

REPUBLIQUE ALGERIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE



جامعة باجي مختار عنابة

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR –ANNABA
BADJI MOKHTAR UNIVERSITY –ANNABA



**Faculté des Sciences de la Terre
Département des Mines**

THÈSE

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de Doctorat LMD en Mines

Spécialité : Mines et Environnement.

THÈME

Contribution à l'étude d'un enrichissement des déchets miniers : cas des stériles francs du gisement de phosphate de Djebel Onk - Tébessa

Présentée par

ZEGHINA Sara Imane

Devant le jury :

Président :	IDRES Abdelaziz	Pr. Université Badji Mokhtar –Annaba
Rapporteur :	BOUNOUALA Mohamed	Pr. Université Badji Mokhtar –Annaba
Co- Rapporteur :	CHETTIBI Mohamed	Pr. Université Badji Mokhtar –Annaba
Examineurs :	AMARA Mourad	Pr. USTHB –Alger
Examineurs :	MEKTI Zohir	Dr. Université Badji Mokhtar –Annaba

Année universitaire 2022/2023

« Les déchets d'hier peuvent devenir les ressources d'aujourd'hui »

(Hitch, M., Ballantyne, S. M., et Hindle, S. R., 2010)

Dédicace

Je dédie cette thèse de doctorat

A la mémoire de mon père et ma mère.

A mon mari mes enfants et ma sœur

*Toutes personnes qui m'ont aidé de près ou
de loin.*

*A tous ceux qui œuvrent et combattent pour un
avenir meilleur, pacifique et prospère.*

ZEGHINA Sara Imane

REMERCIEMENTS

Grâce à Dieu, me voilà enfin arrivé au jour tant espéré pour savourer les fruits de mon travail de recherche en thèse de doctorat en Mines et Environnement.

Un spécial et un immense remerciement à mon Directeur de thèse et Directeur du Laboratoire de Valorisation des Ressources Minières et Environnement (LAVAMINE) le **Professeur BOUNOUALA Mohamed** pour l'encouragement, les efforts fournis de m'avoir donné aussi la chance d'être parmi les chercheurs de son laboratoire afin de mener à bien ce travail réalisé sur les déchets miniers.

J'adresse également mes sincères remerciements à mon Co-Directeur de thèse le **Professeur CHETTIBI Mohamed**, pour sa contribution scientifique fructueuse et son aide durant la réalisation des expériences

J'exprime ma vive reconnaissance à monsieur **IDRES Abdelaziz Professeur** à l'Université BADJI Mokhtar - Annaba pour m'avoir fait l'honneur d'accepter la présidence du jury.

Aussi, je tiens à exprimer vivement mes gratitudes et mes reconnaissances aux membres de jury qui m'ont fait l'honneur d'examiner cette thèse :

Pr AMARA Mourad de l'HSTHB- Alger, ainsi que **Dr MEKTI zohir (MCA) de l'université BADJI Mokhtar ANNABA**

Je voudrais aussi remercier, les ingénieurs et les techniciens de laboratoires de la cimenterie d'Ain Touta Batna (SCIMAT)

Mes vifs remerciements au docteur Khelifi de m'avoir donné énormément de conseil à propos de mon sujet.

Et enfin, mes remerciements vont à tous les responsables, les enseignants, les travailleurs, les doctorants et les étudiants de l'Université BADJI Mokhtar - Annaba, sans oublier l'ensemble des travailleurs de la mine de Djebel Onk et tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin à élaborer ce travail.

RESUME

Les déchets miniers représentent des rejets miniers issus de l'extraction et du traitement des minerais. Ces derniers posent et d'une manière intempestive de gros problèmes qui ayant un impact potentiellement négatif (pollutions du sol ; de l'air et de l'eau) sur l'environnement et l'économie du pays. Pour cette raison une réutilisation des déchets miniers comme matière première alternative dans les matériaux de construction est une solution environnementale prometteuse. En outre, cette voie de mise en valeur des déchets miniers permet de réduire les grandes quantités qui occupent une grande surface sur le carreau de la mine ainsi que la préservation des ressources naturelles non renouvelables exploitées intensivement dans la construction (argiles, calcaire, sable....).

Dans le cadre d'un développement durable et en particulier du respect de l'environnement, des producteurs de ciment se sont intéressés à l'incorporation dans le ciment de certains sous-produits industriels, susceptibles de développer des propriétés hydrauliques intéressantes avec peu d'investissement d'où la nécessité de trouver des différents types de ciment moins coûteux et avec des propriétés physico-mécaniques demandées conduit les industriels à produire des ciments contenant outre le clinker des ajouts secondaires (d'origine naturelle ou sous-produits industrielle) avec des proportions plus ou moins importantes.

Les ajouts minéraux souvent utilisé dans la fabrication du ciment sont principalement le laitier de hauts fourneaux et les pouzzolanes, d'autres matériaux locaux peuvent être utilisés comme les déchets industriels (les phosphogypses, les déchets des briques, déchets de marbre, déchets de lin textile). Ces types des déchets ne peuvent être considérés seulement comme un déchet mais plutôt comme sous-produits et une source d'un ou plusieurs éléments de valeur commerciale.

La démarche de notre étude consiste dans un premier temps à caractériser les stériles francs de phosphate de gisement de djebel Onk Tébéssa et ensuite une étude comparative entre l'utilisation de ce type de déchet comme ajout dans la fabrication du ciment et d'autre ajouts tel que le laitier (sous-produit de l'industrie sidérurgique) et la pouzzolane (d'origine naturelle) et voir leurs influences sur la qualité du ciment étudié CPJ – CEM II 42,5.

D'après les résultats des différents essais, l'utilisation des stériles francs de phosphate comme ajout dans la fabrication du ciment révèle des meilleures résistances à la traction par flexion et à la compression simple pour tous les âges et tous les pourcentages par rapport aux autres ajouts. De ce fait, cette étude montre qu'il est possible d'une part d'ajouter au ciment une certaine quantité de stériles francs de phosphate de Djebel Onk, et d'autre part de procurer au ciment des propriétés physico-mécaniques intéressantes et ce même avec un pourcentage d'ajout allant jusqu'à 30 % .

Mots clés : Déchets miniers, stérile de phosphate, caractérisation physico-chimique, ciment.

ملخص

نفايات التعدين هي نفايات ناتجة عن استخراج ومعالجة الخامات. تطرح هذه النفايات وبطريقة غير مناسبة مشاكل كبيرة لها تأثير سلبي محتمل (تلوث التربة والهواء والماء) على البيئة والاقتصاد في البلاد. لهذا السبب، تعد إعادة استخدام نفايات التعدين كمواد خام بديلة في مواد البناء حلاً بيئياً واعدًا. بالإضافة إلى ذلك، فإن هذه الطريقة تمكننا من تقليل الكميات الكبيرة التي تشغل مساحة كبيرة على أرضية المنجم وكذلك الحفاظ على الموارد الطبيعية غير المتجددة التي يتم استغلالها بشكل مكثف في البناء (الطين والحجر الجيري والرمل، إلخ.).

في سياق التنمية المستدامة وخاصة فيما يتعلق بالبيئة، اهتم منتجو الأسمنت بدمج بعض المنتجات الثانوية الصناعية في الأسمنت، ومن المرجح أن يطوروا خصائص هيدروليكية مثيرة للاهتمام مع القليل من الاستثمار، ومن ثم الحاجة إلى إيجاد أنواع مختلفة من الأسمنت وبأقل تكلفة ويتمتع بالخصائص الفيزيائية والميكانيكية المطلوبة إلى قيام الشركات المصنعة بإنتاج الأسمنت الذي يحتوي، بالإضافة إلى الكلنكر، على إضافات ثانوية (من أصل طبيعي أو منتجات ثانوية صناعية) بنسب أكبر أو أقل.

المضافات المعدنية المستخدمة غالبًا في صناعة الأسمنت هي أساسًا خبث أفران الصهر والبوزولان، ويمكن استخدام المواد المحلية الأخرى مثل النفايات الصناعية (جبس الفوسفات، نفايات الطوب، نفايات الرخام، نفايات الكتان النسيجية، ...). لا يمكن اعتبار هذه الأنواع من النفايات نفايات فقط بل منتجات ثانوية ومصدر لواحد أو أكثر من العناصر ذات القيمة التجارية.

تتمثل مقارنة دراستنا أولاً في توصيف رواسب نفايات الفوسفات الصخرية في ترسبات جبل عنق تبسة ثم دراسة مقارنة بين استخدام هذا النوع من النفايات كإضافة في صناعة الأسمنت والإضافات الأخرى مثل الخبث (منتج من صناعة الصلب) والبوزولان (من أصل طبيعي) وحتى تأثيرهما على جودة دراسة الأسمنت CPJ - CEM II 42.5.

وفقاً لنتائج الاختبارات المختلفة، فإن استخدام مخلفات الصخور الخالية من الفوسفات كإضافة في صناعة الأسمنت يكشف عن قوة شد أفضل عن طريق الانحناء والضغط البسيط لجميع الأعمار وجميع النسب مقارنة مع الإضافات الأخرى. نتيجة لذلك، تظهر هذه الدراسة أنه من الممكن إضافة كمية معينة من نفايات الصخور الخالية من فوسفات جبل أونك إلى الأسمنت، ومن ناحية أخرى تزويد الأسمنت بخصائص فيزيائية ميكانيكية مثيرة للاهتمام وهذا حتى مع نسبة إضافة تصل إلى 30٪.

الكلمات المفتاحية: نفايات التعدين، صخور الفوسفات، الخصائص الفيزيائية والكيميائية، الأسمنت.

ABSTRACT

Mining waste represents mining waste resulting from the extraction and processing of minerals. The latter unduly poses major problems that have a potentially negative impact (soil, air and water pollution) on the environment and the economy of the country. For this reason, the reuse of mining waste as an alternative raw material in building materials is a promising environmental solution. In addition, this mode of recovery of mining waste makes it possible to reduce the large volumes which occupy a large surface on the ground of the mine as well as to preserve the non-renewable natural resources which are intensively exploited in construction (clay, limestone, sand, etc.) .

In the context of sustainable development and in particular respect for the environment, cement producers have taken an interest in the incorporation into cement of certain industrial by-products, likely to develop interesting hydraulic properties with little investment, hence the need to find different types of cement that are less expensive and with the required physico-mechanical properties, leads manufacturers to produce cements containing, in addition to clinker, secondary additions (of natural origin or industrial by-products) with greater or lesser proportions.

The mineral additives often used in the manufacture of cement are mainly blast furnace slag and pozzolan , other materials can be used as industrial waste (brick waste, marble waste, flax waste, phosphogypsum, fibber waste ...). These types of waste can be considered not only as waste but as by-products and a source of one or more elements of commercial value.

The approach of our study consists first of all to characterize the waste rocks of djebel - Onk phosphate deposits, and then to establish a comparative study between the use of this type of waste as an addition in the production of cement and other additions such as blast-furnace slag (a by-product of steel industry) and pozzolan (of natural origin) and even their influence on the quality of the studied cement CPJ-CEM II 42,5.

According to the results of the various tests, the use of waste rock free of phosphate as an addition in the manufacture of cement reveals better tensile strengths by bending and simple compression for all ages and all percentages compared to the others additions. As a result, this study shows that it is possible, on the one hand, to add a certain quantity of waste rock free from Djebel Onk phosphate to the cement, and on the other hand to provide the cement with interesting physico-mechanical properties and this even with an addition percentage of up to 30%.

Key words: mining waste, phosphate rock, physical and chemical properties, cement.

LISTE DES MATIERES

DEDICACE	I
REMERCIEMENTS.....	II
RESUME	III
ملخص	IV
ABSTRACT	V
TABLE DES MATIERES	VI
LISTE DES FIGURES	XII
LISTE DES TABLEAUX	XV
ABREVIATIONS ET SIGLES UTILISES	XVII
INTRODUCTION GENERALE	XIX

CHAPITRE I. Analyse bibliographique sur les gisements, les minerais de phosphate et applications industrielles

I.1- Introduction	1
I. 2 - Historique des phosphates.....	2
I. 3 - Caractéristiques minéralogiques et chimiques des phosphates naturels....	3
I. 3.1- Chimie des phosphates	3
I.3.1.1- Eléments majeurs	4
I. 3.1.2- Eléments en traces du minerai de phosphate.....	5
I. 3.2- Structure cristallographique	6
I. 4 - Typologie des gisements de phosphate	9
I.4.1- Origine des gisements de type Ignée.....	9
I.4.2- Origine des gisements de type Guanos	9
I.4.3- Origine des nodules phosphatés sous-marins	10
I.4.4- Origine des gisements de type sédimentaire	10
I.5- Les Phosphatogenèse	11
I.6- Répartition stratigraphique des dépôts phosphatés	14
I.7- Production et consommation mondiales de phosphates	16
I.8- Phosphates et environnement	19

I.9- Utilisation des phosphates	19
I.9.1- Fabrication de l'acide phosphorique	19
I.9.2- Engrais	20
I.9.3- Applications techniques	23
1 - Production des matériaux de construction	23
2 - Phosphates comme matériaux diélectriques	23
2.1- Matériaux piézoélectriques	24
2.2- Matériaux hydroélectriques.....	24
2.3- Matériaux ferroïques.....	24
3 - Phosphates dans la fabrication des céramiques.....	25
3.1 - Phosphates comme céramiques à faible coefficient de dilatation thermique.....	25
3.2 - Phosphates comme matériaux à faible dilatation thermique.....	25
I.9.4- Applications alimentaires du phosphate	26
I.9.5 - Application pharmaceutique et biomatériaux du phosphate	26
I.9.6 - Phosphate pour le stockage des radioéléments	27
I.10- Conclusion	28

CHAPITRE II : Situation géographique et état de la géologie régionale

II.1 – Introduction	29
II.2. Historique des travaux d'exploration-exploitation des phosphates de djebel Onk Tébessa	30
II.3- Situation géographique	31
II.4- Stratigraphie de la région de Djebel Onk.....	35
II.4.1- Le crétacé	36
II.4.1.1- Le crétacé inférieur	36
II.4.1.2- le crétacé Supérieur	38
II.4.2. Le paléocène	39
II.4.3- l'éocène	41

II.4.4- le miocène	42
II.4.5- le quaternaire	42
II.5- Tectonique de la région de Djebel Onk	43
II.5.1- Tectonique synsédimentaire(Paléocène-Eocène)	44
II.5.2- Tectonique post-éocène moyen et anté-miocène	44
II.5.3- Tectonique tardi-miocène, post-burdigalienne, à pliocène-pléistocène	45
II.6- Géologie du gisement de Kef Essenoun	46
II.6.1- Stratigraphie	46
II.7- Conclusion	49

CHAPITRE III : les déchets miniers et développement de l'industrie minière algérien

III.1 - Introduction	50
III.2- Teneur de coupure	50
III.3- Types de teneur de coupure	51
III.3.1- Teneurs de coupure de planification (étape préliminaire)	51
III.3.2- Teneurs de coupure d'opération	51
III.4- Notion sur Les déchets	52
III.4.1- Définition du déchet	52
III.4.1.1- Approche réglementaire	52
III.4.1.2- Approche environnementale sur les déchets miniers	53
III.4.1.3- Approche économique	53
III.4.1.4- Approche matérielle	53
III.5- Classification des déchets	53
III.5.1- Classification des déchets selon leur origine	54
III.5.2- Selon leur nature	54
III.6- Les déchets miniers	55
III.6.1- Les principaux types des déchets miniers	55
III.6.1.1- Les stériles francs de découverte	56

III.6.1.2. Les résidus d'exploitation	57
III.6.1.3- Les résidus de traitement	57
III.6.1.4- Autres types de déchets	59
III.7- Industrie minière et ses impacts sur l'environnement	60
III.7.1- Rupture des digues	60
III.7.2- Drainage minier acide (DMA)	60
III.7.3- Drainage neutre contaminé (DNC)	62
III.8- Méthodes de gestions actuelles	63
III.8.1- Sur le site minier	63
III.8.2- En dehors du site minier	64
III.9- Les couts de gestion et de réhabilitation des rejets miniers	65
III.10- Valorisation des rejets miniers	65
III.11- Défis de réutilisation des rejets miniers	67
III.12. Conclusion	68

Chapitre IV : Caractérisation physico-chimique et minéralogique des stériles francs de phosphate de djebel Onk

IV.1- Introduction	69
IV.2- Prélèvement et préparation d'échantillons	69
IV.2.1- Échantillonnage	70
IV.2.2- But de l'échantillonnage	70
IV.2.3- Echantillonnage des roches	70
IV.2.4- Préparations des échantillons des déchets de phosphate pour analyse.....	70
IV.2.4.1- Concassage.....	72
IV.2.4.2- Homogénéisation et quartage.....	73
IV.3- Caractérisation physico-chimique des stériles francs	74
IV.3.1- Analyse granulométriques.....	74
IV.3.1. 1- Tamisage des échantillons	74
IV.3.2- Analyse granulo-chimique des stériles miniers de djebel Onk (stériles francs riche et pauvre en P_2O_5) par fluorescence X (FX)	78

IV.3.2. 1- La spectrométrie de fluorescence X(FX).....	78
IV.3.2. 2- Principe de l'analyse par fluorescence X (fx)	79
IV.3.2. 3- Résultats de l'analyse	79
IV. 3.3- Analyse minéralogique par Diffraction à Rayons X (DRX)	82
IV.3.3.1- Techniques d'analyse DRX.....	82
IV.3.3.2- Interaction rayons X-matière	82
IV.3.3.3- Résultats de l'analyse	83
IV.3.4- Analyse par spectrométrie d'absorption atomique (SAA) des stériles miniers de la mine de phosphate de djebel Onk	84
IV.3.4.1- Principe d'analyse	84
IV. 3.4.2- Résultats de l'analyse	85
IV.4- Conclusion	86

Chapitre V : Les clés de succès des déchets miniers de phosphate dans la fabrication des produits cimentiers

V.1- Introduction	87
V.2- Caractérisation des matériaux de base utilisés	88
V.2.1- Le clinker	88
V.2.2- Le gypse	90
V.2.3- Les ajouts	90
V.2.3.1- Le laitier	92
V.2.3.2- Les stériles francs de phosphate	93
V.2.3.3- La pouzzolane	94
V.3- Matériel et méthodes	94
V.3.1- Préparation des mélanges	94
V.3.2- Caractéristiques physiques de la pâte de ciment	95
V.3.2.1- Conditions générales des essais sur la pâte pure	96
V.3.2.2- Détermination de l'humidité du clinker et des ajouts	96
V.3.2.3-Analyse du refus dans le ciment	97
V.3.2.4- Détermination de la quantité d'eau nécessaire et la consistance	98

V.3.2.5- Le temps de prise	103
V.4- Etude sur mortier normalisé	108
V.4.1- Confection des éprouvettes prismatiques «4 x 4 x 16»	108
V.4.2- Mortier normal	110
V.5- Essai de résistance mécanique à la traction par flexion	112
V.6- Essai de résistance mécanique à la compression simple	118
V.7- Conclusion	123
CONCLUSION GENERALE	124
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	125

LISTE DES FIGURES

Tableau	Titre	Page
1	Projection sur le plan de base de la maille hexagonale de l'apatite $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{F}_2$	7
2	Environnement des atomes de calcium des sites de type I dans une fluorapatite non substituée	8
3	Environnement des atomes de calcium des sites de type II dans une fluorapatite non substituée	8
4	Position des atomes de fluor dans la fluorapatite (D'après Bertholus M et Defrancheschi M, 2004).	8
5	Mécanisme des courants ascendants Upwelling (Bakun A, 1990).	13
6	Mécanisme de développement des faciès phosphatés et siliceux (Keyser M et Cook P, 1972)	14
7	Localisation des principaux types de gisements de phosphates dans le monde (Zapata R, 2004).)	17
8	Réserve mondiale roche phosphatée	19
9	Répartition des phosphates industriels (Fitoussi R et Helgorsky J, 1994)	27
10	Carte de situation géographique des gisements de phosphates de la région de Djebel Onk (Prian G et Cortiel H, 1993)	34
11	Coupe stratigraphique schématique du Djebel Onk (d'après Ranchin G, 1963).	36
12	Carte structurale de la région du Djebel Onk à l'intérieur du bassin de Gafsa-Métloui-Onk (Aissaoui D, 1984).	44
13	Coupes stratigraphiques et structurales des flancs Nord et Sud du Djebel Onk (Cielensky B et al, 1988).	45
14	Gisement de Kef Es Sennoun (Kechiched R, 2017)	47
15	Log lithologique du gisement de kef Es Sennoun (Kechiched R, 2017)	48
16	Schéma illustrant la génération des différents types des déchets miniers.	56
17	Photo d'un parc à halde miniers (Mine abandonnée à l'Ouest de l'Australie)	59
18	Photo du parc à rejets miniers (Mine de Goro, nouvelle Calédonie)	59
19	Schéma montrant les vecteurs de transfert du DMA	61

20	Photos montrant le drainage minier acide (DMA) au niveau (a) d'une rivière au Colorado (USA)	61
21	Photos montrant le drainage minier acide (DMA) au niveau du site de Kettara (Maroc)	62
22	Echantillon représentatif de stériles francs riche en P_2O_5	71
23	Echantillon représentatif de stériles francs pauvres en P_2O_5	71
24	Concasseur à mâchoire utilisé	72
25	Diviseur	73
26	Opération de quartage	73
27	Tamiseuse utilisé pour l'analyse granulométrique au niveau de laboratoire du complexe de Djebel Onk – Tébessa	75
28	Courbe de distribution granulométrique pour un échantillon de stériles francs riches en P_2O_5	76
29	Courbe de distribution granulométrique pour un échantillon de stériles francs pauvre en P_2O_5	77
30	Evolution des teneurs des principaux éléments chimiques constituant les stériles francs riche en P_2O_5 de la mine de djebel Onk en fonction de la granulométrie	80
31	Evolution des teneurs des principaux éléments chimiques constituant les stériles francs pauvre en P_2O_5 de la mine de djebel Onk en fonction de la granulométrie	81
32	Analyse par DRX des stériles francs pauvre en P_2O_5	84
33	Analyse par DRX des stériles francs riche en P_2O_5	84
34	Spectromètre d'absorption atomique (Perkin Elmer AAS 3110)	85
35	Composition minéralogique du clinker	89
36	Tamis de marque ALPINE de diamètre 45 μm .	97
37	Malaxeur	99
38	Appareil de Vicat muni de la sonde de consistance	101
39	la variation de la quantité d'eau en fonction de taux d'ajout.	102
40	appareil de Vicat muni de la sonde de prise.	105
41	Variation du temps de prise en fonction de taux de l'ajout laitier	106
42	Variation du temps de prise en fonction de taux de l'ajout stérile	107
43	Variation du temps de prise en fonction de taux de l'ajout pouzzolane	107

