

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Université Mohamed Seddik Benyahia de Jijel

جامعة محمد الصديق بن يحيى - جيجل

Faculté des Sciences de la Nature
et de la Vie
Département des Sciences de la
Terre et de l'Univers



كلية علوم الطبيعة والحياة
قسم علوم الأرض و الكون

Mémoire de fin d'études

Présenté en vue de l'obtention de Master Académique

Filière : Géologie

Spécialité : Ressources Minérales et Géomatériaux

Thème

**Pétrographie et analyse granulométrique du minerais phosphaté du
Djebel Dyr (Tébessa, Algérie nord-orientale)**

Présenté par :

Mr. KEROUAZ Rafiq

Mr. TELMANI Badis

Soutenu le Mercredi 04 juillet 2018

Devant le jury composé de :

Président : Mr MEBROUK F.

Examineur : Mr LEKOUÏ A.

Encadrant : Mr BOUZENOUNE A.

Année Universitaire 2017/2018

Numéro d'ordre (bibliothèque) :

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à son élaboration plus particulièrement :

A' Mes adorables parents qui m'ont mis à l'abri du besoin, et m'ont donné l'avantage de me consacrer entièrement et uniquement à mes études.

A' Mon très cher frère, mes très chères sœurs, ma chère soumia, mes très chers grand-père et grand-mère et pour toute la famille.

A' Mes amis et tous les collègues de toutes les promotions de « géologie » de l'université de Jijel.

A' Mes très chers amis Mohamed, Boubaker, Salahdine de l'université d'Annaba.

A' tous les collègues étudiant(e)s de la Promotion Master II option « RMG » de l'année 2018.

A' tous les collègues étudiant(e)s de la Promotion Master I option « RMGE » de l'année 2018.

Et enfin pour ceux qui ne sont pas sur les lignes mais dans le cœur je vous dis mille merci.

Rafiq Kerouaz

Je dédie ce modeste travail à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à sa réalisation.

A' ma mère et mon père.

A' Ma sœur, son mari et leurs enfants.

A' mes frères et ma petite sœur.

A' toute ma famille et mes amis.

Badis Telmani

Remerciements

Au terme de ce travail et en guise de reconnaissance, nous remercions tout d'abord, notre Dieu le Tout Puissant qui nous a donné la force et la patience pour arriver à ce niveau.

Nous remercions tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce projet de fin d'étude.

*Nous exprimons nos plus grandes gratitudes à notre encadrant **Mr A.Bouzenoune**, nous tenons à le remercier pour la confiance qu'il nous a accordée et pour tous ses conseils dans l'orientation et la rédaction de ce mémoire.*

*Nos remerciements vont également à **Mr.L. Bouabssa**, professeur en géologie à l'université Badji Mokhtar d'Annaba, pour tous les conseils qu'il nous a prodigués pendant ces dernières années.*

Nos remerciements vont également à l'ensemble des enseignants du département des Sciences de la Terre et de l'Univers de l'université Mohamed Seddik Benyahia de Jijel pour les enseignements qu'ils nous ont prodigués pendant notre cursus universitaire.

*Nos vifs remerciements sont également adressés à l'ensemble des personnes travaillant dans le laboratoire des lames minces / Université Badji Mokhtar d'Annaba et notamment nos très vifs remerciements à **Mr. Alem Djafer**.*

Nous tenons également à remercier les enseignants-chercheurs et les techniciens du Laboratoire de recherche en Génie Géologique « LGG » de l'Université Mohamed Seddik Benyahia de Jijel, de nous avoir intégré dans ce projet sur les phosphates de la région de Tébessa et de nous avoir fourni les conditions nécessaires à la réalisation de ce mémoire.

Nos remerciements aux membres du jury pour l'honneur qu'ils nous font par leur présence et d'avoir accepté d'évaluer notre travail.

Enfin, nous remercions nos familles pour leur soutien et nous adressons nos vifs remerciements à tous nos amis de toutes les « promos » de géologie sans exception.

Rafiq /Badis

Résumé

Le minerai phosphaté du synclinal perché du massif du Dyr fait partie d'un ensemble de gisements de classe mondiale répartis de part et d'autre de la frontière algéro-tunisienne. Cette province phosphatée détient l'une des plus grandes réserves mondiales après celles du Maroc et du Sahara occidental. Le minerai phosphaté du djebel Dyr se présentent sous forme de couche d'épaisseur métrique et de niveaux décimétriques de calcaires phosphatés intercalés dans une série sédimentaire argilo-marno-carbonatée du Paléocène-Eocène inférieur. Le minerai est détritique et principalement à pellets, coprolithes, dents de poisson, débris osseux et glauconite déposés dans un environnement marin de plate-forme relativement agité. Sur le plan granulométrique il s'agit de minerai « grossiers » dont plus de 75 % du poids est composé de sédiments de la classe des rudites et de sédiments de fraction grossière de la classe des arénites. Les quatre indices décrivant la distribution granulométrique ont confirmé le caractère « grossier » du minerai avec des valeurs du grain moyen « Mz » comprises entre 0,87 et 1,68 mm et un « sorting index » « σ_i » reflétant un sédiment caractérisé par un classement médiocre qui traduit un environnement de dépôt relativement agité.

Abstract

The phosphate-bearing mineral ore of the Dyr massif perched syncline are part of a group of world class deposits on both sides of the Algerian-Tunisian border. This phosphate rich province holds one of the largest reserves in the world after morocco and Western Sahara. The phosphate mineralization of djebelDyr is in the form of metric-thick ore layer and decimetric levels of phosphate limestone interbedded in a lower Paleocene-Eocene clay-marne-carbonate sedimentary series. Detrital minerals mainly of pellets, coprolites, fish teeth, bone debris and glauconite have deposited relatively restless marine platform environment. In terms of grain size, these are "coarse" ore of which more than 75% of the weight is composed of rudite grade and coarse fraction sediments of the class of arenites. The four indices describing the particle size distribution confirmed the "coarse" character of the ores with mean grain values "Mz" ranging between 0,87and 1,68mm and a "sorting index" " σ_i " reflecting a sediment characterized by a mediocre sorting that reflects a relatively agitated environment deposit.

المخلص

إن خامات الفوسفات لجبل الدير ذات البنية المقعرة هي جزء من مجموعة من المناجم ذات المستوى العالمي المتواجدة على مستوى الحدود الجزائرية التونسية. تمتلك هذه المقاطعة الحدودية الغنية بمناجم الفوسفات أحداً أكبر الاحتياطات في العالم بعد المغرب والصحراء الغربية. يوجد الفوسفات في جبل الدير على شكل طبقة مترية السمك وعلى شكل مستويات أقل سما من الحجر الجيري الفوسفاتي المتداخلة في سلسلة رسوبية غضارية-كلسية من الباليوسنو الايوسن. و يتكون فوسفات جبل الدير من معادن حطامية متمثلة أساساً في الكريات (pellets)، الكوبروليت (coprolithes)، أسنان الأسماك، و حطام العظام و الغلوكونيت (glauconite) ترسبت في بيئة بحرية ذات أجواء غير مستقرة نسبياً. من حيث حجم حبيبات فوسفات جبل الدير فهي من النوع "الخشنة" حيث تتكون من أكثر من 75 % من رواسب ذات رتبة روديتية (rudites) و من رواسب ذات جزء خشنة ذات رتبة ارينيثية (arénites). المؤشرات الأربعة تصف توزيع الحبيبات تؤكد حجم الجسيمات "الخشنة" لفوسفات جبل الدير حيث تتميز بحجم متوسط "Mz" بين 0,87 و 1,68 ملليمتر و مؤشر الفرز " σ_i " يعكس رواسب تتميز بترتيب متوسط يعكس بيئة توضع غير مستقرة نسبياً.

SOMMAIRE

Dédicaces
Remerciements
Résumé/Abstract/ملخص

CHAPITRE I SITUATION GEOGRAPHIQUE ET GENERALITES SUR LES PHOSPHATES

I.1- Introduction générale	01
I.2- Situation géographique de djebel Dyr	03
I.3- Généralités sur les phosphates	04
I.3.1- Composants et minéralogie.....	04
I.3.2- Différents types du gisement	05
I.3.3- La phosphatogenèse.....	06
I.3.4- Usage des phosphates.....	08
I.4- Réserves et production	08
I.4.1- Ressources et réserves mondiales	08
I.4.2- Pays producteurs et évolution de la production.....	11

CHAPITRE II CONTEXTE GEOLOGIQUE

II.1- Cadre géologique régional	16
II.1.1- La chaîne alpine d'Algérie du Nord, l'Atlas saharien et le synclinal du Dyr.....	16
- Le domaine interne.....	16
- Le domaine des flyschs.....	17
- Le domaine externe.....	17
II.1.2- Cadre lithostratigraphique régional.....	17
II.1.2.1- Les formations du Trias.....	17
II.1.2.2- Les formations du Jurassique.....	17
II.1.2.3- Les formations du Crétacé.....	18
II.1.2.4- Les formations du Cénozoïque.....	20
II.1.3- Cadre tectonique régional.....	21
II.1.3.1- Les plissements.....	22
II.1.3.2- Les diapirs.....	22
II.1.3.3- Les fossés d'effondrement.....	22
II.1.3.4- Les failles	22
II.2- Cadre géologique du djebel Dyr	23
II.2.1- Cadre lithostratigraphique du Djebel Dyr.....	23

II.2.1.1- Les formations du Crétacé (C ⁶).....	24
II.2.1.2- Les formations du Danien (e ¹).....	24
II.2.1.3- Les formations du Paléocène <i>pro parte</i> « Montien » (e ²⁻³).....	24
II.2.1.4- Les formations du Thanétien (e ⁴).....	24
II.2.1.5- Les formations de l'Eocène [Yprésien et Lutétien] (e ⁵⁻⁶).....	25
II.2.1.6- Les formations du Miocène (m ^{cs}).....	26
II.2.1.7- Les formations du Quaternaire.....	26
II-2-2- Cadre tectonique du djebel Dyr	26

CHAPITRE III

ANALYSE PETROGRAPHIQUE ET GRANULOMETRIQUE

III.1- Répartition spatio-temporelle des affleurements de minerai phosphaté.....	30
III.2- Méthodes analytiques.....	31
III.3- Pétrographie du minerai phosphaté et de son encaissant carbonaté.....	34
III.3.1- Pétrographie de l'encaissant carbonaté.....	36
III.3.2- Pétrographie du minerai phosphaté.....	39
i- Les coprolithes.....	40
ii- Les pellets.....	40
iii- Les fragments organiques.....	41
iv- Les constituants non phosphatés.....	43
v- La phase de liaison.....	43
III.3.3- Conclusion.....	45
III.4- Analyse granulométrique du minerai phosphaté.....	46
III.4.1- Analyse des courbes des fréquences.....	46
III.4.2- Analyse des paramètres granulométriques.....	48
Conclusion générale.....	51
Références bibliographiques.....	53

Liste des figures

Chapitre I- Situation géographique et généralités sur les phosphates

Fig.I.1- Situation géographique du massif du Dyr (source des images : Google-Earth, 2018)..	04
Fig.I.2- Distribution spatiale (géographique) des principales phosphorites ignées et sédimentaires connues avec leurs âges respectifs (d'après Pufahl et al, 2016).....	06
Fig.I.3- Mécanisme d'upwelling impliqué dans la genèse des gisements de phosphate sédimentaires.....	08
Fig.I.4- Evolution des réserves mondiales de phosphates depuis 2010 (données d'après USGS, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018).....	10
Fig.I.5- Principaux pays détenant les réserves mondiales de phosphates en pourcentage (données d'après USGS, 2018).....	11
Fig.I.6- Principaux pays détenant les réserves mondiales de phosphates en Mt (données d'après USGS, 2018).....	11
Fig.I.7- Production de phosphate naturel en 2017 par pays (données d'après USGS, 2018)....	12
Fig.I.8- Evolution de la production mondiale des phosphates par pays (en million de tonne) (données d'après USGS ; 2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016,2017, 2018).....	12
Fig.I.9- Evolution de la production mondiale par année (données d'après USGS ,2008 ,2009 2010 2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018).....	13
Fig.I.10- Evolution par année de la production de phosphate en Algérie (données d'après USGS, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018).....	14

Chapitre II- Contexte géologique

Fig. II.1- Schéma structural représentant la chaîne alpine d'Algérie du Nord dans le cadre de l'orogène périméditerranéen avec localisation du massif du Dyr (étoile) et coupe passant par la Kabylie du Djurdjura montrant la structuration de cet orogène (d'après Durand Delga et Fontboté, 1980).....	16
Fig. II.2- Carte montrant le cadre géologique régional du massif du Dyr, la localisation de ce dernier est matérialisée par une étoile (dessinée à partir des cartes géologiques au 500 000 ^e de l'Algérie et de la Tunisie, in Bouzenoune, 1993).....	18
Fig. II.3- Colonnes lithostratigraphiques de la région de Tébessa (1) et de la région du Dj.Dyr (2) réalisées à partir des descriptions de la carte géologique de Morsott (Feuille au 50.000 ^e n°178 établie par Blès et Fleury, 1970) et de sa notice.....	19
Fig. II.4- Schéma structural de l'autochtone des confins algéro-tunisiens montrant les principales structures tectoniques de la région et la localisation du synclinal du Dyr (Vila, 1980).....	21
Fig. II.5- Carte géologique du djebel Dyr (extrait de la carte géologique au 1/50 000 ^e de la feuille de Morsott n° 178, d'après Blés et Fleury, 1970).	23
Fig. II.6- Colonnes lithostratigraphiques de la région de Tébessa (colonne lithostratigraphique 1), du massif du Dyr (colonnes lithostratigraphiques 2 et 3) et détails des formations surmontant la couche phosphatée (colonne lithostratigraphique 3)	25
Fig.II.7- Schéma structural et coupe géologique régionale montrant les plis synclinaux et anticlinaux de direction atlasique (NE-SW) dans la région de Tébessa (d'après Blès et Fleury, 1970).	27

Fig.II.8- Coupe géologique réalisée à partir de la carte géologique de Morsott montrant la position lithostratigraphique des minéralisations phosphatées du massif du Dyr.....	27
Chapitre III- Analyse pétrographique et minéralogique	
Fig.III.1- Localisation des affleurements de minerai phosphaté sur la carte géologique du djebel Dyr (extrait de la carte géologique au 1/50 000 ^e de la feuille de Morsott n° 178, d'après Blés et Fleury, 1970).....	30
Fig.III.2- Disposition lithostratigraphique de la couche phosphatée principale dans l'édifice Paléocène-Eocène du djebel Dyr.....	31
Fig.III.3- Equipements utilisés dans les essais d'analyse granulométrique.....	32
Fig. III.4- Classification des roches carbonatées selon Folk (1959).....	35
Fig. III.5- Classification des roches carbonatées selon Dunham (1962) et Embry & Klován (1972).....	35
Fig.III.6- Histogrammes des fréquences des différents échantillons phosphatés.....	47
Fig. III.7- Courbes cumulatives des échantillons phosphatés du Dyr.....	49
Fig.III.8- Nomenclature des sédiments détritiques selon une classification granulométrique en échelle millimétrique et ses correspondances en échelle des « phi » de Wentworth (1922).....	50

Liste des tableaux

Chapitre I- Situation géographique et généralités sur les phosphates

Tab.I.1- Taux de recyclage d'un certain nombre de ressources et matières premières non renouvelables.....	02
Tab.I.2- Production et réserves mondiales de phosphate naturel par pays en 2016 (Données d'après USGS, 2017).....	10

Chapitre III- Analyse pétrographique et granulométrique

Tab.III.1- Intervalles des valeurs de l'« Inclusive Graphic Standard Deviation » (σ_i) et leur interprétation selon la terminologie définie par Folk et Ward (1957).....	33
Tab.III.2- Terminologie de l'« Inclusive Graphic Skewness » (S_{ki}) définie par Folk et Ward (1957).....	34
Tab.III.3- Terminologie du « Kurtosis » (K_G) définie par Folk et Ward (1957).....	34
Tab.III.4- Pourcentages pondéraux relatifs des différentes fractions constitutives du minerai phosphaté du djebel Dyr.....	47
Tab.III.5- Tableau récapitulatif des quatre indices granulométriques du minerai phosphaté du djebel Dyr.....	49

Liste des planches

Chapitre II- Contexte géologique

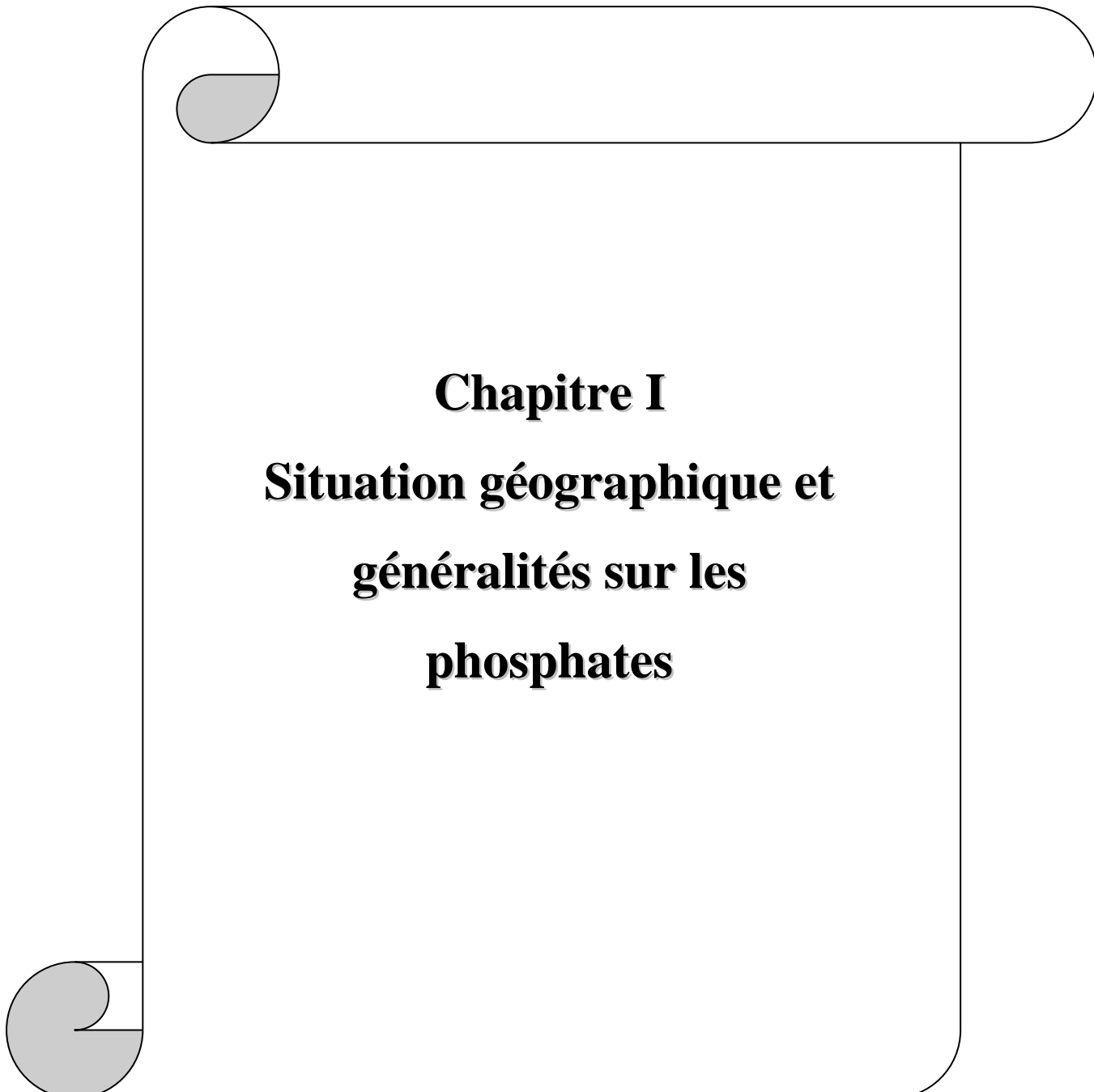
Planche II.1- Aspects à l’affleurement des minerais phosphatés 28

Chapitre III- Analyse pétrographique et minéralogique

Planche III.1- Aspect macroscopique et microscopique du minerai phosphaté et des nummulites..... 38

Planche III.2- Aspects macroscopiques et microscopiques du minerai phosphaté de Dj. Dyr..... 42

Planche III.3- Aspects microscopiques du minerai phosphaté du Dj. Dyr..... 44

A decorative graphic of a scroll, with a grey shaded area on the left side, framing the text.

Chapitre I
Situation géographique et
généralités sur les
phosphates

Chapitre I : Situation géographique et généralités sur les phosphates

I.1-Introduction générale

Le minerai phosphaté est parmi les substances minérales les plus consommées par l'activité humaine, il est de ce fait indispensables au bon fonctionnement des économies des pays. Une grande partie de ce minerai est utilisée, pour les besoins de l'agriculture, dans la production des engrais qui sont incontournables pour augmenter substantiellement les rendements à l'hectare. Les fertilisants, dont les engrais phosphatés, sont en effet indispensables car ils permettent de produire plus et mieux tout en améliorant la fertilité du sol.

Cependant, les phosphates constituent une ressource épuisable, non renouvelable et actuellement non recyclable. En effet, et contrairement à la majorité des autres substances minérales, la plus grande partie des minerais phosphatés est utilisée comme engrais dont le phosphore finit surtout par être capturé par des plantes ou lessivé dans la mer et par conséquent les moyens technologiques actuels ne permettent pratiquement aucune possibilité de recycler les substances phosphatées (Tab.I.1).

Elément	Pb	Al	Au	Ge	Ni	Cu	Sn	Zn	Cr	Phosphore
Taux de recyclage en %	72	49	43	35	35	31	26	26	25	0 %

Tab.I.1- Taux de recyclage d'un certain nombre de ressources et matières premières non renouvelables
(Source : A. Reller and T. Graedel 2014 in

https://www.encyclocolo.com/Epuisement_des_ressources_naturelles)

Etant donné leur caractère épuisable et non renouvelable d'une part et qu'elles constituent actuellement le seul moyen dont dispose l'humanité pour augmenter les rendements à l'hectare d'autre part, les ressources phosphatées actuelles suffiront-elles à faire face aux besoins alimentaires de la planète ? Selon les récentes données de l'USGS (2017) sur les réserves et la production mondiales, la quantité de phosphates actuellement disponible dans le sous-sol ne pourraient satisfaire la demande que pendant seulement environ 260 ans en supposant un taux de croissance nul, ce qui est loin d'être le cas. Avec une croissance de la consommation mondiale de 2 à 3 % dans les années à venir (estimations de l'association internationale de l'industrie des engrais «IFA»), cette durée de 260 ans serait beaucoup plus courte. Les phosphates, avec leurs implications géopolitiques dans le domaine agricole et de la sécurité alimentaire, constituent des ressources critiques et stratégiques et vont donc devenir une denrée de plus en plus recherchée.

C'est en raison de cette importance critique et stratégique des ressources phosphatées que le Ministère de l'Energie et des Mines (MEM) vient récemment (26 avril 2018) d'installer un comité

intersectorial de pilotage d'un mégaprojet pour l'exploitation des phosphates et le développement des industries pétrochimiques en aval. Ce grand projet structurant, dénommé « CPP » est situé dans la wilaya de Tébessa, il a pour objectif la production des engrais phosphatés et azotés, des acides phosphoriques et dérivés et de l'ammoniac. Ces produits seront destinés en partie à la satisfaction des besoins du marché national, le reste sera écoulé sur le marché international (communiqué du MEM,

<http://www.energy.gov.dz/francais/index.php?mact=News,cntnt01,detail,0&cntnt01articleid=559&cntnt01returnid=1291>). La concrétisation de ce projet permettra la fabrication des engrais phosphatés et azotés nécessaires au développement de l'Agriculture ce qui va contribuer à assurer la sécurité alimentaire et l'autosuffisance en cette matière.

C'est dans cette optique que s'inscrit la problématique traitée dans ce mémoire de Master en « Ressources minérales, Géomatériaux » et qui consiste en l'étude du contexte géologique et de quelques propriétés pétrographiques, minéralogiques et granulométriques du minerai phosphaté du djebel Dyr (wilaya de Tébessa). Le minerai de ce massif, bien qu'il ne fasse pas actuellement l'objet d'exploitation, font partie de cette grande province phosphatée transfrontalière entre l'Algérie et la Tunisie qui renferme les plus grandes réserves en phosphates des deux pays.

Etant donné les moyens limités (notamment les moyens analytiques), ce mémoire traitera essentiellement le contexte géologique du minerai phosphaté du djebel Dyr à travers une série de coupes levées sur terrain intéressant la plus grande partie des affleurements phosphatés du massif. La caractérisation pétrographique, minéralogique et granulométrique du minerai phosphaté et de son encaissant s'est basée sur les échantillons récoltés lors des missions de terrain effectuées sur le massif du Dyr.

I.2- Situation géographique

Le massif du Dyr se trouve dans le Nord-Est de l'Algérie, à une quinzaine de kilomètres de la frontière algéro-tunisienne et à une vingtaine de kilomètres au NNE de la ville de Tébessa. Administrativement, il est rattaché à la commune de Boulahaf-Dyr faisant partie de la wilaya de Tébessa (Fig.I.1).

