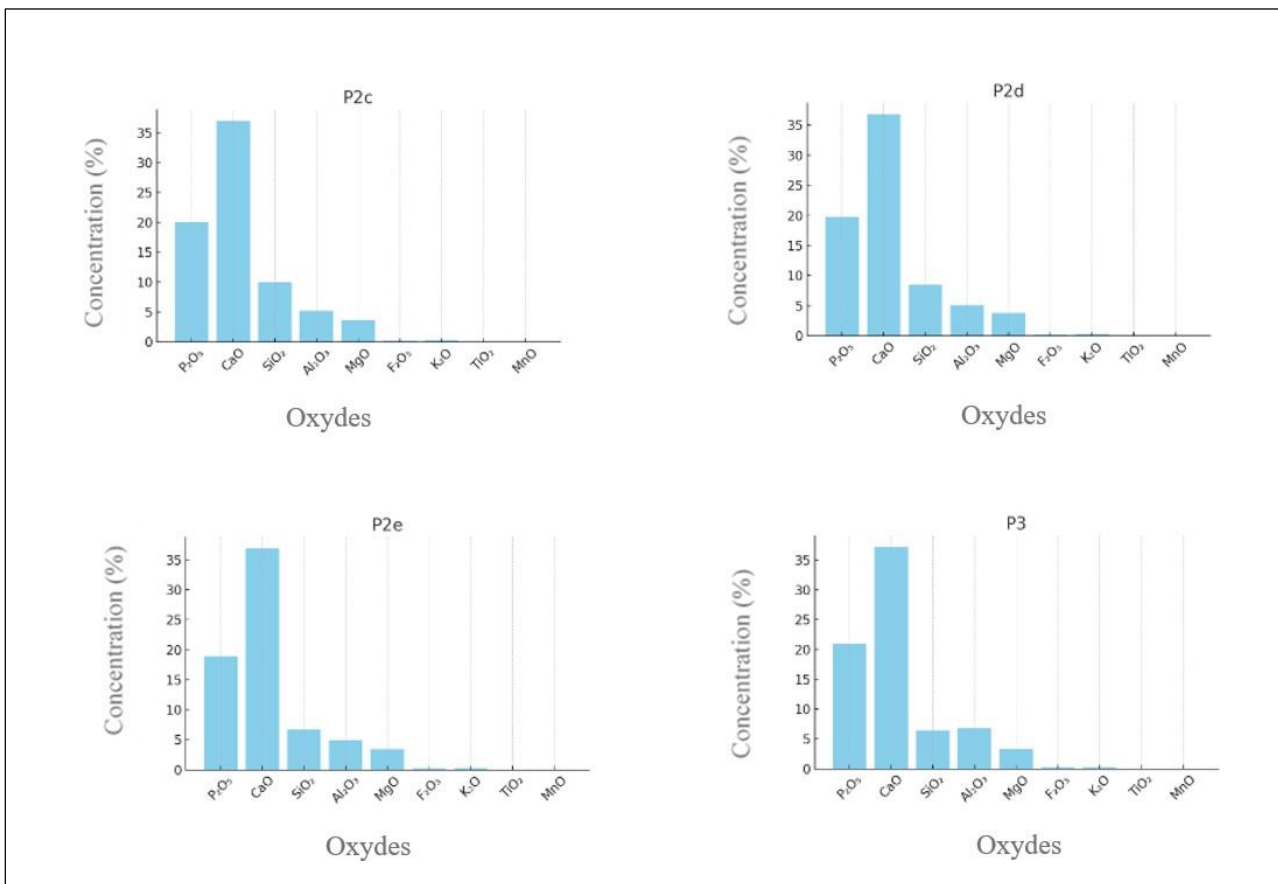