44	Malaxeur.	111
45	Appareil à chocs (TONITECHNIC)	112
46	Moule prismatique.	112
47	Machine de compression et flexion pour mortier.	113
48	Histogramme présente la résistance à la traction par flexion en fonction de l'âge pour un ciment CPA et un ciment avec laitier.	114
49	Résistance à la traction par flexion en fonction de l'âge pour un ciment CPA et un ciment avec ajout laitier.	115
50	Histogramme de la résistance à la traction par flexion en fonction de l'âge pour un ciment CPA et un ciment avec ajout stériles francs.	115
51	Résistance à la traction par flexion en fonction de l'âge pour un ciment CPA et un ciment avec ajout stérile francs.	116
52	Histogramme présente la résistance à la traction par flexion en fonction de l'âge pour un ciment CPA et un ciment avec ajout pouzzolane.	116
53	Résistance à la traction par flexion en fonction de l'âge pour un ciment CPA et un ciment avec ajout pouzzolane.	117
54	Histogramme présente la résistance à la compression en fonction de l'âge pour un ciment CPA et pour un ciment avec ajout laitier.	119
55	Résistance à la compression en fonction de l'âge pour un ciment CPA et un ciment avec ajout laitier.	119
56	Histogramme présente la résistance à la compression en fonction de l'âge pour un ciment CPA et un ciment avec ajout stérile.	120
57	Résistance à la compression en fonction de l'âge pour un ciment CPA et un ciment avec ajout stérile.	120
58	Histogramme présente la résistance à la compression en fonction de l'âge pour un ciment CPA et un ciment avec ajout pouzzolane.	120
59	Résistance à la compression en fonction de l'âge pour un ciment CPA et un ciment avec ajout pouzzolane.	121

LISTE DES TABLEAUX

Tableau	Titre	Page
1	Exemples de substitutions des structures apatitiques	6
2	Répartition chronostratigraphique des gisements phosphatés dans le monde	15
3	Production et réserves mondiales des pays producteurs de phosphate naturel pour la période 2013 et 2014 (USGS, 2015)	18
4	Quelques différences entre les stériles et les résidus miniers	58
5	Méthodes de gestion de différents rejets de l'industrie minière	64
6	Résultats d'analyse granulométrique de stériles francs pauvre en P_2O_5 de djebel Onk concassés à > 10 mm	76
7	Résultats d'analyse granulométrique de stériles francs riche en P_2O_5 concassés à > 10 mm.	77
8	Résultats des analyses chimiques des différentes tranches granulométriques de stérile riche en P_2O_5	80
9	Résultats des analyses chimiques des différentes tranches granulométriques de stérile pauvre en P_2O_5	81
10	Analyses par spectromètre d'absorption atomique des échantillons initiales des stériles francs riche et pauvre en P_2O_5	86
11	La composition chimique du clinker (%) .	89
12	La composition minéralogique du clinker (%).	90
13	Composition chimique du gypse.	90
14	Les différents types des ajouts.	91
15	Composition chimique de laitier (%)	93
16	Composition chimique de déchet de phosphate (stériles francs) (%)	94
17	Composition chimique de pouzzolane du gisement de Bouhamedi (%)	94
18	Humidité du clinker et des ajouts (%)	96
19	Analyse du refus du laitier	98
20	Analyse du refus du stérile franc	98
21	Analyse du refus de la pouzzolane	98
22	la quantité d'eau nécessaire pour l'ajout laitier	102
23	Quantité d'eau nécessaire pour l'ajout des stériles francs	102

24	la quantité d'eau nécessaire pour l'ajout pouzzolane	102
25	Variation de la consistance en fonction de la variation de taux d'ajout pour tous les types des ciments étudié.	103
26	Variation du temps de prise en fonction de taux de l'ajout laitier	106
27	Variation du temps de prise en fonction de taux de l'ajout stériles francs	106
28	Variation du temps de prise en fonction de taux de l'ajout pouzzolane	107
29	Résultat du tamisage du sable	109
30	Résistance à la traction par flexion en fonction de l'âge pour tous les types des ciments étudié	114
31	Résistance à la compression en fonction de l'âge pour tous les types des ciments	118

ABREVIATIONS ET SIGLES UTILISES

<i>Notation</i>	<i>Désignation</i>
A	Ampère
AFNOR	l'Association Française de Normalisation
BRGM	Bureau de recherches géologiques et minières
C	Ciment
C₃A	Aluminate tricalcique
C₄AF	Alumino-ferrite-tetracalcique
C₃S	Silicate tricalcique également dénommée «alite»
C₂S	Silicate bicalcique ou «bélite»
CPJ	ciment portland avec ajout
CPA	Ciment portland sans ajout
daN	Décanewton
DMA	Le drainage minier acide
DNC	Drainage neutre contaminé
DRX	La Diffractométrie de Rayons X
E	Eau
EREM	L'Entreprise de Recherche Minière
F	Flexion
FERPHOS	La Société Nationale du Fer et des Phosphates
FX	La spectrométrie de fluorescence X
g	Gramme
j	Jours

LAVAMINE	Laboratoire de valorisation des ressources minières et environnement
m	Mètre
mg	Milligramme
mm	Millimètre
MPa	Mégapascal
Mt	Millions tonne
N	Newton
NPK	Azote, phosphore, potassium.
PNAD	Phosphate naturel pour application directe
PNAE	le Plan National d'Actions pour l'environnement et le développement durable
ppm	Partie par million
S	Sable
SAA	Analyse par spectrométrie d'absorption atomique
SONAREM	La Société Nationale de la Recherche Minière
T	Tonnes
TC	Teneurs de coup
TRX	Transmission à rayon X

INTRODUCTION GENERALE

L'exploitation minière a pour but d'extraire les minéraux ou métaux présentes à la surface du globe et qui ont une valeur économique qu'elles soient des exploitations souterraines ou à ciel ouvert (Poulard F et al, 2017 et Igoul M, 2014). Cette opération génère un volume important des déchets miniers sans valeur commerciale (Aubertin M et al 2002, Aubertin M et al 2016) que l'on peut les classer principalement en produits naturels : stériles miniers ou (stériles francs, stériles de sélectivité) ainsi que des produits artificiels issus de phase de traitement et d'enrichissement du minerai (résidus de concentrateur, et les boues de traitement). (Aubertin M et al 2002 ; BRGM, 1997 ; Vulcano N, 2006)

Cependant les stériles francs et les stériles de sélectivité sont empilés en surface dans des haldes à stériles (Maknoon M, 2016 ; Ethier M-P, 2011), les résidus de concentrateur dans des parcs à résidus (Aubertin M et al, 2013 ; Deschamps T, 2009), et les boues de traitement sont stockés dans des bassins étanches. A cet effet ces déchets peuvent présenter des risques pour l'environnement selon leur état, leur composition et leur mode d'entreposage (Igoul M, 2014 ; Hakkou R et Al, 2016).

Les stériles miniers sont classés en deux catégorie : les stériles francs de découverte sont définis comme la partie sans aucune valeur commerciale et de nature peut être complètement différente de celle de la zone minéralisée (matériau très pauvre en substance utile) et les stérile de sélectivité (rejets d'exploitation) qui sont considérés comme un matériau contenant des inclusions importantes en substance utile, mais cette teneur est insuffisante pour une éventuelle valorisation économique selon des critères technico-économiques (Maknoon M, 2016 ; Baily Y et Al, 2016)

La proportion des stériles miniers d'exploitation peut atteindre 60 % et plus dans le cas des mines à ciel ouvert par contre les mines souterraines produisent peu de stériles qui représentent les 5 à 15 % de volume de la roche extraite.

Dans les mines à ciel ouvert, les haldes à stériles présentent des dimensions considérables, tant plus de cent mètres en hauteur et plusieurs dizaines d'hectares en superficie (Lomontagne A, 2002; Aubertin M et al 2013). Cette grande quantité produite chaque année est en augmentation continue (Lanoix M.L.B, 2017) c'est la raison pour laquelle une gestion et une élimination de ces quantités importantes produites continuellement est considérée comme

l'un des grands problèmes que rencontrent l'industrie minière mondiale et nationale suite à la politique économique et environnementale. (Taha Y, 2017)

L'Algérie est classée parmi les grands producteurs de phosphate au monde. Cependant, les principaux gisements sont concentrés au Sud – Est de l'Algérie dans la Wilaya de Tébessa et à 20 km de la frontière Algéro – Tunisienne. Par ailleurs, le bassin minier de Djebel-Onk renferme quatre gisements: Gisement de Kef Essennoun, le gisement de Djemi-Djema ; le gisement de Djebel Onk Nord ainsi que le gisement de Bled Hadba.

Les phosphates algériens sont exploités par la Société Minière des Phosphates (SOMIPHOS). La production annuelle de cette matière est 2,3 à 2,5 millions de tonnes de minerais titrant entre 25 à 26% en P_2O_5 et produisant en moyenne 1,1 à 1,3 millions de tonnes de produits marchands.

Cette matière première est utilisée, en grande partie (qui représente 80 à 90% de la production mondiale) pour la fabrication des engrais et de l'acide phosphorique et dans d'autres secteurs tels que l'industrie de la peinture, de la céramique, des cosmétiques et des produits pharmaceutiques, de l'industrie alimentaire et autres.

Dans la mine de phosphate de djebel Onk (objet de notre étude) la production d'une tonne de minerai de phosphate génère entre neuf et dix tonnes de stériles miniers. Dans le but d'éliminer les quantités énormes des stériles miniers et afin de préserver l'environnement et agir par la notion d'un développement durable.

Pour se faire une caractérisation physico-chimique est réalisée par des analyses granulométriques, chimiques et des observations microscopiques à l'aide du microscope électronique à balayage (MEB), des analyses par diffraction des rayons X (DRX) et par fluorescence X.

D'après cette étude, nous avons étudié deux types de stériles miniers à savoir les stériles francs considérés comme matériaux pauvres et les stériles francs riches comme matériaux économiquement pauvres mais contiennent des pourcentages en P_2O_5 élevés quoique ces types de stériles de phosphate ne peuvent être considérés comme un déchet sans valeur mais plutôt il peut faire l'objet de sous-produits co-extraits contenant des éléments valorisables de terres rares ou son utilisation dans d'autres industries cimentières ; agro-alimentaires, pharmaceutiques,...

D'autre part, les stériles francs riches sont économiquement exploitables puisqu'ils sont riches en P_2O_5 dont nous suggérons une mise en valeur de ce genre de déchets pour éliminer ou réduire d'une part la quantité de stériles francs déposés sur le carreau de la mine et d'autre part créer un milieu écologique favorable par le recyclage, la restauration ainsi que la réhabilitation des sites miniers.

Pour les stériles francs pauvre nous proposons une valorisation de ce rejet minier comme ajout dans la fabrication du ciment puisque ce produit contient tous les éléments qu'on le retrouve dans le calcaire et l'argile et aussi dans les ajouts utilisés pour la fabrication du ciment tel que le laitier de haut fourneaux et la pouzzolane (CaO , MgO , SiO_2 ).

Dans le cadre de cette thèse, une caractérisation et une étude environnementale développées par moyens de valorisation des stériles miniers issus de l'exploitation minières du gisement de phosphate de Djebel Onk de la wilaya de Tébessa.

Le présent document portant sur ***Contribution à l'étude d'un enrichissement des déchets miniers : cas des stériles francs du gisement de phosphate de Djebel-Onk – Tébessa*** est structuré en cinq chapitres comportant une introduction générale et une conclusion générale.

- Le premier volet de cette étude tourne autour d'une analyse de la littérature scientifique sur les gisements, les minerais de phosphate et applications industrielles
- Le deuxième chapitre représente une synthèse sur la situation géographique, la géologie régionale (tectonique, stratigraphie, minéralisation, ...) du gisement phosphate de Djebel Onk.
- La troisième partie décrit d'une façon détaillée la nature et les types déchets miniers issus de l'exploitation minière du gisement de phosphate.
- Le quatrième chapitre porte sur l'échantillonnage et la caractérisation des stériles francs de phosphate de djebel Onk par analyse de tamisage, analyse minéralogique par DRX, Analyse par spectrométrie d'absorption atomique (SAA) ainsi que l'analyse des éléments chimiques majeurs et mineurs par fluorescence X.

Dans le dernier volet de cette étude (matériel et discussion des résultats) est menée une étude comparative entre l'utilisation des stériles francs de phosphate comme ajout dans la

fabrication du ciment et d'autres ajouts tel que le laitier (sous-produit de l'industrie sidérurgique) et la pouzzolane (d'origine naturelle) voire leurs influences sur la qualité du ciment étudié CPJ – CEM II 42,5 : paramètres physiques tels que la consistance, mesure de temps de prise et les paramètres mécaniques tels que la résistance à la traction par flexion, à la compression simple).

CHAPITRE I : Analyse bibliographique sur les gisements, les minerais de phosphate et applications industrielles

Sommaire

I.1- Introduction.

I. 2 - Historique des phosphates.

I. 3 - Caractéristiques minéralogiques et chimiques des phosphates naturels.

I. 4 - Typologie des gisements de phosphate.

I.5- Les Phosphatogenèse.

I.6- Répartition stratigraphique des dépôts phosphatés.

I.7- Production et consommation mondiales de phosphates.

I. 8- Réserves de phosphate.

I.9- Phosphates et environnement.

I.10- Utilisation des phosphates.

I.11- Conclusion

CHAPITRE I. Analyse bibliographique sur les gisements, les minerais de phosphate et applications industrielles

I.1- Introduction

Les phosphates naturels comprennent plus de 200 espèces minéralogiques (Fisher A G et Jérôme D, 1973), mais les plus répandues appartiennent à la famille de l'apatite (Slansky M, 1980). Les minéraux apatitiques se forment facilement dans la nature et sont stables dans un large éventail d'environnements géologiques ; et ce pour de très longues périodes. Des concentrations importantes sont rencontrées dans des contextes intrusifs, mais le minéral d'apatite est aussi présent dans les roches éruptives et métamorphiques. Cependant, c'est dans le milieu sédimentaire que de grandes concentrations phosphatées sont connues. Des concentrations sont rencontrées presque dans les sédiments de toutes les périodes géologiques (Nicolini P., 1990), depuis le Précambrien jusqu'au Cénozoïque. (McClellan G H, Leher J R, 1969 ; Dassamiour M, 2012).

Le phosphate naturel (PN) est un terme général qui décrit les assemblages minéraux naturels contenant une concentration élevée de minéraux phosphatés. Le terme se rapporte aussi bien aux minerais phosphatés non enrichis par traitement qu'aux produits concentrés (produits marchands).

Cependant, les apatites des roches ignées et métamorphiques sont bien cristallisées. Dans cet environnement, on observe essentiellement des apatites de composition proche de celle de la fluorapatite et une très faible proportion d'hydroxyapatite. En revanche, les apatites des milieux sédimentaires sont microcristallines et elles sont formées de phosphates provenant des apatites authigènes ou de nature biogène, c'est-à-dire issues de la dégradation de la matière organique (os, arrêtes...).

Ainsi, les gisements sédimentaires fournissent environ 80 à 90 % de la production mondiale des dix dernières années. Ils se trouvent dans des formations d'âge géologique très différent, montrent une gamme très large de compositions chimiques et de formes physiques, se trouvent souvent en couches épaisses relativement horizontales, et peuvent être à la base de terrains de recouvrement peu profonds.

Les gisements qui représentent la majeure partie de la production mondiale de phosphate sont au Maroc et dans d'autres pays africains, aux Etats-Unis, au Proche Orient et en Chine. La plupart des gisements sédimentaires contiennent de la fluoroapatite carbonatée appelée francolite (McClellan G H, 1938). Les francolites ayant une importante substitution carbonate sur phosphate sont les plus fortement réactives et sont les plus appropriées pour l'application directe comme engrais ou amendement.

Les gisements ignés ont fourni environ 10 à 20 % de la production mondiale des dix dernières années. Ils sont exploités dans la Fédération de Russie, au Canada, en Afrique du Sud, au Brésil, en Finlande et au Zimbabwe mais se trouvent également en Ouganda, au Malawi, au Sri Lanka et en plusieurs autres endroits. Ces gisements contiennent généralement des variétés de fluoroapatite qui sont relativement peu réactives et donc moins appropriées pour l'application directe. Les produits de lessivage des apatites ignées et sédimentaires (minerais de phosphate de fer et d'aluminium) ne sont généralement pas utiles pour l'application directe en agriculture dans leur état naturel.

Le phosphate est le composant de ces roches ayant un intérêt agronomique. Plus le contenu en phosphate (P_2O_5) sous forme d'apatite est élevé, plus le potentiel économique du minerai est grand. Les facteurs qui sont importants dans la conversion chimique des PN en engrais (carbonates libres, fer (Fe), aluminium (Al), magnésium (Mg) et chlorure) ne sont souvent pas importants quand la roche doit être employée en application directe (Gremillion L R et McClellan GH, 1975/1980 ; Van Kauwenbergh S G et Hellums D T, 1995).

I.2- Historique des phosphates

En 1669, le monde découvre le phosphore par l'alchimiste allemand Brandt. Et ce, suite au constat relatif à l'évaporation de grandes quantités d'urine humaine.

Plus tard, en 1769, la mise en évidence, par le chimiste suédois Gahn, de la présence de phosphore dans les os. En 1779 a eu lieu l'identification du phosphore dans le minéral pyromorphite de nouveau par Gahn. La méthodologie, développée par Scheele, a permis d'obtenir du phosphore par dissolution d'os dans l'acide nitrique. En 1840, la formulation de la base scientifique de l'industrie des engrais phosphatés, basée sur l'attaque du minerai phosphaté est mise au point par le chimiste allemand Von Liebig (Slansky M, 1980).

En 1842, le processus d'acidification de nodules phosphatés, issus de gisements connus d'Angleterre et d'Espagne, est entrepris par l'anglais Lawes. Il donne à son produit le nom de «superphosphate», terme encore utilisé de nos jours. En 1857, la dissolution de coprolithes par H_2SO_4 , Von Liebig montre l'application du produit résultant au sol et met en évidence l'efficacité de l'absorption par les plantes (OFEFP.2004).

Durant l'année 1870, les roches de faible teneur en phosphore (inappropriées pour la production de superphosphate) sont traitées par l'acide sulfurique pour produire de l'acide orthophosphorique H_3PO_4 , lui-même alors réutilisé dans l'acidification de roches phosphatées. Afin d'obtenir un concentré superphosphate, plus connu aujourd'hui sous le nom de triple superphosphate.

La fin du 19ème siècle coïncide avec le début de la production industrielle des engrais phosphatés, qui, depuis, sont devenus des facteurs prépondérants du développement agricole le décalage entre la croissance rapide (vertigineuse) de la population mondiale et la production agro-alimentaire mondiale en baisse incite les agriculteurs à recourir entre autres aux engrais pour mieux randomiser leurs récoltes et par conséquent subvenir aux besoins des êtres. Sans toutefois, porter préjudice à l'environnement (utilisation excessive des engrais, pesticides, insecticides etc.).

Le minerai commercial typique de phosphore est un concentré calcio-phosphaté avec environ 35 à 38% de P_2O_5 et de 3 à 4% de fluor ; les principales impuretés sont : la silice (généralement sous forme de grains de quartz). Les argiles, les phosphates d'aluminium ; les oxydes et les hydroxydes de fer. Les éléments accessoires les plus communs sont les terres rares (quelquefois en teneurs significatives), U, Sr, Ba, Mg et Zn. (Nettour D et al, 2019).

I. 3- Caractéristiques minéralogiques et chimiques des phosphates naturels

I. 3.1- Chimie des phosphates

Comme les autres minerais utiles, les phosphates sont associés à d'autres éléments, ces derniers sont divisés en deux groupes principaux : éléments majeurs et éléments en trace.

I. 3.1.1- Eléments majeurs

Les phosphates contiennent les éléments majeurs (oxydes) suivants: P_2O_5 , SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , Na_2O , K_2O , CO_2 , SO_3 , F , Cl et H_2O . Ces éléments sont associés aux principales phases minéralogiques telles que : apatite, argiles, carbonates, silice, ...etc. (Chabou M S, 1987; Larouci M , 1988). Les analyses ont permis de révéler les remarques suivantes (Slansky M, 1980).

Les teneurs en SiO_2 sont essentiellement dues à la présence de la silice ou des silicates et surtout les argiles comme la glauconie.

Dans une fluorapatite $Ca_{10}(PO_4)_6F_2$, le rapport CaO/P_2O_5 est égal à 1,31. Il est supérieur à cette valeur dans les apatites carbonatées due à la présence de calcite et de dolomie, ou une substitution de PO_4 par CO_3 . Une valeur de ce rapport inférieure à 1,3 dénote la présence de minéraux phosphatés différents, alumineux ou alumineux calcique.

Le fluor peut être exprimé indépendamment de l'apatite dans les phosphatites, sous forme de fluorine. Dans la plus part de cas, le fluor est lié à l'apatite, le rapport F/P_2O_5 qui caractérise donc ce minérale, varie entre 0,08 à 0,12, atteignant parfois 0,13 voire 0,14.

Les apatites sédimentaires sont habituellement très pauvres en Chlore (Cl). Lorsque la teneur en cet élément est plus élevée, il s'agit en général, de concentrations secondaires indépendantes du réseau de l'apatite, réductibles par lavage à l'eau douce. Des analyses chimiques sur des échantillons de phosphates d'âges variées montre une teneur en Chlore varie de 0,013 à 0,67%.

Le soufre associé aux phosphatites peut être inclus dans les sulfures ou des sulfates. Les sulfures sont représentés par la pyrite qui peut être rencontré soit dans l'exogangue, soit dans l'endogangue. Sa présence est caractérisée par les teneurs en Fe . Les sulfates sont représentés par le gypse et de la barytine ou la célestine. (Sassi S, 1974) a indiqué que le rapport pondéral SO_3/PO_4 peut atteindre 0,12 dans les francolites du bassin de Gafsa.