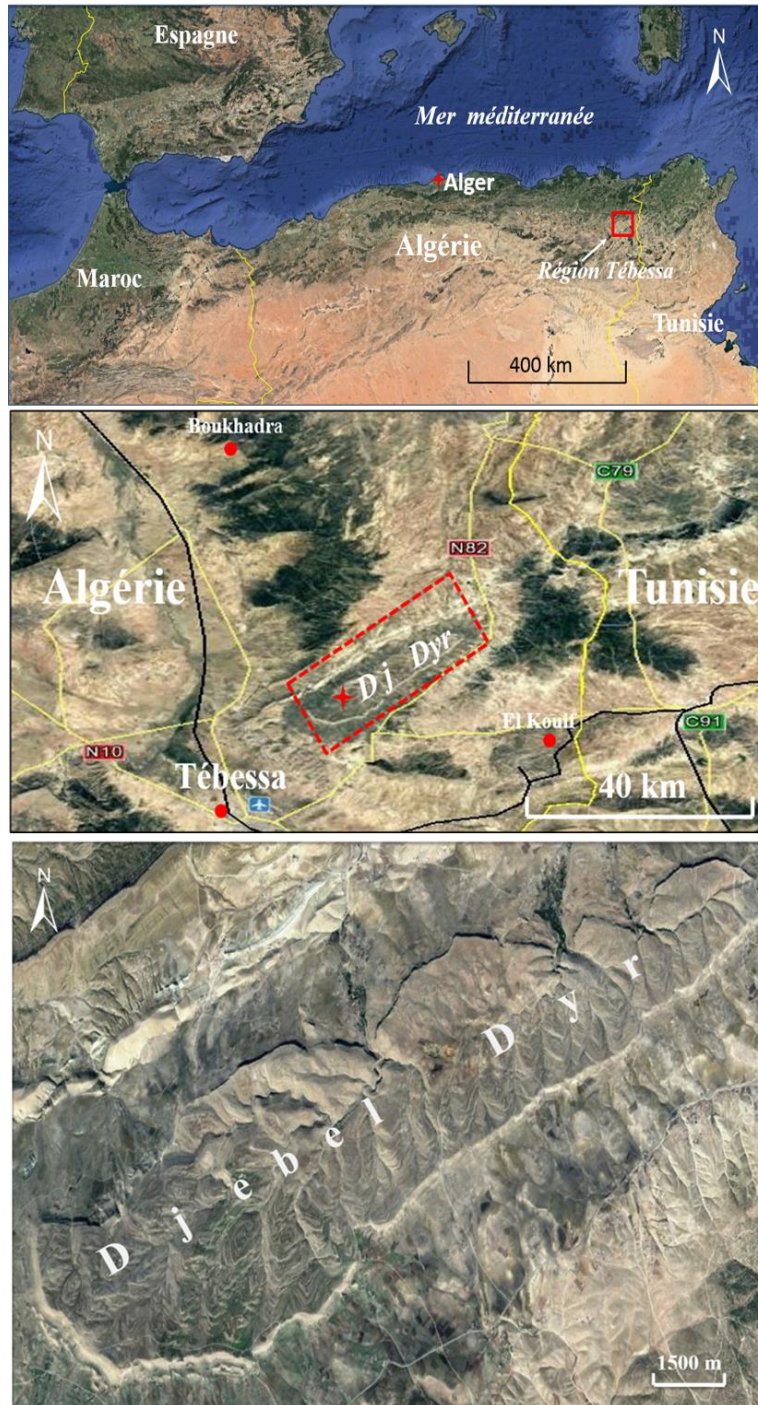


Fig.I.1- Situation géographique du massif du Dyr (source des images : Google-Earth, 2018).

C'est un imposant plateau sous forme d'un synclinal perché orienté NE-SW qui s'étend sur une longueur d'une quinzaine de kilomètres et une largeur variant de un à deux kilomètres dans la partie NE à plus de trois kilomètres dans la partie SW. Ce plateau élevé, présentant des altitudes de l'ordre de 1474 m, est délimité par de petites falaises tout autour du massif parfois interrompues par des failles transverses le long desquelles s'écoulent de petits cours d'eau notamment vers l'Ouest et vers le Nord et le développement de quelques points d'eau, sources et puits, favorisant les cultures maraîchères et l'arboriculture.

I.3- Généralités sur les phosphates

I.3.1- Composants et minéralogie

Les roches phosphatées ou « phosphorites » sont des roches sédimentaires contenant plus de 15-20 % de P_2O_5 (Boggs, 2009). Ce sont donc des roches significativement enrichies en phosphore plus que tous les autres types de roches sédimentaires. Le phosphore de ces roches se trouve dans des particules généralement d'origine biogène comme les pellets, les coprolithes, les dents de poissons, les divers débris osseux, les coquilles phosphatées ainsi que dans des nodules, des brèches...etc.

Les minéraux phosphatés de la famille des apatites sont les fréquents, ils constituent un ensemble de minéraux de composition globale $Ca_5(PO_4)_3(OH,Cl,F)$. Cette composition varie en fonction de l'anion prévalent. Ainsi, trois espèces d'apatites sont classiquement distinguées : la fluorapatite [$Ca_5(PO_4)_3(F)$], la chlorapatite [$Ca_5(PO_4)_3(Cl)$] et l'hydroxyapatite [$Ca_5(PO_4)_3(OH)$].

Cependant, le minéral le plus fréquent de ces roches phosphatées est le carbonate-fluorapatite « CAF » ou « francolite » qui cristallise dans le système hexagonal. Les francolites présentent des structures qui sont généralement très favorables aux substitutions géochimiques. En effet, jusqu'à 10 pour cent des ions carbonates peuvent remplacer les ions phosphates pour donner la formule générale : $[Ca_{10}(PO_4,CO_3)_6F_{2-3}]$. Certains éléments en traces tels que Ag, Cd, Mo, Se, U, Y, Zn, Br, Cu, Cr, I, Pb, V montrent des teneurs conséquentes dans les francolites. Les concentrations en REE (Eléments des Terres Rares) dans certaines phosphorites sédimentaires sont comparables à celles des plus riches gisements de terres rares dans le monde (Pufahl et al, 2016).

Les roches phosphatées peuvent aussi contenir d'autres minéraux comme le quartz détritique ou les cherts authigènes et les carbonates (calcite et dolomite). Les minéraux argileux comme la glauconite, l'illite, la montmorillonite peuvent également être présents dans certains gisements. La matière organique est un constituant caractéristique de nombreux gisements de phosphates sédimentaires.

I.3.2- Différents types de gisement

Il existe principalement trois types de gisements phosphatés : les gisements associés aux roches magmatiques, les gisements de type « Guano » et les gisements d'origine sédimentaire. Ces derniers représentent 95 % des ressources minérales phosphatées du monde. Les gisements magmatiques sont généralement moins riches que les gisements sédimentaires, leurs teneurs en P_2O_5 varient entre 5 et 15 wt % (weight percent = pourcentage pondéral) comparativement à celles des gisements sédimentaires dont les teneurs varient entre 10 et 35 wt % de P_2O_5 (Pufahl et al, 2016).

a) Les gisements d'origine sédimentaire

Les gisements d'origine sédimentaire se forment dans des milieux marins de plate-forme et leurs minerais sont essentiellement constitués de particules biogènes tels que les pellets, les coprolithes et autres dents de poissons et divers débris osseux. Le plus souvent ils forment des corps stratiformes intercalés dans des séries argilo-marno-carbonatées. Les plus importants gisements de ce type se trouvent en Afrique du Nord (Maroc, Sahara occidental, Algérie, Tunisie, Egypte) constituant plus de 80 % des réserves mondiales. On les trouve également au Moyen Orient (Jordanie, Syrie, Arabie Saoudite) ainsi qu'en Chine et aux USA. Les phosphates du djebel Dyr font partie de ce type.

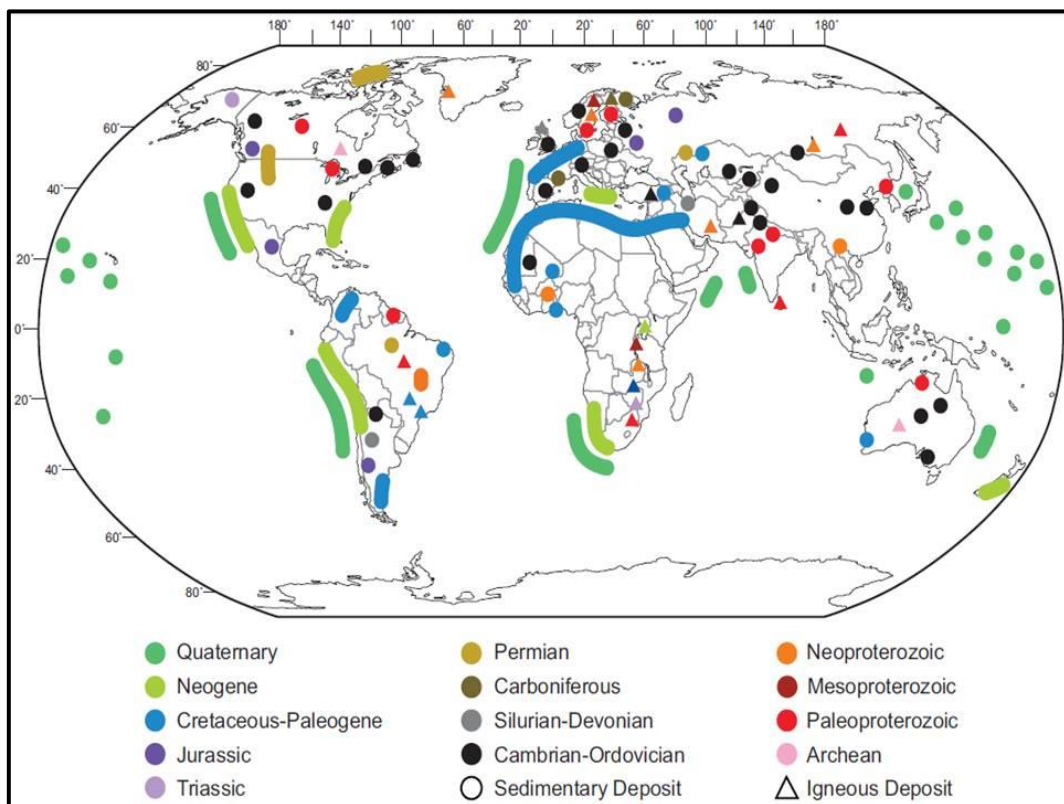


Fig. I.2– Distribution spatiale (géographique) des principales phosphorites ignées et sédimentaires connues avec leurs âges respectifs (d'après Pufahl et al, 2016).

b) Les gisements d'origine ignée

Dans ces gisements magmatiques le phosphate se trouve principalement dans la structure cristalline de l'apatite cristallisée, lors du refroidissement du magma, dans des roches du type carbonatites ou dans des roches intrusives alcalines pauvres en silice (Pufhal et al, 2016). Les gisements d'origine magmatique sont beaucoup moins nombreux dans l'écorce terrestre que ceux d'origine sédimentaire (Fig.I.2) et le coût de leur exploitation plus élevé. Ils sont souvent caractérisés par de faibles teneurs en P_2O_5 (5 à 15 wt % de P_2O_5) comparativement avec les gisements d'origine sédimentaire. Les plus grandes sources de phosphate naturel igné au monde sont représentées par le Complexe alcalin dévonien de Khibiny dans la péninsule de Kola en Russie qui a des réserves de 1300 millions de tonnes (mt), le complexe paléoproterozoïque de Phalabora en Afrique du Sud qui a des réserves de 1500 mt, le complexe de carbonatite alcaline du Crétacé au Brésil (Pufhal et al, 2016).

c) Les gisements de type guanos

Les minerais de ce type de gisements sont issus de la réaction des déjections d'oiseaux sur les roches réceptrices et sont représentés par des nodules phosphatés assez largement distribués au fond des océans actuels. Ils se trouvent principalement dans les îles du Pacifique comme ceux de l'île de Christmaset essentiellement sur les plateaux continentaux notamment le long des côtes occidentales des continents africain (Afrique du Sud, Maroc...) et américain (Californie, Chili...) et également au large du Brésil(Fig.I.2).

I.3.3- La phosphatogenèse

La phosphatogenèse est l'ensemble des processus physico-chimiques et/ou biologiques aboutissant à la formation des dépôts phosphatés. La genèse d'un gisement de phosphates dans un bassin sédimentaire dépendnotamment d'une source suffisante en phosphore, des conditions favorables à la formation d'apatite dans les sédiments et des conditions favorables à la concentration de l'accumulation des éléments phosphatés ainsi formés.

Les mécanismes impliqués dans la genèse des particules phosphatées qui composent les minerais phosphatés sont encore controversés. Plusieurs hypothèses sur la phosphatogenèse ont été discutées depuis longtemps, les unes considèrent que les particules phosphatées ont une origine organique et sont dites « allochtones » alors que d'autres font intervenir une origine authigénétique non organique et dans ce cas les particules sont dites « autochtones » (Riggs, 1979 ; Lamboy, 1982 ; Lew, 1990 ; Soudry et al, 2006). D'après la théorie d'origine non organique, les phosphates sont le résultat de la précipitation des composés phosphatés directement à partir de l'eau de mer alors que

dans le cas d'une origine organique, la participation des organismes est indispensable pour la formation des particules phosphatées.

Cependant, le modèle génétique le plus accepté expliquant la genèse des gisements de phosphate sédimentaires fait intervenir le mécanisme de l'upwelling. Selon la définition donnée par wikipédia (https://fr.wikipedia.org/wiki/Remont%C3%A9e_d%27eau) « la remontée d'eau (*upwelling* en anglais) est un phénomène océanographique qui se produit lorsque de forts vents marins (généralement des vents saisonniers) poussent l'eau de surface des océans laissant ainsi un vide où peuvent remonter les eaux de fond et avec elles une quantité importante de nutriments » (Fig.I.3).

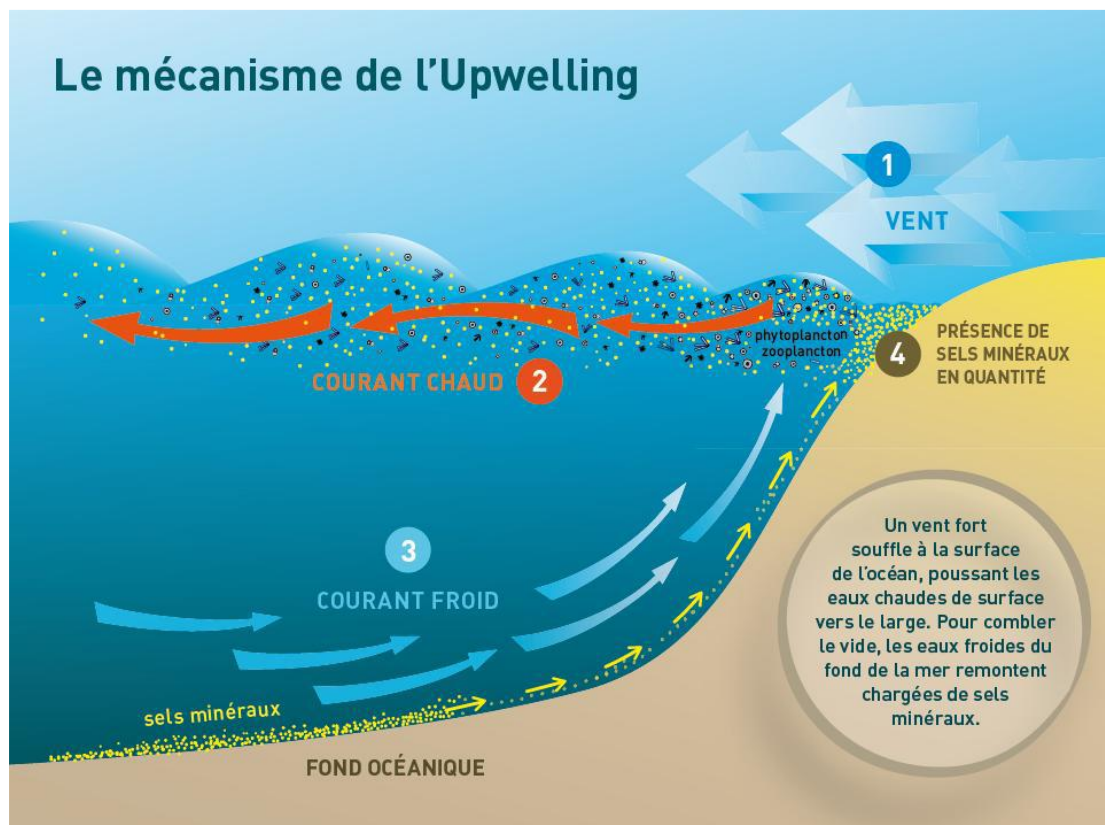


Fig.I.3-Mécanisme d'upwelling impliqué dans la genèse des gisements de phosphate sédimentaires (http://www.plancton-du-monde.org/module-formation/phyto_02.html)

Ainsi, lorsque des courants ascendants (courants d'upwelling) amènent près de la surface des eaux froides et riches en nutriments venant des fonds marins, les eaux superficielles acquièrent une teneur anormale en ions $[\text{HPO}_4]^{2-}$ que la sédimentation pourra utiliser. Ces apports phosphatés induisent ainsi des environnements superficiels riches en nutriments permettant de stimuler le développement d'une riche activité biologique marine. Ainsi, les courants d'upwelling, grâce aux apports et à l'enrichissement phosphatés qu'ils induisent, permettent la genèse de gisements de phosphates sédimentaires soit par la précipitation chimique diagénétique du principal minéral

phosphaté [francolite] ou par le dépôt des restes et rejets d'organismes (os, dents de requins, pellets, coprolithes...) ou encore par l'épigenèse phosphatée des divers débris de fossiles.

I.3.4- Usage des phosphates





















Le phosphore est un élément qui est largement distribué dans la nature. Les minéraux phosphatés sont la seule ressource disponible en phosphore, qui est un élément essentiel pour la nutrition des plantes, des animaux et de l'homme. De plus, les composés du phosphore ont d'importantes utilisations comme additifs pour la transformation des aliments et les boissons gazeuses, les herbicides, les détergents et le traitement de l'eau. (Jasinski, 2017). On utilise aussi les phosphates pour le développement de l'agriculture qui est la grande consommatrice d'engrais phosphatés. En effet, comme l'eau, l'oxygène et le carbone, le phosphore est irremplaçable dans l'agriculture moderne par aucun autre des éléments chimiques qui composent notre univers. Il est considéré avec l'azote (N) et le potassium (K), comme un constituant fondamental de la vie des plantes et des animaux. Il est l'un des éléments nutritifs essentiels nécessaires pour la croissance et le développement des végétaux. Les phosphates sont également utilisés dans d'autres domaines non agricoles tels que la métallurgie (alliage), l'industrie chimique (pesticides, détergents), pétrolière (lubrifiant), alimentaire et pharmaceutique.

Le phosphate est cependant en passe de devenir une ressource stratégique dans un contexte de démographie et de besoins alimentaires en forte croissance. Plusieurs analyses laissent présager qu'il deviendrait un matériau de plus en plus précieux. Son exploitation a un réel impact sur notre économie. Les gisements de phosphates sont rares et mal répartis entre les pays du globe, ils représentent l'une des substances naturelles les plus commercialisées dans le monde (Fig.I.2).

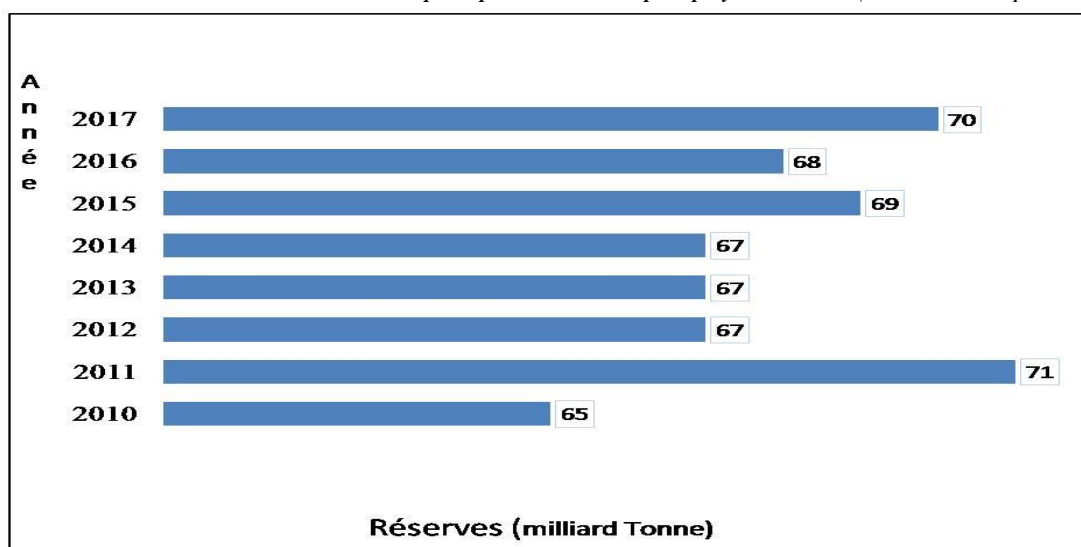
I.4- Réserves et production

I.4.1- Les réserves mondiales

Selon les récentes données de l'United State Geological Service (USGS, 2018) dont les données sont le plus souvent utilisées, les réserves mondiales économiquement exploitables du minerai sont estimées pour l'année 2016 à environ 68 Milliards de tonnes (Mt) et 70 Mt pour l'année 2017 soit une augmentation de 2 Mt (Tab.I.2 et Fig.I.4). Cette nette progression, initiée depuis plusieurs années, est l'expression directe des investissements dans la prospection et l'exploration de nouveaux gisements dont la finalité est de répondre aux besoins croissants et une consommation toujours en hausse de nos économies et particulièrement de l'économie agricole qui absorbent presque la totalité de la production de phosphates.

Pays	Production (Millions de tonnes)	Part mondiale (%)	Réserve mondiale (Millions de tonnes)
 Afrique du Sud	1,7	0,65	1 500
 Algérie	1,5	0,57	2 200
 Arabie saoudite	4	1,53	680
 Australie	2,5	0,96	1 100
 Brésil	6,5	2,49	320
 Chine	138	52,87	3 100
 Égypte	5,5	2,11	1 200
 États-Unis	27,8	10,65	1 100
 Inde	1,5	0,57	65
 Jordanie	8,3	3,18	1 300
 Kazakhstan	1,8	0,69	260
 Maroc et Sahara occidental	30	11,49	50 000
 Mexique	1,7	0,65	30
 Pérou	4	1,53	820
 Russie	11,6	4,44	1 300
 Sénégal	1,25	0,48	50
 Syrie	-	0,34	1 800
 Togo	0,99	0,34	30
 Tunisie	3,5	1,34	100
 Viêt Nam	2,8	1,07	30
Autres pays	5,91	2,26	810
Total	261	100	68 000

Tab.I.2-Production et réserves mondiales de phosphate naturel par pays en 2016 (Données d'après USGS,



2017

Fig.I.4- Evolution des réserves mondiales de phosphates depuis 2010 (données d'après USGS, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017,2018).

Selon toujours les données de l'USGS les réserves en phosphates de l'Algérie s'élèveraient à environ 2,2 Mt soit approximativement 3,14 % des réserves mondiales (Fig. I.5 et I.6). Toutes ces réserves se trouvent dans le district minier de djebel Onk au Sud de la wilaya de Tébessa à quelques kilomètres de la frontière algéro-tunisienne.

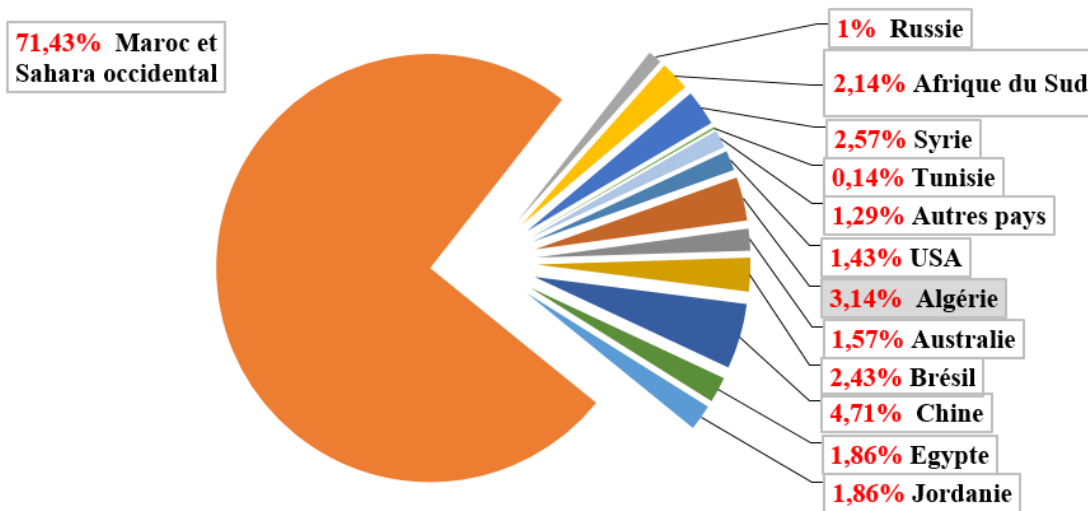


Fig.I.5- Principaux pays détenant les réserves mondiales de phosphates en pourcentage (données d'après USGS, 2018).

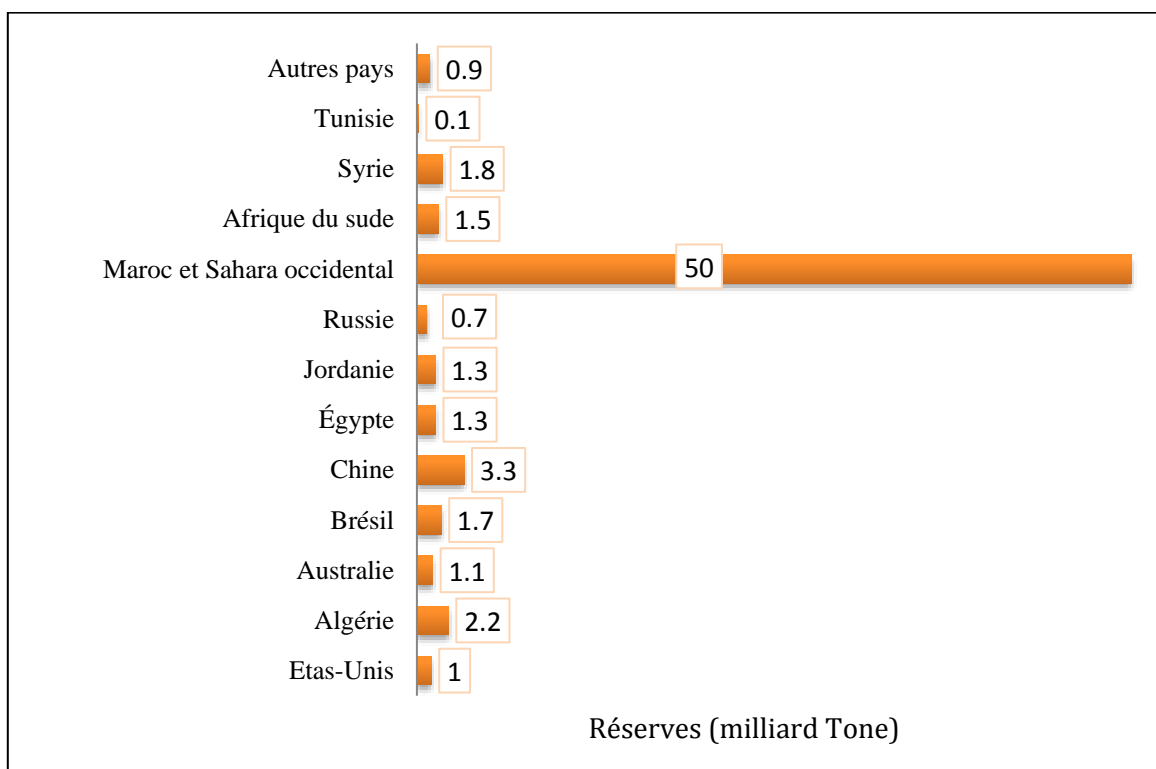


Fig.I.6- Principaux pays détenant les réserves mondiales de phosphates en Mt (données d'après USGS, 2018).