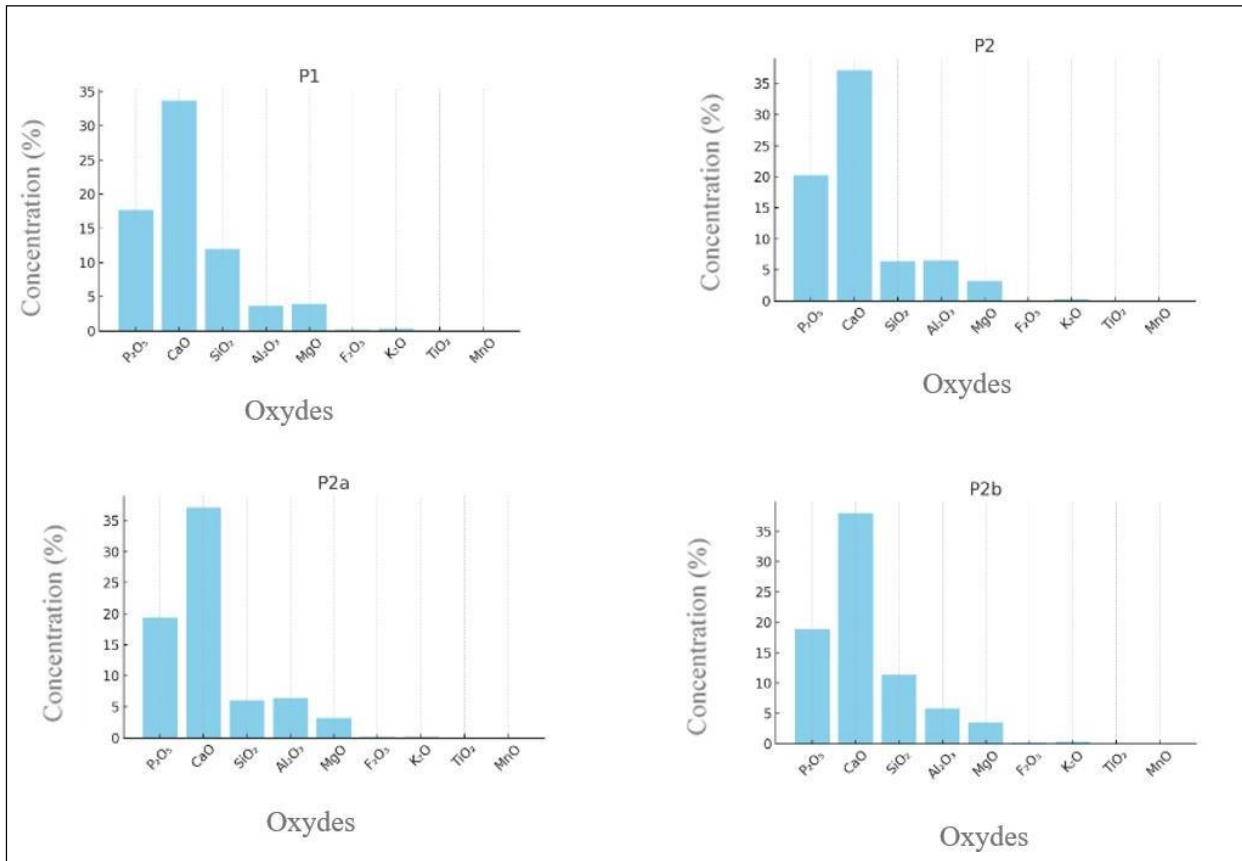