Les teneurs en Al et Fe , sont assez importants dans l'utilisation des minerais de phosphates. Ces éléments sont surtout liés à la présence d'argiles, de sulfure, d'hydroxydes ou encore de phosphates de Fe ou Al . (Kechiched R, 2017).

I. 3.1.2- Eléments en traces du minéral de phosphate

D'après Guibrandsen R (1966), les éléments en traces sont associés soit avec la matière organique ou par l'intégration dans le réseau de l'apatite.

Les concentrations de Ag, As, Mo, Ni, V, Zn, Cr, Cu, Sb, Se, et Cd sont ainsi attribuées à la matière organique, alors que celles de Sr, U, Th et des terres rares sont attribuées à l'apatite tandis que l'uranium peut aussi être piégé par la matière organique.

(Prevôt L, Lucas J, 1979 ; Mezghache H et Hani A, 2002) ont ajouté une possible association avec les argiles.

Les apatites sont de formulation générale $Me_{10}(XO_4)_6Y_2$ (Bechade E, 2008). Cette formule est stœchiométrique et les différents sites Me, XO_4 et Y de la structure sont totalement remplis. Me représente, le plus souvent, un cation divalent, XO_4 un anion moléculaire trivalent, et Y un anion monovalent.

L'apatite la plus fréquente est la fluorapatite $[Ca_{10}(PO_4)_6F_2]$. Les phosphates des dépôts sédimentaires sont cryptocristallins (Slansky M, 1980). Les minéraux correspondants sont également voisins de la fluorapatite. En effet, la structure apatite étant relativement «souple», elle peut accepter de nombreux ions en substitution sur les trois sites. Le tableau 1 permet d'illustrer une partie des différentes substitutions envisageables. Il existe deux types de substitutions possibles (Chaïrat C, 2005) :

- Les substitutions d'ions de même charge et de tailles différentes sur les trois sites Me, XO_4 et Y de la structure apatite. Ces apatites restent stœchiométriques et seule une légère déformation de la maille est observée.
- Les substitutions par des ions de charges et de tailles différentes qui nécessitent une compensation de charge pour assurer l'électroneutralité de la maille cristalline. Ces échanges d'ions se font :

Soit de manière couplée en assurant la stœchiométrie du matériau (Tableau1) (Ca^{2+} , PO_4^{3-}) - (Ln^{3+} , SiO_4^{4-}).

Soit par la création de lacunes amenant à des formulations d'apatites dites non stœchiométriques. Cette variation de la stœchiométrie engendre une variation des propriétés physico-chimiques du matériau. C'est, par exemple, le cas de l'hydroxyapatite phosphocalcique

qui lorsqu'elle est substituée par des groupements carbonate ($\text{Ca}^{10-x} \text{x}(\text{PO}_4)_{6-x} (\text{CO}_3)_x (\text{OH})_{2-x}$, (où représente une lacune).

Tableau 1- Exemples de substitutions des structures apatitiques (Banu M, 2005).

Me^{2+}			XO_4^{3-}			Y^-		
Ca^{2+}	Sr^{2+}	Cd^{2+}	PO_4^{3-}	SiO_4^{3-}	AsO_4^{3-}	OH^-	F	CL
Mg^{2+}	Ba^{2+}	Pb^{2+}	SO_4^{3-}	MnO_4^{3-}	VO_4^{3-}	Br^-	I^-	CO_3^{2-}
Cu^{2+}	Zn^{2+}	U^{4+}	CrO_4^{2-}	CO_3^{2-}	HPO_4^{2-}	S^{2-}	O^{2-}	
Na^+	K^+	Eu^{3+}						

La substitution la plus marquée dans les apatites sédimentaires est celle de PO_4^{3-} par CO_3^{2-} . L'introduction d'ion F-supplémentaire contribue à préserver la neutralité électrique du cristal (Slansky, 1980). Le minéral le plus fréquent est ainsi la carbonate-fluorapatite ou francolite, dont la formule structurale simplifiée est : $\text{Ca}_{10} [(\text{PO}_4)_{6-x} (\text{CO}_3\text{F})_x] \text{F}_2$ et qui cristallise dans le système hexagonal. L'importance possible des substitutions par Na, Mg et OH conduit Lehr J R et al (1967) a proposé, pour les apatites sédimentaires, la formule structurale générale suivante : $(\text{Ca}, \text{Na}, \text{Mg})_{10} (\text{PO}_4)_{6-x} (\text{CO}_3)_x \text{F}_y (\text{F}, \text{OH})$.

I. 3.2- Structure cristallographique

La plupart des minéraux des phosphates sédimentaires font partie de la famille des apatites qui cristallisent dans le système hexagonal, dont la maille élémentaire est un prisme droit à base d'hexagone (Figure 1), et appartiennent au groupe d'espace $\text{P6}_3/\text{m}$ (Montel G et al, 1980). Les tétraèdres XO_4 (PO_4) définissent le squelette de la structure apatitique. En effet, à l'inverse des sites Me (Ca) ou Y (F), aucune lacune n'a jamais été observée sur les sites XO_4 (Lacout J, 1983).

L'arrangement quasi compact des groupements XO_4 fait apparaître deux types de tunnels au sein de la maille cristalline :

- Le premier, dit de type I, est occupé par quatre cations Me notés Me(I); son diamètre est de 2,5 Å dans le cas de la fluorapatite. Ces Me(I) sont situés sur un axe ternaire de la structure et présentent une symétrie Ch. Chaque cation est lui-même entouré de neuf atomes d'oxygène (Figure 2).

- Le second tunnel (notés II), de diamètre compris entre 3 et 4,5 Å dans le cas de la fluorapatite, accueille le complément des cations, soit six cations Me(II) dont les sites ont une symétrie Cs. Les cations Me(II) sont situés en périphérie du tunnel et sont organisés sous la forme de triangles équilatéraux décalés de 60° et placés aux côtes $\frac{1}{4}$ et $\frac{3}{4}$ suivant l'axe de symétrie 6 hélicoïdal (axe c de la maille hexagonale). Leur coordinence est égale à 7 : ils sont entourés de six atomes d'oxygène et d'un atome de fluor (Figure 3).

En fonction de leur nature, les anions Y- vont occuper des positions diverses le long de l'axe formé par les Me(II). Ils bénéficient d'une grande mobilité. Une représentation de ce tunnel est donnée dans le cas de la fluorapatite (Figure 4).

Les paramètres de maille rapportés dans la littérature sont assez variables, mais les plus précis conduisent à $a=9,3684$ Å et $c=6,8841$ Å donnant un volume de maille $V=523,25$ Å³ ce qui correspond à une densité calculée de 3,201, en bon accord avec la densité mesurée ($d=3,15$).

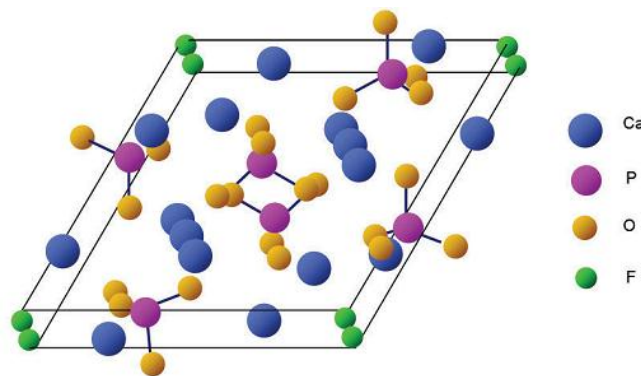


Figure 1- Projection sur le plan de base de la maille hexagonale de l'apatite $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{F}_2$ (D'après Bertholus M et Defranceschi M, 2004).

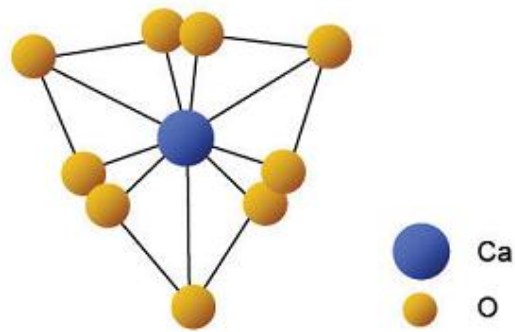


Figure 2 - Environnement des atomes de calcium des sites de type I dans une fluorapatite non substituée (D'après Bertholus et Defranceschi, 2004)

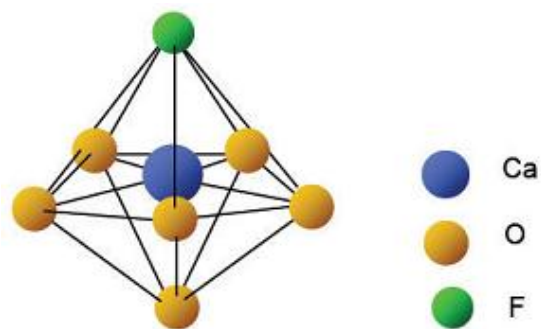


Figure 3 - Environnement des atomes de calcium des sites de type II dans une fluorapatite non substituée (D'après Bertholus M et Defranceschi M, 2004)

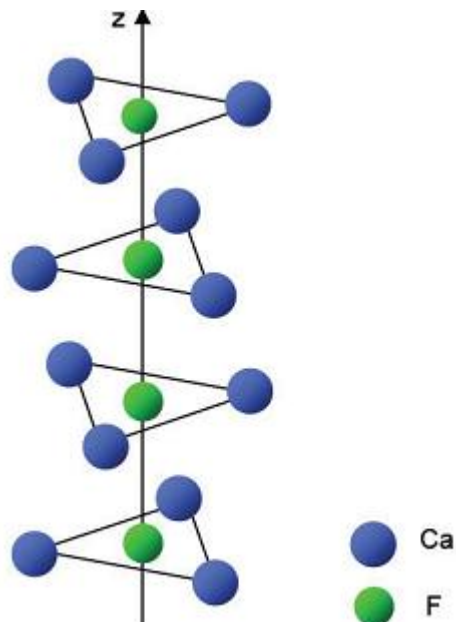


Figure 4 - Position des atomes de fluor dans la fluorapatite (D'après Bertholus M et Defranceschi M, 2004).

I.4- Typologie des gisements de phosphate

Tous les phosphates naturels exploités sont des phosphates de Calcium. La teneur du minerai brut ou des concentrés marchands est évaluée en P_2O_5 % ou, selon une habitude encore bien ancrée, en équivalent en phosphate tricalcique Ca (PO) bien que les phosphates ne se présentent généralement pas sous cette forme ; on parle alors de teneur bone phosphate of lime (BPL) ou Tricalcium phosphate of lime (TPL) qui s'obtient en multipliant la teneur PO par 2,185.

La production de minerais de phosphate est assurée à plus de 80% par des gisements sédimentaires, mais il existe également des gisements d'origine ignée et des gisements de type "guano". Des réserves importantes de phosphates ont été également mises en évidence sur le plateau continental des mers actuelles, mais elles n'ont pu donner lieu jusqu'à présent à des exploitations économiques ; cependant la forte augmentation récente du prix des phosphates pourrait conduire à modifier ce point de vue.

Les phosphates dans le monde se présentent en quatre types de gisements de différentes origines selon Slansky M, (1980) nous distinguons.

I.4.1- Origine des gisements de type Ignee

Les gisements d'origine ignée qui sont associés à des complexes intrusifs alcalins (les syénites, les syénites néphéliniques, les carbonates, les ijolites et les pyroxenites). À titre d'exemple les gisements de Khibiniy en Russie sont liés à un complexe annulaire à syénite néphélinique, avec 16 millions de tonnes de minerais et une teneur de 18 % en P_2O_5 ; les gisements de Palabora en Afrique de Sud avec des teneurs moyennes plus faibles, ce gisement est associé à des carbonatites et des pyroxenites (apatite + serpentine + magnétite). Les réserves de cette dernière sont évaluées à 1.4 milliards de tonnes de concentration 35.7% P_2O_5 , celle des gisements de Kola paraissent être du même ordre de grandeur (Slansky M, 1975).

I.4.2- Origine des gisements de type Guanos

Ils sont formés à partir des déjections des oiseaux de mer dans certains cas, de chauve-souris sur les roches réceptrices, qui contiennent environ 4 % en P_2O_5 . En général, la qualité de ces phosphates est fort intéressante vis-à-vis de leur quantité. Nous citons les gisements de l'île Nauru dans l'océan pacifique qui contiennent 90 millions de tonnes de minerai avec 39 % en

P_2O_5 et les gisements de l'île Christmas dans l'océan indien qui contient 200 millions de tonnes de minerai avec une teneur de 23 jusqu'à 27 % de P_2O_5 .

Les gisements issus du guano n'ont actuellement d'intérêt que dans la mesure où la roche réceptrice est calcaire. Dans les autres cas les minéraux formés sont des phosphates de fer ou d'alumine peu exploitables actuellement (Slansky M, 1980). Ils se trouvent en Namibie et en Madagascar (Truong B et al, 1982). Ces dépôts se sont formés récemment sur des soubassements coralliens ; et présentent des particules très tendres et pratiquement équivalents au phosphate hydrosoluble. Ce type de gisement produit environ 2 à 3% de phosphates naturels (Cogel J et al, 2006). Sous l'influence des pluies acides, l'acide phosphorique des excréments d'oiseaux attaque les calcaires et forme des dépôts de phosphate de calcium. Les réserves de ce type sont presque épuisées ou ne sont pas exploitées pour des raisons environnementales (Guillemot J, 1986).

I.4.3- Origine des nodules phosphatés sous-marins

Les nodules phosphatés sont assez largement distribués au fond des mers actuelles, essentiellement sur le plateau continental.

Les accumulations principales se situent le long des côtes occidentales des continents africain (Afrique du Sud, Maroc ...) et américain (Californie, Chili ...) et également au large du Brésil et de la Ebride. Les réserves ont été évaluées grossièrement à 3.10 t. de minerai à teneur commerciale (de l'ordre de 30 % en P_2O_5). Toutefois aucune des études économiques tentées n'a encore conduit à des résultats favorables.

I.4.4- Origine des gisements de type sédimentaire

Les phosphates sédimentaires sont composés principalement d'apatites, présentant une substitution isomorphe étendue dans le réseau cristallin. Ainsi, ils présentent une grande variation dans leur composition chimique et montrent en conséquence un large éventail de propriétés. Dans les dépôts sédimentaires, les principaux minéraux phosphatés sont des francolites (fluoroapatites microcristallines carbonatées), qui sont en association avec une grande variété de minéraux accessoires et d'impuretés (McClellan G H et Al, 1990).

Les roches sédimentaires sont formées par l'érosion, le transport puis le dépôt des minéraux en surface à faibles profondeurs sous de faibles températures et pression de la terre à

partir de l'eau, de vent et de la glace (Bonnet C, 2011). Le plus important dépôt est en milieu aquatique dans les bassins sédimentaires (Holtan H et al, 1988).

Les phosphates sédimentaires qui ont été déposés progressivement au cours des temps géologiques et qui sont faiblement consolidés, contiennent des particules microcristallines avec de grandes surfaces spécifiques et varient considérablement en termes de composition chimique et de réactivité. Ces dépôts représentent 80 % de toutes les réserves du monde (Guillemot J, 1986). Ils s'étendent du nord à l'ouest et au centre de l'Afrique et sont parmi les plus appropriés pour l'application directe en agriculture (IAEA, 2002).

D'après le BRGM 1975, les gisements sédimentaires ont une répartition stratigraphique et géographique très variée. D'après les éléments statistiques de 1973 les principales régions productrices du monde sont : Les Etats Unis (37 Mt environ) avec surtout les gisements de Floride, de Caroline du Nord et du Sud (Miocène et Pliocène) et des montagnes rocheuses (Permien) ; l'Afrique du Nord avec plus de 20 Mt dont 16 pour le Maroc avec ses niveaux phosphatés de l'Eocène inférieure ; la Russie (6 à 7 Mt) avec de nombreux gisements répartis sur tout entre le Précambrien, le Cambrien, l'Ordovicien, le Jurassique supérieur et le crétacé, l'Afrique occidentale avec des gisements de l'Eocène moyen du Sénégal et du Togo, le Proche Orient (2 Mt) avec ses gisements du Crétacé supérieure de Jordanie, Palastine et la Syrie. Signalons encore de grands gisements du Sahara occidentale (Eocène inférieure) aux réserves supérieures à 1.5 milliard de tonnes de minerai de très bonne qualité dont la production doit atteindre très rapidement une dizaine de millions de t/an, ainsi que ceux du Miocène du Pérou (Sechura) et du Cambrien d'Australie (Slansky M, 1975)

I.5- Les Phosphatogenèse

La présence d'un gisement de phosphates dans un bassin sédimentaire dépend de plusieurs processus notamment d'une source en phosphore suffisante, des conditions favorables à la formation de l'apatite dans les sédiments et des conditions favorables à la concentration et l'accumulation des minéraux phosphatés. Les auteurs sont subdivisés sur les sources possibles du phosphore en deux groupes, l'un avec la théorie d'alimentation directe à partir du continent et l'autre avec l'alimentation à partir des apports océaniques.

L'alimentation directe à partir du continent est défendue par Bushinski GI ,(1964), il a évoqué l'exemple de la Volga qui déverse chaque année dans la mer Caspienne 6000 tonnes de phosphore sous forme de phosphate minéral en solution, l'accumulation de tel apport minéralisé

a l'aptitude de donner lieu à un très gros gisement de phosphate. Peaver DR, (1966) cite l'exemple des gisements de la côte atlantique des États-Unis et Keyser F,(1972) donne l'exemple des gisements du Queensland en Australie.

Erhart H, (1956), Radier H, (1959), Slansky M, (1962) et Westin FC, Brito G (1969) interpellant l'effet de la pédogenèse en climat chaud et humide, qui accroît l'alimentation du bassin en solutions phosphatées, tout en réduisant l'apport détritique. Ces auteurs citent comme exemple respectivement les dépôts phosphatés éocènes du bassin de Gao au Mali, le bassin sédimentaire côtier du Togo-Bénin et au Venezuela là où la quantité de phosphore restent dans les sols.

L'alimentation à partir des apports océaniques, les teneurs moyennes de phosphate en solution ou en suspension dans les océans sont de 0,07 à 0,075 ppm surtout sous quatre formes (Armstrong, 1965), cette teneur augmente proportionnellement avec la profondeur jusqu'à 1000m (Gulbrandsen RA, 1969 ; Roberson CE, 1966). Cette théorie a été proposée par Kazakov AV (1937), elle a été reprise par McKelvey VE et al, (1953) et d'autres auteurs, grâce à son application possible à la plupart des gisements mondiaux. Cette accumulation est comparable à celle de la silice ou du baryum (Gulbrandsen RA et Roberson CE, 1966).

Plusieurs théories de la phosphatogenèse ont été proposées par divers auteurs (Kazakov AV (1937-1950), McKelvey VE et al (1953), Rittmann N (1955), Gulbrandsen RA (1969), Baturin G (1969, 1974), Price N et Calvert G (1978), Lucas J et Prevot L (1981, 1984, 1985), Prevot L (1988), et Mouflih M (1991). Deux possibilités de la genèse de l'apatite soit par précipitation directe sous forme d'apatite, soit par précipitation avec un précurseur calcite initiale, phosphate d'ammonium, phosphate de calcium ou de magnésium amorphe.

Pour expliquer la genèse des phosphates, plusieurs modèles génétiques ont été arborés, nous citons les plus connus :

- Le modèle des environnements sédimentaires en contact direct avec la haute mer (Kasakov A (1937), Cheney T et Sheldon R (1959)), qui permet l'étalement des courants ascendants (upwellings) (figure 5).

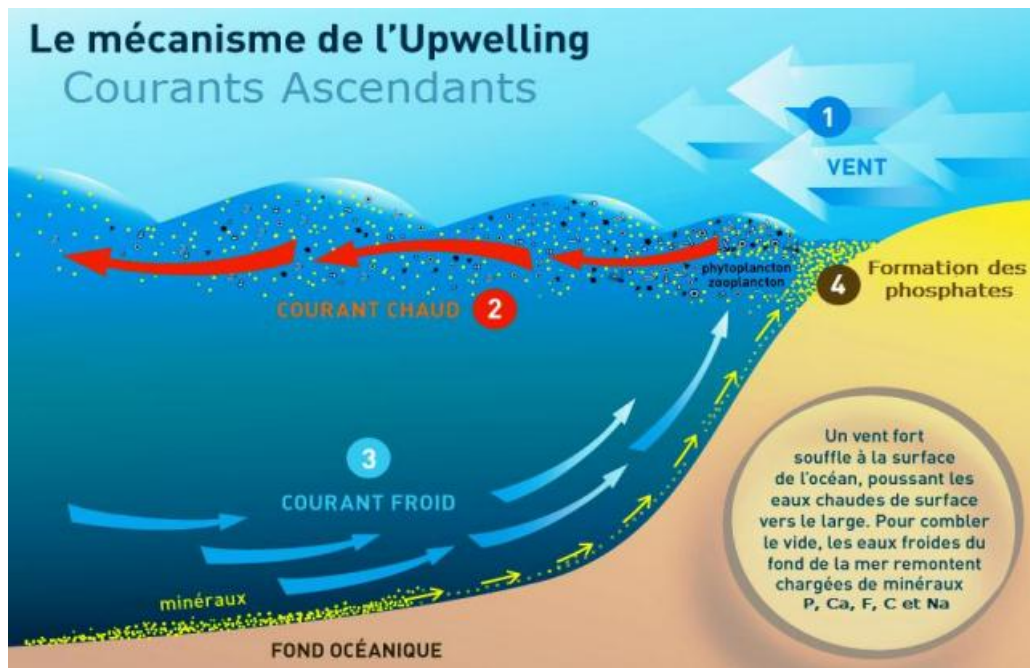


Figure 5 - Mécanisme des courants ascendants Upwelling (Bakun A, 1990).

- Le modèle du bassin fermé en communication restreinte avec la haute mer (Boujo A, (1972), Sassi S (1974), Lucas J et Prevot L(1975)), ce modèle prévoit que le phosphore et les autres minéraux des eaux froides profondes, nécessaires à la formation des phosphates, seront distribués par l'intermédiaire des courants de distribution dans des cuvettes peu profondes protégées des courants forts venus du large.
- Le modèle des zones anticlinales (Keyser M et Cook P, 1972), les phosphates se sont formés et étalés de part et d'autre de ces zones pour donner du côté interne de sédiments riches en phosphate et du côté externe des dépôts pauvres (figure 6).