I.4.2- Pays producteurs et évolution de la production

D'après les données de l'United State Geological Service (USGS, 2018) plus de 40 pays produisent du minerai phosphaté en tant que produit marchand et 16 pays ont produit plus de 95% de la production mondiale (Fig.I.7). Historiquement, les Etats-Unis (USA) ont été les plus grands producteurs de phosphate, avec près du tiers de la production mondiale depuis 1900. A partir de 1997, certaines mines commençaient à se tarir et d'autres voyaient leur production diminuer. Le plus important gisement des Etats-Unis serait épuisé en 2050.

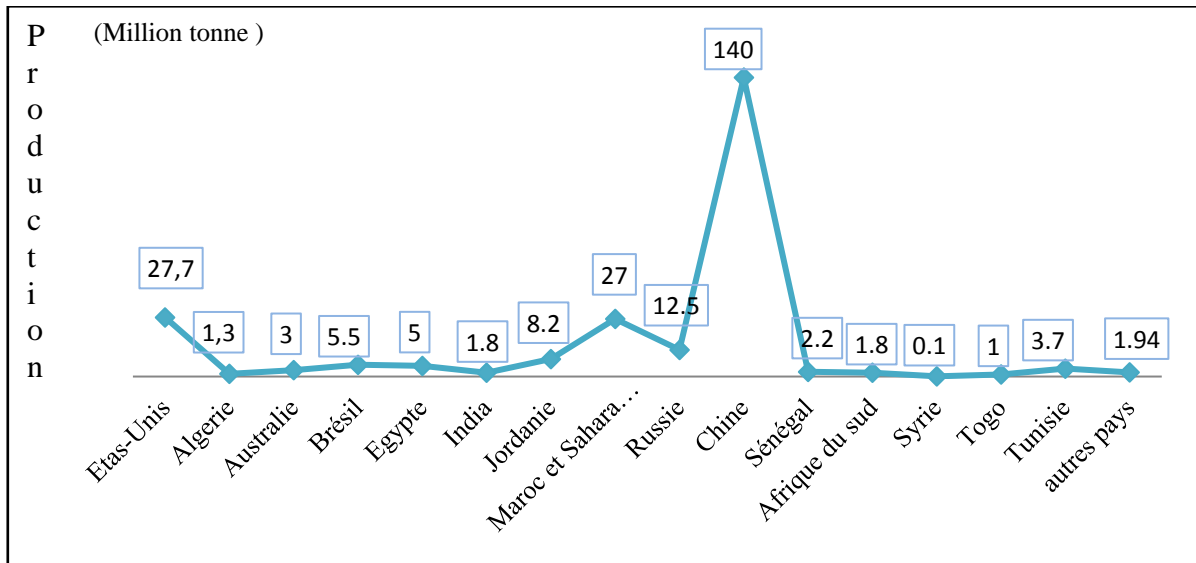


Fig. I.7- Production de phosphate naturel en 2017 par pays (données d'après USGS, 2018).

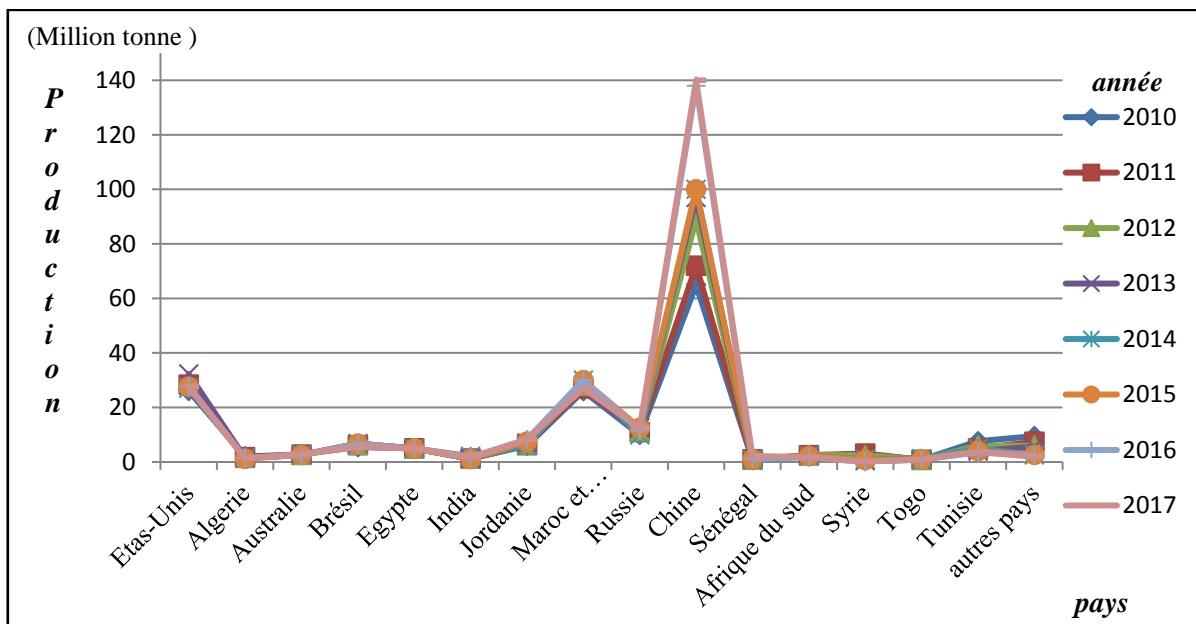


Fig.I.8- Evolution de la production mondiale des phosphates par pays (en million de tonne) (Données d'après USGS ; 2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018).

Cependant, la Chine est le pays qui détient la plus grande production de phosphate pour l'année 2017 avec 140 mt soit presque 53 % de la production mondiale annuelle (Fig.I.7 et I.8). Elle détient cette première place avec toujours plus de la moitié de la production mondiale, depuis plus d'une dizaine d'années. Le Maroc avec le Sahara occidental, bien qu'ils détiennent les plus grandes réserves mondiales de phosphates occupent le troisième rang en production (Fig.I.8).

La production mondiale a été estimée à 261 millions de tonnes (mt) pour l'année 2016 et 265 mt pour l'année 2017 soit une augmentation de 4 mt (Tab.I.2 et Fig.I.9). Cette augmentation, qui a été régulière pendant la période allant de 2007 à 2017 (Fig.I.9), reflète les besoins en phosphates de nos économies (notamment l'économie agricole) en forte croissance.

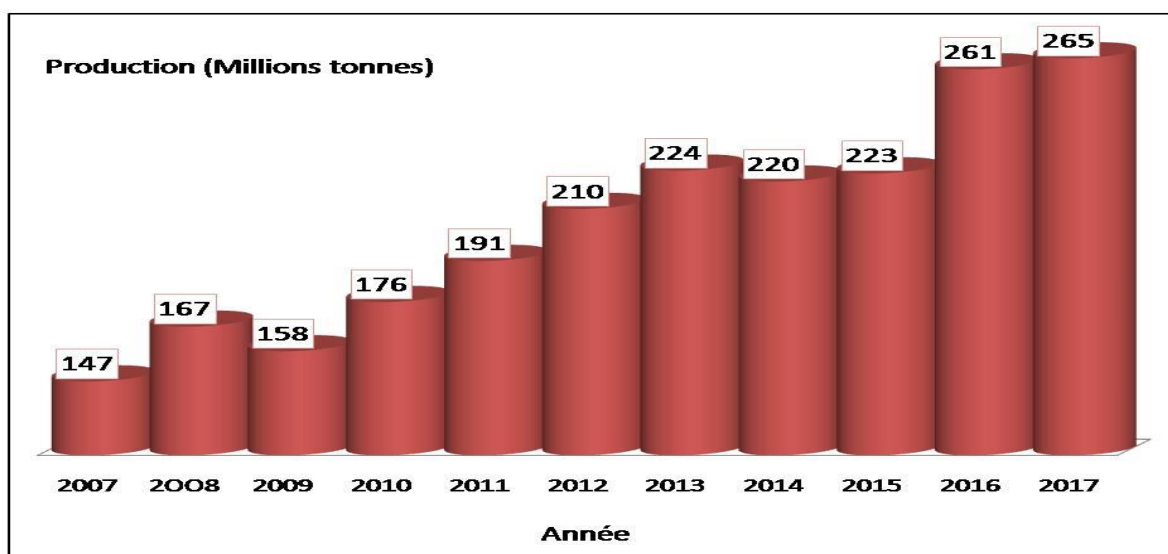


Fig.I.9- Evolution de la production mondiale par année (données d'après USGS ,2008 ,2009 20102011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017,2018).

Contrairement à l'évolution croissante de la production mondiale de phosphate pendant cette dernière décennie entraînée principalement par celle de la Chine, l'Algérie a vu sa production annuelle décroître de 2 mt en 2010 à 1,3 mt en 2017 (Fig.I.10). On soulève ici un disfonctionnement quand on compare les réserves détenues par l'Algérie, estimées à 2,2 Milliards de tonnes qui lui permettent d'occuper le troisième rang mondial après le Maroc-Sahara Occidental et la Chine, et la production en nette décroissance. Ce disfonctionnement, clairement lié aux capacités de production des mines de phosphates du district de djebel Onk, a récemment attiré l'attention des pouvoirs publics qui ont réagi en instituant un consortium piloté par la Sonatrach pour rehausser cette production (communiqué du Ministère de l'Énergie et des Mines du 26 avril 2018, (<http://www.energy.gov.dz/francais/index.php?mact=News,cntnt01,detail,0&cntnt01articleid=559&cntnt01returnid=1291>)).

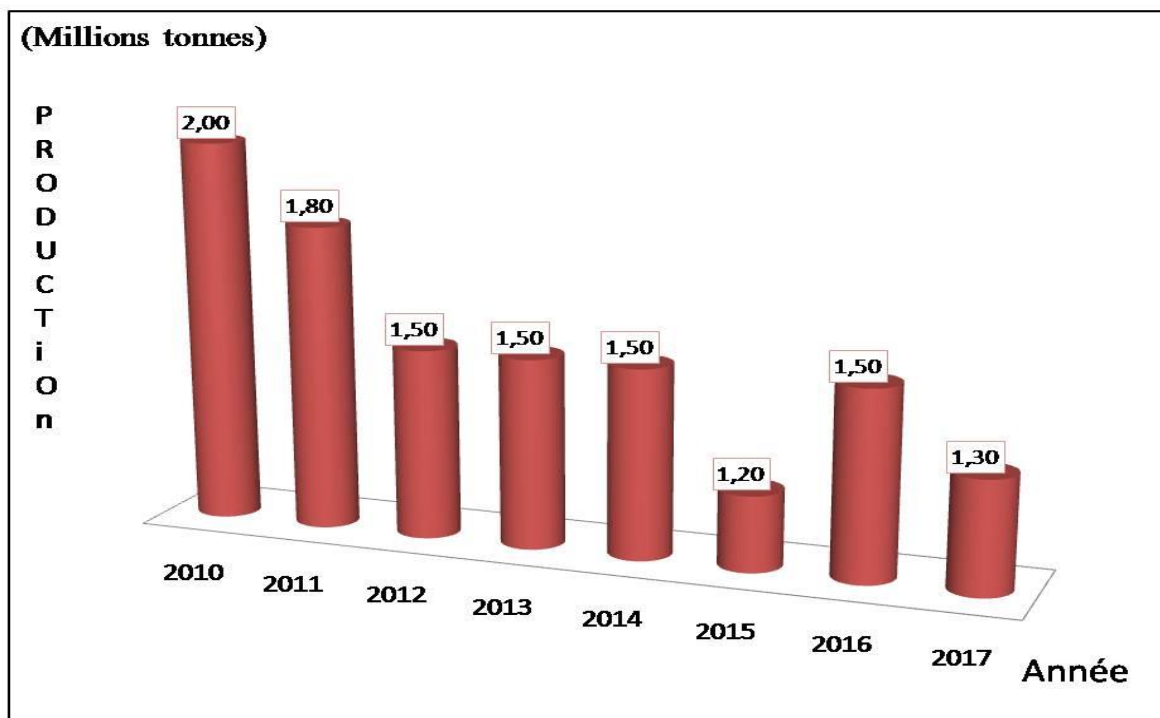


Fig.I.10- Evolution par année de la production de phosphate en Algérie (données d'après USGS, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018).

Lorsqu'on compare l'offre des phosphates dans le marché mondial avec la demande en nette augmentation depuis plusieurs années et qui vont continuer à croître chaque année en parallèle avec une probable diminution des réserves mondiales dans les années à venir, on se rend compte de l'intérêt et du rôle stratégique que vont jouer ce type de ressources minérales indispensables pour notre sécurité alimentaire. Ces évolutions ont poussé des spécialistes à prédire que les engrais vont voir leur prix exploser de 500 à 1000% dans les 20 à 30 ans à venir.

Comme nous l'avons déjà mentionné et au rythme d'extraction actuel, les réserves mondiales pourraient satisfaire la demande pendant seulement environ 260 ans en supposant un taux de croissance nul, ce qui est loin d'être le cas. Avec une croissance de la consommation mondiale de 2 à 3 % dans les années à venir (estimations de l'association internationale de l'industrie des engrais « IFA »), cette durée de 260 ans serait beaucoup plus courte. Contrairement à de nombreuses autres substances minérales pour lesquelles les avancées technologiques ont permis de trouver des substituts ou des processus de recyclage, les phosphates constituent à l'heure actuelle une substance minérale non recyclable et n'a aucun substitut. Etant donné ces circonstances, les phosphates vont devenir une ressource critique et dans un contexte de démographie et de besoins alimentaires en forte croissance.



Chapitre II
Contexte Géologique

Chapitre II : Contexte Géologique

II-1- Cadre géologique régional

II-1-1-La chaîne alpine d'Algérie du Nord, l'Atlas saharien et le synclinal du Dyr

La chaîne alpine d'Algérie du Nord constitue un tronçon de la chaîne alpine d'Afrique du Nord ou chaîne des Maghrébides qui font partie de l'orogène alpin périméditerranéen (Fig. II.1). Cet orogène, principalement composé de formations géologiques d'âge mésozoïque et cénozoïque, s'étend de l'ouest à l'est sur 2000 km. Il a été édifié à la suite d'une histoire tectonique polyphasée dont les paroxysmes ont été enregistrés pendant les temps cénozoïques (Durand Delga et al, 1980). L'ensemble des phases tectoniques ont abouti à la mise en place des nappes de charriage, aux plissements, aux écaillages, au magmatisme qu'on observe de nos jours dans cet édifice complexe.

Les formations géologiques constitutives de cet orogène d'Algérie du Nord sont classiquement rattachées à trois domaines : le domaine interne, le domaine des flyschs et le domaine externe (Fig.II.1).

- **Le domaine interne** : il est formé par des terrains anciens principalement précambriens polymétamorphisés et par leur couverture sédimentaire représentée notamment par les formations de la dorsale kabyle.

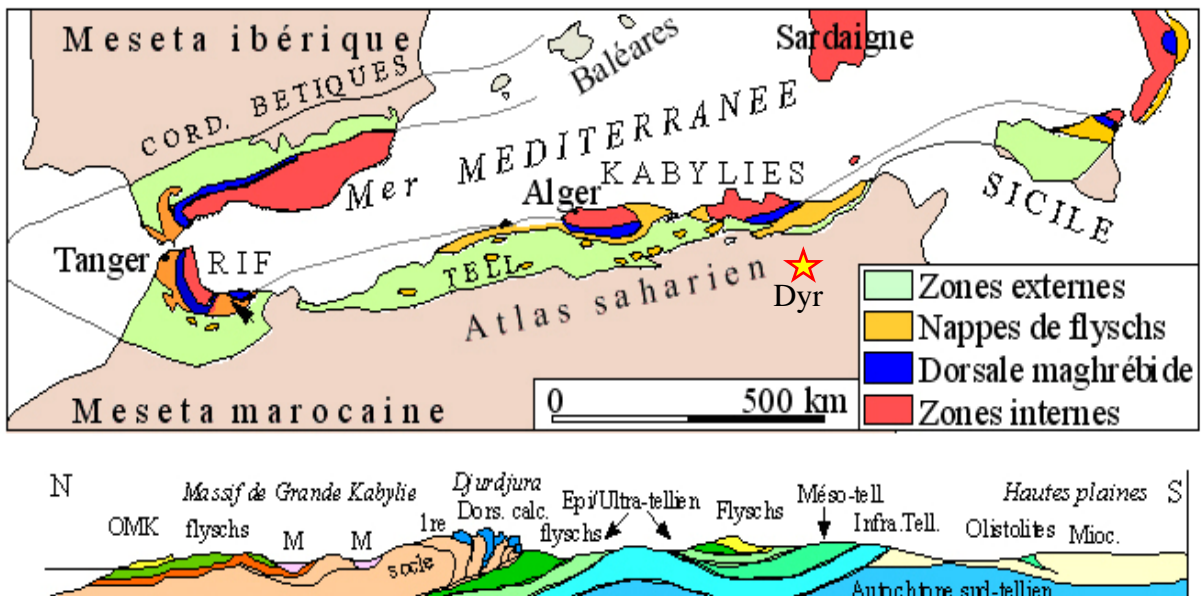


Fig. II.1- Schéma structural représentant la chaîne alpine d'Algérie du Nord dans le cadre de l'orogène périméditerranéen avec localisation du massif du Dyr (étoile) et coupe passant par la Kabylie du Djurdjura montrant la structuration de cet orogène (d'après Durand Delga et Fontboté, 1980)

- **Le domaine des flyschs** : ce domaine correspond aux formations flyschoides dont les deux principaux types kabyles sont représentés en Algérie du Nord par :

- Les flyschs maurétaniens d'âge Crétacé inférieur (Gélard, 1969).
- Les flyschs massyliens d'âge également Crétacé inférieur (Raoult, 1969).

- **Le domaine externe** : ce domaine est représenté par les formations géologiques de la marge nord-africaine qui sont globalement constituées par les séries telliennes et les séries de l'Avant-pays (Vila, 1980).

L'orogène alpin de l'Algérie du Nord, constitué principalement par des formations géologiques allochtones, passe vers le Sud au domaine de l'Atlas saharien. Ce domaine est constitué par des formations géologiques autochtones plissées en une série d'anticlinaux et de synclinaux de direction NE-SW. Le synclinal perché du Dyr constitue l'un des plis de l'Atlas saharien oriental.

II.1.2- Cadre lithostratigraphique régional

Les formations géologiques de l'Atlas saharien oriental (région de Tébessa) constituent une série sédimentaire subsidente dont la puissance peut aller jusqu'à une dizaine de km. Leur âge va du Trias au Quaternaire avec absence à l'affleurement des terrains jurassiques (Fig. II.2 et II.3).

II.1.2.1- Les formations du Trias

Dans cette partie de l'Atlas saharien oriental (région de Tébessa), les formations triasiques constituent des affleurements globalement de forme elliptique allongée dans la direction atlasique (NE-SW). Sur le plan lithologique, elles sont constituées par des marnes et argiles bariolées à gypse contenant également d'autres types de roches tels que les dolomies, les cargneules et des roches basaltiques du type ophite (Dubourdieu, 1956). Le sel de type halite, dont la présence en profondeur était soupçonnée à travers les nombreuses sources salées de la région, a été désormais reconnu par sondage au Nord de l'Ouenza sur plus de 200 m d'épaisseur (Bouzenoune, 1993).

II.1.2.2- Les formations du Jurassique

Les formations jurassiques sont absentes à l'affleurement dans la région mais elles ont été recoupées par des sondages pétroliers (Beghoul, 1974 in Bouzenoune, 1993). Dans la région de Telidjene, au Sud de Tébessa, J.-M. Vila (2001) a signalé la présence de chicots dolomitiques du Lias et du Dogger dans les diapirs des Hamimats.

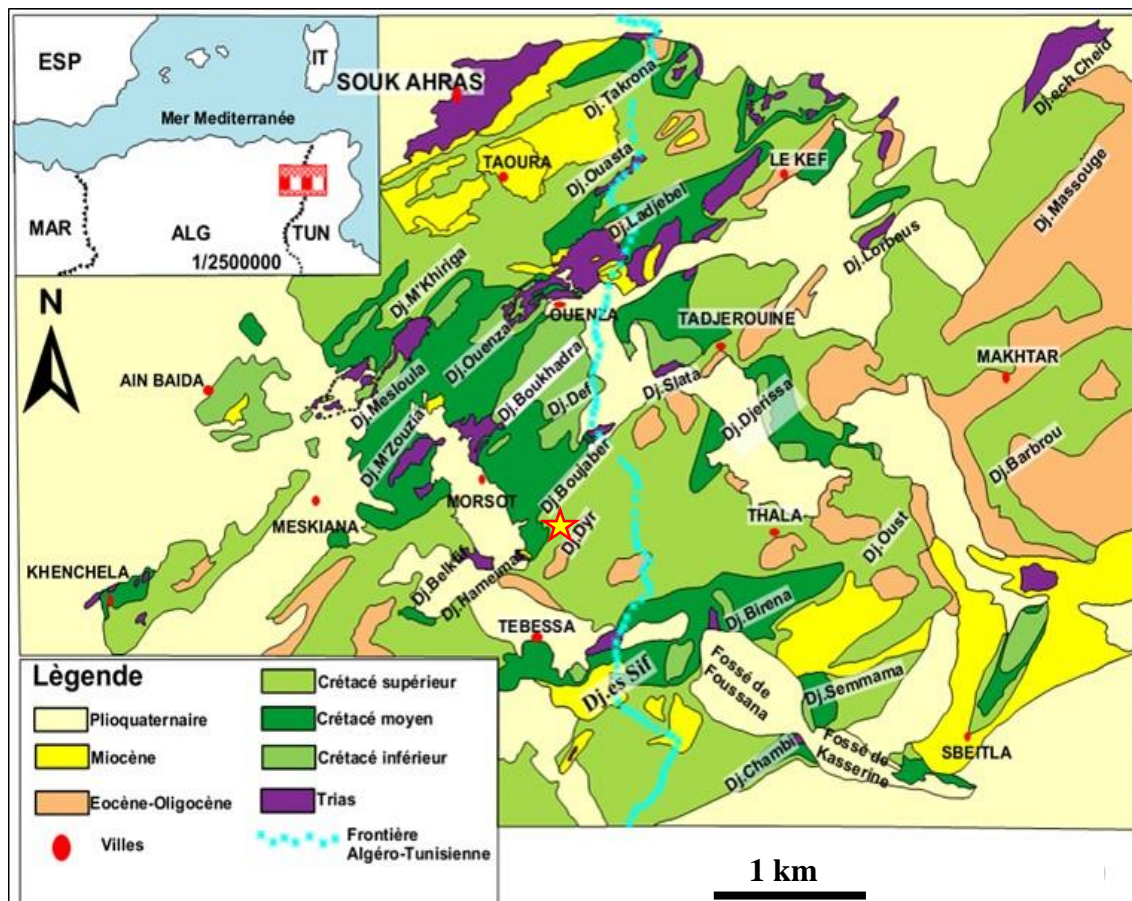


Fig. II.2- Carte montrant le cadre géologique régional du massif du Dyr, la localisation de ce dernier est matérialisée par une étoile (dessinée à partir des cartes géologiques au 500 000^e de l'Algérie et de la Tunisie, in Bouzenoune, 1993).

II.1.2.3- Les formations du Crétacé

La période crétacée est caractérisée par de puissants dépôts argilo-marneux ponctués périodiquement par des dépôts carbonatés néritiques notamment à l'Aptien et au Turonien (Dubourdiou, 1956).