FIGURE 18 : HISTOGRAMMES DES TENEURS EN ELEMENTS MAJEURS DES COUCHES PHOSPHATEES DE BASSIN MINIER KEF ESSENNOUN (DJBEL ONK).

Chapitre III : caractérisation géochimique

Les histogrammes des échantillons du Thanetien supérieur montrent des tendances distinctes :

L'échantillon **P1** (partie basale) se distingue par une haute teneur en CaO et P₂O₅, ainsi que des niveaux modérément élevés de SiO₂ et MgO, tandis que les autres oxydes sont présents en faibles quantités. Les échantillons **P2 à P2e** (partie principale) présentent tous une teneur élevée en CaO et P₂O₅, mais avec une teneur en SiO₂ généralement plus basse que **P1**, sauf pour **P2b**. Les concentrations en Al₂O₃, MgO et autres oxydes varient, K₂O, TiO₂, et MnO. L'échantillon **P3** (partie sommitale phospho-calcaire) se distingue par la plus haute concentration en P₂O₅ et une haute teneur en CaO, avec des concentrations pondérées en SiO₂ et Al₂O.

- **Résultats des concentrations des éléments terres rares :**

Élément (ppm)	P1 : Thanetien supérieur partie basale	P2 : Thanetien supérieur partie principale	P3 : Thanetien supérieur partie sommitale phospho-calcaire
Ce	181,656	196.43	104,522
Dv	19,725	ND	12,106
Er	11,038	13.42	6,866
Eu	5,517	5.88	3,194
Gd	21,412	24.93	11,690
Ho	3,165	4.57	2,106
La	121,989	144.23	88,876
Lu	1,408	1.79	0,909
Nd	123,561	138.66	72,119
Pr	43,379	32.65	31,344
Sc	4,197	ND	2,375
Sm	25,189	23.75	14,599
Tb	4,037	3.42	2,007
Tm	<0,0001	1.78	<0.0001
Y	160,453	ND	108,148
Yb	10 ,003	9.67	6,430

TABLEAU 7 : ANALYSE COMPARATIVE DES CONCENTRATIONS D'ELEMENTS TERRES RARES (EN PPM) ENTRE DIFFERENTES PARTIES DU THANETIEN SUPERIEUR.