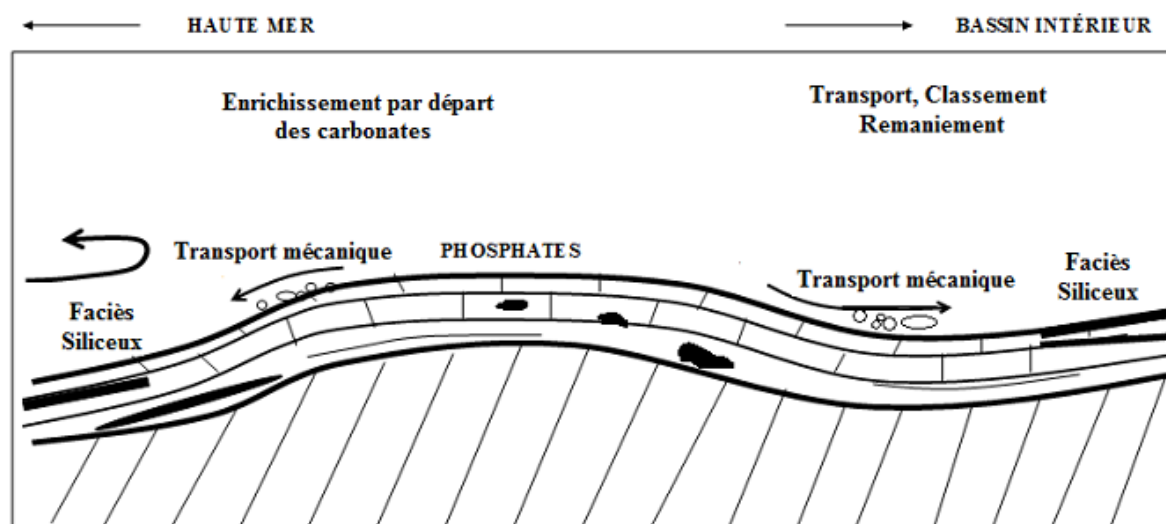


Figure 6 - Mécanisme de développement des faciès phosphatés et siliceux (Keyser M et Cook P, 1972)

Le modèle des bassins évaporitiques (Hite R, 1978) ce type de bassin joue un rôle essentiel dans la formation des phosphates. Ce modèle a été adopté pour les phosphates de Fom Selja à la Tunisie caractérisé par deux séquences gypseuses encadrant la séquence phosphatée (Lucas J et al, 1979).

Le modèle des pièges (Slansky M (1980) ; Lucas J et Prevot L (1975)) qui sont soit des dépressions locales des fonds marins, soit des rides de fond, soit des seuils qui séparent un bassin partiellement ou à l'intérieur d'un golfe étroit. La présence de ces pièges est essentielle lors de l'accumulation de la matière organique qui déclenche la sédimentation phosphatée. (El haddi H, 2014)

I.6- Répartition stratigraphique des dépôts phosphatés

La répartition stratigraphique des dépôts phosphatés à l'échelle mondiale s'étale du Précambrien-Infracambrien jusqu'à l'actuel. Le tableau 2 expose la répartition spatio-temporelle des gisements phosphatés dans le monde (Cook P et Elhinny M, 1979).

Tableau 2 - Répartition chronostratigraphique des gisements phosphatés dans le monde
(Cook P et Elhinny M, (1979))

Étage	Gisement
Pliocène	Gisement de Floride (formé par remaniement).
Crétacé Supérieur-Éocène	Bassin côtier occidental et septentrional d'Afrique, Moyen-Orient, Aktynbinsk (Sud Oural, Russie) Olinda (Brésil).
Jurassique-Crétacé inférieur	Plaine Moscou-Volga Mexique
Permien	Gisement des montagnes Rocheuses Himalaya au nord de Delhi en Inde
Ordovicien	Gisement de Tenesse
Cambrien	Gisement Queensland (Georgia bassin, Australie) Karatan en Syberie Yunnan en Chine Laokao au Vietnam
Précambrien-infracambrien 1800-2200 Ma 1200-1600 Ma 700 – 800 Ma 620 Ma	Australie, UpperPeninsula dans le Michigan, Rajastan (Inde), gisements sibériens, chine. Afrique Ouest (Ouest du fleuve Niger), partie orientale du Sénégal.

Cette répartition spatio-temporelle des phosphates dans le monde est concentrée principalement dans l'Amérique du Nord (États-Unis), en Afrique du Nord (Maroc et Tunisie), en Chine, sur certaines îles d'Océanie (Nauru, Banaba et Makatea) et dans des pays comme (Togo et Jordanie...), ainsi le Maroc, les États-Unis et la Chine considérés comme les pays les plus producteurs dans le monde avec une part de marché supérieur à 62 %.

I.7- Production et consommation mondiales de phosphates

En 2018, environ 8,5 tonnes de phosphates sont produites dans le monde chaque seconde, soit 270 millions de tonnes par an (compteur en tonnes). Les phosphates sont utilisés dans l'agriculture comme engrais en tant que source de phosphore. Ces engrais peuvent être d'origine organique (poudre d'os, arêtes de poissons, ...) ou inorganique (attaque d'acide sur du minerai), ce qui est de plus en plus le cas.

Les phosphates vont devenir une **ressource critique** dans un contexte de démographie et de besoins alimentaires en forte croissance. Plus encore que pour la potasse, les gisements de phosphates sont rares et mal répartis entre les pays du globe. La Chine et le Maroc produisent les deux tiers de la production mondiale, et ces disparités vont s'accroître. En effet, le seul gisement d'importance que possèdent les Etats-Unis sera épuisé en 2050. Et au rythme actuel d'extraction, il n'y aura plus de gisement de phosphates dans 90 ans, vers 2100.

Pourtant, la demande et l'utilisation des phosphates vont continuer à croître ; l'**agriculture** n'est pas près de se passer des engrais (phosphates, potasse et azote) et des spécialistes australiens ont prédit que les engrais vont voir **leur prix exploser** de 500 à 1000 % dans les 20 à 30 ans à venir.

La figure 7 présente une carte des gisements de phosphate naturel actuellement en exploitation, ceux qui ont été exploités dans un passé récent, et ceux qui se sont avérés potentiellement économiques.

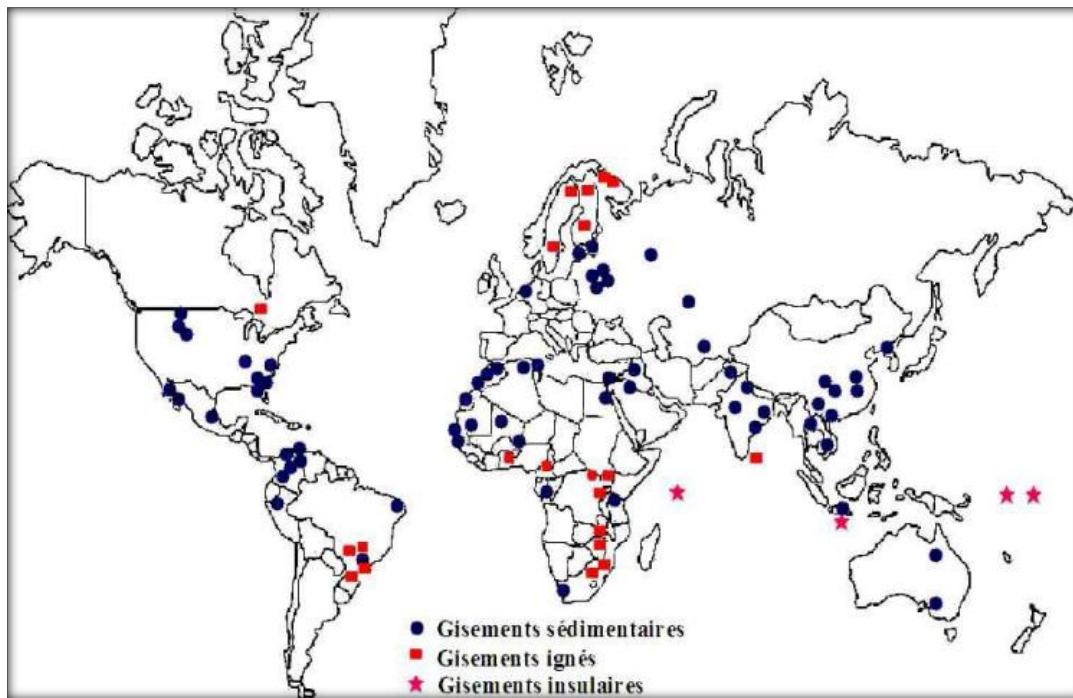


Figure 7 - Localisation des principaux types de gisements de phosphates dans le monde
(Zapata R, 2004).)

Le tableau 3 rapporte la production et les réserves mondiales de phosphates selon les statistiques des années 2015- 2016. Les pays les plus producteurs de phosphate sont la Chine, les Etats-Unis et le Maroc, avec plus de 70 % de la production mondiale. Les réserves mondiales se concentrent dans les plateaux continentaux et monts sous-marins dans l'océan Atlantique et l'océan Pacifique (figure 8). Les ressources mondiales de roche phosphatées sont estimées à plus de 300 milliards de tonnes. Les plus grands gisements de phosphate dans le monde sont localisés au Maroc et en chine (Saaidi, 1991). L'Algérie occupe la troisième place en termes de réserves dans le monde.

Sur une base mondiale, la production et la consommation de phosphate naturel pour application directe (PNAD) sont très limitées et des données fiables sont souvent difficiles à obtenir et évaluer. Beaucoup de pays ne classent pas les PNAD comme engrais et les statistiques de consommation peuvent ne pas les inclure. Les informations sont susceptibles d'être obtenues par des canaux officieux, et leur qualité peut être fortement variable. Il peut être nécessaire d'estimer les PNAD en retirant la quantité de PN utilisés pour d'autres buts des quantités totales de PN importés ou utilisés dans un pays.

Tableau 3- Production et réserves mondiales des phosphates naturels en 2016 (Stephen, 2017)

Pays	Production (10⁶kg)		Réserves (10⁶ kg)
	2015	2016	
États Unies d'Amérique	27 400	27 800	11 000 000
Algérie	1 400	1 500	2 200 000
Australie	2 500	2 500	1 100 000
Brésil	6 100	6500	320 000
Chine	120 000	138 000	3 100 000
Egypte	5 500	5 500	1 200 000
Inde	1 500	1 500	65 000
Palestine	1 840	1 800	260 000
Jordanie	8 340	8 300	120 000
Kazakhstan	1 600	1 000	260 000
Mexique	1 680	1 700	30 000
Maroc et Sahara occidental	29 000	30 000	50 000 000
Pérou	3 880	4 000	820 000
Russie	11 600	11 600	1 300 000
Arabie saoudite	4 000	4 000	680 000
Sénégal	1 240	1 250	50 000
Afrique du sud	1 980	1 700	1 500 000
Syrie	750	/	1 800 000
Togo	1 110	900	30 000
Tunisie	2 800	3 500	100 000
Autres pays	2 440	2 410	810 000
Total	244 500	264 35600	2

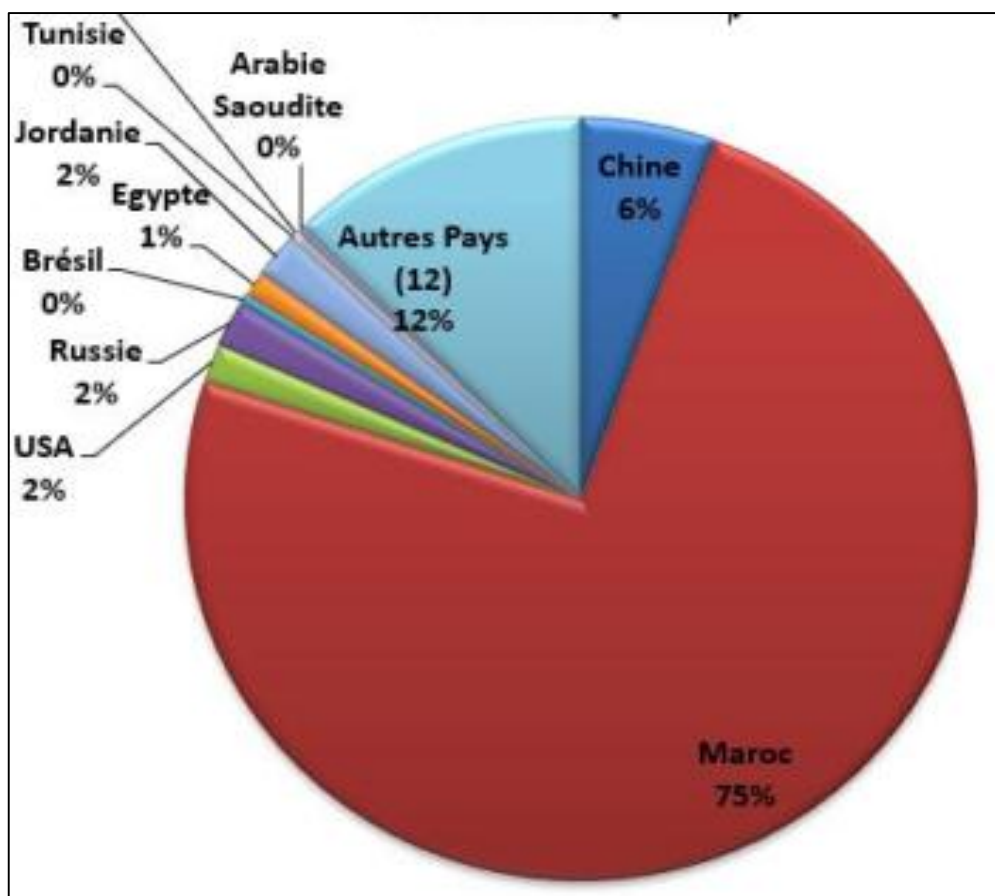


Figure 8 - Réserve mondiale roche phosphatée. (Données tirées de USGS, 2020).

I.8- Phosphates et environnement

Les phosphates naturels contiennent des cations métalliques qui peuvent être valorisés en tant que sous-produits (U, TR, V, Ti) (Cherniak DJ (2000), Rakovan J et Reeder R (1996), Ogihara S (1999), Monir M et al (1999), Krea M et Khalaf H (2000), ou qu'il convient d'éliminer parce qu'ils constituent un danger pour l'environnement (U, Cd, Mo, Se, As...) par suite de l'utilisation des engrais phosphatés (Nathan Y et al (1996), Baïoumy H (2005), Sassi S et Sassi AB (1999), Baturin G et Kochenov G (2000)).

Le taux du cadmium dans le sol européen est devenu, ces dernières années, une des principales préoccupations de la CEE. Il a été estimé que 30–60 % du cadmium contenu dans les récoltes provient de l'atmosphère et 40 – 70 % du sol. Une des sources du cadmium dans le sol est l'engrais phosphaté. Au rythme actuel d'utilisation de ces engrais, surtout dans les pays industrialisés, il y a une accumulation du cadmium dans le sol.

Le phosphore est, avec le nitrate, un des grands responsables du phénomène de l'eutrophisation. Un autre problème environnemental est que les terrils de phosphogypse découlant de la production industrielle d'engrais contiennent des éléments radioactifs. Pour cela des études de valorisation et de dépollution des phosphates ont été effectuées (Boussen, 2007), dans le but de récupérer certains éléments, tel que l'uranium, ou d'éliminer certains éléments toxiques ou nuisibles tels que le cadmium et les métaux lourds.

I.9- Utilisation des phosphates

Le caractère essentiel du phosphore pour toutes les formes de vie. Végétale, animale et humaine, permet de comprendre le développement actuel de l'industrie des phosphates et la diversité des produits phosphorés qu'il génère (Fitoussi R et Helgorsky J, 1982). Lesquels peuvent être grossièrement rangés en trois classes qui diffèrent par leurs champs d'application, ainsi que par les normes de pureté auxquelles elles sont soumises.

I.9.1- Fabrication de l'acide phosphorique

La roche phosphatée est la source principale de l'acide phosphorique, la fabrication de ce dernier représente 80 à 90% de la consommation mondiale de phosphate. On outre, l'acide phosphorique H_3PO_4 est la source de base d'importants composés industriels (ciment dentaire, détergents, levures, etc.). Le procédé industriel, le plus ancien pour la fabrication de l'acide phosphorique est l'attaque de phosphate de calcium par l'acide sulfurique selon la réaction (1). La réaction donne le phosphogypse comme un sous-produit de la production de l'acide phosphorique



L'acide phosphorique est la base de plusieurs réactions de nombreux produits :

- Il est combiné au carbonate de sodium naturel et donne du phosphate de sodium monobasique ou phosphate monosodium (NaH_2PO_4) il est utilisé dans le traitement des eaux de chaudières
- Il est aussi utilisé comme matière première dans la fabrication d'une gamme de produits chimiques comprenant le pyrophosphate acide de sodium (NaH_2PO_4), le tripolyphosphate de sodium ($NaPO_4$), et le métaphosphate de sodium ($NaPO_3$),

- Il est aussi considéré comme un produit de base du phosphate rouge utilisé dans la fabrication des allumettes.

I.9.2- Engrais

Les engrais constituent de loin la production principale (90% du phosphate mondial). Ils sont obtenus à 90 % par voie humide (attaque de la roche phosphatée par un acide fort). Donc, l'engrais est une substance minérale ou organique, naturelle ou synthétique, qui apporte un ou plusieurs nutriments aux plantes. Ces nutriments, en fonction de leur importance dans le processus de développement des plantes, peuvent être classifiés en trois catégories ci-après (Kulaif Y, 1997).

- macronutriments primaires: N, P, K.
- macronutriments secondaires: Ca, Mg, S ;
- micronutriments ou oligoéléments : B, Cl, Cu, Fe, Mn, Mo, Zn et Co.

Les engrais peuvent être produits sous forme solide ou liquide. L'ammoniac anhydre gazeux (82 % d'azote) est stocké et appliqué sous forme liquide. Les engrais liquides se subdivisent en solutions.

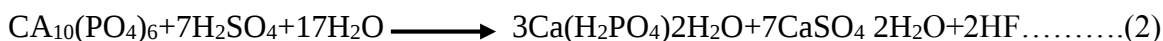
Les engrais minéraux sont constitués de composés inorganiques et organiques synthétiques, obtenus par des procédés industriels (exemple : urée). Ces derniers se subdivisent en deux types : simples (avec un unique composé chimique, mais avec un ou plusieurs nutriments, macro et/ou micro) ou mixtes (résultant du mélange de deux ou plusieurs engrais simples). Les fertilisants mixtes se subdivisent en divers types, les plus connus sont les mélanges (mélange de deux ou plusieurs engrais simples pouvant être individuellement sous forme granulée ou en poudre les fertilisants et les granulés complexes (produits par réaction chimique à partir de deux ou plusieurs composés chimiques dans chaque unité de granulation).

En résumé, les engrais les plus communs peuvent être classifiés selon le nombre de nutriments et leur composition chimique :

a) avec un macronutriment ·

- Azotés : urée, nitrate de calcium, sulfate d'ammonium, nitrate d'ammonium, nitrate de sodium, nitrate de potassium.
- Phosphatés :

- Superphosphate normal (18 % de P_2O_5) : produit résultant de l'acidification de la roche phosphatée (réaction 2), principalement utilisé en Chine (57 % de la consommation mondiale, 5.9 Mt de P_2O_5).



- Superphosphate concentré (25 % de P_2O_5) obtenu après attaque sulfurique et phosphorique de la roche phosphatée, son principal constituant est le phosphate monocalcique $Ca(H_2PO_4)_2$.
- Superphosphate triple (41 à 48 % de P_2O_5) de plus en plus utilisé, il est obtenu suite à l'attaque de phosphates naturels par de l'acide phosphorique (réaction 3).



b) avec deux macronutriments

- Phosphate monoammonique $NH_4H_2PO_4$: obtenu après neutralisation de H_3PO_4 par NH_3 à pH 4 voir réaction (4).



- Phosphate diammonique (DAP) $(NH_4)_2HPO_4$: phosphate solide le plus concentré disponible sur le marché, principale source de P_2O_5 de l'agriculture mondiale, (réaction 5).



c) Formulations NPK (désignations commerciales) : un engrais NPK renferme, outre des composés phosphorés, du potassium (catalyseur de la conversion des nutriments complexes en leurs formes simples), de l'azote (agent responsable de la croissance des plantes) et divers éléments accessoires (Barr J, 1971).

La fabrication des engrais est basée essentiellement sur deux types de matières premières :

- **Basiques** : ammoniac anhydre, roche phosphatée, soufre.
- **Intermédiaires** : acide sulfurique (ou chlorhydrique), acide nitrique, acide phosphorique.

I.9.3- Applications techniques

Les phosphates ne sont pas seulement utilisés dans le domaine de l'agriculture. Pour des applications techniques ils constituent une gamme vaste et hétérogène de produits qui diffèrent aussi bien par leur structure (phosphate, métaphosphate, polyphosphate, pyrophosphate) que par leurs usages.

1- Production des matériaux de construction

Le phosphogypse est le produit de l'attaque du phosphate marchand par l'acide sulfurique. La production mondiale de phosphogypse est très importante elle est estimée à environ 250 millions de tonnes par an. Cette énorme quantité trouve trois destinations : le rejet en cours d'eau, la mise en terril ou la valorisation. (Leenars R, 2006). L'emploi juste du phosphogypse peut se faire dans nombreux domaines, dont le génie civil.

- Dans les constructions routières, où le phosphogypse est envisagé seul en terrassement comme remblai routier, ou en assises de chaussées.
- La production d'agglomérées avec des mélanges de phosphoplatre et de sable ou comme mélanges compactés de phosphogypse stabilisés à la chaux la production de plâtre "imitation marbre", la production de ciment d'anhydrite. La production de plâtre (ou phosphoplatre), obtenu par conversion thermique du sulfate de calcium dihydraté du phosphogypse en semihydrate. Cette production fut la première application intéressante qui est passé à l'échelle industrielle grâce à la teneur élevée du phosphogypse en gypse et l'aspect technique relativement simple de cette application.
- Les produits et dérivés de cette technique sont : L'enduits de plafonnage manuel ou à la machine, les plaques de plâtre cartonnées avec ou sans isolant, les plâtres de collage, les carreaux de plâtre etc. Par contre, l'industrie du ciment n'admet que des phosphogypses exempts au maximum d'impuretés. Les applications les plus importantes dans la fabrication du ciment sont la régularisation de la prise du ciment, la fabrication combinée du clinker avec l'acide sulfurique et la minéralisation de la cuisson et du clinker.