La série crétacée débute par un Barrémien représenté par des marnes argileuses contenant parfois des intercalations de calcaires argileux et de calcaires gréseux. L'Aptien est constitué par de puissantes assises carbonatées marquant le paysage topographique de cette région ; elles sont encadrées à la base et au sommet par des dépôts terrigènes marneux (Dubourdiou, 1956). Le Clansayésien est représenté par de puissantes (200 à 300m) séries marneuses à intercalations de bancs de calcaire et de calcaire gréseux ou argileux riches en ammonites. Les dépôts de l'Albien sont à dominance marneuse caractérisés par l'abondance des Bélemnites, des empreintes d'ammonites ; leur épaisseur est de 400 à 500 m. Le Crétacé inférieur se termine par une série de marnes argileuses du Vraconien d'une épaisseur pouvant aller jusqu'à 600 m (Dubourdiou, 1956)

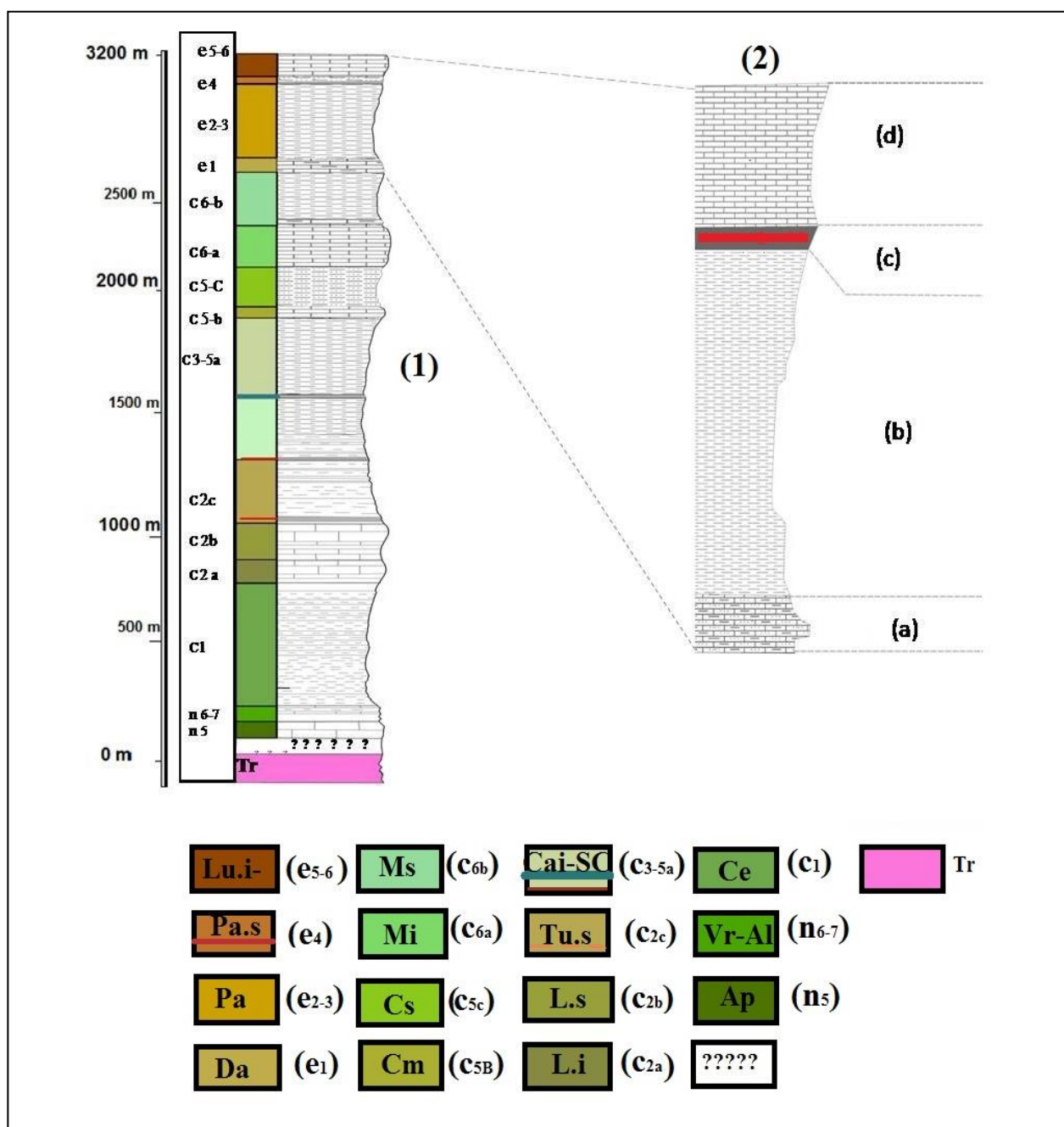


Fig. II.3- Colonnes lithostratigraphiques de la région de Tébessa (1) et de la région du Dj.Dyr (2) réalisées à partir des descriptions de la carte géologique de Morsott (Feuille au 50.000e n°178 établie par Blès et Fleury, 1970) et de sa notice.

Légende: [e⁵⁻⁶]: Lutétien inférieur (Lu.i). [e⁴]: Paléocène supérieur (Pa.s). [e²⁻³]: Paléocène (Pa). [e¹]: Danien (Da). [c^{6b}]: Maestrichtien supérieur (Ms). [c^{6a}]: Maestrichtien inférieur (Mi). [c^{5c}]: Campanien supérieur (Cs). [c^{5b}]: Campanien moyen (Cm). [c^{3-5a}]: Campanien inférieur-Santonien-Coniacien (Ci-sc. [c^{2c}]: Turonien supérieur (Tus). [c^{2b}]: Ligérien Supérieur (Li.s). [c^{2a}]: Ligérien inférieur (Li.i). [c¹]: Cénomaniens (Ce). [n⁶⁻⁷]: Vraconien-Albien (Vr-Al). [n⁵]: Aptien (Ap). [???]: Absence de jurassique. [Tr]: Trias.

[a] Calcaire argileux avec passage de marnes grises. [b] Marnes argileuses noires-verdâtres avec petits bancs calcaires intercalés du Paléocène. [c] Couche phosphatée du Thanétien. [d] Calcaire à silex de l'Eocène inférieur.

Le Crétacé supérieur est représenté par une puissante (600 à 900 m) série de marnes argileuses au Cénomaniens, des calcaires et marno-calcaires à Inocérames au Turonien et au Sénonien par des marnes argileuses à intercalation de marnes à lumachelles (Coniacien-Santonien, 200 à 600 m), des marnes, des calcaires crayeux et des marno-calcaires (Campanien, 300 à 600 m), par des calcaires lités recouverts par des marnes argileuses grises à noires (Maestrichtien, 200 m) (Dubourdieu, 1956).

II.1.2.4- Les formations du Cénozoïque

Les formations du Cénozoïque de cette partie orientale de l'Atlas saharien (région de Tébessa) sont essentiellement représentées par les terrains du Paléocène, Eocène, Miocène et Pliocène. Elles montrent des affleurements épars avec des surfaces réduites (Fig. II.1).

Les formations paléocènes montrent une continuité sans interruption avec celles du Crétacé terminal (Maestrichtien) sous forme de marnes grises contenant de rares intercalations de bancs de calcaire argileux. Les couches phosphatées du djebel Dyr se sont apparemment apparues vers la fin de cette période paléocène (Blès et Fleury, 1969). La période éocène voit un changement notable du type de sédimentation avec apparition de formations carbonatées à silex à l'Yprésien, caractère qui semble général à toute la région, suivies par des marnes et des calcaires au Lutétien. L'épaisseur des formations éocènes atteint les 200 m (Fleury, 1969).

Les formations oligocènes sont absentes dans la région de Tébessa. Cette absence est-elle liée à une paléogéographie particulière configurée par l'orogénèse atlasique qui a induit l'émersion et l'érosion de vaste surface devenue continentale et dont les produits d'érosion notamment les silex yprésiens se retrouvent repris dans la sédimentation transgressive du Miocène inférieur (Dubourdieu, 1956).

Les formations miocènes et pliocènes affleurent principalement au Nord et au Sud de la ville de Tébessa et consistent essentiellement en des séries composées de conglomérats, grés, argiles, marnes et calcaires lacustres sur une épaisseur avoisinant les 1000 m pour le Miocène et de conglomérats bariolés, grés, sables, argiles et calcaires lacustres avec une puissance d'environ 150m pour le Pliocène (Dubourdieu, 1956).

Les dépôts quaternaires sont distribués essentiellement dans les parties basses des reliefs et couvrent des surfaces importantes (plaines et vallées actuelles). Ils sont formés de croutes calcaires, limons éboulis, cailloutis et de poudingues pouvant atteindre une puissance de 10à30m (Dubourdieu, 1956).

II.1.3- Cadre tectonique régional

Les principales structures tectoniques de cette région frontalière de l'Atlas saharien oriental sont représentées par les plissements, les diapirs, les failles et les fossés d'effondrements (Fig.II.4).

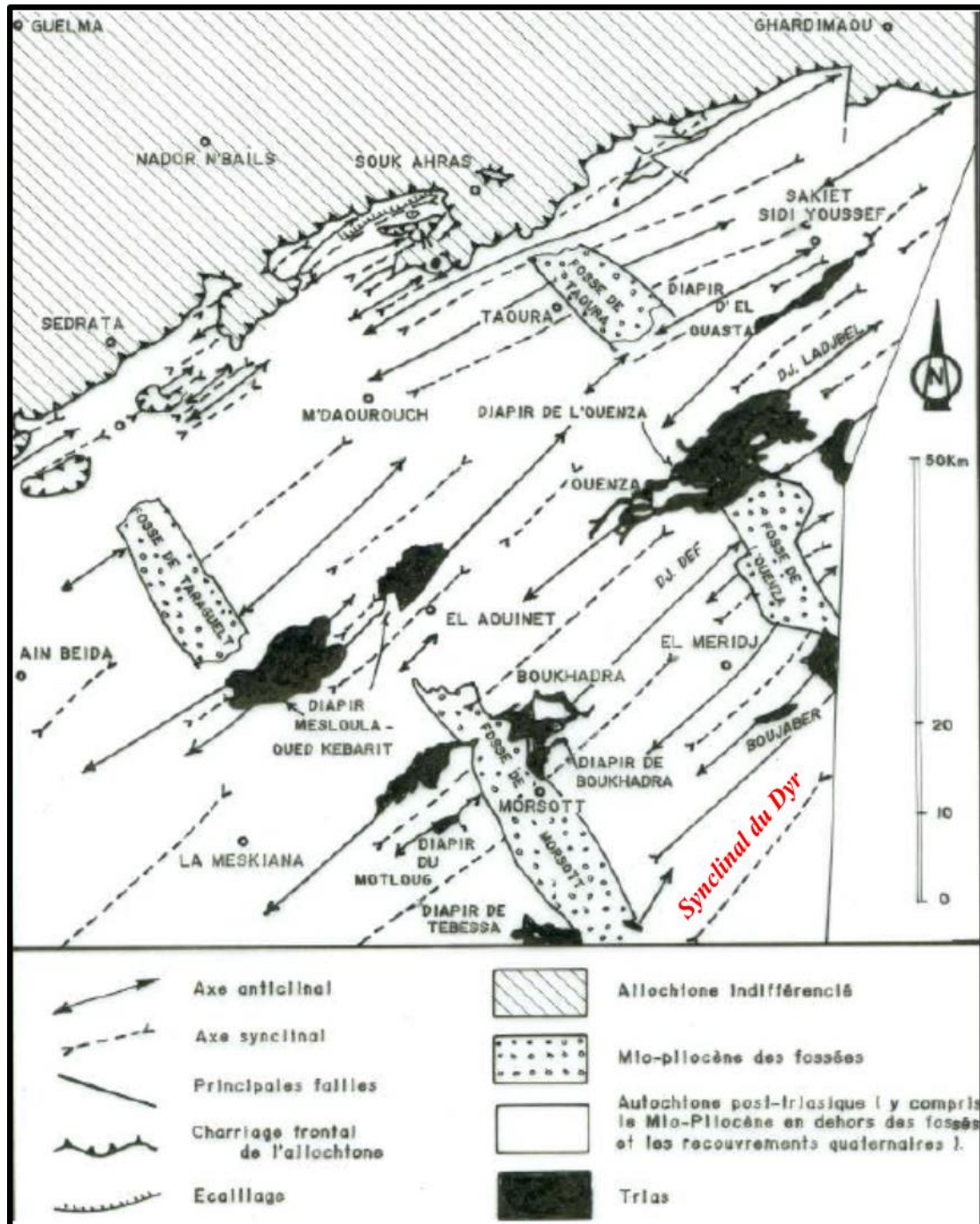


Fig. II.4- Schéma structural de l'autochtone des confins algéro-tunisiens montrant les principales structures tectoniques de la région et la localisation du synclinal du Dyr (Vila, 1980).

II.1.3.1- Les plissements

Dans l'Atlas saharien oriental, l'épaisse série sédimentaire anté-lutétienne est plissée en un ensemble de synclinaux et d'anticlinaux selon une direction NE-SW dite « atlasique » ou « pyrénéenne » (Fig.II.2 et Fig. II.4). Les anticlinaux sont généralement étroits alors que les synclinaux, parfois perchés l'image du synclinal du Dyr, présentent de grands rayons de courbure. Ces plis sont souvent recoupés par des fossés d'effondrement de direction NW-SE et les charnières des anticlinaux sont parfois occupées par les évaporites du Trias diapir (Fig. II.4).

II.1.3.2- Les diapirs

Cette partie de l'Atlas saharien des confins algéro-tunisiens est caractérisée par la densité des affleurements des évaporites du Trias (Fig. II.2). Ces derniers occupent une large bande (80 km) orientée NE-SW qui s'étend sur plus de 200 km et forment ce qui est communément appelé « zone des dômes » ou « zone des diapirs ». La structure de ces affleurements est considérée comme diapirique ayant été mis en place d'une manière polyphasée. Les traces de cette activité diapirique ont été enregistrées dans la sédimentation aptienne, vraconienne, éocène, miocène et quaternaire (Perthuisot, 1978). Ces affleurements triasiques ont cependant été interprétés récemment comme des « glaciers de sel » (Vila, 1996).

II.1.3.3- Les fossés d'effondrement

Les fossés d'effondrement ou grabens sont des structures orientées NW-SE délimitées par d'importantes failles normales (Fig. II.2 et Fig.II.4). Ils recoupent d'une manière orthogonale les structures précédentes (plis et diapirs). Ils résultent apparemment d'une activité tectonique distensive post-miocène et sont remplis principalement par des formations quaternaires (Durozoy, 1952 ; Dubourdiou, 1956 ; Kasi tani, 1986).

II.1.3.4- Les failles

En raison de l'histoire géologique polyphasée qui a marqué cette région frontalière des confins algéro-tunisiens, les différentes formations géologiques ont enregistré les différentes phases tectoniques qui ont affecté cette région. Cet enregistrement se manifeste à travers une multitude d'accidents tectoniques dont les plus importants sont les failles majeures ayant affecté le substratum et qui ont permis l'extrusion des évaporites triasiques, les failles normales bordières qui délimitent les fossés d'effondrement (N140 à N 160) et de nombreuses autres failles de moindre importance affectant les différentes formations géologiques (NW-SE à EW et NE SW).

II.2-Cadre géologique du djebel Dyr

II.2.1-Cadre lithostratigraphique du djebel Dyr

Le massif du Dyr est un synclinal perché dont l'ossature est constituée par les calcaires massifs à Nummulites et silex de l'Eocène inférieur et par les marnes à couches phosphatées et calcaires argileux du Paléocène se trouvant sur les petites falaises et les pentes qui délimitent ce massif (Blès et Fleury, 1970). Les entablements calcaires du Dyr sont très localement recouverts par des conglomérats du Miocène. Les plaines situées en contrebas de ces entablements sont principalement occupées par les dépôts du Quaternaire. Les plaines plus lointaines du massif sont occupées par les formations du Crétacé supérieur (Fig. II.5 et Planche II.1, photo 1 et 2).

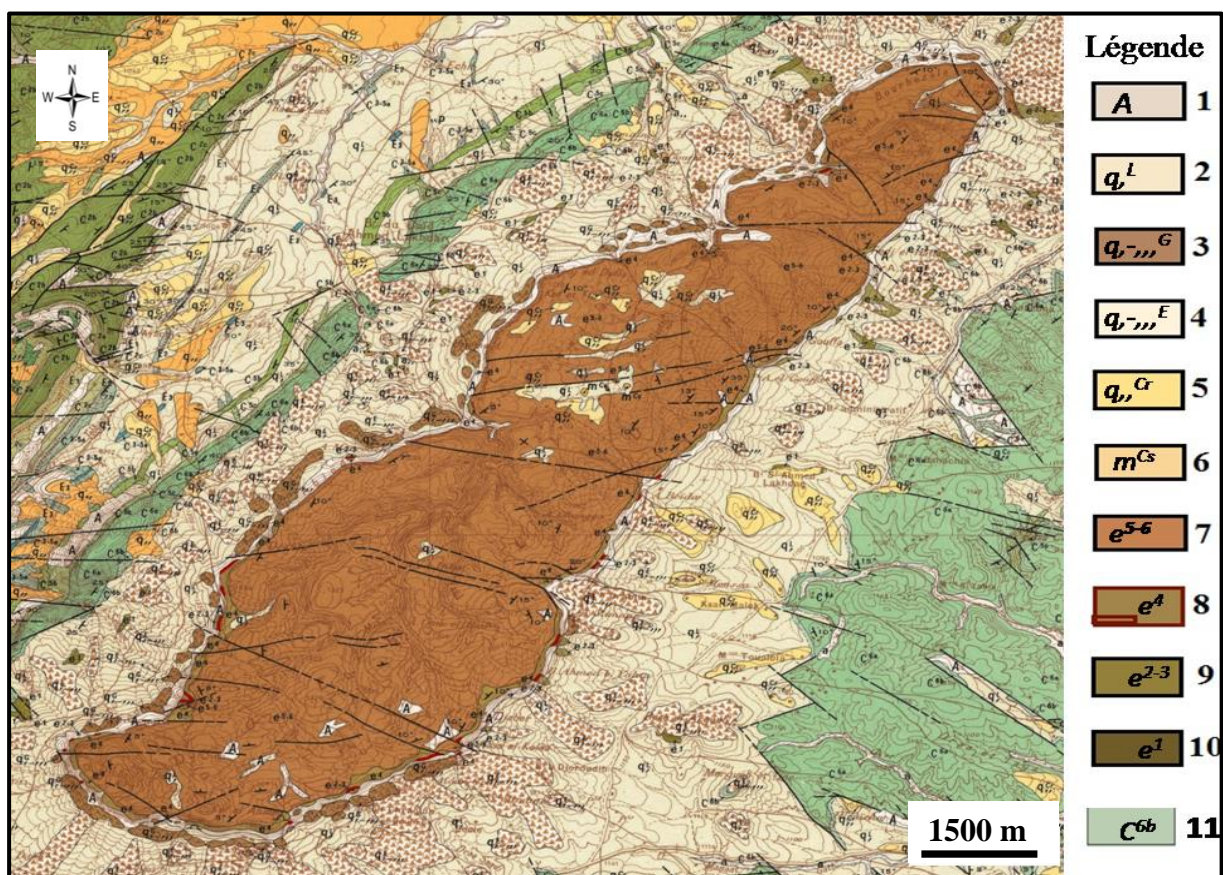


Fig. II.5- Carte géologique du djebel Dyr (extrait de la carte géologique au 1/50 000^e de la feuille de Morsott n° 178, d'après Blès et Fleury, 1970).

Légende : [1], [2], [3], [4] et [5] : Quaternaire. [6] Miocène : sables et graviers quartzeux blancs et roux. [7] Lutétien inférieur-Yprésien : calcaires massifs à Nummulites, silex et lumachelles siliceuses (150 m environ). [8] Paléocène supérieur (« Thanétien ») : calcaires argileux clairs, en petits bancs, à silex noirs (20 m en moyenne) avec une couche phosphatée à la base. [9] Paléocène p.p. : marnes grises (200 m en moyenne). [10] Danien : calcaires argileux clairs à passées de marnes grises (75 à 100m). [11] Maestrichtien supérieur : marnes grises (150 m en moyenne).

II.2.1.1- Les formations du Crétacé (C⁶)

Les plaines entourant le synclinal perché du Dyr sont constituées par des marnes grises montrant quelques intercalations calcaires à l'extrême base. Elles sont datées du Maestrichtien supérieur par une abondante faune d'Ammonites et leur épaisseur est estimée à 150 m en moyenne (Blès et Fleury, 1970). Ces marnes, en grande partie recouvertes par les formations quaternaires, surmontent des calcaires massifs grisâtres se présentant en gros bancs et renfermant parfois de nombreuses empreintes d'Inocérâmes datés du Maestrichtien inférieur (Blès et Fleury, 1970).

II.2.1.2- Les formations du Danien (e¹)

Il s'agit de calcaires argileux gris clair, un peu crayeux, en petits bancs à surfaces ondulés, alternant avec des marnes grises, leur épaisseur a été estimée à 75-100m et leur âge a été déterminé grâce à une riche microfaune de Globigérines (Blès et Fleury, 1970). Les formations du Danien affleurent très peu et sont généralement recouvertes par les dépôts du Quaternaire. Les rares affleurements apparaissent le long de petits ruisseaux qui parcourent les pentes qui entourent le massif (Fig. II.5).

II.2.1.3- Les formations du Paléocène « *pro parte* » « Montien » (e²⁻³)

Les formations du Paléocène *p.p.* consistent en des marnes grises, homogènes, au sommet desquelles apparaissent de rares bancs de calcaires argileux, leur épaisseur est de l'ordre de 200 m (Blès et Fleury, 1970). Comme pour les formations du Danien, ces marnes paléocènes *p.p.* montrent des affleurements très exigus et épars, apparaissant principalement dans les parties amont des pentes entourant le massif (Fig. II.5 et Fig.II.6). Le sommet de cette série marneuse est parfois marqué par le développement d'une lumachelle riche en Huîtres (Flandrin, 1948 *in* Fleury, 1969).

II.2.1.4- Les formations du Thanétien (e⁴)

Il s'agit de calcaires argileux en petits bancs souvent noduleux à silex, d'une épaisseur pouvant aller jusqu'à 40 m dans la terminaison périsinglinale SW du massif du Dyr. Les affleurements du Thanétien sont plus développés sur le flanc SE du synclinal et au niveau de la terminaison périsinglinale du Dyr où ils forment un liseré plus ou moins continu soulignant les calcaires massifs de l'Yprésien. Ils sont par contre plus rares, discontinus et épars au niveau du flanc NW (Fig.II.5).

C'est à la base de ces calcaires argileux du Thanétien que sont localisés les horizons phosphatés du djebel Dyr, objets du présent mémoire (Fig.II.6 et Planche II.1, photo 3, 4 et 5).

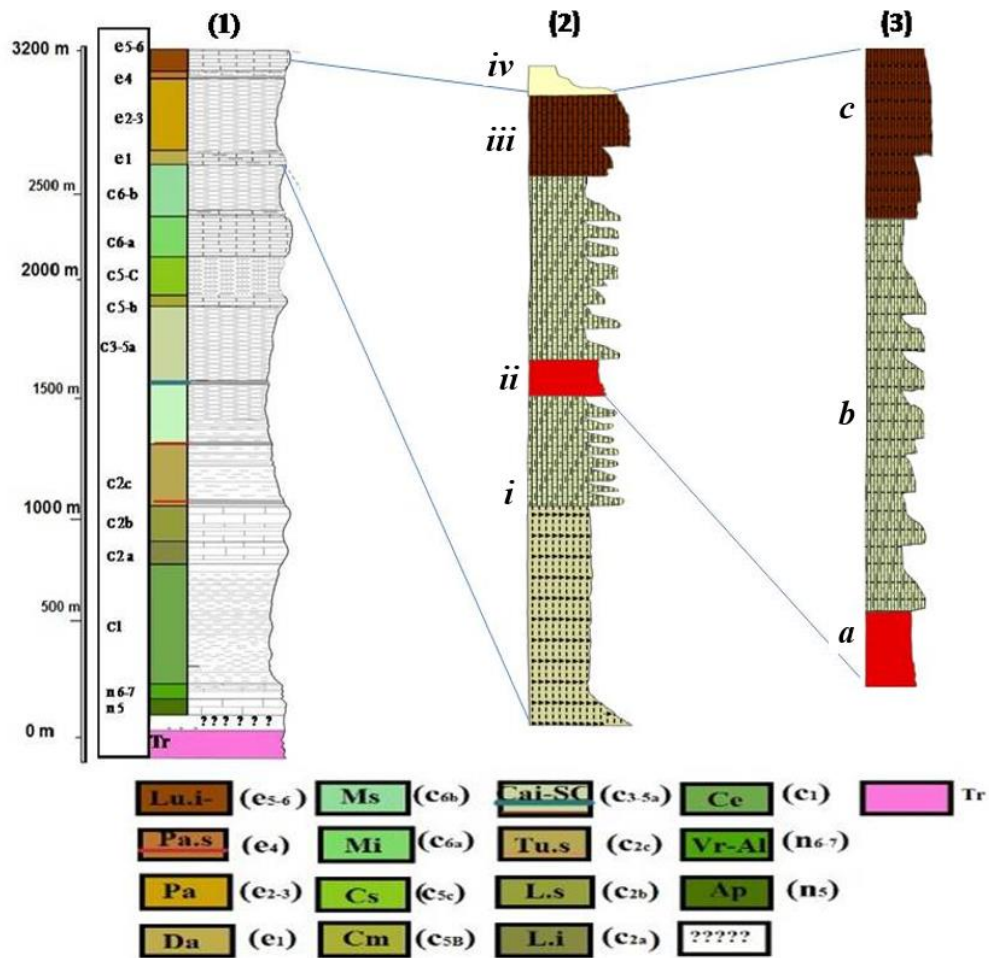


Fig. II.6- Colonnes lithostratigraphiques de la région de Tébessa (colonne lithostratigraphique 1), du massif du Dyr (colonnes lithostratigraphiques 2 et 3) et détails des formations surmontant la couche phosphatée (colonne lithostratigraphique 3)

Légende :

Colonne lithostratigraphique 1 : même légende que la figure II.3, page 19.

Colonne lithostratigraphique 2 : [i] Marnes surmontées par des alternances de calcaires et de marnes du Paléocène supérieur. [ii] Couche de minerai phosphaté d'épaisseur métrique surmontée par des alternances de calcaires argileux en bancs décimétriques et de marnes. [iii] Calcaires à nummulites et silex de l'Eocène inférieur. [iv] Conglomérats du Miocène continental

Colonne lithostratigraphique 3 : [a] Couche phosphatée d'une épaisseur d'environ 1m, [b] Alternance de marnes et de calcaires argileux avec des nodules à silex au-dessus la couche phosphatée. [c] Alternance de calcaires riches en nummulites, lamellibranche et des calcaires à silex.

II.2.1.5- Les formations de l'Eocène [Yprésien et Lutétien] (e⁵⁻⁶)

L'entablement du Dyr est délimité par de petites falaises sous forme de cuesta, il est principalement constitué par les formations éocènes (Planche II.1, photo 2, 3 et 5). Ces dernières débutent approximativement au-dessus du principal niveau phosphaté par un ensemble yprésien d'une cinquantaine de mètres d'épaisseur de calcaires argileux clairs en petits bancs décimétriques contenant parfois du silex sous forme de petites lentilles. Cet ensemble est surmonté par un deuxième ensemble constitué, sur plus de 100 m d'épaisseur, par des calcaires massifs à Nummulites en gros bancs métriques contenant du silex brun à

noir sous forme de lits, lentilles et rognons. Certains bancs organogènes, très riches en Nummulites, sont entièrement silicifiés. Cet ensemble carbonaté à Nummulites est attribué au Lutétien (Fleury, 1969)

II.2.1.6- Les formations du Miocène (mc^s)

De petits affleurements de Miocène continental sont signalés au centre de l'entablement synclinal du Dyr (Fleury, 1969). Il s'agit de sables et de graviers quartzeux blancs à traces ferrugineuses rousses et à stratifications entrecroisées.

II.2.1.7- Les formations du Quaternaire

Dans le massif du Dyr, les formations quaternaires sont principalement représentées par des limons récents, des éboulis à éléments de calcaires éocènes accumulés sur les pentes entourant le massif et par des croûtes calcaires se trouvant essentiellement au centre et au SE de l'entablement du massif du Dyr (Fig. II.5).