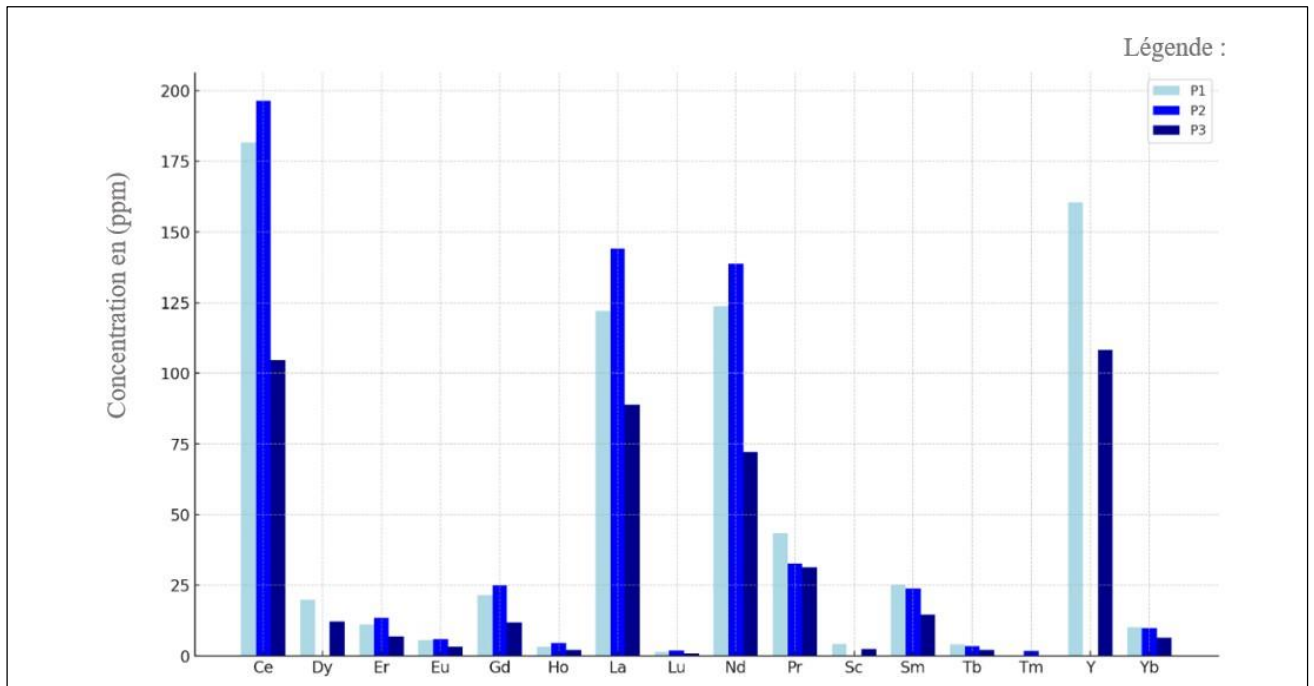


FIGURE 19 : HISTOGRAMMES MONTRANT LES VARIATIONS DES CONCENTRATIONS D'ÉLÉMENTS DE TERRES RARES (EN PPM) DANS LES STRATES DU THANETIEN SUPÉRIEUR DE KEF ESSENNOUN (DJEBEL ONK).

Cet histogramme représente les concentrations de différents éléments chimiques dans trois échantillons distincts : P1, P2 et P3. On observe une variation importante des concentrations de chaque élément entre les trois échantillons. Par exemple, pour le Cérium (Ce), l'échantillon P1 présente la concentration la plus élevée, suivie de P2, puis de P3 qui présente la concentration la plus faible. Une tendance similaire est observée pour d'autres éléments tels que le Néodyme (Nd) et l'Yttrium (Y), où P1 présente des concentrations élevées par rapport à P2 et P3. En revanche, certains éléments tels que le Dysprosium (Dy), l'Erbium (Er), l'Europium (Eu) et l'Holmium (Ho) montrent des concentrations relativement faibles dans tous les échantillons, avec peu de variations notables entre P1, P2 et P3. Les échantillons P1, P2 et P3 présentent donc une hétérogénéité notable dans les concentrations des éléments chimiques.

II.4 Interprétation et discussion

Dans cette partie, nous traiterons des résultats géochimiques obtenus des différents échantillons de phosphate du gisement de Kef Essennoun (Djebel Onk). Les tableaux et histogrammes fournis permettent de visualiser les variations de concentration des éléments de terres rares (ETR) à travers les différentes couches stratigraphiques. L'analyse se concentre sur la répartition des ETR, en particulier le Cérium et le Néodyme, afin de mieux comprendre leur potentiel économique et leur répartition géochimique.

II.4.1 La distribution des éléments de terres rares (ETR) dans les différentes couches du gisement de Kef Essennoun, présente une hétérogénéité marquée (Voir les tableaux et histogrammes), les concentrations en ETR, en particulier pour le Cérium (Ce) et le Néodyme (Nd), varient considérablement en fonction de la profondeur stratigraphique.

Les couches basales (P1) et principales (P2) du Thanétien supérieur présentent des concentrations nettement plus élevées en ETR, tandis que la couche sommitale (P3) présente des concentrations plus modestes.

Cette distribution inégale est principalement due à des facteurs géologiques, tels que les conditions de dépôt et les processus diagenétiques, qui ont favorisé une accumulation plus importante des ETR dans certaines couches. Ainsi, la couche principale (P2) se distingue par sa richesse en ETR, ce qui en fait une zone d'intérêt prioritaire pour une éventuelle exploitation économique potentielle. Bien que la couche basale (P1) présente également des concentrations importantes, celles-ci restent légèrement inférieures à celles de la couche principale (P2), tandis que la couche sommitale (P3) s'avère être la plus pauvre en ETR.

II.4.2 Distribution des éléments importants : lanthane – Cérium – Néodyme, Parmi les éléments de terres rares, le Lanthane, le Cérium (Ce) et le Néodyme (Nd) se distinguent par leur importance à la fois géochimique et économique.