2- Phosphates comme matériaux diélectriques

Un matériau diélectrique se distingue d'un matériau métallique par le fait que les charges ne peuvent se déplacer sous l'action d'un champ électromagnétique. En revanche, sous l'action d'un champ électrique E les $\vec{e}$ ntités, qui le constituent peuvent révéler l'existence de

dipôles électriques ce qui crée une polarisation locale au niveau microscopique et une susceptibilité électrique au niveau macroscopique.

2.1- Matériaux piézoélectriques

Le terme piézoélectricité vient du mot grec *piézein* (presser, appuyer). Il caractérise la propriété que possèdent certains matériaux de se polariser électriquement sous l'action d'une contrainte mécanique et réciproquement de se déformer lorsqu'on leur applique un champ électrique. Les deux effets sont indissociables. Le premier effet est appelé effet piézoélectrique direct, le second effet est piézoélectrique inverse (Thomas M, 2016).

2.2- Matériaux hydroélectriques

Parmi vingt classes de symétrie piézoélectriques, 10 d'entre elles sont compatibles avec l'existence d'un moment dipolaire permanent, en l'absence de contrainte ou de champ extérieur, par décalage des barycentres des charges positives et négatives. Ces 10 classes caractérisent les matériaux hydroélectriques où un changement de température détermine une variation de la polarisation électrique et par conséquent engendre un potentiel électrique. Cette propriété est rencontrée dans nombre de minéraux tels que le quartz, la tourmaline.

Un sous-groupe remarquable des cristaux piézoélectriques sont les cristaux ferroélectriques pour lesquels la direction de la polarisation spontanée peut être réorientée ou même renversée sous l'action d'un champ électrique externe.

La signature de la ferroélectricité est l'existence d'un cycle d'hystérésis lorsqu'on représente la variation de la polarisation P en fonction du champ appliqué (Hustel B et al, 2013)

2.3- Matériaux ferroïques

Le terme «ferroïques» est le nom générique regroupant les composés ferromagnétiques, ferroélectriques et ferroélastiques. L'origine du radical «ferro» remonte à Pierre Weiss qui établit vers 1900 que le fer et certains métaux sont composés de "domaines" minuscules, rassemblant un certain nombre d'atomes. Normalement, ces domaines sont disposés en désordre à l'intérieur du métal.

Le passage d'un aimant sur un barreau de fer non aimanté aligne tous ces «domaines» dans le même sens et provoque l'aimantation du métal. De cette première expérience est resté

le terme « ferro » pour tout alignement de domaines et/ ou de moments magnétiques, électriques parallèlement à une même direction. Inversement, le radical « antiferro » décrira des alignements d'entités antiparallèles.

3 - Phosphates dans la fabrication des céramiques

3.1- Phosphates comme céramiques à faible coefficient de dilatation thermique

Les relations entre la structure d'une céramique et ses propriétés dilatométriques constituant un aspect important de la science des matériaux géoscience en raison de leur implication dans nombre d'applications industrielles : métallurgie, électronique, matériaux spéciaux utilisés dans la construction des engins spatiaux etc. Dans le cas où les matériaux sont soumis à des contraintes thermiques importantes (capsules spatiales, supports de miroirs de télescopes, fours thermiques, supports de catalyseurs ou de puces électroniques, etc.), la nécessité pour ce matériau, de pouvoir supporter des chocs thermiques sans altération est à l'origine de nombreuses recherches sur les céramiques à faible dilatation thermique. L'un des aspects de ces études est de relier le comportement macroscopique de la céramique aux modifications microscopiques résultant de l'effet thermique, modifications pouvant être détectées par l'analyse structurale.

Tout solide chauffé ou refroidi subit une modification de ses dimensions. Les modifications engendrées lors du chauffage d'un matériau solide sont généralement caractérisées par le coefficient de dilatation thermique. Les phases cristallisées anisotrope sont donc des coefficients dépendant de l'orientation cristallographique et sont souvent caractérisées par des valeurs moyennes obtenues, par exemple à partir des céramiques frittées.

3.2- Phosphates comme matériaux à faible dilatation thermique

Le rôle des phosphates dans le développement des céramiques à faible dilatation thermique est lié à la richesse de la cristalochimie des composés du Zirconium et des phases engendrées par diverses substitutions cationiques. Leur découverte a tenait en partie au hasard. En 1976 Goodenough mettaient en évidence les propriétés de conduction ionique de la phase $\text{Na}_{1+x}\text{Zr}_2\text{P}_{3-x}\text{Si}_x\text{O}_{12}$ en vue de la mise au point de batteries fonctionnant à haute température. L'intérêt de ces

silicophosphâtes conduisait (Boilot et al 1979) à élaborer ces électrolytes à plus basse température et à étudier leur comportement thermique. Les faibles valeurs de dilatation obtenues pour certaines compositions furent le point de départ de nombreuses études sur cette famille de composés connue sous le nom de Nasicon (acronyme de Natrium Super Ionique Conducteur). Plus récemment sont observées les propriétés remarquables du diphosphate de Zirconium (ZrP_2O_7) et de ses composés isotypes ainsi que celles de l'oxyphosphate $\text{Zr}_2\text{O}(\text{PO}_4)_2$ et des différentes phases résultant de la substitution du Zirconium par le Hafnium.

I.9.4 - Applications alimentaires du phosphate

Les phosphates pour des applications alimentaires recouvrent également un vaste domaine de produits : poudres de levures, charcuterie, salaisons, fromages, etc.

Leur degré de pureté, notamment vis à vis de certains éléments (Arsenic, Fluor, métaux lourds), est très rigoureux. Ceci explique pourquoi la majeure partie de ces composés est préparée à partir d'acide phosphorique dit de voie thermique. La pureté de ce dernier est nettement supérieure à celle de l'acide phosphorique dit de voie humide, ultérieurement, résultant de l'attaque des apatites par un acide fort (en général, l'acide sulfurique). L'alimentation des animaux contient deux éléments indispensables à la constitution du corps et au fonctionnement de l'organisme qui sont le calcium et le phosphore ; la roche phosphatée offre ces deux derniers éléments.

I.9.5 - Application pharmaceutique et biomatériaux du phosphate

L'industrie pharmaceutique utilise largement l'acide phosphorique et le Calcium dans la production de nombreux médicaments, et les pâtes dentifrices, En outre ils polissent, blanchissent, préviennent les dépôts de tartre et constituent un complément en Fluor.

L'acide phosphorique purifié entre dans la synthèse de produits pharmaceutiques. Les phosphates et triphosphate de calcium sont également utiles pour l'industrie pharmaceutique.

Dans le domaine du traitement du sang, les sels de phosphates freinent la coagulation et facilitent donc les analyses médicales. (Smith P et Thirion E, 1991).

On rencontre aussi les phosphates dans le domaine des biomatériaux à usage orthopédique. Les différents phosphates de calcium entrent dans la constitution de nombreux

biomatériaux soit sous forme de céramique ou ciment soit sous forme de dépôts ou dans des matériaux de composite. (Mihai B, 2005).

I.9.6 - Phosphate pour le stockage des radioéléments

En matière de stockage des éléments radioactifs en particulier des déchets provenant des centrales nucléaires, les solutions envisagées par les opérateurs concernés doivent beaucoup à la découverte en 1972 du réacteur fossile nucléaire d'Oklo au Gabon (Carpena J et Lacout J, 2002). A l'origine de cette découverte, une analyse de routine de la quantité d'Uranium - 235 dans un minerai montrait des taux extrêmement variables pouvant atteindre une proportion aussi basse que 0,4 % alors que la teneur attendue était de 0,72%.

Les propriétés géologiques et cristallographiques des phosphates de Calcium les prédisposent à être des matériaux capables de stocker des éléments radioactifs.

Les différentes applications industrielles du phosphate sont résumées et montées dans la Figure 8.

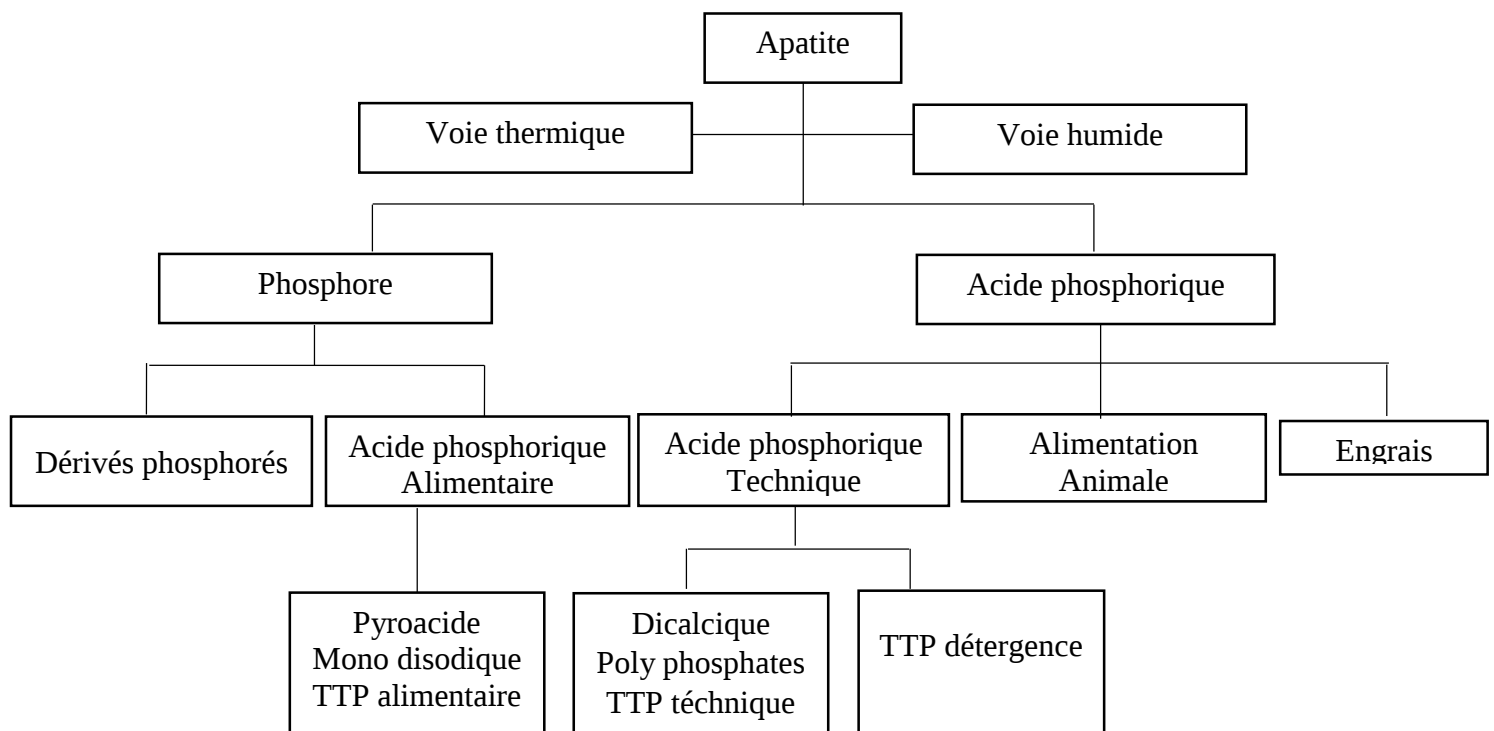


Figure 9 - Répartition des phosphates industriels (Fitoussi R et Helgorsky J, 1994).

I.10- Conclusion

Le phosphate est le composant de ces roches ayant un intérêt agronomique. Plus le contenu en phosphate (P_2O_5) sous forme d'apatite est élevé, plus le potentiel économique du minerai est grand. Les facteurs qui sont importants dans la conversion chimique des Phosphates Naturels en engrais (carbonates libres, fer (Fe), aluminium (Al), magnésium (Mg) et chlorure) ne sont souvent pas importants quand la roche doit être employée en application directe.

CHAPITRE II : Situation géographique et état de la géologie régionale

Sommaire

II.1- Introduction.

II.2- Historique des travaux d'exploration des phosphates de djebel Onk Tébessa

II.3- Situation géographique

II.4- Stratigraphie de la région de Djebel Onk

II.4.1- Le crétacé

II.4.2. Le paléocène

II.4.3- l'éocène

II.4.4- le miocène

II.4.5- le quaternaire

II.5- Tectonique de la région de Djebel Onk

II.6- Géologie du gisement de Kef Essenoun

II.6.1- Stratigraphie

II.7- Conclusion

CHAPITRE II : Situation géographique et état de la géologie régionale

II.1 - Introduction

Les phosphates algériens sont liés aux dépôts marins du Tertiaire Paléocène et Eocène (Visse L, 1952). Les phosphates stratiformes liés aux dépôts marins, sont largement développés sur le territoire Nord-est algérien. Ils sont subdivisés en deux zones : celle du Nord, plus exactement connue à Sétif et Bordj Bou Arreridj, à l'exemple des anciennes exploitations (Ras El Oued, Bordj Ghedir) et la zone Est, plus riche et très importante particulièrement à Tébessa où se trouvent les gisements en cours d'exploitation. Notamment dans la région de Djebel Onk. Cette région comprend plusieurs secteurs ou formations phosphatées. Parmi les gisements soumis à l'expertise, dont les limites sont définies, trois sont attenants à l'exploitation actuelle Djemi-Djema Est et Ouest et Kef Essenoun et trois en sont éloignés de 6 à 35 kilomètres : Djebel Onk Nord, Bled El Hadba et Oued Bétita.

Les dépôts de phosphates sont concentrés dans plusieurs gisements : Bled El Hadba (800 Mt), Djemi-Djema (618 Mt), Kef Essenoun (517 Mt), Bétita (175 Mt), Djebel Onk Nord (92 Mt) et Tarfaya (144 Mt). Ces phosphates sont d'âge Tertiaire Inférieur : passage Paléocène à l'Eocène inférieur. Ces domaines phosphatés d'âge Tertiaire, appartiennent à la grande province phosphogénique méditerranéenne qui s'étale depuis le Maroc à l'Ouest jusqu'aux pays du Moyen Orient (Irak, Jordanie, Syrie etc...).

Les Gisements d'importance économique, connus sous le nom de phosphorite, sont localisés dans la zone Est et plus précisément à Tébessa, ou ils sont en relation étroite et partagent des affinités avec les gisements connus en Tunisie. Ceux du Nord Est de Tébessa (Dj. Dyr et El Kouif), en terme des réserves sont l'équivalent de : Ain Kerma, Kelaât Djerda et Sra Quartane du côté tunisien et ceux de Bir El Ater, situés sur les flancs de Djebel Onk et le flanc Ouest de Djebel Zrega, avec un potentiel économique considérable, sont en rapport direct avec les gisements exploités en Tunisie dans le Bassin de Gafsa (Visse L, 1952 et Kassatkine Y et al., 1980), comme les gisements de M'rata, Redeyef, Kef Eschfair et Metleoui.

II.2 - Historique des travaux d'exploration-exploitation des phosphates de Djebel Onk Tébessa

Les travaux sur les phosphates Algéro-tunisiens ont débuté au 18ème siècle par Philippe Thomas qui a découvert des couches de phosphate à Rass El Ajoun au Sud-ouest de la Tunisie en 1873.

L'ouverture de la carrière de Djebel Dyr se fait en 1893. Durant cette période, l'exploitation commença aussi au niveau du Kouif. Cependant, les conditions d'exploitation et les teneurs faibles en phosphore entraînent l'abandon de Djebel Dyr (en 1908) et ce n'est que la mine d'El Kouif qui continua à fournir l'essentiel de la production.

Durant la période 1906-1907, Joleau M a découvert le gisement de Djebel Onk avec la mise en évidence de deux couches phosphatées à Djemi-Djema au Sud de Djebel Onk. Le gisement de Kouif a été exploité par la Société des Phosphates de Constantine, où la production a atteint 157000 tonnes en 1918 (publications de la Société des phosphates).

Visse L (1951) a étudié ce gisement de phosphate avec beaucoup de détails relatifs à la stratigraphie. La Société Nationale de la Recherche Minière (SONAREM) a repris l'exploitation du gisement d'El Kouif dès l'indépendance (1963) et ce jusqu'à la fermeture de la mine en 1979.

La fermeture de la mine d'El Kouif est accompagnée par une exploration intensive dans la région de Tébessa Sud. Des levés radiométriques aéroportés ont été effectués sur le bassin du Djebel Onk durant la période allant de 1961 à 1963. Ces levés interviennent après le succès de cette méthode dans l'Atlas Tellien le long des affleurements de l'Eocène. Par ailleurs, les études ont été reprises par Ranchin G (1963) qui avait établi les cartes géologiques à l'échelle 1/5000. Alors, l'objet de nombreux travaux, parmi lesquels on peut citer de Chabou-Mostafai S (1987) et Mezghache H (1991).

De 1971 à 1974, les travaux de recherches et de prospection sur les phosphates de l'est Algérien ont été relancés par la Société Nationale de la Recherche Minière (SONAREM) en s'appuyant davantage sur des levés aéro-radiométriques (Rudowicz I, 1975).

L'exploitation du gisement de Djebel Onk a commencé en Février 1965 au niveau de Djemi-Djema par la Société de Djebel Onk. Suite à l'aménagement de la mine, l'intérêt porté à

la géologie de Djebel Onk s'accroît. Cette région devenait,

De 1985 à 1987, la Société Nationale du Fer et des Phosphates (FERPHOS) qui exploite les phosphates de Djebel Onk a confié à l'Entreprise de Recherche Minière (EREM), des travaux de recherche et d'évaluation des ressources en phosphates, de la région de Tébessa. Des travaux de sondages carottés ont été réalisés, totalisant plus de 10732 m (97 sondages) et avec un programme de creusement de tranchées (64 tranchées). Ceci est suivi par un contrat avec le Bureau de Recherche Géologique et Minière (BRGM) pour la collecte des éléments techniques et économiques relatifs au projet de développement de l'exploitation des gisements de phosphate de Djebel Onk (Prian G et Cortiel P, 1993).

II.3- Situation géographique

Le gisement de Djebel Onk est situé au Nord-Ouest du Sahara Algérien précisément à l'est des monts de Nememcha à une vingtaine de kilomètres de la frontière Algéro-Tunisienne. La région appartient à la wilaya de Tébessa dont elle est éloignée d'environ 100 km, la localité la plus proche est la ville de Bir el Ater. Le gisement est relié à Bir el Ater par la route nationale n°16 (Annaba – El-Oued) et par le chemin de fer servant au transport des phosphates vers l'installation portuaire d'Annaba éloignée de 340 km. Le relief du terrain montagneux est très varié. Djebel Onk culmine à 1338 m au Guern el kebech, les terrains sont entaillés par un oued en général à sec. Le climat est semi désertique.

Les travaux de prospection et d'évaluation réalisés en 1985-1988 sur la région de Djebel Onk ont montré les gisements importants en qualité et en quantité : Djebel Onk Sud (Djemi-Djema, Kef Essenoun), Oued Bétita, Bled EL Hadba et Djebel Onk Nord (flanc septentrional de l'anticlinal de Djebel Onk, à 8 km au NW de Bir El Ater). Ce dernier a permis d'estimer les réserves de ce gisement environ 150 millions tonnes à 20,29 % en P_2O_5 et 3,95 % en MgO .

▪ Djebel Djemi-Djema

Situés aux deux extrémités du brachyanticlinal, ou la couche de phosphate s'enfonce progressivement vers le nord-est et le sud-ouest. L'épaisseur moyenne de la couche de phosphate est respectivement de 28m à 30m. Ce enfoncement s'accompagne d'une augmentation du recouvrement stérile, en particulier de la couverture sableuse du Miocène. Dans la partie orientale du gisement de Djemi-Djema est, la surface d'érosion ante miocène provoque l'érosion progressive d'ouest en est et la disparition complète du faisceau phosphate

et des calcaires yprésiens sus-jacents. Les réserves calculées de ces deux blocs sont évaluées à 600 millions tonnes en B+C1+C2 avec des teneurs de 23,47% en P_2O_5 et 3,74 % en MgO.

▪ **Bled EL Hadba**

Située à 14 km au Sud-est de djebel Onk et à 16 km de la frontière Algéro -Tunisienne. Marque par la réapparition de la couche phosphate a l'affleurement sur le flanc Sud de la mégastucture synclinal, séparent les anticlinaux des Djebel Onk et du djebel Zrega. La couche de phosphate est épaisse que sur le flanc Sud du djebel Onk .mais la sédimentation phosphatée est plus hétérogène avec diminution de la fréquence des grains.Les réserves calculées sont de : 325 millions tonnes avec des teneurs de (14 à 19%) en P_2O_5 et fortes teneurs en MgO (6 à 10%).

▪ **Le gisement de Tarfaya**

Se singularise par une structure renversée des formations géologiques, les couches se redressent et présentent des pendages assez élevés. La couche productive et les calcaires du toit s'amincissent par les effets d'une érosion très importante.

▪ **Le Gisement de Margueb Ettir**

Situe à 3 km à l'ouest de Bir el Ater et à 750 m au nord-ouest de la route N°16

▪ **le gisement de Bettita**

Est le plus éloigné de tous les gisements il est située à 45km au Sud-est du centre minier du Djemi-Djema. Et n'est distant que de 2 à 4km du gisement de Mides et Tunis. La série de phosphate d'une épaisseur enverront 35 à 45m 26-28 % de P_2O_5 et moins 1% MgO. Les réserves prévisionnelles sont estimées à 20 Mt.