II.2.2 -Cadre Tectonique du djebel Dyr

Le massif du Dyr est un pli synclinal perché de direction atlasique (NE-SW) dont l'ossature est constituée par les calcaires à Nummulites et silex de l'Eocène inférieur (Fig.II.7). Comme l'ensemble des plis de la région il est le résultat de la phase atlasique qui est donc post-lutétienne. C'est au sein de ces formations essentiellement carbonatées que s'intercalent **le niveau** stratiformes de minerai phosphaté et calcaires phosphatés du djebel Dyr. **Ce couche phosphaté**, dont la genèse syn-sédimentaire est antérieure à cette phase tectonique atlasique, ont donc, à l'instar de l'ensemble de la série qui les encaissent, subi les effets de cette phase tectonique. Elles sont plissées et sont affectées par un ensemble de failles perceptibles sur le terrain.

Etant donnée cette structure synclinale à fond plat, il est logique de voir une continuité dans la direction E-W des affleurements de minerai phosphaté cartographiés sur les deux flancs du synclinal (Fig.II.8). Ces affleurements représenteraient alors les extrémités de la même couche qui serait probablement continue sous les couches de l'Eocène inférieur. De probables failles, en relation avec la genèse du synclinal, affecteraient la structure et provoqueraient des décalages dont il faut tenir compte dans toute prospection ou exploitation.

Les différentes formations géologiques du massif du Dyr, en plus d'être plissées, sont affectées par une multitude de failles dont les directions principales sont NW-SE à E-W (Fig.II.7).

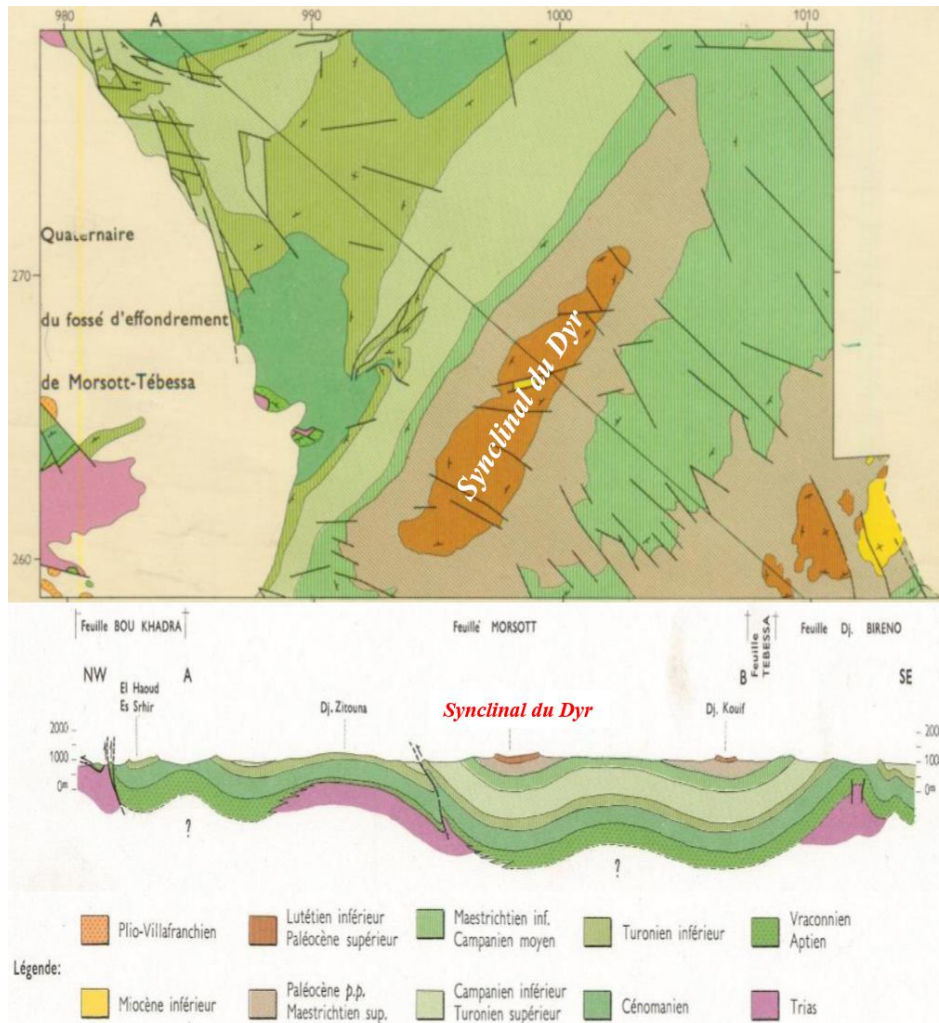


Fig.II.7- Schéma structural et coupe géologique régionale montrant les plis synclinaux et anticlinaux de direction atlasique (NE-SW) dans la région de Tébessa (d'après Blès et Fleury, 1970). L'ossature de ces plis est généralement assurée par des formations carbonatées crétacées et les anticlinaux sont parfois percés par des évaporites triasiques diapiriques. L'ossature de certaines structures synclinales dont celles des massifs du Dyr et du Kouif sont assurées par des assises carbonatées de l'Eocène inférieur.

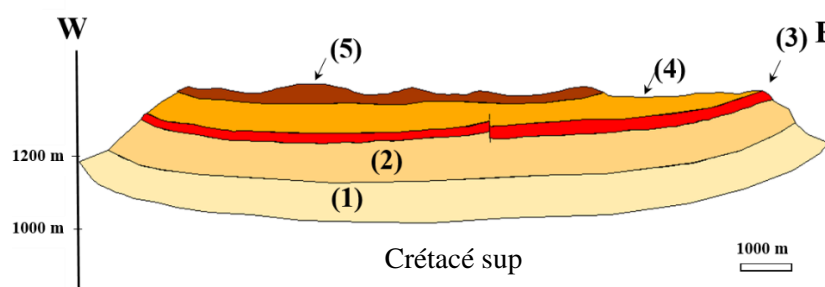


Fig.II.8- Coupe géologique réalisée à partir de la carte géologique de Morsott montrant la position lithostratigraphique des minéralisations phosphatées du massif du Dyr (pour sa représentation, l'épaisseur de la couche phosphatée a été délibérément exagérée).

Légende

(1) Paléocène: marnes grises. (2) Paléocène supérieur: alternance de calcaires argileux clairs en petit bancs à silex noir et de marnes. (3) Couche phosphatée du Thanétien. (4) alternance des marnes et de calcaires de l'Yprésien. (5) Lutétien inférieur-yprésien: calcaire massif à nummulites, silex et lumachelle. Les attributions stratigraphiques sont approximatives et sont d'après Fleury (1969).

Planche II.1 : Aspects à l'affleurement du minerai phosphaté

Photo 1- Vue panoramique sur le versant SE de l'entablement du synclinal perché du Dyr.

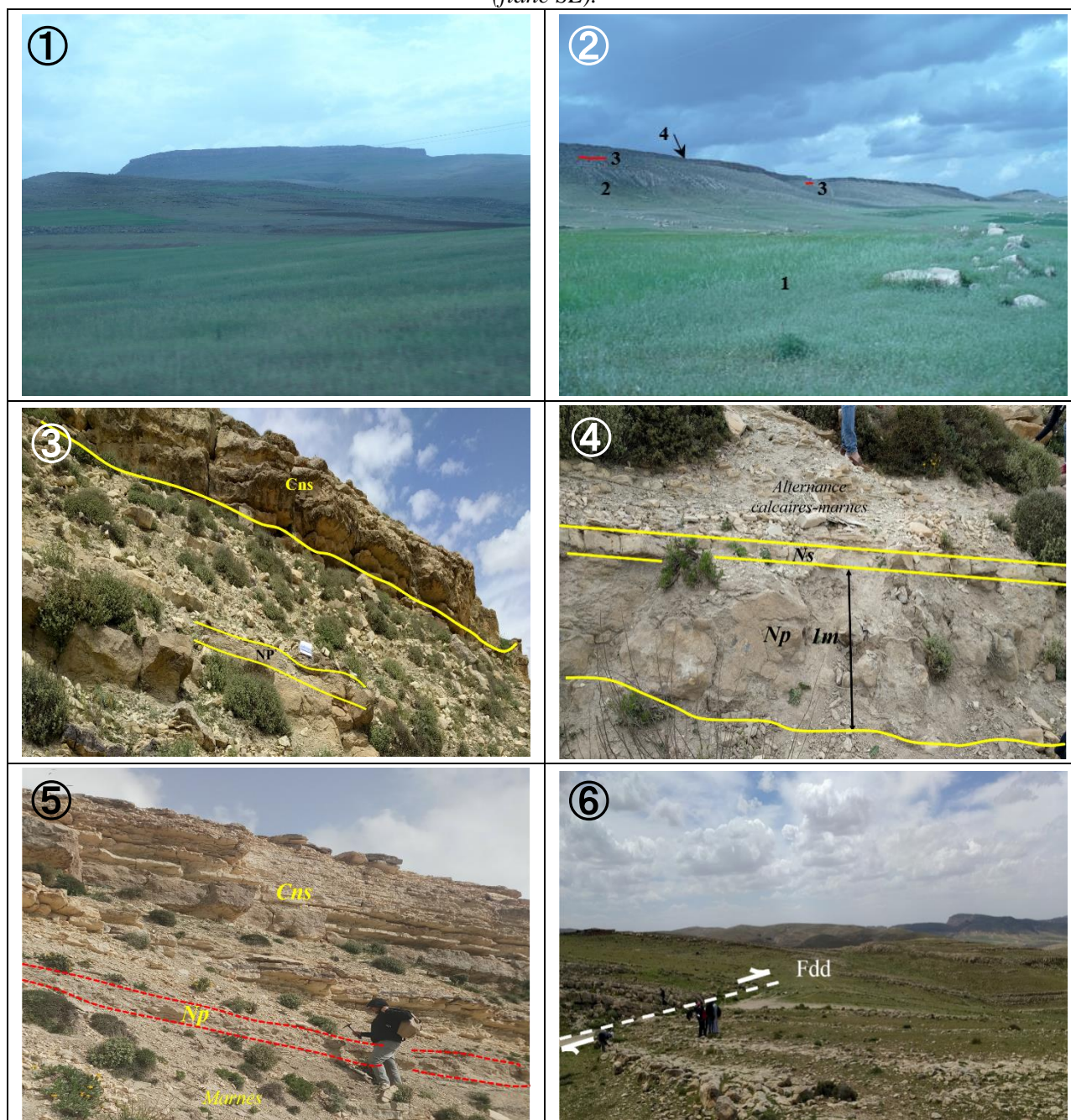
Photo 2- Position stratigraphique de la couche phosphatée dans la série sédimentaire du versant (flanc) SE du synclinal du Dyr. (1) : recouvrement quaternaire. (2) : marnes paléocènes. (3) : Couche phosphatée du Thanétien. (4) : Petite falaise sous forme de cuesta constituée par les calcaires à Nummulites et silex de l'Yprésien.

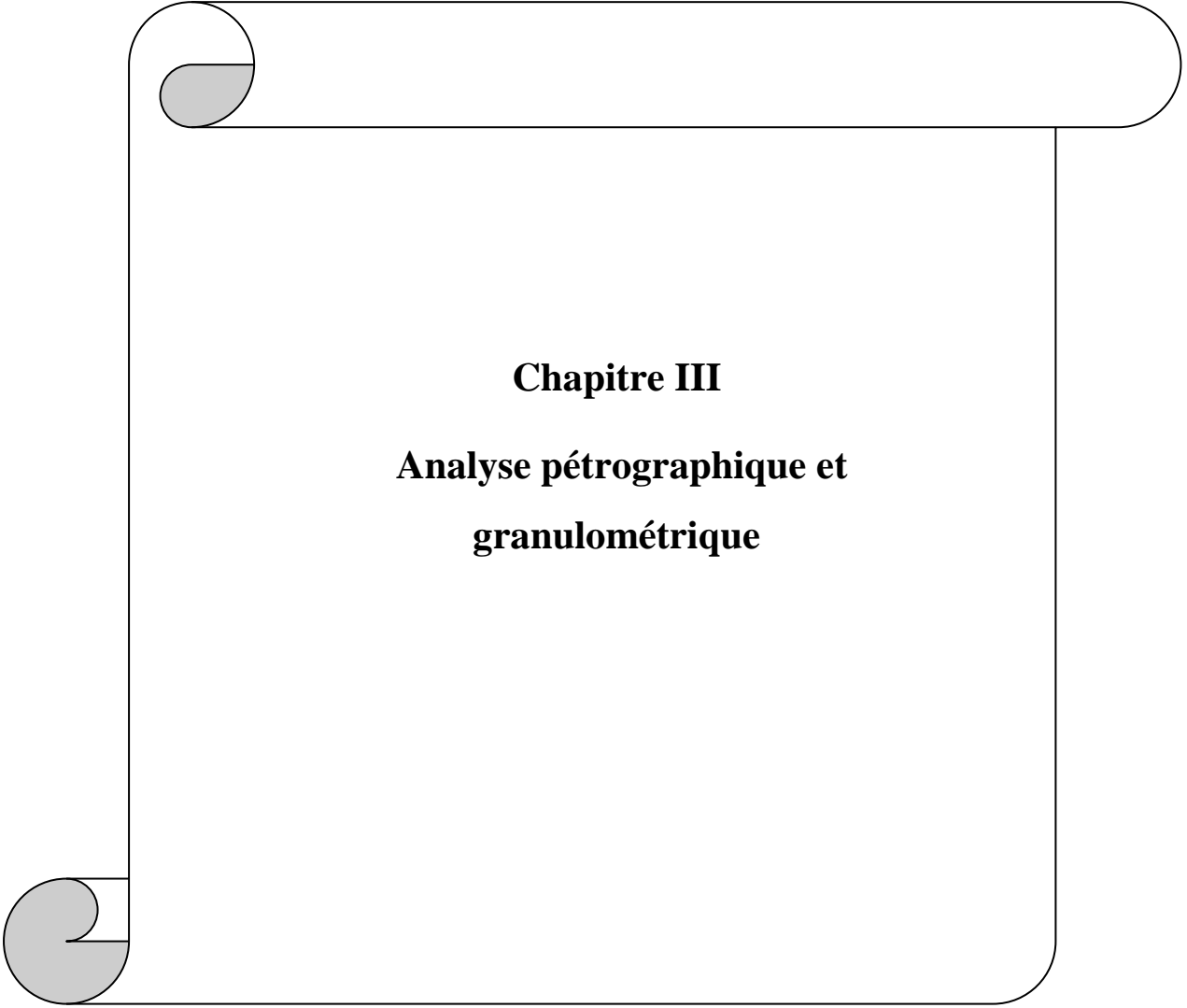
Photo 3- Niveau phosphaté intercalé dans les alternances de calcaires argileux et de marnes du Thanétien-Yprésien inférieur (Cns : Calcaires à Nummulites et silex, Np : Niveau phosphaté).

Photo 4- Couche phosphatée métrique au sommet des marnes paléocènes (Np : niveau phosphaté, Ns : Niveau de calcaire argileux à rognons de silex noir).

Photo 5- Niveau de phosphate (Np) surmonté par les alternances de calcaires argileux et de marnes puis par les calcaires à Nummulites et silex (Cns) de l'Yprésien (Flanc NW).

Photo 6- Faille décrochante sénestre (Fdd) affectant les calcaires à Nummulites et silex de l'Yprésien (flanc SE).



A decorative border resembling a scroll, with a grey shaded area at the top-left and bottom-left corners, and rounded ends on the right side.

Chapitre III
Analyse pétrographique et
granulométrique

Chapitre III : Analyse pétrographique et granulométrique

III.1- Répartition spatio-temporelle des affleurements de minerai phosphaté

Les affleurements de minerai phosphaté du djebel Dyr, tels qu'ils ont été cartographiés par Blès et Fleury (1970), sont principalement localisés en bordure de l'entablement constitué par les calcaires éocènes et délimité par de petites falaises (Fig.III.1). Ces affleurements, de dimensions exigües (métrique), sont discontinus et épars. Ils sont au nombre de vingt et un (21) affleurements dont vingt (20) se trouvent dans la moitié SW du massif et un seul affleurement se trouve sur le flanc NW de la moitié NE du massif. Pour les affleurements de la moitié SW, Onze (11) sont localisés sur le flanc SE du synclinal, cinq (05) au niveau du flanc NW et quatre (04) au niveau de la fermeture péri synclinale SW (Fig.III.1).

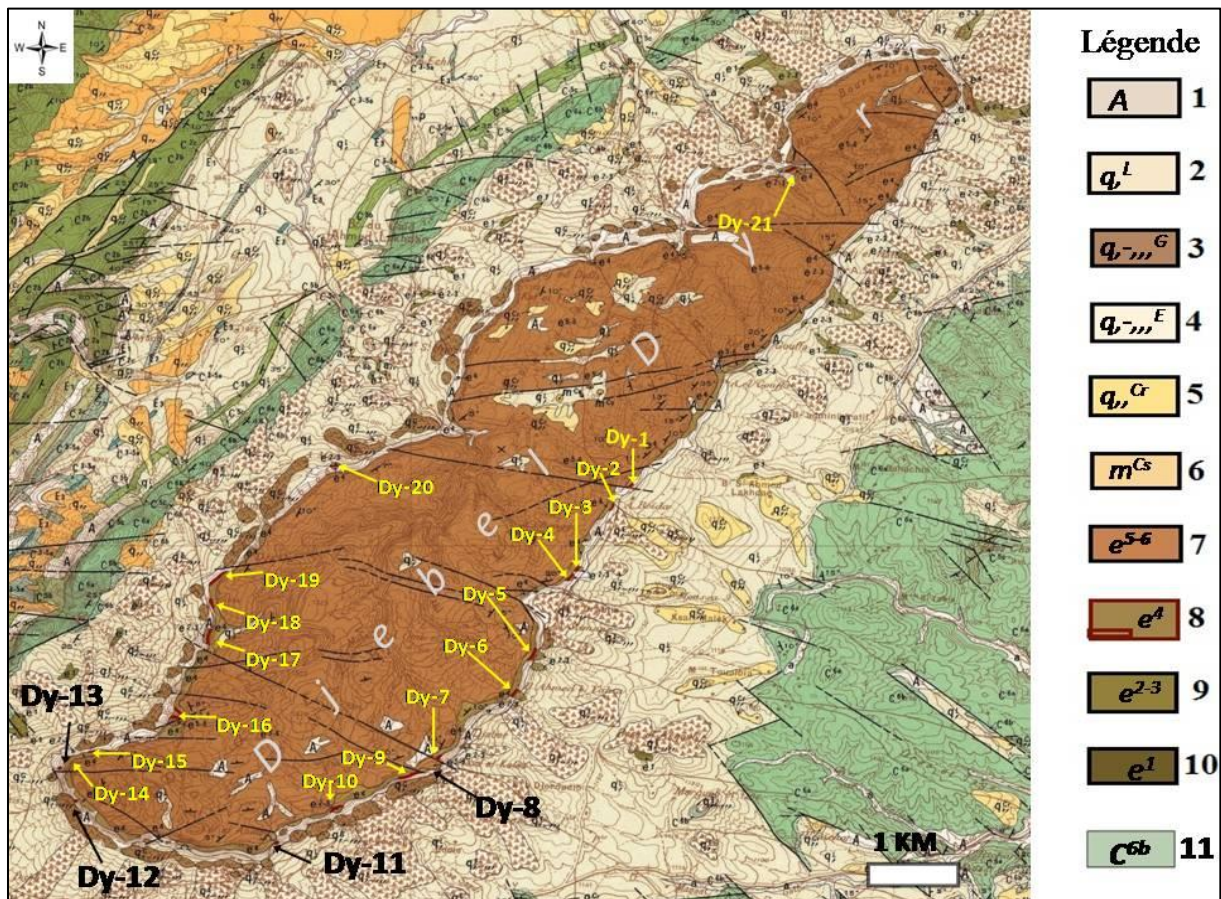


Fig.III.1-Localisation des affleurements de minerai phosphaté sur la carte géologique du djebel Dyr (extrait de la carte géologique au 1/50 000^e de la feuille de Morsott n° 178, d'après Blès et Fleury, 1970).

Légende : [1] [2] [3] [4] et [5] : Quaternaire. [6] : Miocène: Sables et graviers quartzeux blancs et roux. [7] : Lutétien inférieur-Yprésien: calcaires massifs à Nummulites, silex et lumachelles siliceuses. [8] : Paléocène supérieur (« Thanétien »): calcaires argileux clairs, en petits bancs, à silex noirs avec couche phosphatée à la base. [9] : Paléocène p.p. : marnes grises. [10] : Danien: calcaires argileux clairs, à passées de marnes grises. [11] : Maestrichtien : marnes grises.

Ces affleurements ont fait l'objet de coupes levées sur terrain avec un échantillonnage régulier destiné d'une part à l'étude lithologique et pétrographique du minerai phosphaté et de leur encaissant carbonaté et d'autre part à l'analyse granulométrique du minerai phosphaté. Cependant, seuls les affleurements montrant du minerai plus ou moins friables pouvant se prêter à un tamisage ont été échantillonnés. Les affleurements à minerai plus compact et massif ont été échantillonnés pour un examen microscopique.

Les coupes levées sur le terrain montrent que le minerai phosphaté est localisé à la limite entre les marnes datées du Paléocène (Blès et Fleury, 1970) et les alternances de calcaires argileux et marnes du Thanétien (Fig.III.2).

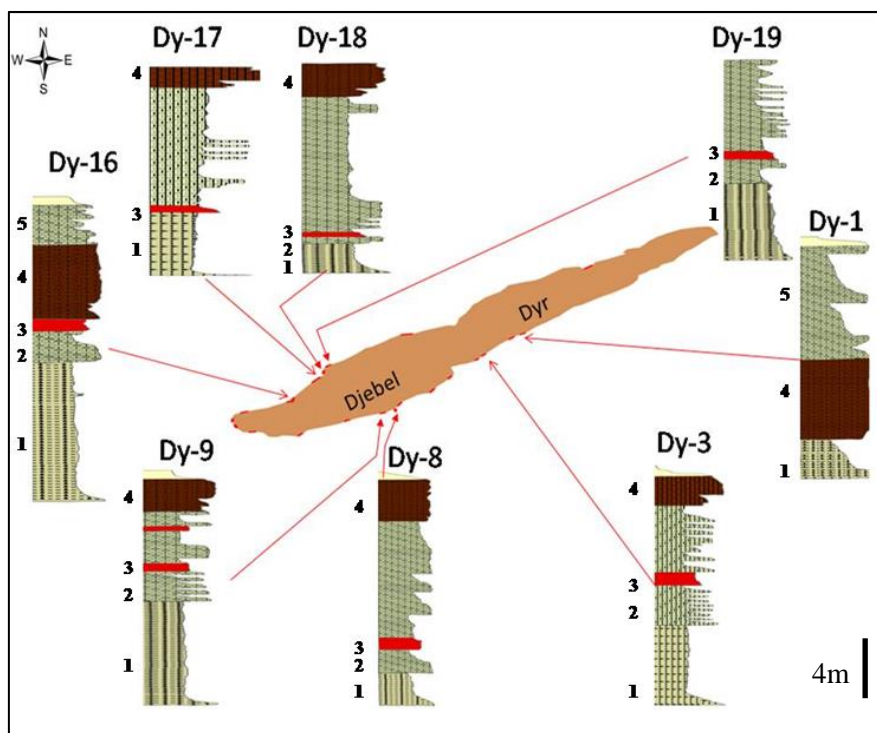


Fig.III.2- Disposition lithostratigraphique de la couche phosphatée principale dans l'édifice Paléocène-Eocène du djebel Dyr.

Légende : (1) marne grises du Paléocène. (2) Alternance de calcaires argileux à silex et des marnes.

(3) Couche et niveau phosphatés (4) Alternance des calcaires à nummulites et silex de l'Eocène inférieur (Yprésien). (5) Alternance des calcaires et des marnes de l'Eocène inférieur (Lutétien inférieur).

III.2- Méthodes analytiques

Les échantillons ainsi prélevés lors de la levée des coupes sur terrain ont fait l'objet de la confection de lames minces pour l'examen microscopique aussi bien du minerai phosphaté que de son encaissant carbonaté et d'analyses granulométriques pour les échantillons de minerai phosphaté.

La réalisation des lames minces a nécessité d'abord l'enrobage à la résine de certains échantillons plus ou moins friables. Les échantillons ont été ensuite découpés en « talons » ou « sucres » dans le laboratoire de Génie Géologique de l'Université Mohamed Seddik Benyahia de Jijel. La confection des lames minces proprement dite a été réalisée au département de Géologie de l'Université Badji Mokhtar d'Annaba et que nous tenons à remercier vivement toutes les personnes qui ont contribué à leur confection.

Les échantillons destinés à l'analyse granulométrique et dans le but de les rendre meubles ils ont d'abord été trempés dans de l'eau distillée sur des périodes allant jusqu'à dix jours pour certains échantillons. Les échantillons les plus relativement compacts ont subi plusieurs cycles de lavage et de séchage à l'étuve à une température de 80°C et pendant 24 heures. Les échantillons ainsi arénétisés ont subi un quartage au diviseur échantillonneur et une prise de 200 grammes a été prélevée pour l'essai granulométrique.

L'analyse granulométrique par tamisage à sec a été réalisée au laboratoire pédagogique des « Géomatériaux » du département de Géologie de l'Université Mohamed Seddik Benyahia de Jijel. Le tamisage a été effectué avec une tamiseuse électrique à vibration horizontale et verticale. Chaque échantillon a subi un tamisage pendant 15 mn sur une colonne constituée de 20 tamis de la série A.F.N.O.R dont les mailles en micromètre sont : 6300, 4000, 3150, 2500, 2000, 1600, 1250, 1000, 800, 630, 500, 400, 315, 250, 200, 160, 125, 100, 80, 63 et un fond pour recevoir les passants du dernier tamis. Les refus récoltés sur chaque tamis ont été pesés sur une balance dont la précision est de 0.01 g (Fig.III.3).