➤ Le Cérium, l'un des éléments les plus abondants, atteint des concentrations maximales dans la couche principale (P2), avec environ 196,43 ppm, suivi de la couche basale (P1) à 181,656 ppm. En revanche, la couche sommitale (P3) affiche des teneurs plus faibles en Cérium, avec seulement 104,522 ppm.

➤ Le Néodyme, également un élément clé, présente une distribution similaire. Il atteint des valeurs élevées dans la couche P2 (138,66 ppm) et P1 (123,561 ppm), tandis que la couche P3 affiche une concentration plus faible en Néodyme, avec 72,119 ppm. Cette répartition suggère que les processus géologiques et diagenétiques ayant affecté les couches P2 et P1 ont favorisé l'enrichissement de ces éléments.

➤ Le Cérium et le Néodyme sont d'une grande importance économique en raison de leur utilisation dans diverses applications technologiques. Leur présence dans les phosphates du Kef Essennoun renforce l'attrait économique de ce gisement, offrant un potentiel intéressant pour une **valorisation des phosphates**.

II.4.3 Distribution des valeurs les plus hautes et les plus basses des ETR dans les couches (valeur économique), Les analyses montrent que les valeurs les plus élevées des ETR sont principalement localisées dans la couche principale (P2). En termes de valeur économique, cette couche est la plus prometteuse, car elle contient les concentrations les plus importantes de Cérium, Néodyme et autres Lanthanides. Par exemple, la teneur en Cérium dans la couche (P2) atteint 196.43 ppm, ce qui est la plus haute valeur parmi toutes les couches analysées. De plus, la concentration en Néodyme, avec 138.66 ppm, et Lanthane avec 144.23 ppm, renforce l'intérêt économique de cette couche.

En revanche, la couche sommitale (P3) présente les valeurs les plus basses pour la plupart des ETR, ce qui réduit son potentiel économique. Cette faible concentration suggère que les processus géologiques qui ont favorisé l'accumulation des ETR dans les couches inférieures n'ont pas eu le même effet dans cette couche. Cela rend la couche (P3) moins attractive pour l'exploitation sélective des ETR.

Chapitre III : caractérisation géochimique

Le phosphate des trois couches a des teneurs hétérogènes pour une concentration économiquement acceptable, ils sont mélangés avant commercialisation, de ce fait les ETR qui accompagnent ces phosphates auront une teneur moyenne, pour une évaluation plus rigoureuse nous allons évaluer, les teneurs moyennes pondérées de ces ETR au sein de la couche commercialisée.

Elément (ppm)	P1	P2	P3
	Thanetien supérieur partie basale	Thanetien supérieur partie principale	Thanetien supérieur partie sommitale phospho-calcaire
Σ ETRs	736,729ppm	601,18 ppm	467,291 ppm
Moyenne Pondérée des ETR	601, 7ppm		
Teneur des ETR g/T P ₂ O ₅	0,601g de ETR par Tonne de P ₂ O ₅		

1ppm=1mg / kg

Une Tonne de P₂O₅ contient 0,602g en ETR

TABLEAU 8 : CONTENANCE DE LA Σ ETRS STRATEGIQUES DANS LES TROIS COUCHES PHOSPHATEES.

Elément (ppm)	P1 Thanetien supérieur partie basale	P2 Thanetien supérieur partie principale	P3 Thanetien supérieur partie sommitale phospho-calcaire	Moyenne Pondérée	Teneur des ETR/gT P ₂ O ₅
Ce	181,656	104,522	161	149,1	149 mg/T
La	121,989	88,876	118,365	109,74	110 mg/T
Nd	123,561	72,119	111,5	103,73	104 mg/T
Pr	43,379	31,344	35,791	36,84	036 mg/T
Tb	4,037	3.42	2,007		
Somme des ETR	474,622	300,281	428,663		
Moyenne Pondérée	401,2 ppm				
Teneur des ETR g/T P ₂ O ₅	0.401,2 g/t				

TABLEAU 9 : CONCENTRATION DES TERRES RARES DANS LES PHOSPHATES LES PLUS INTERESSANTES ÉCONOMIQUEMENT.