▪ **Le Gisement de Djebel ONK- Nord**

Situe à 6 km au nord du centre minier de Djemi-Djema. Appartient au flanc septentrional de l'anticlinale de djebel- Onk, a faible pendage vers le nord cette zone se caractérise par une réduction progressive de l'épaisseur de la couche de phosphate, en allant vers l'Ouest et vers le Nord, jusqu'à sa disparition complète, sur les flancs du hautfond d'Ain Fouris. De la couche de phospharenites est de 14 à 18 m. La réduction d'épaisseur s'accompagne en outre d'une sédimentation phosphatée plus hétérogène, avec apports de quartz détritiques liés à la zone de

haut-fond vers l'est .la couche de phosphate est complètement érode par la surface d'érosion ante-miocène (post lutétienne), qui tronque progressivement la série de Ouest vers l'Est. Ce gisement se caractérise par une bonne teneur en P_2O_5 (23 à 26%), leur épaisseur maximale de la couche de phosphate est de 14 à 18m.

▪ **Kef Essennoun**

Ce dernier qui est l'objet de notre étude est situé sur le flanc méridional de l'anticlinal crétacé de Djebel Onk. Il constitue quelque sorte la retombée synforme de la méga structure antiforme. Au Nord, on aperçoit les dressants de Kef Essennoun qui correspondent à la zone de la flexure faille du flanc Nord de la structure synforme. Le flanc Sud est constitué par la table de Kef Essennoun, qui plonge monoclinalement vers le sud-ouest, sous un angle de 10 - 15°.

Au plan structural, le gisement peut être assimilé au plongement Sud-Ouest du synclinal de Bled Djemi-Djema. Lithologiquement le gisement de Kef Essennoun est identique à celui de Djemi Djema, il se distingue de ce dernier par l'importance de la puissance de la couche phosphatée (couche productive) qui peut atteindre jusqu'à 50 m, et gisent à une profondeur relativement faible. Les réserves sont estimées environ 480 millions tonnes en B+C1+C2 avec des teneurs moyennes en P_2O_5 (25,05 à 27,94 %) de la couche productive et 3,2 % en MgO, plus riches comparativement à celles de Djemi-Djema.

Le bassin de Djebel Onk se situe dans la zone des climats subdésertiques caractérisés par deux saisons très nettes ; un hiver froid et rigoureux et un été chaud où les températures peuvent dépasser 45°. Les précipitations sont peu abondantes, n'excédant pas en moyenne 300 mm/an. La végétation est pratiquement inexistante. En hiver les chutes de neige se produisent régulièrement sur les sommets, les gelées sont nombreuses et les pluies sont souvent, brèves mais parfois leur forte intensité occasionne des crues très violentes. Le vent dominant est le Sirocco, vent sec et chaud dont l'effet de dessèchement au printemps peut-être catastrophique sur les cultures. La population est peu dense. Sa situation économique s'est améliorée grâce à l'installation du complexe minier à Bir El Ater ; ce qui a contribué à l'agrandissement et au développement de la ville.

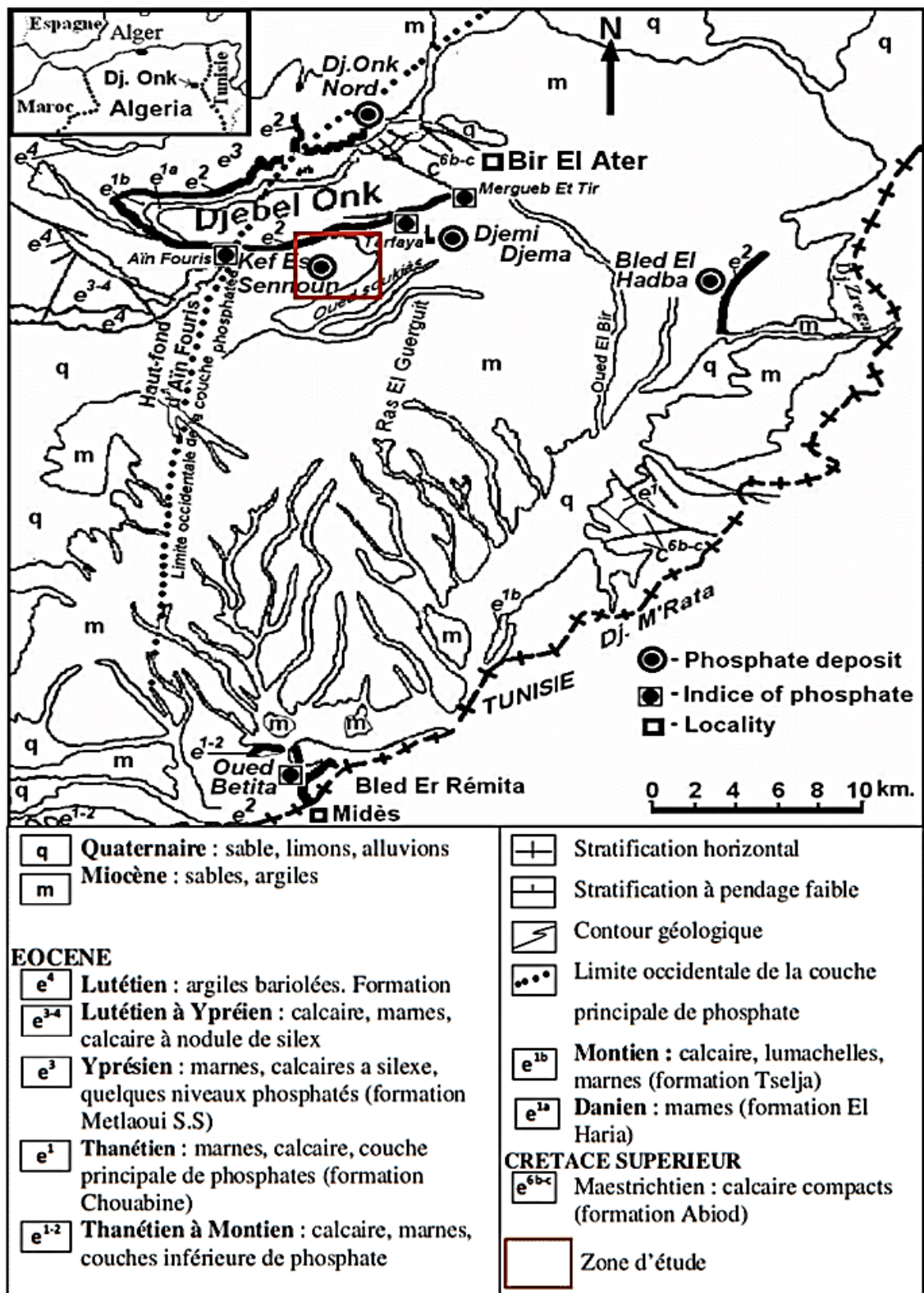


Figure 10 - Carte de situation géographique des gisements de phosphates de la région de Djebel Onk (Prian G et Cortiel H, 1993).

II.4- Stratigraphie de la région de Djebel Onk

La stratigraphie de la région de Djebel Onk a été établie par Visse (1952). La série sédimentaire affleurante est exprimée par une succession stratigraphique allant du Crétacé supérieur (Maestrichtien) à l'Eocène moyen (Lutétien), surmontée par une série sablo-argileuse continentale datée du Miocène et du Quaternaire (Figure 11).

Le détail de la lithologie et de son découpage stratigraphique sont basés sur la synthèse des travaux de plusieurs auteurs (Dubourdieu G (1956), David (1956), Fleury J (1969), Thiéberoz et Madre (1976), Rouvier (1977) , Perthuisot (1978), Chikhi (1980), Otmanine A (1987), Perthuisot (1992), Bouzenoune A (1993), Dussert (1924), Flandrin J (1948), Visse L (1951), Ranchin G (1963), Villain J(1979), Chabou-Mostefai S (1987)

La colonne lithostratigraphique ci-après résume l'essentiel de ces résultats voir figure 11

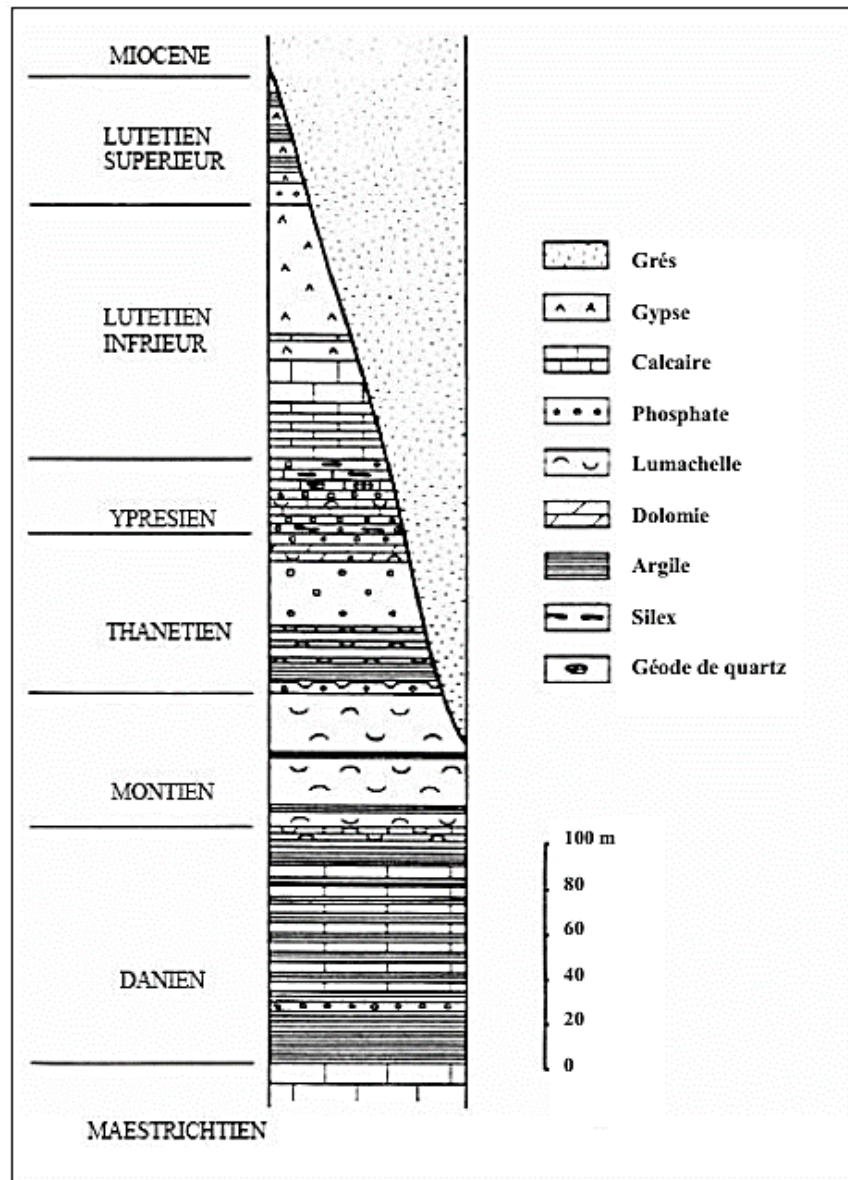


Figure 11 - Coupe stratigraphique schématique du Djebel Onk (d'après Ranchin G, 1963).

II.4.1- Le crétacé

II.4.1.1- Le crétacé inférieur

Le crétacé affleure largement dans les monts de Mellègue. Les formations du Crétacé inférieur, représentées par le Barrémien, l'Aptien, l'Albien et le Vraconien, sont localisées dans les parties centrales des structures anticlinales, généralement percées par les diapirs triasiques. Ce sont les sédiments les plus anciens au cœur de l'anticlinal du Djebel Onk tectoniquement très accidentés. Seuls les dépôts du Maestrichtien y affleurent.

▪ **La barrémien**

Les formations du Barrémien sont très réduites. Elles affleurent en petit anticlinal à Sidi Embarka au Nord-Est du Djebel. Ouenza, sur le flanc Sud-Ouest de l'anticlinal de Mesloulou et le long de l'Oued Batma ainsi qu'au Nord-Sud de Dehar Mesloulou (Dubourdieu G, 1956). Elles sont représentées à la base par des marnes grises ou jaunes assez argileuses, refermant des ammonites pyriteuses. Au sommet, ce sont des intercalations marno-calcaires avec de minces couches de calcaires noduleux gris clairs. Dubourdieu G (1956) et Durozoy (1956) ont signalé la présence probable d'une partie du Barrémien dans les calcaires et les dolomies des grands escarpements du flanc Est du Djebel Bouroumane. Les formations du Barrémien se sont déposées sur un haut fond, assez proche de la surface témoignant de conditions de sédimentation de mer peu profonde. Ces conditions de sédimentation se poursuivent jusqu'au début de l'Aptien.

▪ **L'Aptien**

L'Aptien affleure d'une manière remarquable dans la région de Mesloulou, M'Khiriga, Kef Rekhma et Boudjaber. Ces formations sont rencontrées dans le noyau des structures anticlinales et à la proximité des formations triasiques. La puissance de la série aptienne est liée au développement des faciès récifaux. Cette série joue un rôle important de métallotecte lithologique, car il encaisse les minéralisations ferrières et polymétalliques. Ces formations à caractère essentiellement carbonaté néritique, se sont déposées dans une mer chaude peu profonde. L'Aptien inférieur est essentiellement marneux, caractérisé par une alternance de marne, d'argile, de grès et de calcaire à gastéropodes, mollusques et échinoïdes. Il est surmonté par l'Aptien supérieur formé par des calcaires massifs avec des intercalations de marnes et demarno-calcaires à Orbitolines. La formation aptienne est généralement surmontée, par le Clansayésien. Il est marneux à ammonites à l'Ouenza et argileux avec intercalations des calcaires et grès lumachelliques à Mesloulou. Le Clansayésien est formé d'alternances de marnes, de grès, de calcaires et de marno-calcaires. Son épaisseur varie entre 40 à 90 m à M'Zeita et de 250 à 300 mètre au Sud-Est de ce massif (Dubourdieu G, 1956).

▪ **L'albien**

L'Albien des monts de Mellègue est généralement carbonaté, marqué par une faune benthique dans des zones peu profondes (Bouzenoune A, 1993). La puissance des dépôts albiens est de l'ordre 450 m, dépassant les 1300 m à Djebel Hameima (Dubourdieu G, 1956).

C'est une formation constituée de calcaire gris bioconstruit, surmontée par des marnes grises à ammonites. Dans sa partie moyenne à supérieure, l'Albien est représenté par des marnes grises foncée bitumineuses à foraminifères benthiques. Ces marnes s'intercalent au sommet par des bancs de calcaires et de grès. Le passage entre l'Albien inférieur calcaire et l'Albien moyen marneux et marno-calcaire est marqué par une inconformité stratigraphique antévracénienne.

- **L'albo-aptien**

La couverture albo-aptienne est percée par le Trias. Ce dernier redresse les couches et provoque une complexité des structures, généralement scellées par le Vraconien comme à l'Ouenza, M'zouzia et Boukhadra (Bouzenoune A, 1993 ; Nedjari-Belahcène et Nedjari, 1984 ; Othmanine A, 1987).

- **L'vracénien**

Le Vracénien est caractérisé par une formation marneuse à intercalation de calcaire argileux dont la puissance est de 500 à 600 m (Dubourdieu, 1956). Il s'agit des dépôts pélagiques marquant ainsi une transgression. Les faciès vracéniens ont été datés grâce à des ammonites (Fleury J (1969), Othmanine A, 1987). La lithologie permet de former un écran imperméable qui contrôle les minéralisations polymétalliques. Au Sud de Boujaber, la barre albienne est surmontée par un niveau marneux à foraminifères planctoniques rapportée au Vracénien-Cénomaniens (Salmi-Laouar S, 1998). Cette formation affleure aussi, sur le versant Nord-Est de Hameimat Nord sous forme de marnes noires à foraminifères pélagiques avec de minces intercalations de calcaire très argileux dont l'épaisseur moyenne de 100 m (Fleury J, 1969).

II.4.1.2- le crétacé Supérieur

Le Crétacé Supérieur est représenté dans la région par les dépôts du Cénomaniens, Turonien, Coniacien, Santonien, Campanien et Maastrichtien.

- **Le Cénomaniens**

Est caractérisé par une série monotone de marnes grises qui renferment des filons calcitiques fibreux. Sa puissance varie entre 600 et 900 m. La partie inférieure est caractérisée par des marnes argileuses verdâtres surmontées par une série marneuse avec des couches de calcaires du Cénomaniens moyen. Les parties supérieures de cette formation deviennent

essentiellement carbonatées.

- **Le turonien**

Le Turonien est très bien développé dans la région. Sa puissance peut atteindre 1000 m. Il montre un faciès carbonaté, généralement constitué par des marno-calcaires. Les calcaires sont compacts et très durs ils s'alternent avec des couches de marnes à Inocérames à la base. Cet ensemble est suivi par des marnes argileuses, riches en ammonites, huîtres et divers de lamellibranches (Dubourdieu G, 1956 et 1959). Le Turonien représente un métallotecte pour la minéralisation polymétallique.

- **Le coniacien-Santonien**

Le Coniacien-Santonien n'a pas été subdivisé à cause de manque d'éléments de datation. Il est représenté par des marnes argileuses grises verdâtres et jaunes grises à plaquettes de calcite fibreuse, en intercalation de marnes à lumachelles. L'épaisseur varie de 200 à 300 m à l'Ouenza et de 490 à 600 m à Boukhadra (Dubourdieu G, 1956).

- **Le campanien inférieur**

Le Campanien inférieur est représenté par une formation homogène constituée de marnes argileuses. Les parties supérieures sont dominées par des calcaires blancs, crayeux à minces avec des intercalations de marnes et de calcaires marneux. La puissance de cette formation varie entre 300 m et 600 m (Dubourdieu G, 1956). Le régime sédimentaire du Campanien supérieur, Maestrichtien indique toujours la continuité des mêmes conditions de dépôts dans un milieu peu profond et de mer chaude avec une prédominance de calcaires crayeux rarement récifaux (Chevenine A et al. 1989).

II.4.2. Le paléocène

La base du Paléocène est caractérisée par la présence de marnes analogues à celles du Maestrichtien supérieur qui s'intercalent à des couches phosphatées vers les niveaux supérieurs. Ces phosphates renferment aussi des rognons de silex qui sont bien développés dans sa partie sommitale. Il est représenté par des sédiments marins qui atteignent d'assez grandes épaisseurs (350 m).

- **Le danien**

Il est constitué par un puissant complexe marneux où on note la séparation entre le Danien supérieur et le Danien inférieur. Le Danien supérieur est représenté par des calcaires et des intercalations de marnes assez épaisses, avec des caractéristiques spécifiques, calcaire dur de couleur crème ou blanc s'intercalant avec des marnes tendres argileuses schisteuses dont l'épaisseur varie d'une dizaine de centimètres à un mètre. Le Danien inférieur est représenté par des argiles marneuses schisteuses d'une couleur gris foncé ou brun vert avec des intercalations des marnes très dures en bancs irréguliers. La série est traversée par des gypses. L'épaisseur du Danien inférieur est de 30 à 40 m.

- **Le montien**

Cet étage est caractérisé par de puissantes couches calcaires à *Ostrea Canaliculita* Sow et *Ostrea Multicostata* Desh (Pélécypodes), avec des intercalations de marnes. Il affleure en plusieurs points ; Djebel Onk, Djebel Darmoun, Djemi-Djema, Oued Betita et Bled El Hadba. Son épaisseur est de 60 m. Pour Visse en 1951, le Montien est représenté par 2 mètres de calcaires, le reste de la lumachelle étant attribué au Thanétien.

- **Le thanétien**

C'est l'horizon porteur de la minéralisation. Il est visible sur le flanc de l'anticlinal de Djebel Onk avec une épaisseur de 72 m. Il se subdivise en deux parties:

- a- Le thanétien inférieur**

Représenté par des marnes gris foncé à noire schistifiées. Dans la partie inférieure, on note la présence des conglomérats et de minces passées phosphatées, ainsi que deux niveaux de marnes à faune caractéristiques (*Thésiteogracitis*). Au sommet apparaissent des intercalations phosphatées atteignant jusqu'à 2 m, surmontées par des calcaires et des marnes à gros gastéropodes. La puissance varie de 30 à 40 m.

- b- Le thanétien supérieur**

Il débute par un niveau dolomitique à Gastéropodes, sous-jacent à une couche phosphatée d'une épaisseur moyenne de 30 m à Djebel Onk et Bled El Hadba et qui diminue jusqu'à disparition vers le Nord. L'Ouest et le Sud de ce gisement se terminent généralement

par un niveau lumachéllique. C'est essentiellement cette couche qui est exploitée à Kef Essenoun

II.4.3- l'éocène

Les formations de l'Eocène sont caractérisées par des calcaires à silex et d'autres à nummulites. À la proximité des périmètres des Monts de Mellègue, leur puissance est de 200 m. Ils renferment aussi des niveaux phosphatés qui sont parfois silicifiés au sommet. Le Néogène dans la région est essentiellement représenté par les formations du Miocène et du Pliocène.

▪ L'yprésien

Il repose directement sur les dépôts du thanétien et prend une grande extension dans la région de Djebel Onk. Il a une épaisseur de 32 m. Il est constitué de: Calcaire à silex avec une couche phosphatée, intercalée (3 m) ; Calcaire marneux avec des lits phosphatés dans la partie supérieure (4,5 m); Calcaire à nodule de silex noir. Ces nodules représentent une patine ferrugineuse, noire à brun rouge. Son épaisseur est de 26 m.

▪ Le lutétien

Les roches de cet étage recouvrent, en concordances les roches yprésiennes. Elles sont répandues dans la région de Dj. Darmoun (270 m d'épaisseur). On distingue de bas en haut :

a) Le lutétien inférieur

Il est marqué par des changements de faciès:

- Les calcaires disparaissent et à leur place viennent les marnes blanches, crayeuses, à géodes de quartz et à silex, avec une faune caractéristique; Hemither Sitea Moracano. Son épaisseur est de 30 m ;
- Des calcaires massifs, blanchâtres à nodules de quartz (15 m d'épaisseur);
- Du gypse avec bancs de calcaires (150 m d'épaisseur).

b) Le lutétien supérieur

Ce faciès est évaporitique; Il est constitué de gypse et d'argile verdâtre, argile

phosphatée verte et bancs de calcaire. A la base, on distingue l'argile verte phosphatée et bancs de calcaire d'une épaisseur de 10 m et au sommet, des argiles vertes avec banc de gypse intercalé. Son épaisseur est de 65 m. La faune caractéristique est *Ostrea Multicostata* et *Cardia Placunoides*.