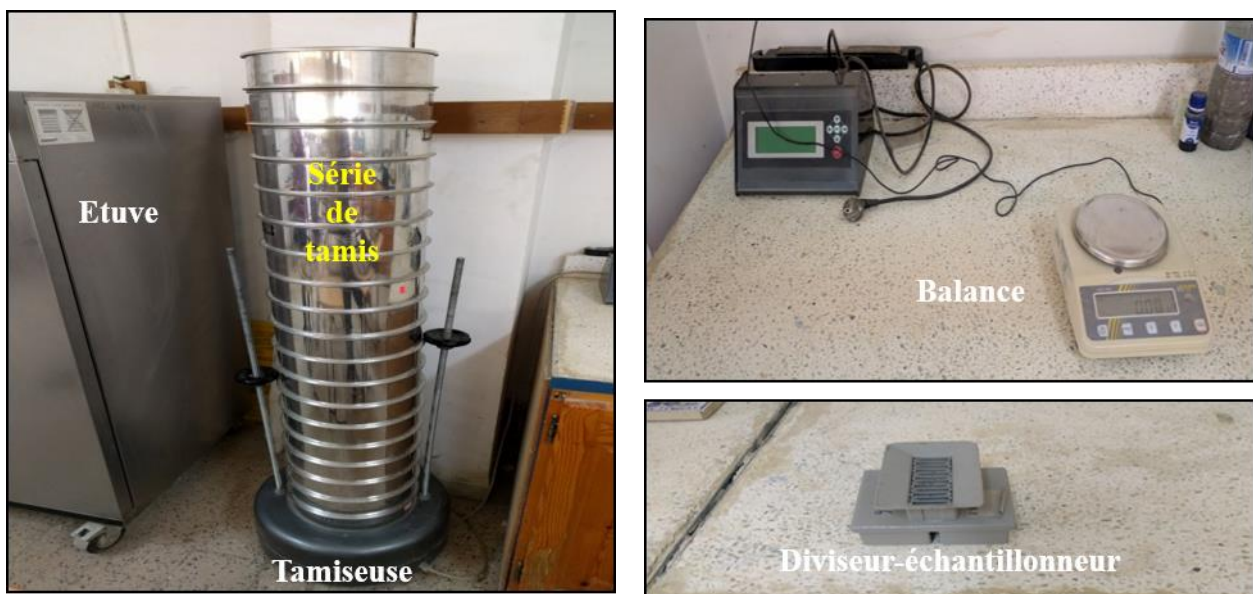


Fig.III.3- Equipements utilisés dans les essais d'analyse granulométrique

Les données du tamisage ont été utilisées pour réaliser les histogrammes de fréquence permettant de comparer les granulométries des différents échantillons de minerai phosphaté. Elles ont également été utilisées pour tracer les courbes de fréquence des refus cumulés à partir desquelles sont extraites les données nécessaires pour le calcul des indices granulométriques. Pour le calcul de ces derniers, nous avons utilisé la méthode de Folk et Ward (1957) qui définit les quatre paramètres ou indices les plus utilisés dans la caractérisation granulométrique des sédiments meubles comme suit :

- Le **grain moyen** ou « **Graphic Mean** » (**Mz**) est un paramètre qui donne une idée générale sur la texture de l'échantillon, il est donné par la relation

$$Mz = \frac{\Phi_{16} + \Phi_{50} + \Phi_{84}}{3}$$

où Φ_{16} , Φ_{50} et Φ_{84} sont extraits de la courbe cumulative et correspondent aux refus cumulés inférieurs respectivement à 16, 50 et 84 % du poids de l'échantillon.

- Le **classement** ou « **Inclusive Graphic Standard Deviation** » (**σ_i**) est un paramètre qui donne des informations sur le tri ou le classement de l'échantillon en présentant une estimation de la dispersion des tailles des grains par rapport à la moyenne de l'échantillon. Il est donné par la relation :

$$\sigma_i = \frac{\Phi_{84} - \Phi_{16}}{4} + \frac{\Phi_{95} - \Phi_5}{6.6}$$

En fonction des valeurs obtenues, le classement de l'échantillon est interprété en faisant référence à la terminologie définie par Folk et Ward (1957) donnée dans le tableau III.1.

Intervalle des valeurs	Interprétation
$0 < \sigma_i < 0,35$	Très bien classé
$0,35 < \sigma_i < 0,50$	Bien classé
$0,50 < \sigma_i < 0,71$	Assez bien classé
$0,71 < \sigma_i < 1$	Moyennement classé
$1 < \sigma_i < 2$	Médiocrement classé
$2 < \sigma_i < 4$	Très mal classé

Tab.III.1- Intervalles des valeurs de l'« **Inclusive Graphic Standard Deviation** » (**σ_i**) et leur interprétation selon la terminologie définie par Folk et Ward (1957).

- L'« **Inclusive Graphic Skewness** » (**Ski**) est calculé par la relation suivante :

$$Ski = \frac{\Phi_{16} + \Phi_{84} - 2\Phi_{50}}{2(\Phi_{84} - \Phi_{16})} + \frac{\Phi_5 + \Phi_{95} - 2\Phi_{50}}{2(\Phi_{95} - \Phi_5)}$$

Ce paramètre informe sur l'enrichissement en particules grossières (asymétrie négative), l'enrichissement en particules fines mal triées (asymétrie positive), ou s'il y a symétrie de la distribution granulométrique de l'échantillon. L'interprétation des résultats obtenus est faite en faisant référence aux intervalles définis par Folk et Ward (1957) mentionnés dans le tableau III.2.

Intervalles des valeurs	Interprétation
$+ 1,00 > SK_i > + 0,30$	Forte asymétrie vers les petites tailles
$+ 0,30 > SK_i > + 0,10$	Asymétrie vers les petites tailles
$+ 0,10 > SK_i > - 0,10$	Symétrie granulométrique de l'échantillon
$- 0,10 > SK_i > - 0,30$	Asymétrie vers les grandes tailles
$- 0,30 > SK_i > - 1,00$	Asymétrie vers les grandes tailles

Tab.III.2- Terminologie de l'« *Inclusive Graphic Skewness* » (SK_i) définie par Folk et Ward (1957)

- Le « **Kurtosis** » (K_G) est l'indice d'acuité du mode, il mesure l'angulosité de la courbe des fréquences, c'est à dire le degré de concentration ou au contraire de dispersion du mode. Plus la valeur du kurtosis est élevée et plus la taille des grains du sédiment est homogène. Si le mode est concentré dans des classes granulométriques restreintes, la distribution est dite leptocurtique, s'il est dispersé elle est dite platycurtique. L'interprétation des valeurs du « Kurtosis » est faite en référence aux intervalles définis par Folk et Ward (1957) (Tab.III.3).

Intervalles des valeurs	Interprétation
$K_G < 0,67$	Courbe très platycurtique
$0,67 < K_G < 0,90$	Courbe platycurtique
$0,90 < K_G < 1,11$	Courbe mesocurtique
$1,11 < K_G < 1,50$	Courbe leptocurtique
$1,50 < K_G < 3,00$	Courbe très leptocurtique
$3,00 < K_G$	Courbe extrêmement leptocurtique

Tab.III.3- Terminologie du « *Kurtosis* » (K_G) définie par Folk et Ward (1957).

D'autre part, les refus de chaque tamis ont été examinés sous loupe binoculaire et un comptage des principaux constituants a été réalisé.

III.3- Pétrographie du minéral phosphaté et de son encaissant carbonaté

Pour la caractérisation et la nomenclature des roches carbonatées constituant la série encaissante du minéral phosphaté, nous avons fait appel aux classifications les plus utilisées, celle de Folk et celle de Dunham (Fig.III.4 et Fig.III.5). La première étant descriptive et permet de rendre compte de la nature des principaux constituants de la roche alors que la

seconde est plus interprétative et donne des informations sur les conditions énergétiques qui ont régné pendant le dépôt de la roche.

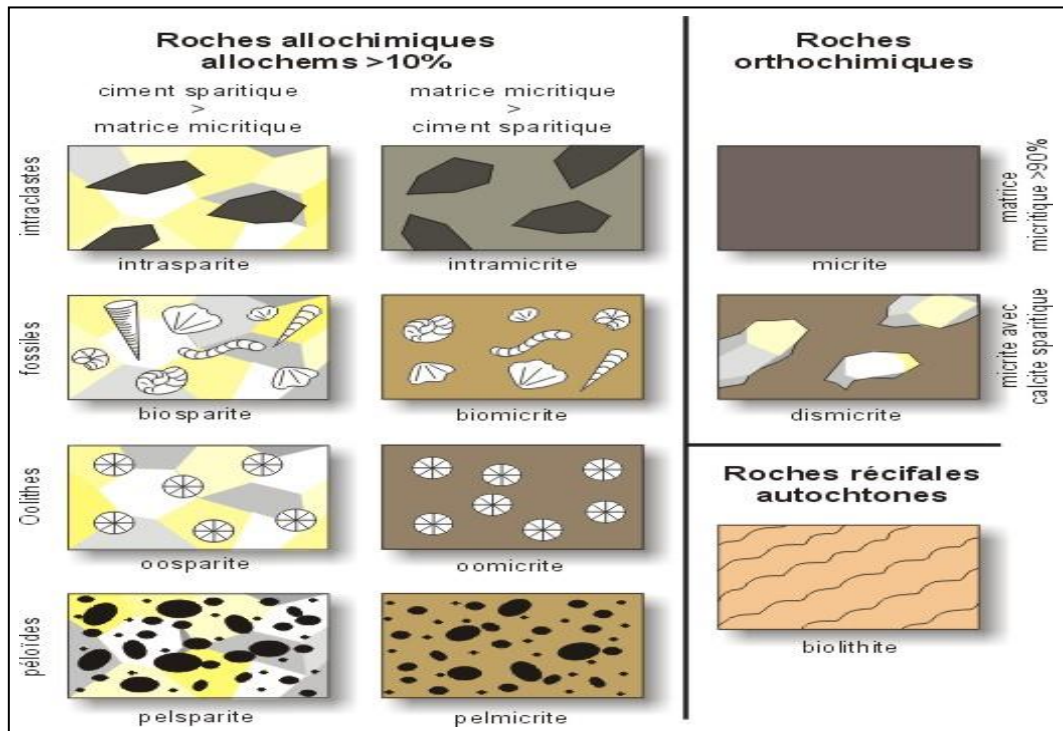


Fig. III.4- Classification des roches carbonatées selon Folk (1959). (D'après Boulvain, 2016 <http://www2.ulg.ac.be/geolsed>).

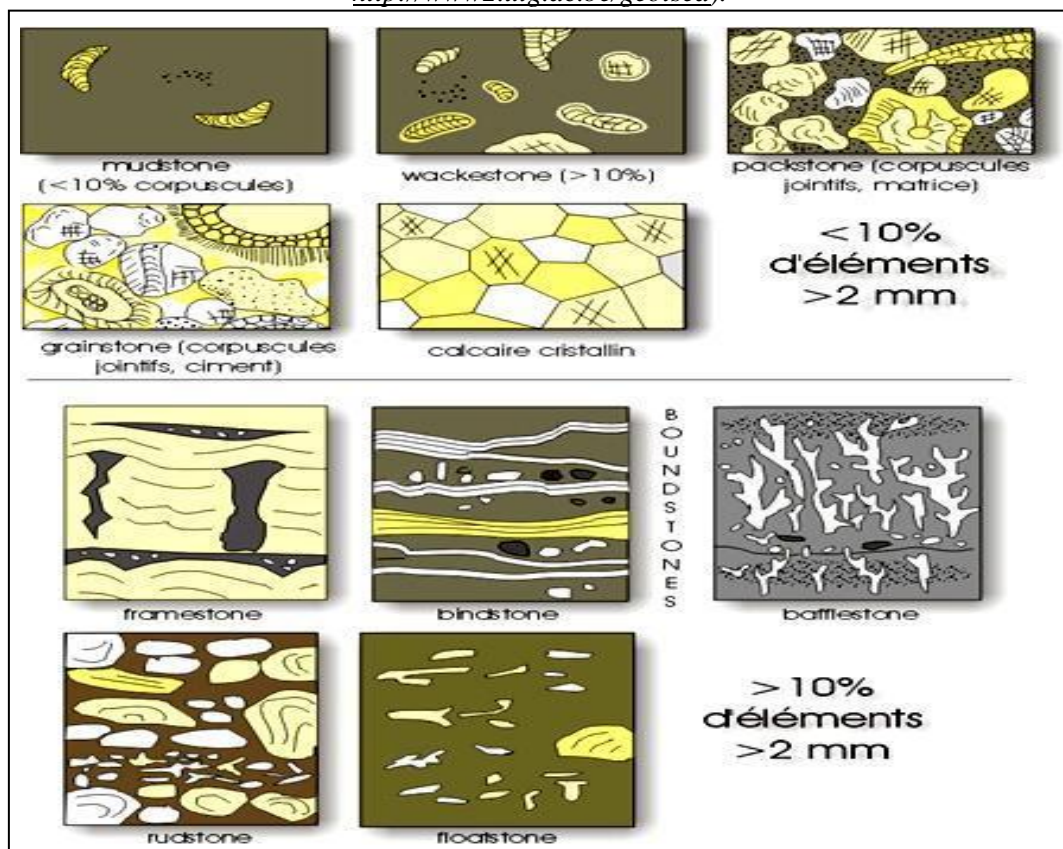


Fig. III.5- Classification des roches carbonatées selon Dunham (1962) et Embry & Klovan (1972). (D'après Boulvain, 2016 : <http://www2.ulg.ac.be/geolsed>).

Comme nous l'avons déjà mentionné, il existe dans l'entablement du Dyr vingt et un (21) affleurements de minerai phosphaté cartographiés par Blès et Fleury (1969). Sur les vingt et un, seuls quatorze affleurements ont été échantillonnés et étudiés, ils sont répartis sur le flanc SE (huit affleurements), le flanc NW (quatre affleurements) et la fermeture périsinglinale (un affleurement). Cette étude pétrographique s'est basée sur des échantillons prélevés régulièrement lors de la levée de coupe sur terrain. L'échantillonnage a intéressé aussi bien les niveaux précédents les couches phosphatées que ceux déposés après les accumulations phosphatées (Fig.III.2). Dans certains affleurements seuls les horizons phosphatés ont été échantillonnés alors que dans d'autre cas la couche principale de phosphate qui surmonte les marnes paléocènes est recouverte par les éboulis de pente et n'a pu être échantillonnée.

Dans tous les cas où elle a été observée cette couche principale d'une épaisseur moyenne d'un mètre, datée du Thanétien (Fleury, 1969), est stratigraphiquement localisée au-dessus des marnes datées du Paléocène supérieur et elle est surmontée par des alternances de calcaires argileux en bancs d'épaisseur décimétrique et de marnes datées de l'Yprésien inférieur (Fleury, 1969) (Fig.III.2 ; Planche II.1, photo 2 ; Planche III.1, photo 1 et 2). D'autres horizons phosphatés et de calcaires phosphatés moins épais (10 cm en moyenne) ont cependant été observés à des niveaux stratigraphiques plus élevés (Yprésien inférieur) (Fig.III.2).

III.3.1- Pétrographie de l'encaissant carbonaté

La synthèse des observations effectuées sur les affleurements de phosphates étudiés permet de dégager une coupe synthétique illustrant l'agencement temporel des différents faciès déposés avant et après le dépôt de la couche phosphatée. De la base vers le sommet on trouve :

- a) Epaisse (>100 m) série marneuse en grande partie recouverte par les éboulis de pentes dans les parties élevées et par les alluvions quaternaires dans les parties basses (Planche II.1, photo 2).
- b) Niveau carbonaté sur une épaisseur de 3 m en lit centimétrique dont la base est relativement plus enrichie en silex qui se présente sous forme de lit ou de lentilles étirées. Ce niveau se termine par un banc dolomiritique microcristallin à rares minuscules grains phosphatés et rares tests de foraminifère et de radiolaire.
- c) Niveau de phosphate à coprolithes et dents de poisson du Thanétien sur une épaisseur de 1 m (Planche III.1, photo 4). Au microscope, ce minerai phosphaté est constitué de pellets, de « pseudo-oolithes » et de coprolithes phosphatés sertis par un ciment

carbonaté peu abondant. On note également la présence de rares Nummulites et des grains de glauconite verts.

d) Alternance de calcaires argileux gris clair en bancs décimétriques se débitant en plaquettes d'épaisseur millimétriques et de marnes argileuses (épaisseur 3 m).

e) Banc de calcaire à silex blond d'épaisseur 0,20 m.

f) Environ 40 m d'alternance de bancs de calcaire crayeux blanc de 10 à 30 cm d'épaisseur et de marnes argileuses plus ou moins consistantes se débitant en plaquettes d'épaisseur métrique.

g) Bancs de calcaire très dur (1,20 m). L'observation microscopique montre que ces calcaires sont des wackestones biomicritiques contenant des débris de Lamellibranche, Nummulites, Gastéropodes et plaquettes d'Echinodermes.

h) Calcaires noduleux (1 m).

i) Calcaires en bancs métriques contenant des silex noirs occupant, le plus souvent sous forme de lentilles étirées, la partie centrale des bancs (2 m).

j) Niveau de calcaire phosphaté. Au microscope les calcaires de nature micritique montre la présence de Nummulites et de débris de Gastéropodes. La composante phosphatée est représentée par des pellets phosphatés, des pellets partiellement phosphatisés et des pellets à couronne phosphatée.

k) Banc de calcaire blanc de 0,50 m surmonté par un niveau de 2 m d'épaisseur de calcaires très riches en Nummulites de tailles macroscopique (Planche III.1, photo 3 et 4). Dans ce faciès, l'observation microscopique montre que les nummulites sont jointives indiquant le degré de compaction subi par ce faciès et que ce faciès a subi une intense silicification affectant aussi bien la phase de liaison que les espaces intraparticulaires (intranummulites) (Planche III.1, photo 5 et 6).

l) Plusieurs bancs de calcaires blancs grisâtres contenant des niveaux de silex noirs surmontés par une combe marneuse. Les calcaires consistent en des mudstones à débris de fossiles indéterminables (Gastéropodes, Lamellibranches, Nummulites ?) et rares radioles d'oursin. On trouve aussi des faciès wackestone à débris de plaquette d'oursin et rares Nummulites et rares grains phosphatés.

Planche III.1- Aspect macroscopique et microscopique du minerai phosphaté et des nummulites

Photo 1- Couche phosphatée (CP) d'épaisseur d'un mètre environ surmontée par les alternances de calcaire argileux à silex (CS) et de marnes (MA)

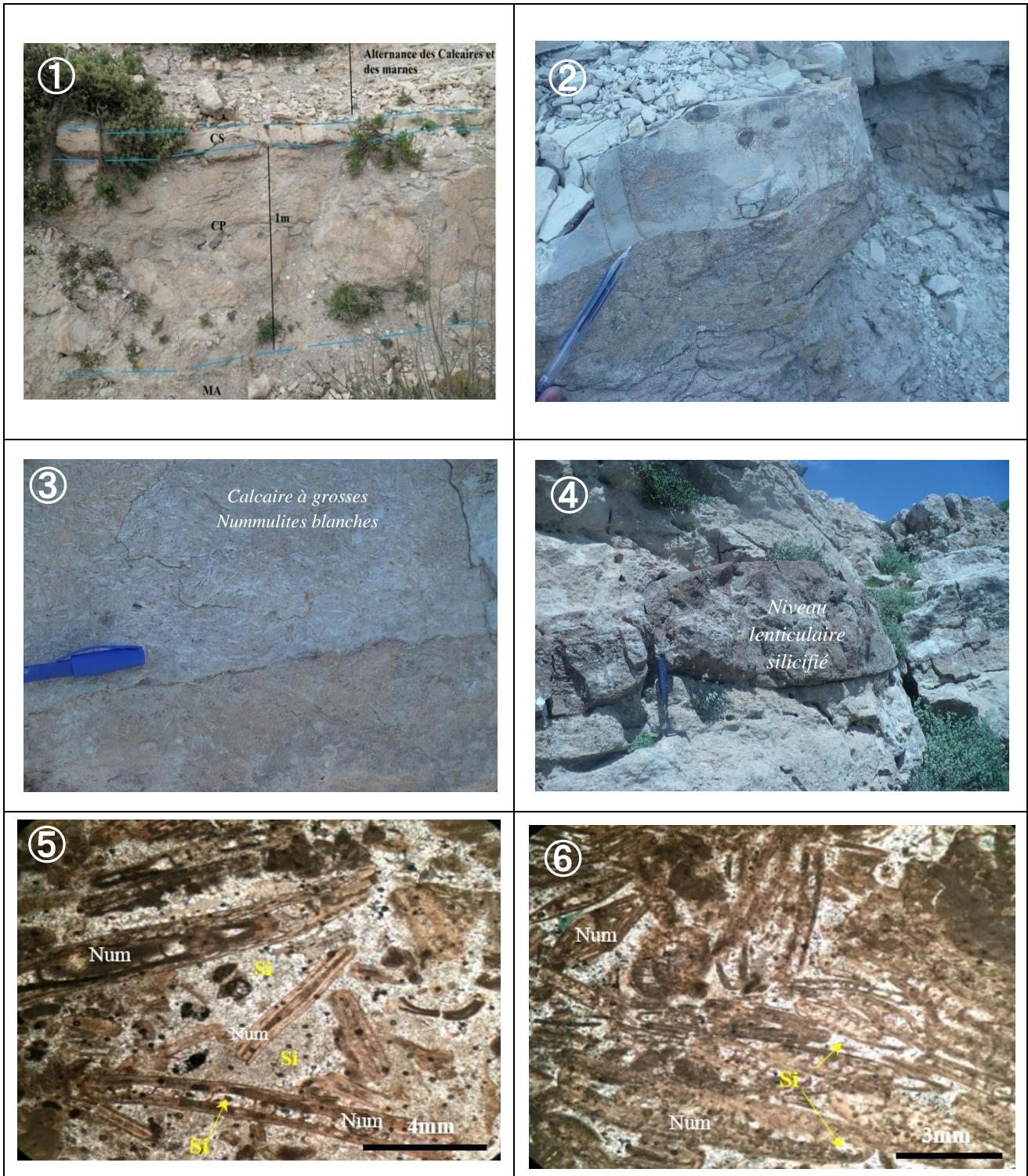
Photo 2- Contact entre la couche de minerai phosphaté et un banc de calcaires argileux à silex. Le contact est parfaitement plat et rectiligne. Aucun signe de ravinement n'a été observé à ce niveau.

Photo 3- Calcaire à grosses Nummulites

Photo 4- Niveau lenticulaire à grosses Nummulites silicifié

Photo 5- Calcaire à Nummulites intensément silicifié.

Photo 6- Calcaire à Nummulites intensément silicifié.



m) Alternances de calcaires à silex et de marnes sur une cinquantaine de mètres constituant le début de l'entablement et correspondant probablement aux calcaires du Lutétien datés par Fleury (1969). Les calcaires ont montré à l'observation microscopique des faciès de type mudstone à rares éléments phosphatés et rares radioles d'oursin avec présence de Foraminifère unisériel et bisériel et des faciès de type wackestone à grainstone à grosses Nummulites.

III.3.2- Pétrographie du minerai phosphaté

A l'échelle de l'échantillon, le minerai phosphaté observé dans le massif du Dyr montre dans l'ensemble un aspect détritique de couleur grisâtre constitué de grains de formes et de tailles hétérogènes allant des tailles inférieures au millimètre aux tailles pouvant dépasser le centimètre (Planche III.2, photo 1 et 2). Les grains peuvent être arrondis émoussés ou anguleux à sub-anguleux, d'autres montrent des formes plus ou moins allongées et cylindriques également émoussées parfois segmentées (Planche III.2, photo 1).

En plus de la couche de minerai phosphaté stratigraphiquement localisée au sommet des marnes paléocènes, il existe au djebel Dyr d'autres horizons phosphatés situés à des niveaux stratigraphiques plus élevés (Yprésien et Lutétien inférieur selon la stratigraphie établie par Fleury, 1969). Ces horizons, moins riches en phosphates, consistent en des calcaires dans lesquels les grains phosphatés sont mêlés aux constituants classiques des roches carbonatées yprésiennes et lutétiennes du Dyr (Planche III.3, photo 1).

Ainsi des calcaires à Foraminifères de type Miliolites de l'Yprésien inférieur sont parfois envahis par des concentrations phosphatées représentées essentiellement par des grains de pellets de type « P₁ » et dans lesquels on a pu noter la forte ressemblance dans la forme et dans la taille des grains phosphatés pelletoidaux et des Foraminifères (Planche III.3, photo 4). Cette ressemblance laisse à penser à une filiation génétique entre les deux types de grains (Foraminifères et pellets) attestée par l'épigénie phosphatée des Miliolites (Planche III.3, photo 6).

Les principaux constituants observés à l'échelle de l'échantillon consistent en des coprolithes, des pellets, des dents de poisson et autres débris osseux ainsi que d'autres grains macroscopiquement indéterminables baignant dans une matrice argileuse ou carbonatée ou encore argilo-carbonatée. Le minerai à matrice argileuse est généralement friable alors que le minerai montrant une phase de liaison carbonatée est plus dur.

A l'échelle microscopique, en plus des constituants identifiés sur échantillon, nous avons également identifié des minéraux silicatés comme la glauconite, le quartz et autres carbonates essentiellement de nature dolomitique.

i- Les coprolithes

Les coprolithes sont des particules formées à partir des déjections des vertébrés et des invertébrés tels que les Sélaciens, les poissons, les crustacés. Ils ont des dimensions plus grandes que celles des pellets, leur taille peut aller jusqu'à plusieurs centimètres. Cependant, en raison de leur origine fécale et de leur forme généralement cylindrique et allongée, ils sont fragiles et se cassent souvent pour former des grains de dimensions et de formes similaires à celles des pellets.

Dans le minerai phosphaté du djebel Dyr les coprolithes sont moins nombreux que les pellets et comme ces derniers ils sont souvent pigmentés par des matières noirâtres probablement de la matière organique. Cependant, dans les coprolithes cette matière organique est souvent disséminée d'une manière irrégulière et ne montre pas, comme dans le cas des pellets, des distributions structurées ou zonées (Planche III.2, photo 3 et Planche III.3, photo 3).