Chapitre III : caractérisation géochimique

Elément (ppm)	Ce	La	Nd	Pr	Tb
Moyenne Pondérée des ETR	0.149 g/kg	0.110 g/kg	0.104 g/kg	0.00036 g/kg	0.0031 g/kg
Cours mondial	6,4 US \$/kg	6,4 US \$/kg	120,9 US\$/kg	120,9 US\$/kg	1000 US\$/kg
Prix coutant des concentrations/kg	0,0009536 US \$	0,000704 US \$	0.0125736 US\$	0,043524 US\$	0.0031 US\$
Prix coutant des concentrations/T phosphates	0.9536 US\$	0.704 US \$	12,5736 US\$	43,524 US\$	3.1 US\$

TABLEAU 10 : COURS MONDIAL DES TERRES RARES ETR

Total prix des ETR est de 60,8552 US\$/ Tonne
Le prix des phosphates est de 152,50 US \$/ Tonne
Le prix des phosphates incluant les ETR est de = 213,3552 US\$/ Tonne

II.4.4 Intérêt économique des éléments de terres rares (ETR) présents dans les phosphates, tels que le Néodyme, le Cérium et le Lanthane, réside dans leur contribution essentielle aux technologies de pointe et leur valeur ajoutée pour les ressources minérales. Le Néodyme est particulièrement indispensable pour fabriquer des aimants permanents de haute performance utilisés dans les moteurs électriques, les générateurs d'éoliennes et divers dispositifs électroniques. Le Cérium est fondamental dans les catalyseurs visant à réduire les émissions polluantes et se trouve également dans de nombreux produits optiques et électroniques. Quant au Lanthane, il est utilisé dans la production de catalyseurs, de verres optiques et d'écrans plats.

Les phosphates de Kef Essennoun, avec leurs concentrations en Lanthanides, sont donc une ressource stratégique pour le développement de technologies avancées. L'extraction et la valorisation de ces phosphates ne renforceraient pas seulement la position économique de l'Algérie sur le marché mondial des métaux rares, mais soutiendraient également le progrès industriel et technologique du pays.

Conclusion

Les analyses géochimiques des gisements de Phosphates du Djebel Onk révèlent une concentration élevée en phosphates ainsi que des teneurs en éléments des terres rares (ETR) tels que le Cérium (Ce), le Lanthane (La) et le Néodyme (Nd). Cette découverte confère aux phosphates une valeur économique considérablement accrue. En effet, les terres rares, en particulier les éléments "magnétiques" tels que le Néodyme et le Praséodyme.

En conséquence, la valorisation des Phosphates du Djebel Onk, traditionnellement utilisés dans l'industrie des engrais, prend une nouvelle dimension grâce à la présence de ces terres rares. Des éléments tels que le Néodyme, le Praséodyme, le Cérium et le Dysprosium ajoutent une importance économique accrue, en tant que composants clés des technologies de pointe. Les aimants permanents, nécessaires pour les véhicules électriques, l'énergie éolienne et les dispositifs électroniques, dépendent largement de ces éléments. La demande croissante de ces terres rares, stimulée par l'expansion rapide des technologies, devrait augmenter le marché de près de 10 % par an d'ici 2030, actuellement dominé par la Chine.

Ainsi, l'identification de la présence des terres rares dans les phosphates du Djebel Onk permet leur valorisation économique, et une valeur ajoutée à ces phosphates, ainsi que de nouvelles perspectives économiques. En intégrant la récupération de ces éléments dans le procès de traitement, l'Algérie pourrait maximiser la valeur ajoutée de ces ressources minérales et répondre à la demande mondiale croissante et rejoindre les principaux pays producteurs en ETR.