II.4.4- le miocène

Les formations du Miocène affleurent largement au Nord de l'Oued Mellègue avec une puissance qui peut atteindre 1000 m (Dubourdieu, 1956). Ces dépôts reposent en discordance sur les formations les plus anciennes (Albien-Sénonien et même sur le Trias) où ils forment leur couverture. Il s'agit d'une accumulation puissante de marnes et de grès dont l'épaisseur peut atteindre dans le bassin d'El Oued Soukiès au Nord-Ouest de l'Ouenza 1000 m (Dubourdieu G (1956), Kowalski y et Hamimed A, 2000). Les formations miocènes comportent aussi des conglomérats contenant des éléments de calcaires variés, de silex gris, des galets ferrugineux et des éléments empruntés au Trias, témoignant d'une activité diapirique (Bouzenoune A, 1993).

Le Miocène est subdivisé en trois :

- **Le miocène inférieur**

Il est formé de conglomérats, de sable à gros grains et sables blancs à grains moyens avec de minces couches d'argiles siliceuses. Sa puissance est de 200 m.

- **Le miocène moyen**

Il est essentiellement argileux de couleur marron, parfois schisteux, avec des intercalations de sables à grains fins et moyens. Leur épaisseur est de 100 m.

- **Le miocène supérieur**

Il est constitué de roches sablo-argileuses, grès à bancs de graviers et contenant de gros blocs arrondis.

II.4.5- le quaternaire

Les formations quaternaires couvrent de vastes surfaces dans la région. Elles sont essentiellement représentées par des éboulis de pente, des dépôts sableux ; dépôts éoliens, des graviers, des blocs, des dépôts alluvionnaires et fluviaux

Les dépôts quaternaires d'origine continentale sont fréquents dans les parties basses des reliefs ils couvrent des surfaces importantes (plaines et vallées actuelles). La puissance de ces dépôts varie de 10 à 30 m. Ils sont formés de croûtes calcaires, limons éboulis, cailloutis et de poudingues (Dubourdieu G, 1956).

II.5- Tectonique de la région de Djebel Onk

La région de Djebel Onk appartient à l'extrémité orientale de l'Atlas Saharien (Ranchin G, 1963-a et 1963-b). La série supérieure de l'Eocène du bassin de Djebel Onk-Gafsa-Métloui est structurée en une suite d'anticlinaux et de synclinaux dissymétriques, généralement faillés dans leurs flancs, d'axe le plus souvent SW-NE et décrochés par des accidents transverses N120° à N140° E.

Les anticlinaux de Djebel Onk, Djemi-Djema et Oued Betita (figure 12) sont localisés à la bordure de la flexure Sud Atlasique qui correspond à une zone d'affrontement entre le territoire atlasique mobile et la plateforme saharienne stable. Plus particulièrement, ils appartiennent à la branche Nord de la flexure, de direction Est-Ouest

Trois phases tectoniques d'ampleurs très inégales ont marqué de leur empreinte la région considérée sont représenté dans la Figure 12.

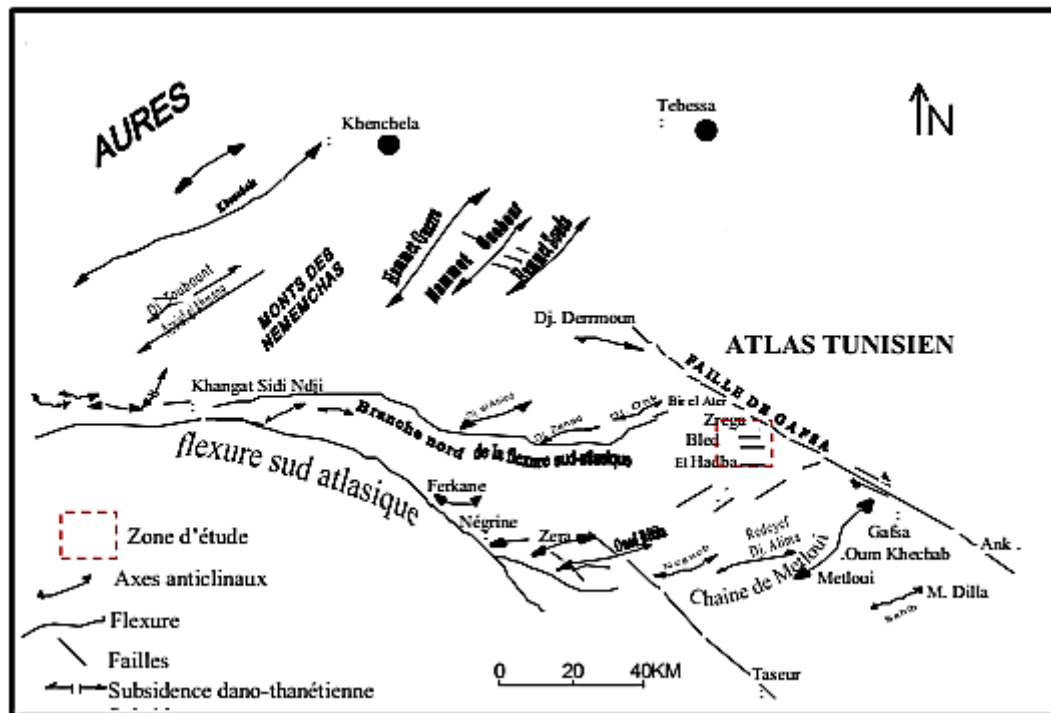


Figure 12 - Carte structurale de la région du Djebel Onk à l'intérieur du bassin de Gafsa-Métloui-Onk (Aissaoui D, 1984).

II.5.1- Tectonique synsédimentaire (Paléocène-Eocène)

Une phase compressive NW-SE contemporaine à la sédimentation paléogène, s'exprime par des ondulations et des failles synsédimentaires. Cette tectonique précoce induit des lacunes de sédimentation dans la série paléocène-éocène et a conduit à l'édification des dispositifs paléogéographique en hauts fonds et sillons qui vont contrôler la sédimentation des phosphates. Ces déformations précoces peuvent être liées à la montée diapirique des évaporites triasiques, notamment au Paléocène-Eocène.

II.5.2- Tectonique post-éocène moyen et anté-miocène

Contemporaine à l'émersion de la série au Lutétien supérieur, phase majeure du plissement des Aures et des déformations distensives transverses ($N120^{\circ}$ à $N150^{\circ}$) induisant un début de déstructuration de la série crétacé supérieur à éocène en petits horsts et grabens allongés suivant la direction $N170^{\circ}E$ qui vont être affectés par la pénéplantation et l'érosion différentielle anté-miocène. Ces plissements sont, en majorité, antérieurs aux dépôts des sables miocènes. C'est à la faveur de cette phase tectonique qu'apparût l'anticlinal de Djebel Onk (Mezghache H et al, 2000).

II.5.3- Tectonique tardi-miocène, post-burdigalienne, à pliocène-pléistocène

C'est la phase majeure de plissement de l'Atlas tunisien. Les plissements de la série crétacée supérieure, paléocène, éocène et miocène en grandes structures antiformes et synforme jouent en horst et grabens dans les structures antérieures, ils forment vers le sud et sur le flanc inverse des méga plis de Djebel Onk et Djemi-Djema. Cette tectogenèse est responsable de la structure actuelle de la région du Djebel Onk (figure 13).

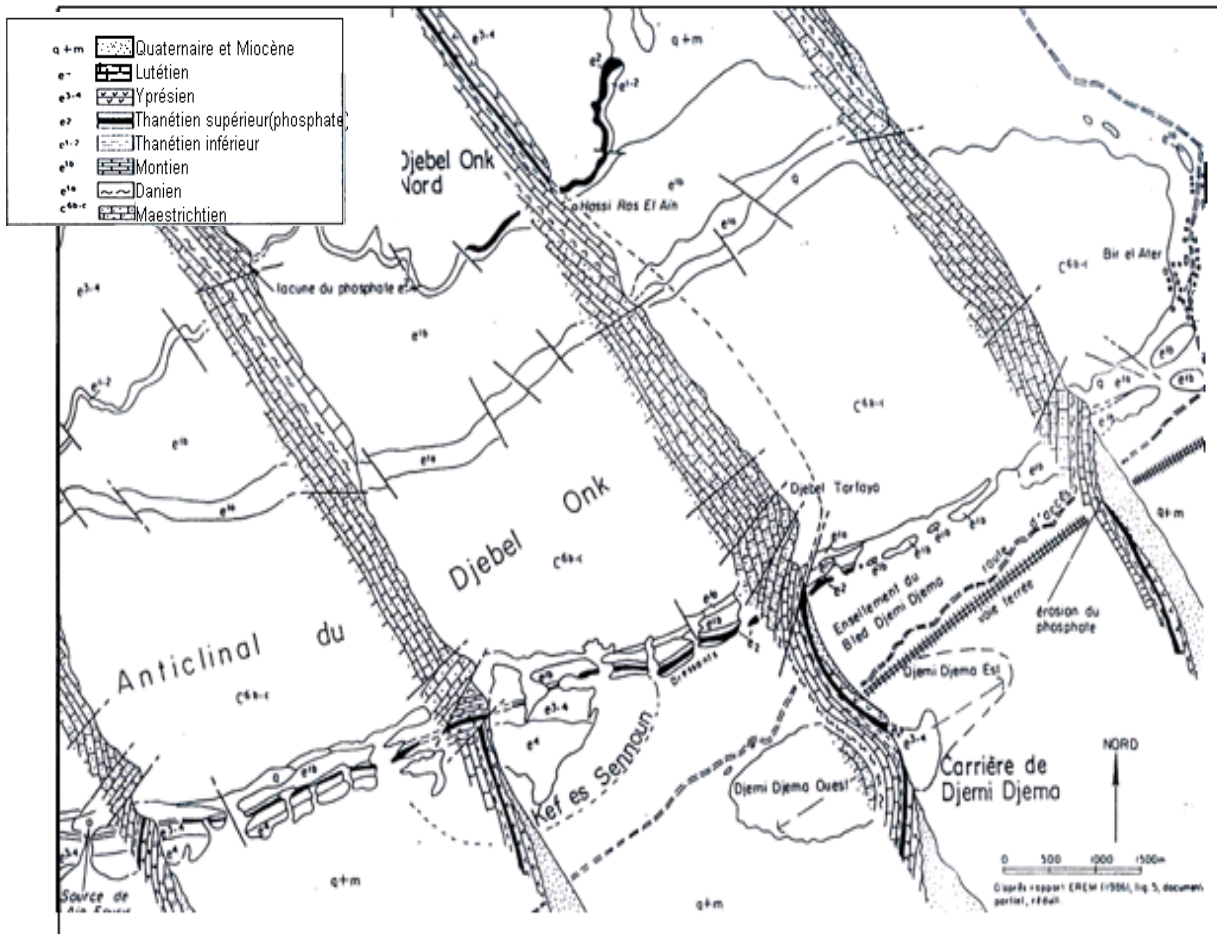


Figure 13 - Coupes stratigraphiques et structurales des flancs Nord et Sud du Djebel Onk (Cielensky B et al, 1988).

II.6- Géologie du gisement de Kef Essennoun

Le gisement de Kef Essennoun qui fait partie du bassin minier de Djebel Onk (Tébessa), se présente sous forme d'un massif calcaireux d'une longueur de 20 Km avec une largeur de 3 Km où il culmine à 1198 m d'altitude au Djebel Tarfaya. Il est caractérisé par des ailes dans leurs flancs orientés N80°E (Parian G et Cortiel P, 1993).

Le secteur de Kef Essennoun est situé sur le flanc méridional de l'anticlinal de Djebel. Onk, à environ 9 Km vers le Sud-Sud de la ville de Bir El Ater (Tébessa Sud). Nous présentons ci-dessous brièvement la géologie du gisement ainsi que la description des faciès des minerais de phosphates.

II.6.1- Stratigraphie

Toute la succession lithologique de Djebel Onk est rencontrée à Kef Essennoun, mais s'indifférencie, cependant, par une épaisseur verticale plus importante du faisceau phosphaté (jusqu'à 53 m dans le sondage 7).

Le Thanétien qui est l'horizon porteur de la minéralisation est bien développé à Kef Essennoun, il est subdivisé en deux étages: le Thanétien inférieur et le Thanétien supérieur.

- **Le Thanétien inférieur**

Est représenté par une série de marnes schistifiées de couleur gris foncé à intercalations irrégulières de calcaire. Un niveau conglomératique à Gastéropodes et de minces passées phosphatées sont rencontrées dans la partie inférieure. Dans la partie sommitale, les phosphates sont surmontés par des calcaires et des marnes à gros gastéropodes.

- **Le Thanétien supérieur**

Est représenté par une couche de phosphate de couleur grise, grise foncé ou brune ; souvent rattachée à formation Chouabine (Chabou-Mostfai S, 1987). Le gîte de Kef Essennoun constitue une table monoclinale à pendage régulier et faible vers le Sud (5 à 10°). Les bressants de Kef Essennoun correspondent à la zone de flexure faille du flanc inverse de la mégastucture antiforme, ou du flanc Nord de la structure synforme. Les dressants sont allongés N75°E où la couche phosphatée qui affleure est subverticale ou fortement inclinée vers le Sud-Est ou le

Nord-Sud (Cilensky B et Benchernine , 1987). Le faisceau phosphaté du Thanétien supérieur du gisement de Kef Essennoun est comme tout le faisceau du phosphate de Djebel Onk, constitué de la superposition de 3 sous couches (Prian G et Cortiel P, 1993) voir (Figure 14 et 15).

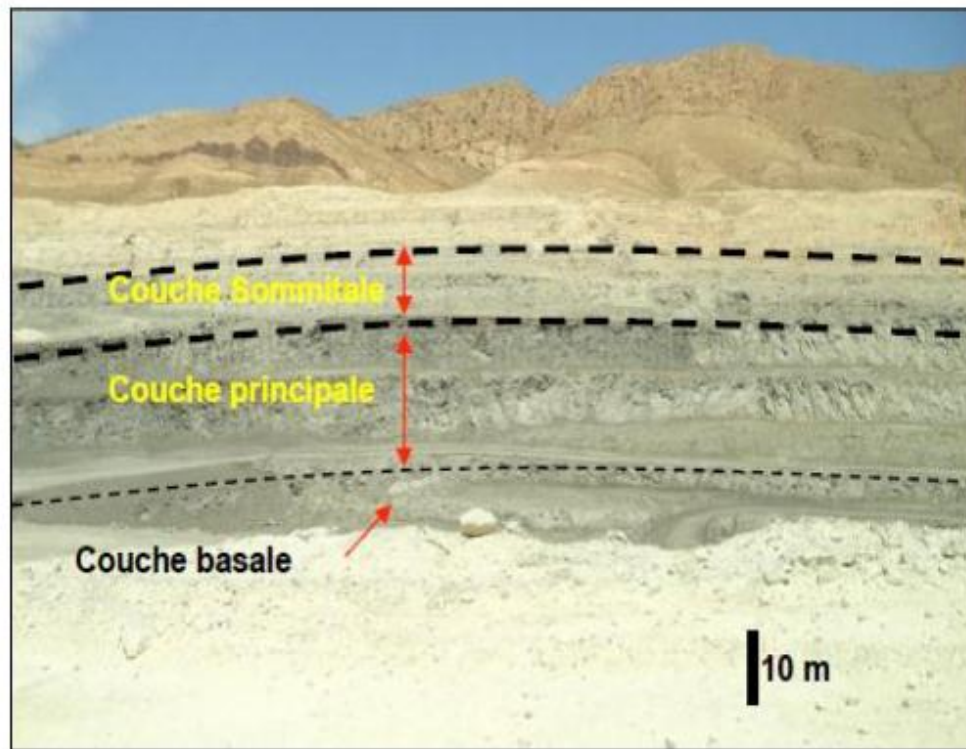


Figure 14 - Gisement de Kef Essennoun (Kechiched R, 2017).

Du bas en haut, les couches sont :

- **La couche basale**

Cette couche est constituée par deux minces niveaux de minerais phosphatés qui s'intercalent de marnes. Le passage à la couche principale, sus-jacente, peut être marqué par un banc de dolomie grise de 40 cm.

- **La couche principale**

Cette couche a une épaisseur d'environ 25 à 30 m, elle est constituée par des minerais de phosphates à faibles intercalations des niveaux marno-calcaires et dolomitiques. Cette couche est caractérisée par des teneurs élevées en P_2O_5 qui peuvent dépasser 30 % et par de faibles teneurs en MgO (<5 %). Elle représente l'horizon exploitable dans tous les gîtes de Djebel Onk.

- **La couche sommitale**

Cette couche de dolomie phosphatée a une épaisseur qui varie de 1 à 10 m, (l'épaisseur moyenne est de 3 m). Elle est caractérisée par une faible teneur en P_2O_5 ($< 18\%$) et par de fortes teneurs en MgO (6 à 11 %). Les teneurs de SiO_2 peuvent atteindre 6 %.

Les phosphates de cette couche sont très durs, bien cimentés, de couleur grise noire, et à granulométrie hétérogène où les grains sont généralement coprolithiques. Cette couche renferme des niveaux silicifiés au sommet.

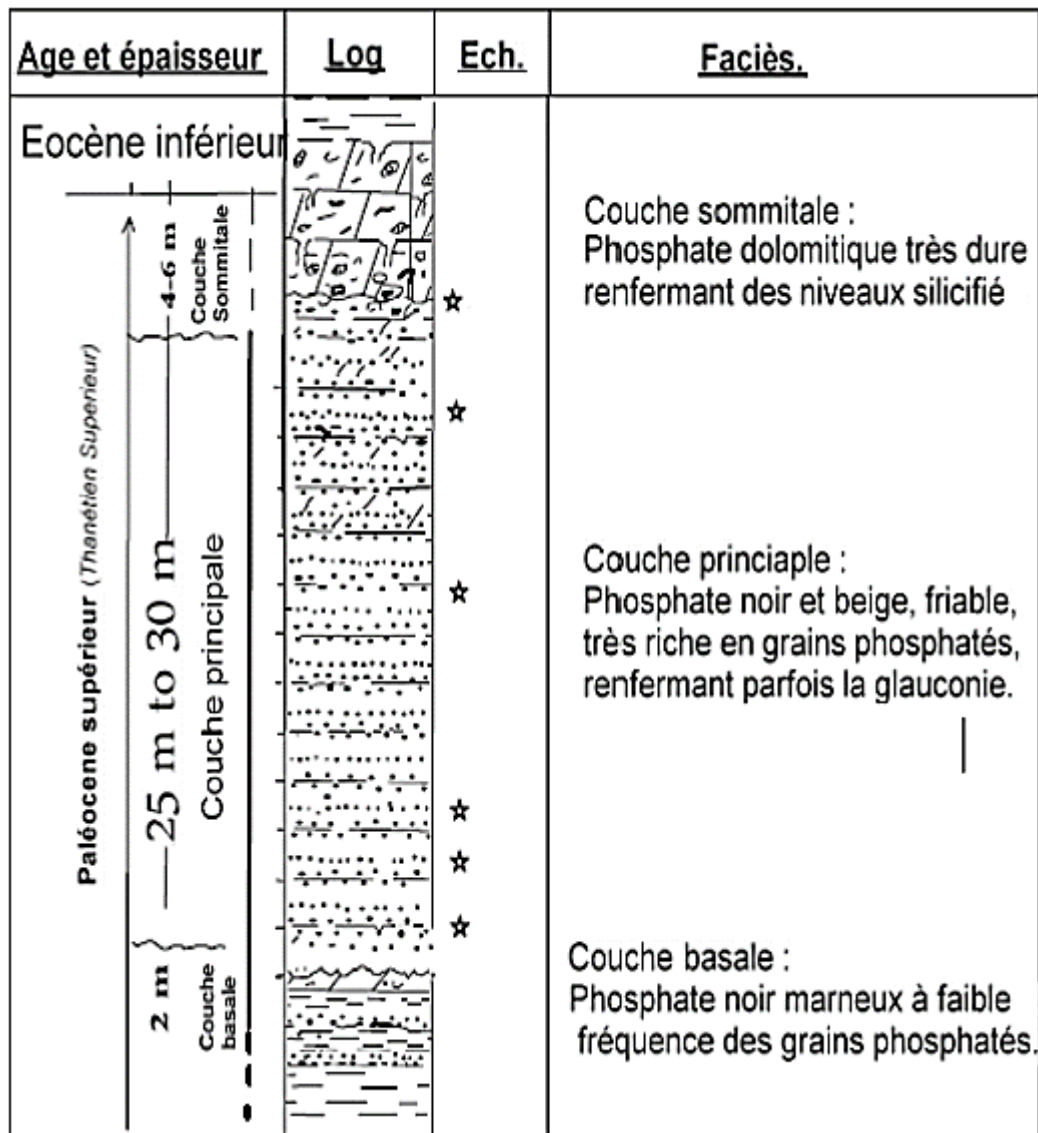


Figure 15 - Log lithologique du gisement de kef Essennoun (Kechiched R, 2017)

II.7- Conclusion

Les minerais de phosphates de Tébessa Sud, représentés par le gisement de Kef Essennoun, au niveau du bassin minier de Djebel Onk, sont d'âge Thanétien. Ils se présentent sous forme d'une couche de 30 m d'épaisseur en moyenne, subdivisée en trois sous couches : (1) basale; (2) principale et (3) sommitale. Ce gisement constitue une table monoclinale à pendage régulier vers le Sud (5 à 10°).

Les faciès de minerais rencontrés montrent :

- phosphates noirs à ciment argileux et à glauconie,
- beiges à ciment carbonaté
- dolomitique
- phosphates silicifiés.

Généralement, le phosphate se présente sous forme de pellets sur toute la région de Djebel Onk, Le ciment le plus fréquemment rencontré dans les phosphates de l'Atlas Saharien Oriental est carbonaté, Le ciment siliceux, dont l'origine est probablement la présence des radiolaires, est parfois rencontré au niveau du massif de Djebel Onk donnant naissance aux minerais de phosphates silicifiés.

CHAPITRE III : les déchets miniers et développement de l'industrie minière algérien

Sommaire

III.1 - Introduction.

III.2- Teneur de coupure.

III.3- Types de teneur de coupure.

III.4- Notion sur Les déchets.

III.5- Classification des déchets.

III.6- Les déchets miniers.

III.7- Industrie minière et ses impacts sur l'environnement.

III.8- Méthodes de gestions actuelles.