Les coprolithes du minerai phosphaté du djebel Dyr montrent souvent des microfractures de quelques dizaines de microns d'ouverture apparemment remplies de minéraux phosphatés (Apatite ?) probablement issue du remaniement des apatites constitutives des coprolithes (Planche III.3, photo 1).

ii- Les pellets

Les pellets constituent avec les coprolithes les grains les plus abondants du minerai phosphaté du djebel Dyr. Il s'agit de grains phosphatés de forme arrondie et de taille variant entre 100 et 500 microns mais toujours inférieures à celles des coprolithes. Ils montrent dans la plupart des échantillons un classement moyen à bon (Planche III.2, photo 4). Leur structure interne est variable. Les pellets les plus nombreux ne présentent aucune structure interne particulière. Cependant, certains pellets montrent une fine pellicule ou gaine d'épaisseur micrométrique, généralement de couleur brun jaunâtre claire, entourant la masse globuleuse généralement plus sombre des pellets (Planche III.2, photo 4). Selon leur couleur et les modalités de répartition de la matière noirâtre (probablement de la matière organique) incluse dans les pellets, nous avons pu distinguer plusieurs types de pellets (Planche III.2, photo 4) :

- Pellets de type « P₁ » : ce sont des pellets de forme arrondie et de taille pouvant aller jusqu'à 500 microns montrant des couleurs claires brunes jaunâtres. Ce type de pellet montre parfois une fine pellicule de couleur plus claire autour des grains et de faibles concentrations de matières noirâtres aléatoirement diffusées dans les grains.
- Pellets de type « P₂ » : ce sont des pellets également de forme arrondie et de taille pouvant aller jusqu'à 500 microns. Ils se distinguent des pellets du type « P₁ » par leur couleur plus sombre induite par les matières noirâtres en quantités plus élevées et montrant une distribution plus homogène.
- Pellets de type « P » : ce type présentent une combinaison des caractères des deux premiers types. Ils possèdent la même forme et le même ordre de grandeur de taille. Ils se distinguent cependant par la distribution des matières noirâtres qui induisent des zones brunes jaunâtres moins pourvues et des zones plus sombres plus pourvues de matières noirâtres. La distribution concentrique de ces dernières forme parfois une alternance de zones claires et de zones sombres donnant ainsi au pellet une structure interne qui ressemble beaucoup à celle des oolithes. Cependant et contrairement aux oolithes ces pellets zonés sont dépourvus de nucléus.

Il est aussi intéressant de noter que ces différents types de pellets sont plus ou moins bien calibrés et montrent entre eux un classement moyen. Cette homogénéité de forme et de taille peut être attribuée soit à une origine commune de l'ensemble de ces pellets et dont l'origine fécale est la plus acceptée auquel cas ils seraient produits par des vertébrés et/ou invertébrés du même type et de dimensions, soit à un milieu de dépôt caractérisé par des conditions hydrodynamiques plus ou moins agitées qui sont loin d'être celles des environnements calmes et profonds.

iii- Les fragments organiques

Il s'agit principalement de débris osseux fréquents dans le minerai phosphaté avec des dimensions variables dépassant parfois le centimètre. Au microscope, ces fragments osseux montrent souvent une structure interne filamenteuse et sont parfois brisés et cassés lorsqu'ils présentent des formes plus ou moins allongées (Planche III.2, photo 4 et planche III.3, photo 1 et 2). Ce caractère détritique que montrent les fragments osseux est probablement dû soit à leur nature originelle fragile soit à un dépôt dans un environnement marin plus ou moins agité.

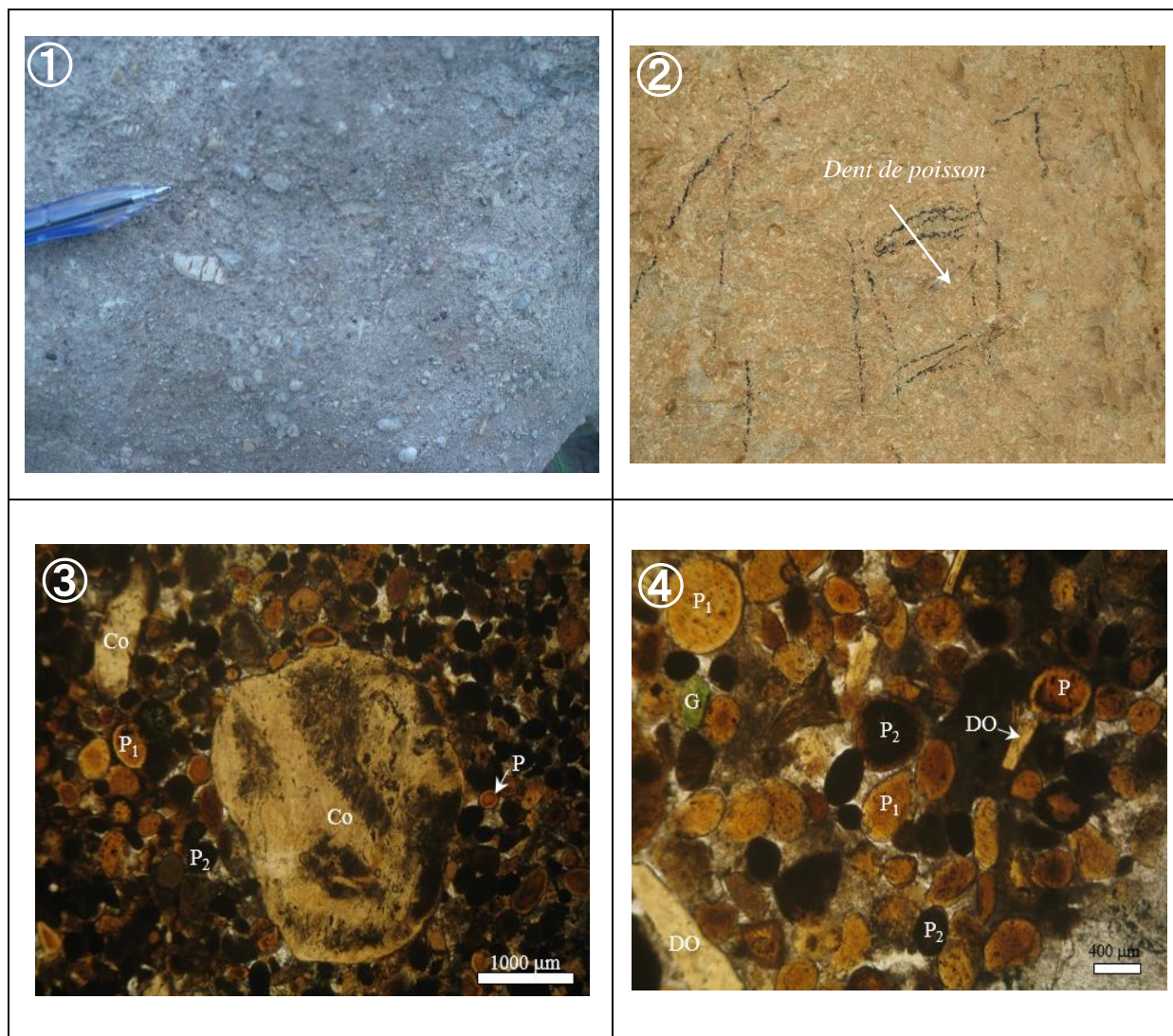
Planche III.2- Aspects macroscopiques et microscopiques du minerai phosphaté de Dj. Dyr

Photo 1-Minerai de phosphate de couleur grise montrant un aspect détritique avec des grains de formes et de tailles hétérogènes allant de l'infamillimètre au centimètre.

Photo 2-Dent de poisson dans un calcaire phosphaté

Photo 3-Minerai phosphate « pelletoidal » avec plusieurs types de pellets (« P », « P₁ » et « P₂ ») selon leur couleur et la répartition de la matière organique noirâtre. Présence de coprolithes en section longitudinale et en section transversale

Photo 4-Minerai phosphaté « pelletoidal » avec plusieurs types de pellets selon leur couleur et la répartition de la matière organique noirâtre. Type (P₁) de couleur brun jaunâtre clair, type (P₂) brun sombre. Certains pellets montrent la présence d'une pellicule entourant la masse globuleuse centrale. Cette dernière présente selon la distribution de la matière organique des couleurs du type (P₁) ou du type (P₂). Noter la présence de débris osseux (DO) et de glauconite verdâtre (G).



Parmi les particules biogènes qu'on a pu également observé dans le minerai phosphaté du djebel Dyr on peut citer les dents de Sélacien ou de poisson (Planche III.2, photo 2). Ils ne sont pas nombreux contrairement à ce qui a été observé dans les minerai phosphatés du djebel Kouif et de djebel Onk (Lemzaouda et al, 2017 ; Kechiched, 2011) et leur taille peut parfois dépasser le centimètre.

Le minerai pauvre représenté par les calcaires phosphatés contient une composante biogène beaucoup plus liée au dépôt carbonaté qu'aux concentrations phosphatées. Il s'agit principalement de Foraminifères, Nummulites, Gastéropodes, Radiolaires, Echinodermes, Lamellibranches ainsi que des nombreux débris squelettiques issus de cette microfaune marine (Planche III.3, photo 1 et 4). Ces derniers et au vu de leur fréquence et de leur dimension militent pour un environnement de dépôt marin épisodiquement plus ou moins agité.

iv- Les constituants non phosphatés

Les principaux constituants non phosphatés qu'on a pu identifier dans le minerai phosphaté du djebel Dyr sont représentés par de la dolomite et de la glauconite. La dolomite se présente en rhomboèdres le plus souvent zonés d'une centaine de microns (Planche III.3, photo 5). Le cœur des rhomboèdres est généralement sombre alors que la périphérie est plus claire. La glauconite, reconnaissable à sa « couleur » verdâtre se présente en grains peu fréquents, dispersés dans le minerai phosphaté avec des dimensions ne dépassant pas 200 microns en moyenne. La présence de ce minéral atteste de l'origine marine incontestable du minerai phosphaté du djebel Dyr.

Nous signalons également la présence de minerai phosphaté riche en quartz sous forme de grains détritiques de taille ne dépassant pas la centaine de microns.

v- La phase de liaison

La phase de liaison ou « exogangue » du minerai phosphaté du djebel Dyr est essentiellement de nature carbonatée pour le minerai dur et argileuse pour le minerai tendre. Les boues phosphatées sont quasiment absentes et les ciments siliceux n'ont été observés que dans des calcaires contenant un certain pourcentage de grains phosphatés.

Planche III.3- Aspects microscopiques du minerai phosphaté du Dj. Dyr

Photo 1- Calcaire phosphaté contenant des Nummulites (Nu), des pellets du type « P », « P₁ » et « P₂ », des coprolithes (Co) et des débris osseux parfois brisés

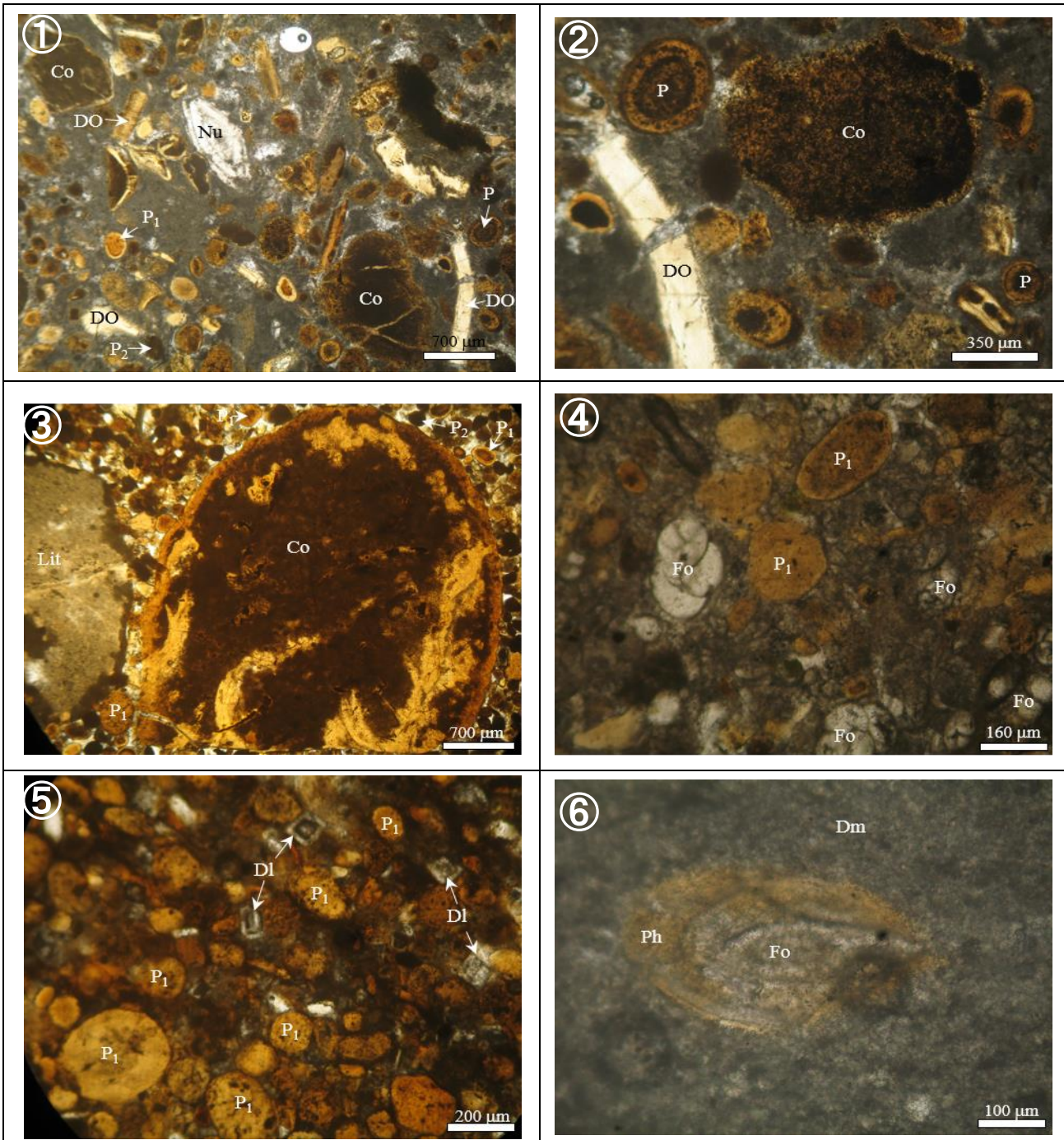
Photo 2- Calcaire contenant des grains phosphatés qui montrent une distribution des matières noirâtres (matière organique ?) qui confère parfois à ces grains une structure interne concentrique zonée similaire à celle des oolithes (P). Ces matières noirâtres sont parfois concentrées au centre des grains et dans d'autres cas elles sont diffuses d'une façon aléatoire dans certains coprolithes (Co). Les fragments osseux (DO) sont parfois brisés.

Photo 3- Minerai phosphaté pelletoidal (P₁, P₂) contenant également des grains coprolithiques (Co) et des lithoclastes (Lit).

Photo 4- Calcaire phosphaté à Foraminifère. Noter la ressemblance dans la forme et la taille des grains phosphatés (P₁ et P₂) et des Foraminifères (Fo).

Photo 5- Minerai phosphaté contenant des cristaux de dolomie zonée (Dl)

Photo 6- Test de Foraminifère (Fo) en voie d'épigénie phosphatée (Ph) et de dolomitisation.



III.3.3- Conclusion

Les concentrations phosphatées du djebel Dyr se présentent sous forme de couche d'épaisseur métrique de minerai riche localisée au sommet des marnes paléocènes et d'horizons d'épaisseur centimétrique à décimétrique de calcaires phosphatés situés à des niveaux stratigraphiques plus élevés (Yprésien inférieur). L'ensemble de ces phosphates s'est déposé dans un environnement marin peu profond périodiquement agité attesté par la présence de glauconite, de dents de poissons, de débris biogènes (débris osseux et fragments de fossiles) et par une microfaune marine représentée essentiellement par des Foraminifères, Nummulites, Gastéropodes, Lamellibranches, Echinodermes, Radiolaires....

Les principaux faciès pétrographiques identifiés sont représentés par des packstones, des wackestones et des mudstones biomicritiques. Les grainstones sont beaucoup moins abondants. Dans ces faciès généralement bioclastiques, les débris squelettiques plus moins nombreux militent pour un environnement relativement agité épisodiquement. Les faciès mudstones traduisent les périodes calmes et d'absence d'agitation.

Sur le plan minéralogique et en l'absence de moyens analytiques nous ne pouvons que reprendre ce qui a été identifié par nos prédécesseurs sur l'ensemble des phosphates de la région de Tébessa. Ces derniers sont principalement constitués par des apatites du type « Francolite » (parfois dénommée Carbonate-Fluorapatite ou « CAF ») dans laquelle jusqu'à 10 pour cent des ions carbonates peuvent remplacer les ions phosphates pour donner la formule générale : $[Ca_{10}(PO_4, CO_3)_6F_{2-3}]$.

Le minerai phosphaté du djebel Dyr, généralement de couleur grisâtre, présente un aspect détritique. Il est composé par une fraction phosphatée biogène dominante et une fraction non phosphatée. Les deux fractions étant serties par une phase de liaison argileuse et/ou carbonatée. La fraction phosphatée est principalement constituée par des pellets, des coprolithes, des débris osseux, des dents de poissons alors que la fraction non phosphatée est représentée essentiellement par la dolomite et la glauconite.

Bien que des indices d'épigénie phosphatée de certains Foraminifères aient été observés, il reste cependant admis que l'ensemble des pellets et des coprolithes soient d'origine fécale. Les coprolithes, de tailles plus grandes et de formes généralement cylindriques et allongées se prêtant facilement à la cassure, peuvent probablement également être à l'origine de certains pellets de taille plus réduites. La nature fracturée, brisée et cassée de certains coprolithes milite pour cette hypothèse et traduit des conditions de dépôts caractérisées par la présence de courants ayant généré des conditions hydrodynamiques plus ou moins agitées.

III.4- Analyse granulométrique du minerai phosphaté

L'analyse granulométrique du minerai phosphaté s'est basée sur neuf (09) échantillons répartis sur le flanc SE, le flanc NW et la fermeture périclinale du synclinal du Dyr (Fig.III.6). Cette disposition permet, en plus d'une caractérisation intrinsèque ponctuelle localisée des caractères granulométriques du minerai phosphaté, elle permet aussi de suivre l'évolution spatiale de ces mêmes paramètres. Nous supposons évidemment au vu de l'interprétation de la structure synclinale du massif (Fig.II.8) que les échantillons, notamment ceux de la couche principale située au sommet des marnes paléocènes, sont équivalents à ceux du flanc NW.

Ainsi les échantillons utilisés dans l'analyse granulométrique sont Dy.3 et Dy.4 pour le flanc SE, Dy.8, Dy.9, Dy.10 et Dy.14 pour la fermeture périclinale et Dy.17, Dy.18 et Dy.19 pour le flanc NW. Nous tenons cependant à préciser que cette répartition et subdivision descriptive des échantillons n'a pas pour objectif d'étudier l'influence de la structure du massif sur les caractères granulométriques du minerai phosphaté puisque la genèse de ce dernier est syn-sédimentaire. La phosphatogenèse du minerai du massif du Dyr a eu lieu pendant la période allant de la fin du Paléocène au début de l'Eocène. La couche principale est probablement du Thanétien (Fleury, 1969). Par contre la structuration du massif du Dyr en synclinal est liée à la phase atlasique considérée en Algérie comme post-éocène (post-lutétienne) (Laffitte, 1938, Dubourdiou, 1956). Elle est donc clairement postérieure à la période de phosphatogenèse et ne pourrait avoir influencé les caractères granulométriques du minerai phosphaté. Ses effets auraient tout au moins générer une fracturation au sein des grains et des roches phosphatées. Cette répartition des échantillons sur les deux flancs et la fermeture est donc essentiellement d'ordre spatial montrant la disposition géographique des échantillons sur l'ensemble de la structure du massif. En dépliant la structure synclinale du massif, le lecteur pourrait se forger une idée sur l'espacement des échantillons tels qu'ils se sont déposés pendant la période de phosphatogenèse.

III.4.1- Analyse des courbes des fréquences

Les résultats des analyses granulométriques illustrées à travers les histogrammes et courbes de fréquences montrent que le minerai phosphaté du massif du Dyr est relativement grossier présentant des maximums du côté des grains dépassant 1,25 mm (Fig.III.6). Les fractions grossières de la classe des arénites et celles des rudites constituent en moyenne plus des trois quarts (76,31 %) du poids de chaque échantillon (Tab.III.4).

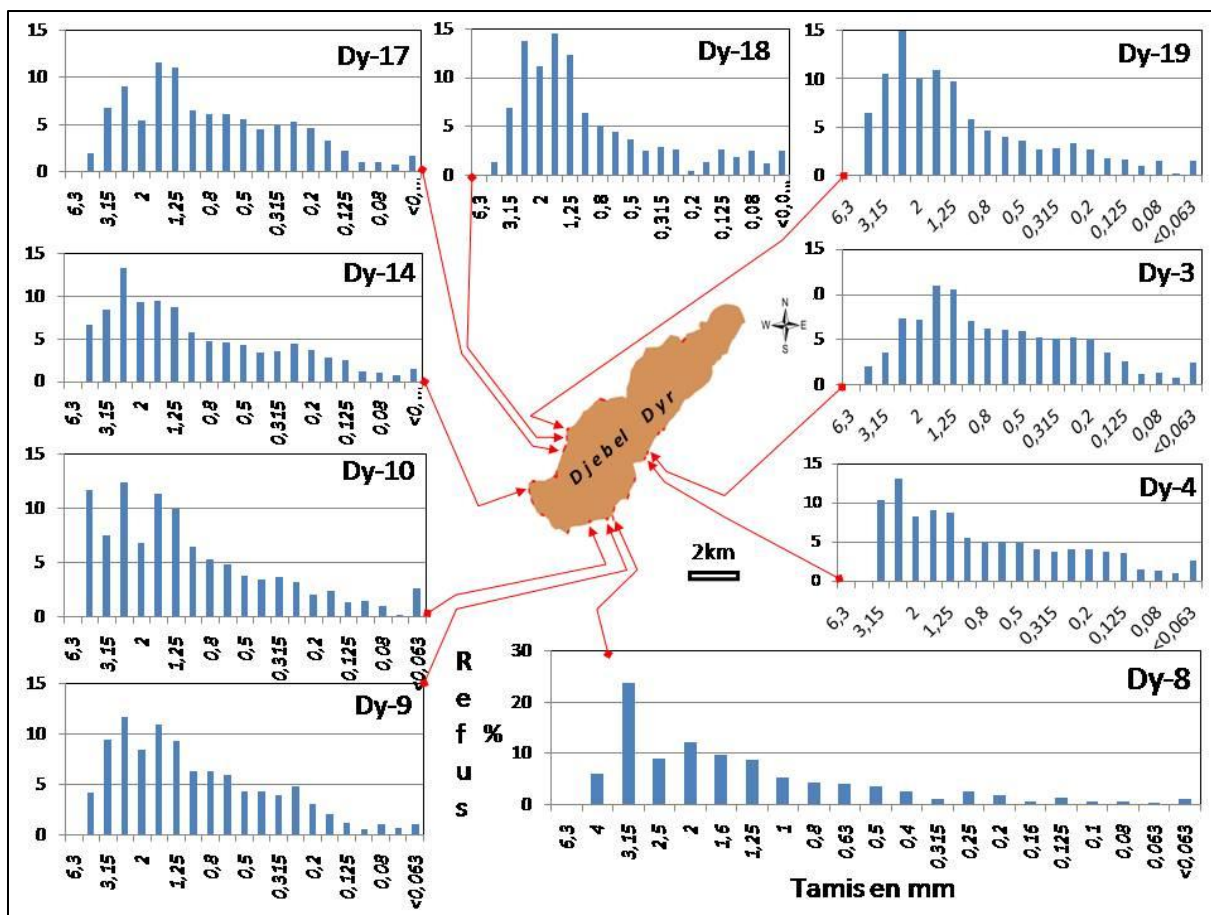


Fig.III.6-Histogrammes des fréquences des différents échantillons phosphatés

Echantillon	Fraction des Rudites (> à 2 mm)	Fraction des Arénites (entre 2 mm et 63 microns)		
		Fraction grossière (entre 2 mm et 500 µm)	Fraction moyenne (entre 500 et 250 µm)	Fraction fine (entre 250 et 63µm)
Dy-3	20,21 %	46,99 %	15,65 %	17,16 %
Dy-4	31,78 %	38,27 %	12,02 %	17,93 %
Dy-8	51,18 %	35,91 %	6,27 %	6,64 %
Dy-9	33,86 %	43,24 %	13,03 %	9,87 %
Dy-10	38,14 %	41,16 %	10,13 %	10,57 %
Dy-14	37,69 %	37,45 %	11,42 %	13,44 %
Dy-17	23,38 %	47,04 %	14,79 %	14,79 %
Dy-18	33,08 %	46,55 %	8,03 %	12,33 %
Dy-19	42,09 %	38,82 %	8,81 %	10,28 %
Moyenne	34,60 %	41,71 %	11,13 %	12,56

Tab.III.4- Pourcentages pondéraux relatifs des différentes fractions constitutives du minerai phosphaté du djebel Dyr

La fraction grossière des arénites étant la plus dominante avec en moyenne 41,71 % du poids de chaque échantillon suivie par la fraction des rudites avec 34,60 % en poids de chaque échantillon. Seuls les deux échantillons Dy.8 et Dy.19 montrent une dominance de la fraction des rudites avec respectivement 51,18 % et 42,09 % en poids de chaque échantillon contre respectivement 35,91 % et 38,82 % en poids pour la fraction grossière des arénites (Tab.III.4).

La fraction restante du sédiment phosphaté, soit en moyenne moins de 25 % en poids de l'échantillon, est partagée approximativement dans les mêmes proportions entre une fraction moyenne (entre 500 et 250 μm) et une fraction fine (entre 250 et 63 μm) des arénites.

Au vu de ces résultats, il apparaît que le minerai phosphaté du djebel Dyr est représenté par des phosphates détritiques grossiers dont la granulométrie est dominée par la classe grossière des arénites (entre 2 mm et 500 μm) et par la classe des rudites (> à 2 mm). Ce sont donc des phosphates qu'on pourrait qualifier sur le plan granulométrique de mélange de « sables » grossiers et « graviers » phosphatés. Cette répartition granulométrique a d'ailleurs déjà été pressentie dans la section relative à l'étude pétrographique du minerai phosphaté où nous avons montré que les phosphates du djebel Dyr sont principalement pelletoidaux. La composante pelletoidale correspondrait donc à la fraction grossière des arénites alors que la fraction appartenant à la classe des rudites serait essentiellement composée de coprolithes.