Conclusion générale

Conclusion générale :

La région de Tébessa, faisant partie de l'Atlas saharien oriental, s'inscrit dans la vaste province paléogéographique des « bassins atlasique Algéro-Tunisiens ». Cette région géologiquement diversifiée a été influencée par une série d'environnements marins variés au cours des périodes triasique, Crétacée et Éocène. Le Miocène a été marqué par une intense activité tectonique, tandis que le Quaternaire a vu une transition vers des conditions de sédimentation continentale.

Tébessa Sud est renommée pour ses gisements de phosphate, en particulier celui de Kef Essenoun (Djebel Onk), situé dans le bassin de Gafsa-Métlaoui-Onk. Cette zone fait l'objet d'études approfondies sur deux processus sédimentaires majeurs : la phosphatation et la glauconitisation. La phosphatation se produit grâce à l'action de bactéries dans des microsystemes saturés, ce qui entraîne la formation de francolite, un phosphate de Calcium et de Magnésium.

Parallèlement, la glauconitisation commence par l'accumulation de matière organique oxydée par des bactéries aérobies dans des environnements marins oxygénés, favorisant ainsi la formation de particules phosphatées et de glauconite. Les phosphates du Djebel Onk, composés principalement de francolite, présentent des concentrations typiques de 32% de P₂O₅, 52% de CaO et 4% de F, avec une teneur notable en terres rares. L'étude pétrographique des diverses formations phosphatées observées à Tébessa Sud a mis en évidence la présence de coprolithes, de pellets de phosphates, de glauconite et de débris osseux.

Sur le plan géochimique, Les analyses géochimiques des phosphates du Djebel Onk ont mis en évidence des concentrations significatives de terres rares, notamment le cérium, le lanthane et le néodyme, surtout observées dans la couche principale du Thanétien supérieur. Ces observations révèlent la richesse en éléments stratégiques présente dans les formations géologiques locales, une distribution variable selon les strates géologiques. En utilisant des techniques avancées telles que la spectrométrie de fluorescence X et la spectrométrie d'émission de plasma à couplage inductif.

Sur l'aspect économique, les phosphates du Djebel Onk offrent une opportunité stratégique remarquable grâce à leur concentration en terres rares, notamment le néodyme, le praséodyme, le cérium et le dysprosium. Ces éléments jouent un rôle essentiel dans la production d'aimants permanents à haute efficacité, dont la demande mondiale ne cesse de croître. En effet, ces aimants sont indispensables pour le développement de technologies avancées, comme les véhicules électriques, où ils contribuent à réduire le poids et augmenter l'autonomie des moteurs. Dans le secteur des énergies renouvelables, ils sont fondamentaux pour les générateurs d'éoliennes, permettant des rendements énergétiques élevés avec une stabilité accrue, même sous des conditions extrêmes. En outre, l'industrie électronique bénéficie également de ces terres rares dans la fabrication de dispositifs performants et miniaturisés, tels que les smartphones, les ordinateurs portables et les appareils médicaux de précision. Stratégiques.

La demande mondiale pour les terres rares, notamment pour des éléments tels que le néodyme, le praséodyme, le cérium et le dysprosium, est en forte croissance, avec une prévision de hausse annuelle de 10 % jusqu'en 2030. Cette tendance est principalement alimentée par la transition vers des technologies plus écologiques et l'essor des innovations électroniques. Actuellement, la Chine domine le marché en contrôlant près de 57 % de la production mondiale et en disposant d'une chaîne de transformation des terres rares bien établie, ce qui la place en

Conclusion Générale

position stratégique pour répondre à la demande mondiale.

En exploitant les phosphates du Djebel Onk pour leur abondance en terres rares, l'Algérie a l'opportunité d'augmenter considérablement la valeur ajoutée de ses ressources minérales. Cette valorisation permettrait non seulement de répondre efficacement à la demande mondiale croissante, mais également de positionner l'Algérie comme un acteur majeur sur le marché mondial des matériaux stratégiques. De plus, cela favoriserait le développement industriel et technologique du pays, tout en diversifiant ses sources de revenus.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

Durand-Delga, M., Fontboté, J.-M., (1980). Le cadre structural de la méditerranée occidentale. Mémoire du bureau de recherches géologiques et minières. 115, 65 -85.

Durozoy, M.G. (1956). Carte géologique de l'Algérie au 1/50000, feuille n°206 Tébessa avec notice explicative détaillée. Publ. Serv. Carte géol. Algérie.

El bamiki, R (2021). Étude géologique des occurrences phosphatées du Haut-Atlas marocain : Compréhension des contrôles géologiques sur l'accumulation du phosphate. Thèse doctorat Étude géologique des occurrences phosphatées du Haut-Atlas marocain : Compréhension des contrôles géologiques sur l'accumulation du phosphate.26,27,30,34p

International Fertilizer Association. (2023). Phosphate Market Report isponible sur : <https://www.fertilizer.org/>

Kechiched, R (2017). Les phosphates du nord de tébessa (dyr et elkouif) : étude sédimentologique, gîtologique et géochimique. Thèse doctorat Université Badji Mokhtar – Annaba. 6p

Kechiched, R (2017). Les phosphates du nord de tébessa (dyr et elkouif) : étude sédimentologique, gîtologique et géochimique. Thèse doctorat Université Badji Mokhtar – Annaba. 8,9,10,11,12,13,14p

Kechiched, R. (2011). Typologie géochimique et géostatistique des minerais de phosphates du gisement de Bled El Hadba – Djebel Onk (Algérie Orientale). Université Badji Mokhtar – Annaba. 175p.

Kechiched, R. Laouar, R. Bruguier, O. Salmi-Laouar, S. Kocsis, L. Bosch D, Foufou, A. Ameer-Zaimeche, O. Laritb, H. Glauconite-bearing sedimentary phosphorites from the Tébessa region (eastern Algeria) : Evidence of REE enrichment and geochemical constraints on their origin, Vol 145 , September 2018, Pages 190-200.

Leur situation dans le cadre des phosphates algériens. DEA, Fac. Sci. Alger, 136p.

MOUSSELMAL, F (2020). Actualisation des reserves geologiques cas du **gisement** de phosphate de Kef Essenoun - Djebel Onk(**Tébessa**)

OCP Group. (2023). Rapport Annuel (2023) Disponible sur : <https://www.ocpgroup.ma/>.

Sagno, J (2019). Mise en valeurs les rejets de minerais phosphatés : Nouvelles tendances de restauration et de réhabilitation des sites miniers (cas de société de phosphate- SOMIPHOS- Djebel Onk – Tébessa. Mémoire Université Badji Mokhtar – Annaba. 6,25,26,39,41p

Sami L (2004) : Contribution à l'étude géologique des minéralisations à Pb- Zn, Ba et F dans la région de Meskiana : Exemple des indices d'Es Souabaa et de m'Khiriga. (Atlas saharien oriental, Algérie), thèse de magister, USTHB, Alger.

Sappin, A.-A.,Beaudoin . Classification des principaux indices en éléments des terres rares au Québec (Canada) : Contexte géologique et évaluation de leur intérêt économique.1p

Soukeur,R (2022) .Valorisation des éléments de terres rares par procédés membranaires (ETR Lourds) . Thèse doctorat Université de Rennes 1, France et LHCIM, Faculté de Chimie de l'USTHB, Alger, Algérie.7,8 ,9,10p.

US Geological Survey. (2023). *Mineral Commodity Summaries 2023: Phosphate Rock*.

US Department of the Interior. Disponible sur : <https://www.usgs.gov/>.

Sites consultés :

<https://dspace.univ-annaba.dz/>

https://theses.hal.science/tel-03341306/file/2020_EL_BAMIKI_archivage.pdf

<https://www.aniref.dz/DocumentsPDF/monographies/MONOGRAPHIE%20WILAYA%20TEBESSA.pdf>

https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1464343X18301493?via%3Dihub*