III.4.2- Analyse des paramètres granulométriques déduits des courbes cumulatives

Les données des analyses granulométriques effectuées sur les neuf (09) échantillons de minerai phosphaté du djebel Dyr nous ont permis de tracer les courbes cumulatives (Fig.III.7). Ces courbes montrent une granulométrie étalée sur l'intervalle compris entre 6,3 mm et 63 microns et que toutes les classes granulométriques incluses dans cet intervalle sont effectivement pourvues de sédiments phosphatés traduisant une granulométrie continue. Ces différentes courbes sont relativement plus redressées dans les plages des fractions grossières traduisant davantage de sédiments grossiers et moins redressées dans les plages des fractions fines.

C'est à partir de ces courbes cumulatives que nous avons déduits les paramètres phi (ϕ) nécessaires pour le calcul des indices granulométriques selon la méthode de Folk et Ward (1957) dont un bref aperçu a été présenté dans la section III.2 (Méthodes analytiques). Les indices ainsi calculés sont récapitulés dans le tableau III.5.

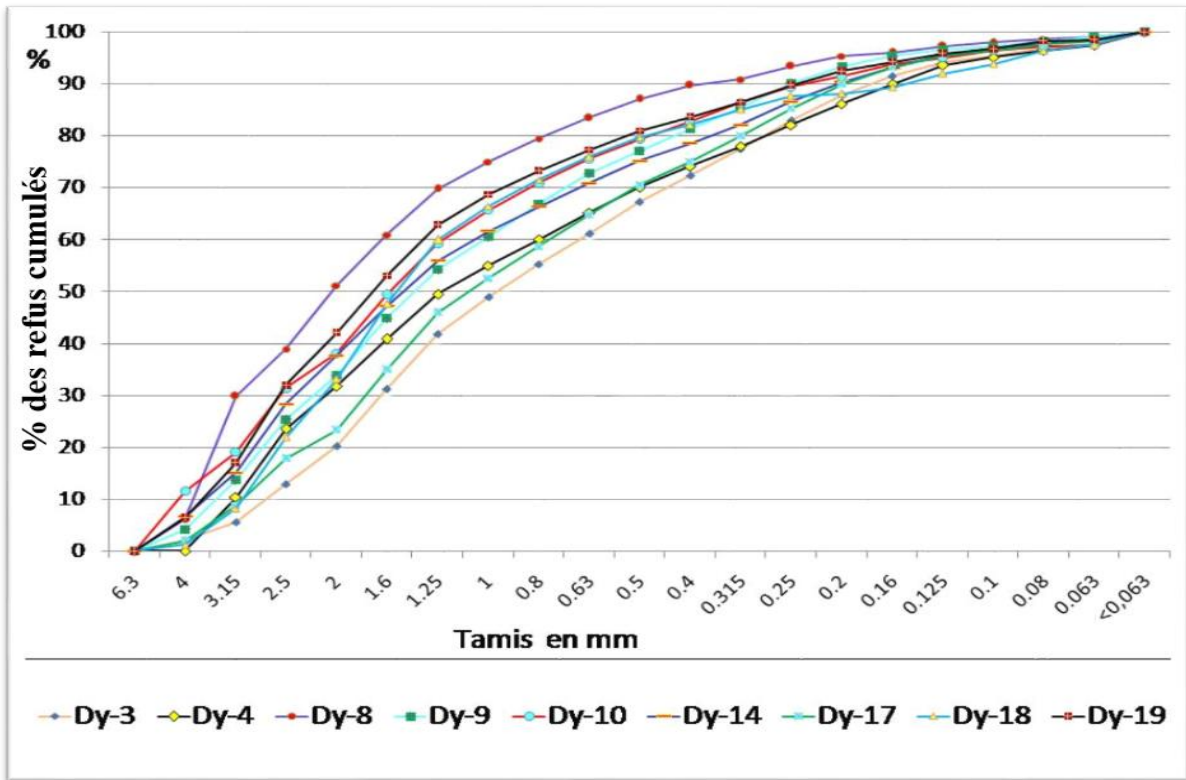


Fig. III.7-Courbes cumulatives des échantillons phosphatés du Dyr.

Paramètres échantillons	Grain moyen (Mz)	Sorting index (σ)	Skewness (Ski)	Kurtosis (KG)
Dy- 3	-0,03 ϕ 1,02mm	1,55 Class. Médiocre	+0,25 A.P.T	4,92 C.E.L
Dy- 4	0,15 ϕ 0,90mm	1,66 Class. Médiocre	+0,33 F.A.P.T	5,27 C.E.L
Dy- 8	-0,75 ϕ 1,68mm	1,26 Class. Médiocre	+0,43 F.A.P.T	2,90 C.T.L
Dy- 9	-0,17 ϕ 1,12mm	1,49 Class. Médiocre	+0,34 F.A.P.T	4,10 C.E.L
Dy-10	-0,27 ϕ 1,20mm	1,45 Class. Médiocre	+0,26 A.P.T	3,35 C.E.L
Dy-14	-0,12 ϕ 1,08mm	1,63 Class. Médiocre	+0,35 F.A.P.T	5,07 C.E.L
Dy-17	0,20 ϕ 0,87 mm	1,55 Class. Médiocre	+0,28 A.P.T	4,43 C.E.L
Dy-18	-0,13 ϕ 1,10mm	1,51 Class. Médiocre	+0,42 F.A.P.T	3,69 C.E.L
Dy-19	-0,37 ϕ 1,29 mm	1,50 Class. Médiocre	+0,44 F.A.P.T	3,84 C.E.L

Tab.III.5- Tableau récapitulatif des quatre indices granulométriques du minerai phosphaté du djebel Dyr (F.A.P.T: Forte Asymétrie vers les petites tailles, A.P.T: Asymétrie vers les petites tailles, C.T.L: Courbe Très Leptocurtique ,C.E.L: Courbe Extrêmement Leptocurtique).

A la lumière de ces résultats il apparait que les phosphates du djebel Dyr sont caractérisés par des valeurs de « Mz » (grain moyen) comprises entre $-0,75 \phi$ (1,68 mm) et $0,20 \phi$ (0,87 mm). Ces valeurs traduisent, selon l'échelle de Wentworth (1922), une granulométrie principalement représentée par des sables grossiers (Fig.III.8).

Phi	Grade		Mm.	Microns
-8	Boulder	G R A V E L	256	256,000
-6	Cobble			
-2	Pebble			
-1	Granule			
0	Very Coarse			
0	Coarse	S A N D	1	1,000
1	Medium			
2	Fine			
3	Very Fine			
4	Coarse			
5	Medium	S I L T	0.0313	31.3
6	Fine			
7	Very Fine			
8	Clay			

Fig.III.8- Nomenclature des sédiments détritiques selon une classification granulométrique en échelle millimétrique et ses correspondances en échelle des « phi » de Wentworth (1922).

Les valeurs de « l'Inclusive Graphic Standard Deviation » (σ_i) ou « sorting Index » qui exprime le classement du sédiment sont comprises entre 1,26 et 1,666 traduisant un classement médiocre pour l'ensemble des échantillons analysés (Tab.III.1 et III.5). Ce type de classement peut être attribué au mélange des sédiments arénitiques grossiers représentés principalement par les pellets phosphatés et une fraction de sédiment plus grossier de la classe des rudites composée principalement par des coprolithes. Ce mélange de sédiments de granulométrie relativement différente traduit des conditions hydrodynamiques plus ou moins agitées ayant influencé le processus de sédimentation des particules phosphatées.

Les valeurs de l'« inclusive skewness » (S_{ki}) sont comprises entre +0,25 et +0,44, elles traduisent des distributions granulométriques caractérisées par de fortes à très fortes

asymétriques vers les petites tailles (Tab.III.5). Les valeurs du Kurtosis sont comprises entre 2,90 et 5,27, elles traduisent des distributions granulométriques très leptocurtiques ($K_G = 1,50$ à 3,00) à extrêmement leptocurtiques ($K_G > 3,00$).

III.4.3- Conclusion

L'analyse granulométrique du minerai phosphaté du djebel Dyr a permis de montrer qu'il s'agit de minerai détritique caractérisé par une granulométrie relativement grossière. Il est composé d'un mélange de sédiments de la classe des rudites (taille des grains supérieure à 2 mm) principalement composés de coprolithes et de sédiments de la classe des arénites (taille des grains comprises entre 0,063 et 2 mm) essentiellement composés de pellets phosphatés. La classe des rudites représente un peu moins de 35 % du poids du sédiment alors que la classe des arénites représente un peu plus de 65 % en poids du sédiment. La classe des arénites est dominée par la partie grossière de cette classe (taille des grains supérieure à 500 microns et inférieure à 2 mm) qui représente environ 42 % du poids du sédiment. Les arénites moyennes et fines représentent moins de 25 % en poids du sédiment.

Cette distribution granulométrique des constituants du minerai phosphaté du djebel Dyr est corroborée par les paramètres granulométriques déduits des courbes cumulatives. Les valeurs du grain moyen (M_z) sont comprises entre 0,87 et 1,68 mm traduisant un sédiment grossier dominé par la classe des arénites. L'« Inclusive Graphic Standard Deviation » ou « Sorting Index » (σ_i) dont les valeurs sont comprises entre 1,26 et 1,55 traduisant un classement médiocre pour l'ensemble des minerais analysés. Ce classement qui reflète le mélange de sédiments de granulométries différentes et pauvres en sédiments fins pourrait résulter d'une sédimentation dans un environnement de dépôt caractérisé par des conditions hydrodynamiques relativement agitées marquées par la présence de courants. Les valeurs de l'« Inclusive Skewness », comprises entre +0,25 et +0,44, indiquent des distributions granulométriques asymétriques vers les petites tailles comme c'est illustré sur les histogrammes et les courbes de fréquence. Les valeurs du Kurtosis, comprises entre 2,90 et 5,27, montrent qu'il s'agit de distributions granulométriques très leptocurtiques à extrêmement leptocurtiques.



Conclusion générale

Conclusion générale

Le massif du Dyr est constitué d'une épaisse série sédimentaire composée d'argiles, de marnes et roches carbonatées dont l'âge va du Maestrichtien au Lutétien inférieur dans laquelle s'intercalent des horizons phosphatés dans l'intervalle fini-Paléocène-Yprésien. Cette série a été plissée en un synclinal perché faisant partie de l'ensemble des plis de direction NE-SW généré par la phase atlasique à l'Eocène supérieur.

Les horizons phosphatés sont représentés par une couche principale de minerai phosphaté d'épaisseur métrique localisée au sommet des marnes paléocènes et par d'autres horizons d'épaisseur moins importante (décimétrique) de calcaires phosphatés situés à des niveaux stratigraphiques plus élevés (Yprésiens). La couche de minerai affleure d'une façon discontinue tout autour de l'entablement synclinal matérialisé par les roches carbonatées à silex de l'Yprésien-Lutétien inférieur, elle est souvent recouverte par les éboulis de pente.

Les calcaires et les marno-calcaires de l'Yprésien-Lutétien inférieur qui surmontent la couche de minerai et dans lesquels s'intercalent les horizons de calcaires phosphatés correspondent à dépôts de plate-forme. Ils renferment une microfaune essentiellement benthique matérialisée par des Foraminifères, Nummulites, Gastéropodes, Lamellibranches, Echinodermes, Radiolaires. Souvent cette microfaune se présente sous forme de débris traduisant un environnement de dépôt caractérisé par des conditions hydrodynamiques relativement agitées. Le minerai phosphaté est de nature détritique composé de constituants biogènes et de constituants non phosphatés. Les premiers sont représentés par des pellets de différents types parfois zonés donnant l'aspect d'« oolithes » sans nucléus, de coprolithes, de débris osseux et de dents de poissons. Les seconds consistent principalement en de la dolomite zonée et de la glauconite. L'ensemble de ces constituants se trouve dans une « exogangue » argileuse et/ou carbonatée, ils traduisent un dépôt des sédiments phosphatés dans un environnement marin incontestable.

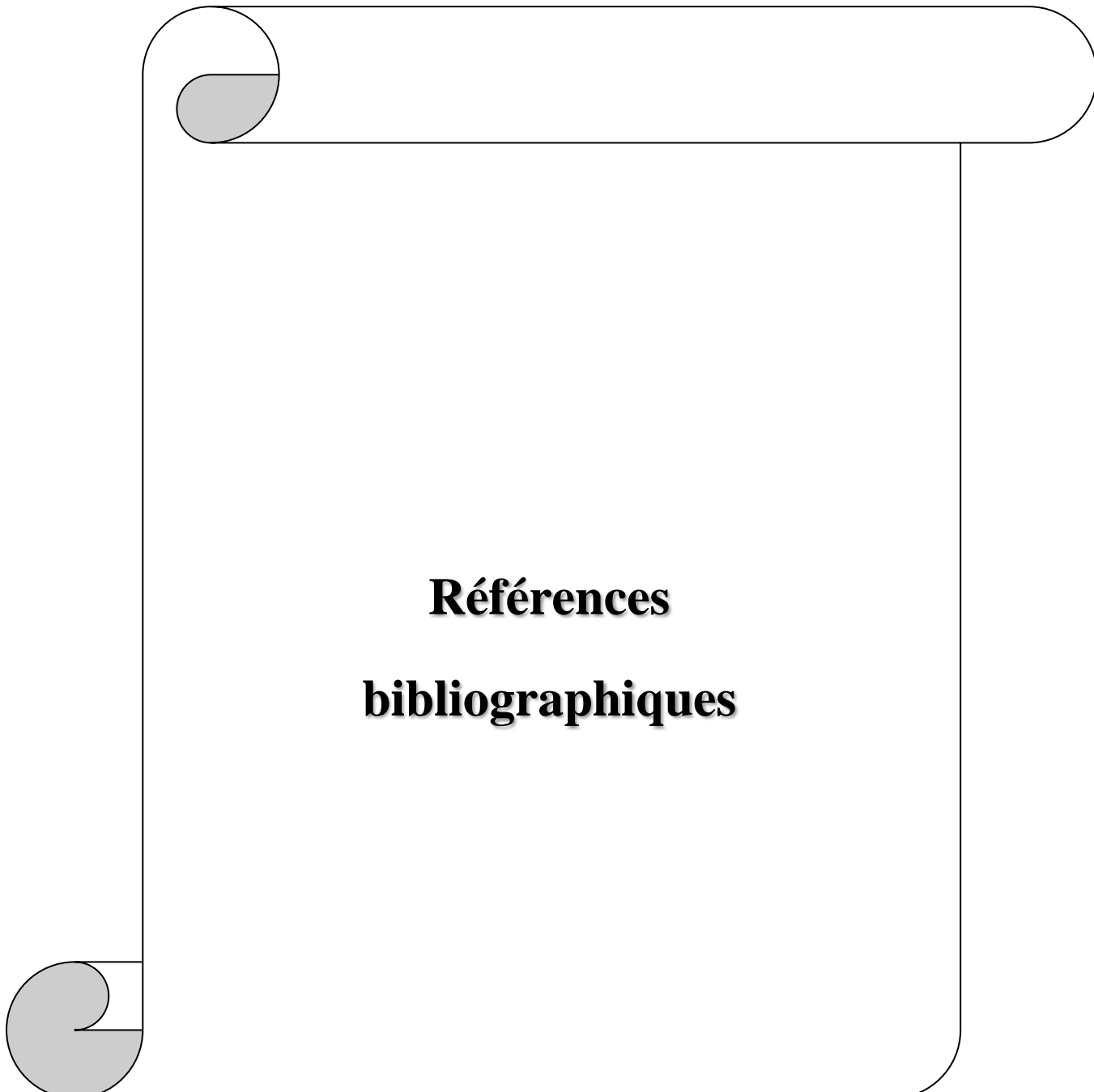
L'analyse granulométrique a montré qu'il s'agit d'un minerai « grossier » composé par des sédiments de la classe des arénites et d'autres de la classe des rudites. Cette dernière avec la fraction grossière (>500 microns) de la classe des arénites représentent plus de 75 % en poids du sédiment. Les 25 % restants sont constitués, à parts approximativement égales, par des sédiments de la classe des arénites moyennes (taille des grains comprise entre 500 et 250 microns) et des sédiments de la classe des arénites fines (taille des grains inférieure à 250 microns). La composante à rudites et arénites grossières est essentiellement composée de

coprolithes et de « grosses » pellets phosphatés alors que la composante à arénites moyenne et fine est composée de pellets et autres constituants non phosphatés.

Les courbes granulométriques cumulatives ont permis de montrer qu'il s'agit de minerai à granulométrie étalée et continue. Toutes les fractions comprises entre 63 microns et 6.5 mm sont effectivement représentées.

Les quatre indices granulométriques déduits de ces courbes cumulatives selon la méthode de Folk et Ward (1957) ont confirmé les caractères relatifs à la granulométrie et à l'environnement de dépôt de ces sédiments phosphatés déduits de l'analyse pétrographique de ces minerais. Le grain moyen « Mz », avec des valeurs comprises entre 0,87 et 1,68 mm ($0,20 \phi$ et $-0,75 \phi$), traduit selon l'échelle de Wentworth (1922) la présence d'un sédiment dominé par des fractions grossières de la classe des sables grossiers et des graviers. L'absence relative de la fraction fine à très fine implique un environnement de dépôt relativement agité. Les valeurs de l'« Inclusive Graphic Standard Deviation » ou « Sorting Index » « σ_i » sont comprises entre 1,26 et 1,55, elles sont descriptives d'un sédiment phosphaté caractérisé par un classement médiocre. Ce classement reflète le mélange de sédiments à granulométrie différente, mais dans l'ensemble grossière, résultant du brassage sous l'action de courants dans un environnement de dépôt plus ou moins agité. Les valeurs de l'« Inclusive Skewness » « S_{ki} » sont comprises entre +0,25 et +0,44, elles traduisent des distributions granulométriques asymétriques à forte à très forte asymétrie vers les petites tailles. Le « Kurtosis » « K_G » présente des valeurs assez élevées (2,90 à 5,27) traduisant des distributions granulométriques leptocurtiques à extrêmement leptocurtiques.

L'approche combinant deux volets complémentaires relatifs à l'étude pétrographique et l'analyse granulométrique du minerai phosphaté du djebel Dyr a permis d'apporter des données qui ont permis de mieux les caractériser. Leurs localisations lithostratigraphiques sont plus ou moins circonscrites, les proportions relatives des différents constituants sont précisées et les caractères granulométriques sont définis. L'ensemble de ces données a permis de préciser les conditions hydrodynamiques de l'environnement de dépôt de ces sédiments phosphatés et les données relatives à la pétrographie et la granulométrie sont d'un apport fort utile pour l'adaptation des procédés de traitement de ces minerais phosphatés.



**Références
bibliographiques**

Références Bibliographiques

- Beghoul M. (1974) :** Etude géologique de la région des Hamimat (Sud - Est Constantinois). Application à la recherche pétrolière dans les confins algéro-tunisiens. Thèse Dr.-Ing, Univ. Pierre et Marie Curie (Paris VI) ,140 p.
- Blès J.-L. (1969) :** Contribution à l'étude des déformations cassantes de la feuille de Morsott (Sud-Est constantinois, Algérie). Les microfractures et leurs relations avec les failles et les plis. Publication du Service de la Carte géologique de l'Algérie, N.S., Bull. n°39, pp. 7-17.
- Blès J.-L. et Fleury J.-J., (1970) :** Carte géologique au 1/50 000 de Morsott avec notice explicative. Alger, Service Géologique de l'Algérie.
- Blès J.-L. et Fleury J.-J. (1970) :** Notice explicative de la carte géologique du Morsott (178). Service géologique de l'Algérie Alger, 36 pages.
- Boggs S. Jr. (2009) :** Petrology of sedimentary rocks. Cambridge University Press, Second Edition, 596 pages.
- Bouzenoune A. (1993) :** Minéralisations périadiapirique de l'Aptien calcaire : les carbonates de fer du gisement hématitique de l'Ouenza (Algérie orientale). Thèse Doct, d'Univ. Paris IV.
- Dubourdiou G. (1956) :** Etude géologique de la région de l'Ouenza (confins algéro-tunisiens). Thèse des Sciences, Paris, Publications du Service de la Carte Géologique de l'Algérie, Bulletin N° 10, Vol. 1, 659 p.
- Dubourdiou G. et Durozoy G. (1950) :** Observation tectonique dans les environs de Tébessa et de l'Ouenza (Algérie) Bull .serv. Géol. France 5eme série, 1, XX.p, 257,266.
- Dunham, R.-L. (1962):-** Classification of carbonate rocks according to depositional texture .in Classification of carbonate rocks. Symposium Amer. Assc. petr. Géol. 1962.
- Durand Delga M. et Fontboté L. (1980)-** Le cadre structural de la Méditerranée occidentale, in Géologie des chaînes alpines issues de la Téthys, edited by J. Aubouin, J. Debelmas, M. Latreille, Colloque no 5, 26° Congrès géologique international, Paris, in : Mém. BRGM, pp. 67-85.
- Durozoy G. (1952) :** Etude hydrogéologique du synclinal de l'Ain Dalaa, données sur l'hydrogéologie Algérienne, Tome II, XIX^e Congrès Geologique International, Alger, pp. 130 – 143.
- Fleury J.-J. (1969) :** Stratigraphie du Crétacé et de l'Eocène (Aptien-Lutétien) de la feuille au 1/50 000 de Morsott n°178 (Algérie, Constantinois, Atlas saharien). Publ. Serv. Carte Géol. Algérie, N.S., Bull. N°39, pp.147-157.
- Folk. R.L, Ward, W.C., (1957) :** Brazos River bar: A study in the significance of grain size parameters. Journal of sedimentary petrology, 27, pp 3-26.
- Flandrin J (1948) :** Les chaînes atlasiques et la bordure nord du Sahara. Publ. XIX C. G. I. Alger 1952, Monogr. rég. Ire série, n° 14, 82 p.

Gelard J. P., (1969) : Le flysch à base schisto-gréseuse de la bordure méridionale et orientale du massif de Chellata : le flysch Maurétanien (Grande Kabylie). Bull. Soc. Géol. Fr., (7), t. XI, pp. 676-686, 3 fig., 1 pl.

Jasinski S.M. (2017) : Phosphate rock. U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, pp.125-126.

Kasi-Tani N. (1986): Evolution géodynamique de la bordure nord-africaine : le domaine inter-plaque Nord-algérien. Approche mégaséquentielle. Thèse Doctorat ès sciences Univ de Pau et des pays de l'Adoure, 2 tomes.

Kechiched (2011) : Typologie géochimique et géostatistique des minerais de phosphates du gisement de Bled El Hadba – Djebel Onk (Algérie Orientale). Mémoire de Magister, Université Badji Mokhtar d'Annaba, 191 pages.

Laffitte R. (1938) : Etude géologique de l'Aurès. Publ. Serv. Carte géol. Algérie, (2), Strat. Descr. Région., Bull. n°15, 451 pages. Alger

Lamboy M. (1982) : Importance des pelotes fécales comme origine des grains de phosphate ; l'exemple du gisement de Gafsa (Tunisie). Comptes rendus de l'Académie des Sciences, Paris, 595-600.

Lemzaouda M. et NEMMOUR B. (2017) : Pétrographie et analyse granulométrique des minéralisations phosphatées du Djebel Kouif (Tébessa-Algérie nord-orientale). Mémoire de Master en Ressources Moinérales et Géomatériaux. Université Mohamed Seddik Benyahia de Jijel, 65 pages.

Perthuisot V. (1978) : Dynamique et pétrogenèse des extrusions triasiques en Tunisie septentrionale. Thèse de Doctorat, Ecole normale supérieure, Paris, France, 312 p.

Pufahl P. K. and Croat L. A. (2016) : Sedimentary and igneous phosphate deposits: formation and exploration: An invited paper. Economic geology, Vol.112, n°03, pp.483-516

Raoult J. F., (1969) : Nouvelles données sur les flyschs du Nord du Kef Sidi Dris et dans la zone du Col des Oliviers (Nord du Constantinois, Algérie). Bull. Soc. Géol. Fr., (7), t. XI, pp 516-543, 2 fig.

Riggs S.R. (1979) : Phosphorite sedimentation in Florida - a model phosphogenic system. Economic Geology 74, 285-314.

Soudry, D., Glenn, C.R., Nathan, Y., Segal, I., et VonderHaar, D., (2006) : Evolution of Tethyan phosphogenesis along the northern edges of the Arabian–African shield during the Cretaceous–Eocene as deduced from temporal variations of Ca and Nd isotopes and rates of P accumulation. Earth-Science Reviews, 78, 27-57.

USGS (2008): Phosphate rock. U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, pp.124-125.

USGS (2009): Phosphate rock. U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, pp.120-121.

USGS (2010): Phosphate rock. U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, pp.118-119.

USGS (2011): Phosphate rock. U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, pp.118-119.

USGS (2012): Phosphate rock. U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, pp.118-119.

- USGS (2013):** Phosphate rock. U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, pp.118-119.
- USGS (2014):** Phosphate rock. U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, pp.118-119.
- USGS (2015):** Phosphate rock. U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, pp.118-119.
- USGS (2016):** Phosphate rock. U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, pp.124-125.
- USGS (2017):** Phosphate rock. U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, pp.124-125.
- USGS (2018):** Phosphate rock. U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, pp.122-123.
- Vila J.M. (1980) :-** La chaîne alpine d'Algérie Orientale et des confins algéro-tunisiens. Thèse ès. Sci. Naturelles, Univ. P et M Curie, Paris VI. France
- Vila J.M., BenYoucef.M, Chikhaouie.M & Ghanmi M. (1996) :** Deuxième étude de surface d'un grand « glacier de sel » sous-marin albien (250 Km²) : Les masses triasiques du diapir de Ben Ghasseur et de l'anticlinal de Kef (NW Tunisien). Bull. Soc. Géol. France, t.167, n°2, p 235-246.
- Vila J.-M. (2001):** Les avantages d'une approche multi-source (biostratigraphie, sédimentologie, forages, profils sismiques et gravimétrie) pour l'étude de l'holocène crétacée («glaciers de sel», tectonique en radeaux et dômes de sel) et de l'halotectonique tertiaire (plissement des «glaciers de sel», genèse des dômes de sel-plis) des confins algéro-tunisiens. Bulletin du Service Géologique de l'Algérie, Vol. 12, n°2, pp.129-167.

Liens aux sites web consultés

- https://www.encycloecolo.com/Epuisement_des_ressources_naturelles)

- <http://www.energy.gov.dz/francais/index.php?mact=News,cntnt01,detail,0&cntnt01articleid=559&cntnt01returnid=1291>

- https://fr.wikipedia.org/wiki/Remont%C3%A9_d%27eau)

- <http://www2.ulg.ac.be/geolsed>