III.9- Les couts de gestion et de réhabilitation des rejets miniers.

III.10- Valorisation des rejets miniers.

III.11- Défis de réutilisation des rejets miniers.

III.12- Conclusion.

CHAPITRE III : Les déchets miniers et développement de l'industrie minière algérienne

III.1 - Introduction

L'exploitation minières a pour but d'extraire les minéraux ou métaux présentes à la surface du globe et qui ont une valeur économique qu'elles soient des exploitations souterraines ou à ciel ouvert (Poulard F et al, 2017 ; Igoul M, 2014). Cette opération génère un volume très important des déchets miniers (des déchets gazeux, liquides et solides) sans valeur commerciale (Aubertin M et al 2016) que l'on peut les classifier principalement en produits naturels : stériles miniers (stériles francs, stériles de sélectivité) ou des produits artificiels issue de phase de traitement et d'enrichissement du minerai (résidus de concentrateur, et les boues de traitement). Les stériles francs et les stériles de sélectivité sont empilés en surface dans des haldes à stériles (Maknoon M, 2016) les résidus de concentrateur entreposés en surface dans des parcs à résidus (Aubertin et al 2013), et les boues de traitement sont stockés dans des bassins étanches (voir figure16), donc ces déchets peuvent présenter des risques pour l'environnement (Mlayah, A et al, 2005) selon leur état, leur composition et leur mode d'entreposage (Hakkou R, 2016 et Igoul M, 2014).

III.2- Teneur de coupure

L'enveloppe géométrique du gisement est définie par la teneur de coupure choisie pour exploiter la substance valorisable. Un gisement est donc un objet à masse et à composition variable dans le temps, il peut diminuer, voire disparaître, si le cours du marché du produit de la mine descend en dessous de son prix de revient ; en revanche, il peut réapparaître ou devenir plus important dans le cas contraire. Pour survivre économiquement, une mine doit donc être toujours à la recherche de méthodes d'extraction et de valorisation permettant la production d'un produit final vendable à profit suffisant ; souvent ces évolutions entraîneront une évolution dans la nature et la quantité des résidus produits. En fonction de leur nature physico-chimique, de la quantité et de la méthode de stockage, les résidus d'une mine peuvent avoir des impacts quasi nuls à très importants sur l'environnement. Pour les mines en opération ou en cours de fermeture, le coût lié à la maîtrise de l'impact sur l'environnement de certains de ces résidus peut constituer un poids non négligeable sur le prix de revient (Vega J, 2012).

III.3- Types de teneur de coupure

D'après (Taylor H, 1972) On peut distinguer les deux types de teneur de coupures suivantes :

III.3.1- Teneurs de coupure de planification (étape préliminaire)

Au cours de l'exploration et aux différentes étapes de la planification de l'exploitation d'un gisement, une teneur de coupure est nécessaire pour définir géographiquement et quantitativement les limites du minerai potentiel.

Puisque aucune information précise sur l'exploitation minière éventuelle n'est encore connue au début de l'exploration d'un gîte, la teneur de coupure de planification à cette étape est semi-quantitative : elle vise à prédire de façon satisfaisante la valeur du minerai qui pourra éventuellement être exploité ou traité.

En général, les ressources sont calculées pour un certain nombre de teneurs de coupure. Exemple : dépôt de cuivre à basse teneur à différentes teneurs de coupure

III.3.2- Teneurs de coupure d'opération

La teneur de coupure d'opération est nécessaire au début de l'exploitation pour déterminer à court terme quelle portion du minerai peut être gardée en réserve et quelle portion peut être acheminée.

- **Teneur de coupure à la mine**

Le minerai au-dessus de la teneur de coupure est exploité, celui en dessous reste sur place.

- **Teneur de coupure au concentrateur**

Le minerai (extrait) au-dessus de la teneur de coupure est acheminé vers l'usine de traitement pour être concentré. Le minerai sous la coupure est jeté ou entreposé pour une concentration ultérieure (mis sur des haldes séparées).

- **Teneur de coupure à la fonderie (plus rare)**

Le concentré au-dessus de la teneur de coupure est raffiné et vendu. La teneur de coupure peut aussi être appliquée à des impuretés présentes dans le concentré.

Les décisions sur les teneurs de coupure sont prises au moment de la production, même si ces T.C. ont d'abord reçu une première évaluation à l'étape de la planification. La T.C. peut aussi s'appliquer de façon inverse (ex. Teneur maximale de phosphate acceptable dans un concentré de fer).

III.4- Notion sur Les déchets

III.4.1- Définition du déchet

A l'origine de toute mesure particulière visant les déchets, il y a l'hypothèse que la notion même de déchet peut être définie (Bruno D, 1997). Or la plupart des auteurs s'accordent à dire qu'il n'existe pour le moment aucune définition satisfaisante du déchet (Leroy J (1994), Galaup S (1996), London C (1996)). En effet, suivant les acteurs impliqués et le contexte auquel on se réfère, la notion de déchet peut viser des objets de nature et de fonctions différentes.

III.4.1.1- Approche réglementaire

Pour le législateur, il s'agissait avant tout de réglementer le traitement des déchets en interdisant le rejet dans l'environnement ou la revente en vue d'échapper aux obligations légales. Il fallait donc pouvoir définir de manière exacte ce qui entrait dans le cadre de la loi.

La loi algérienne N° 01-19 du 12/12/ 2001 (article 3 du journal officiel de la république algérienne N° 77 en 2001), définit le déchet comme : Tout résidu d'un processus de production, de Transformation ou d'utilisation, et plus généralement toute substance ou produit et tout bien Meuble dont le propriétaire ou le détenteur se défait, projette de se défaire, ou dont il a Obligation de se défaire ou de l'éliminer.

La directive européenne du 18 mars 1991 modifiant celle de 1975 considère comme déchet « toute substance ou tout objet figurant à l'annexe I dont le détenteur se défait ou dont il a l'intention ou l'obligation de se défaire ».

III.4.1.2- Approche environnementale sur les déchets miniers

Du point de vue de l'environnement, un déchet constitue une menace à partir du moment où l'on envisage un contact avec l'environnement. Ce contact peut être direct ou le résultat d'un traitement. Historiquement, du fait de la prédominance de la filière enfouissement technique durant de nombreuses années, on considérait ce contact comme inéluctable. Plusieurs

définitions mettent ainsi en avant la composition du déchet comme critère d'identification (comme l'indique la directive européenne du 18 mars 1991). Cette approche peut conduire à considérer des sous-produits de nature dangereuse ou contenant des polluants comme des déchets indépendamment de leur valeur ou de leur possible réutilisation.

III.4.1.3- Approche économique

Sur le plan économique, un déchet est une matière ou un objet dont la valeur économique est nulle ou négative pour son détenteur à un moment et dans un lieu donné (Maystre L, 1994). Cette définition exclut une bonne part des déchets recyclables, qui possèdent une valeur économique, même faible. Certaines entreprises peuvent ainsi être tentées de faire passer certains déchets pour des sous-produits pour les soustraire à la loi.

III.4.1.4- Approche matérielle

Le lieu d'entrepôt d'un déchet est appelé « mono stockage initial » s'il ne contient qu'une seule catégorie de déchets : c'est le cas d'une pile de journaux sur un balcon ou d'un tas de chutes de fabrication dans le conteneur d'un atelier. On parle de « stockage initial banalisé » lorsque, dès ce premier stade, les déchets sont mélangés : c'est le cas de la classique poubelle domestique. Dans la sphère domestique, on distingue le stockage initial dans le logement, le premier stockage intermédiaire dans l'immeuble (benne commune pour des sacs-poubelles dans un local commun d'un immeuble collectif), le stockage intermédiaire à la limite entre la propriété privée et le domaine public.

III.5- Classification des déchets

D'après Une première approche nous amène bien sûr à distinguer les déchets en fonction de leur nature physique : solides, liquides, gazeux. Même si de nombreux raisonnements sont applicables aux trois catégories de déchets, nous ne traiterons pas le cas des déchets gazeux, qui font souvent l'objet de traitements spéciaux et ne sont pas explicitement visés par de nombreuses dispositions réglementaires concernant les déchets.

III.5.1- Classification des déchets selon leur origine

Il est courant de distinguer les déchets suivant leur origine :

- **déchets urbains**, qui regroupent les ordures ménagères et les déchets des municipalités
- **déchets industriels**,
- **déchets agricoles**.

Cette distinction se traduit au plan réglementaire par une répartition des responsabilités. La gestion des déchets urbains revient aux communes alors que celle des déchets industriels est sous la responsabilité directe du producteur.)

III.5.2- Selon leur nature

Selon la loi N 01-19 du 12 décembre 2001 (article 5) relative à la gestion, au contrôle et élimination des déchets arrête les définitions de ces grandes familles de déchets suivant la nature du danger qu'ils font courir à l'environnement :

- **Déchets inertes**

Un déchet inerte est un déchet qui ne subit aucune modification physique, chimique ou biologique importante. Les déchets inertes ne se décomposent pas, ne brûlent pas, ne produisent aucune réaction physique ou chimique, ne sont pas biodégradables et ne détériorent pas d'autres matières avec lesquelles elles entrent en contact d'une manière susceptible d'entraîner une pollution de l'environnement ou de nuire à la santé humaine

- **Déchets ménagers et assimilés**

Ils proviennent des ménages, des commerçants, des artisans, des entreprises et industries dans la mesure où ils ne présentent aucun caractère spécial ni dangereux. Ce sont :

- Les ordures ménagères
- Les déchets de nettoyage (balayage des rues et des espaces publics)
- Les déchets encombrants
- Les déchets non dangereux des industries, des commerces et des artisans

- Les déchets verts
- Les boues de décantation et de stations d'épuration.

▪ **Déchets spéciaux**

Ce sont des déchets qui, en raison de leur composition ou de leurs propriétés physico-chimiques (corrosifs, explosifs, toxiques, inflammables, cancérigène, infectieux, etc.) présentent un danger pour la santé humaine ou pour l'environnement. Même si généralement, les ménages n'en produisent qu'en faible quantité (produits phytosanitaires, équipements électroniques, etc.), ils ne devraient pas être jetés dans la poubelle réservée aux ordures ménagères.

Ce type de déchet doit donc impérativement subir un ensemble de traitements appropriés pour en réduire la toxicité et le risque de contamination. Ils nécessitent donc des filières spécifiques de collecte, de transport, de traitement, de recyclage et d'élimination.

III.6- Les déchets miniers

III.6.1- Les principaux types des déchets miniers

Chacune des étapes d'exploitation peut être génératrice de déchets miniers, généralement de caractéristiques physiques et chimiques, donc d'impact environnemental potentiel, assez différentes. Leurs volumes respectifs, surtout en ce qui concerne les déchets de découverte (les résidus de découverte), seront fonction aussi du type d'exploitation (mine à ciel ouvert, mine souterraine) ; leur composition chimique variera en fonction de la substance exploitée et la nature du gisement.

En premier lieu, nous pouvons classer les principaux types de déchet minier en quatre grands groupes :

- les stériles francs de découverte et/ou de traçage de galerie,
- les résidus d'exploitation (stériles francs et/ou stériles de sélectivité minéralisés),
- les résidus de traitement (rejets de l'usine d'enrichissement),
- autres résidus (scories de grillage ou de fusion du minerai).

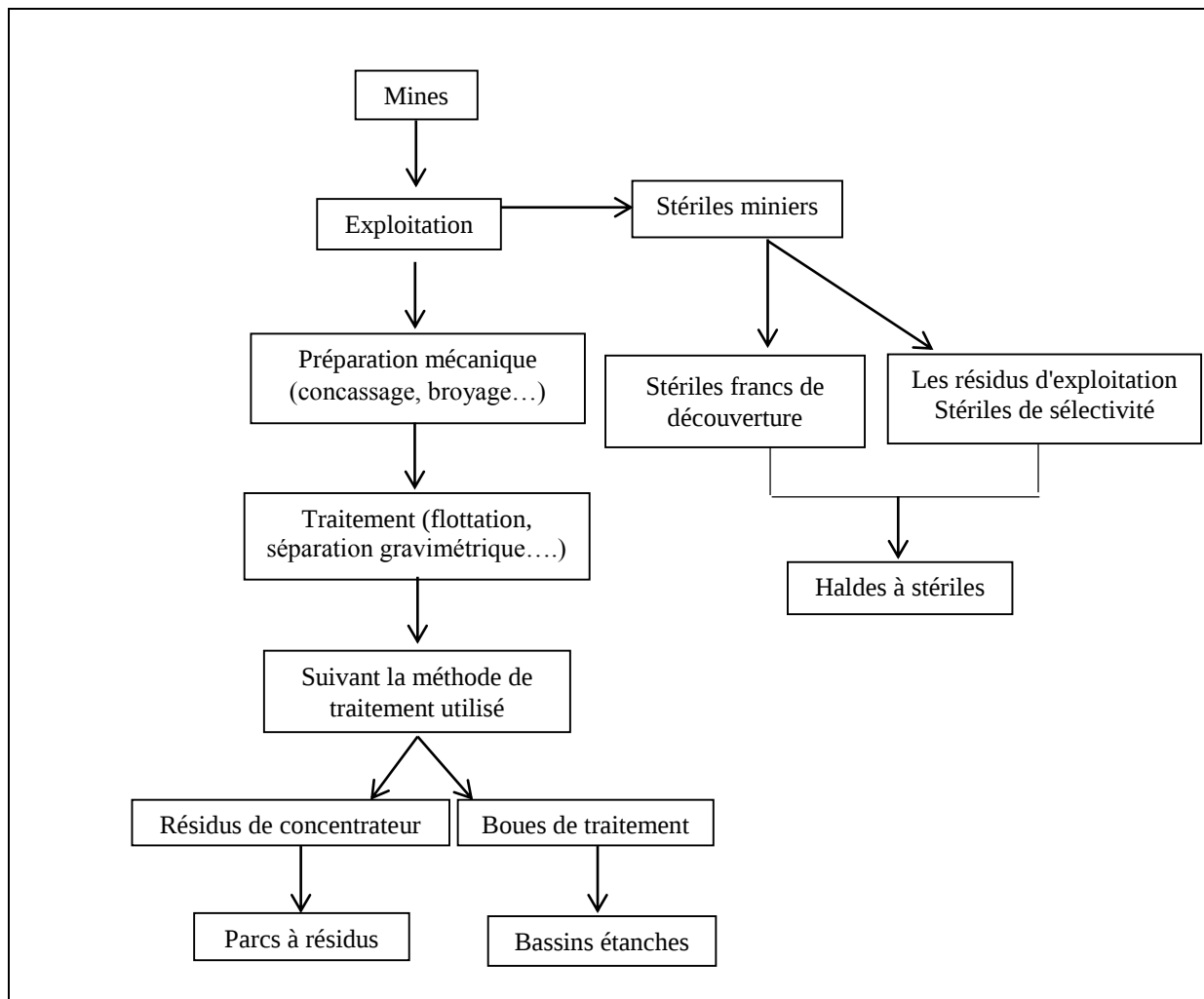


Figure 16 - Schéma illustrant la génération des différents types des déchets miniers.

III.6.1.1- Les stériles francs de découverte

Ce sont les sols et morts terrains qui recouvrent le minerai, décapés pour une mise en exploitation à ciel ouvert, ou les matériaux stériles extraits lors du percement de galeries, puits ou descenderies dans le cas d'une mine souterraine.

Ces résidus contiennent en règle générale des teneurs en métaux et en éléments accompagnateurs faibles, de l'ordre de grandeur de l'anomalie géochimique produite par les phénomènes de dispersion naturelle, remaniement mécanique ou diffusion chimique des métaux du minerai dans sa roche encaissante. D'une certaine façon, les caractéristiques physiques et chimiques de ce genre de résidu ne se différencieront pas de celles des matériaux qui auront été remaniés lors de la construction de tout autre ouvrage d'art (autoroute, tunnel, barrage, etc.) dans le même contexte régional.

III.6.1.2. Les résidus d'exploitation (stériles de sélectivité)

Lors de l'exploitation, le mineur opérera un tri précoce entre le minerai vendable et le minerai pauvre où la récupération des substances valorisables sera non économique dans tel contexte. Ce minerai pauvre pourra être stocké sur place, dans l'attente d'un traitement éventuel si les cours du métal venaient à monter. Dans les mines anciennes, la pratique était parfois de le mettre à part, ou de le rejeter de la même façon que les autres résidus de la mine. Dans le cas de mines modernes de métaux de base, les stocks de ce type de résidu sont souvent traités en fin d'exploitation.

Le caractère plus ou moins disséminé d'un gisement conditionnera également la technique d'exploitation, donc le volume, la nature et l'importance des résidus d'exploitation. Dans un gisement de fer de type "disséminé" par exemple, l'exploitant placera la teneur limite d'exploitation du minerai à une valeur donnée (28 % en fer). Cette limite est opérationnelle seulement quand la masse minérale exploitée présentera une gamme continue de teneurs décroissantes en fer suivant les conditions géologiques responsables de sa formation. Le résidu minier dans ce cas aura, en effet, des teneurs en métal très voisines du minerai. Par contre pour les gisements de type "tout ou rien", il y a discontinuité géochimique brutale entre le minerai et sa gangue, celle-ci ne contenant plus que de faibles anomalies en métaux (approchant à peine le centième de la teneur du minerai). Dans ce cas, une exploitation du minerai, ne laissera que des rejets pauvres, plus ou moins contaminés par des métaux et métalloïdes accompagnateurs du gisement.

III.6.1.3- Les résidus de traitement

La valorisation du minerai vendable consiste à effectuer plusieurs opérations de pré-concentration du ou des minéraux économiques. Ces opérations produisent plusieurs types de solides : l'un enrichi en substances valorisables (le "concentré") et un ou plusieurs qui en sont appauvris. Dans le cas des métaux de base et de l'or, les résidus issus de l'usine (appelée "la laverie") sont généralement constitués de particules finement broyées, de sables fins et limons issus du traitement du minerai par gravité ou flottation. Ils sont souvent sédimentés dans des bacs de décantation retenus par des digues à stériles ou déposés en terril. Afin de réduire les coûts de transport, l'exploitant localisera la laverie en aval de la mine (transport par gravité) et les schlamms de laverie seront décantés dans le vallon sous-jacent, à l'amont d'une digue à stériles.

Les résidus et les boues issus d'une laverie contiennent fréquemment des teneurs significatives en éléments accompagnateurs ou en minéraux secondaires tels que les sulfures de fer (la pyrite, etc.) et leurs produits d'oxydation. Ils peuvent contenir aussi des concentrations résiduelles non négligeables en réactifs utilisés pour la séparation et la concentration des métaux valorisables.

Tableau 4 - Quelques différences entre les stériles et les résidus miniers (Aubertin M, 2003)

Résidus	Stériles
Granulométrie fine (silt-sable), relativement uniforme	Fragments grossiers (dimension allant du cm au m) et porosité élevée localement
Pyrite directement accessible à l'oxygène	Oxygène doit diffuser dans les pores internes pour atteindre la pyrite contenue dans les fragments plus gros
Hauteur faible	Hauteur des haldes de stériles élevées (10-40 m au-dessus de la zone saturée)
Oxydation de la pyrite initialement limitée à la partie superficielle du parc à résidus	Oxydation de la pyrite pouvant affecter de grandes profondeurs dans la halde
Température généralement peu élevée	Température pouvant être élevées
Apport de l'oxygène limité à la diffusion	Apport d'oxygène par diffusion, convection, transfert thermique, etc,



Figure 17- Photo d'un parc à halde miniers (Mine abandonnée à l'Ouest de l'Australie)



Figure 18 - Photo du parc à rejets miniers (Mine de Goro, nouvelle Calédonie)

III.6.1.4- Autres types de déchets

Dans bon nombre d'exploitations anciennes (Fe, Cu, Sn...), le minerai ou concentré était grillé ou fondu sur place pour éliminer certains composants (sulfures, par exemple) afin d'arriver à un produit marchand plus pur. Dans ces cas, on peut retrouver sur ces sites anciens

des tas de scories qui forment un cas particulier de rejets. Des suies provenant du nettoyage des fours de grillage ou des conduits d'évacuation des fumées y sont fréquemment associées. Ces produits oxydés se retrouvent, soit accumulés à proximité de la mine si le grillage était opéré sur place, soit souvent entassés à proximité de la fonderie en contrebas.

III.7- Industrie minière et ses impacts sur l'environnement

Sous l'effet des conditions climatiques et du contact avec les facteurs naturels de l'eau, de l'air et de température, ces rejets miniers ont produit une contamination des ressources en eau et de la faune et de la flore. Les principaux impacts rencontrés souvent dans la littérature peuvent être liés à des risques d'ordre physique, chimique ou esthétique (Yassine T, 2017)

III.7.1- Rupture des digues

Plusieurs ruptures de digues ont eu lieu dans pas mal pays du monde à cause de certain problèmes d'instabilité géotechniques. Les raisons de rupture de digues ont été toujours liées soit à une teneur en eau élevée dans les rejets de concentrateur qui génère des pressions interstitielles importantes dans les digues de rétention soit à cause des problèmes de fuites, de liquéfaction ou une mauvaise conception des sites d'entreposage (Aubertin M et al., 2002b). Tout récemment, deux ruptures de digue ont eu lieu à Rio-Doce au Brésil (2015) et une autre à Colorado aux États-Unis (2015). Les rejets de concentrateurs, provenant de digues, contiennent souvent plusieurs contaminants potentiellement toxiques (ex. Métaux lourds et métalloïdes) et peuvent présenter un risque potentiel sur l'environnement.

III.7.2- Drainage minier acide (DMA)

Ce phénomène constitue l'un des plus importants problèmes auquel fait face l'industrie minière. Le drainage minier acide (DMA) résulte de l'oxydation naturelle de minéraux sulfureux, que l'on retrouve dans les matériaux rocheux, lorsque ceux-ci sont exposés à l'air et à l'eau (Figure 19). La réaction entre ces éléments provoque une génération d'acide qui favorise la mise en solution de divers éléments potentiellement solubles à des pH acides. L'acidité, combinée à la présence de contaminants potentiellement toxiques (ex. : Zn, Cu, Cd, Hg, Pb, Co, Ni, Ta, As, etc.), peut affecter sérieusement les écosystèmes, qui reçoivent les effluents contaminés (Ripley E et al, 1996 ; Ritcey G, 1989).

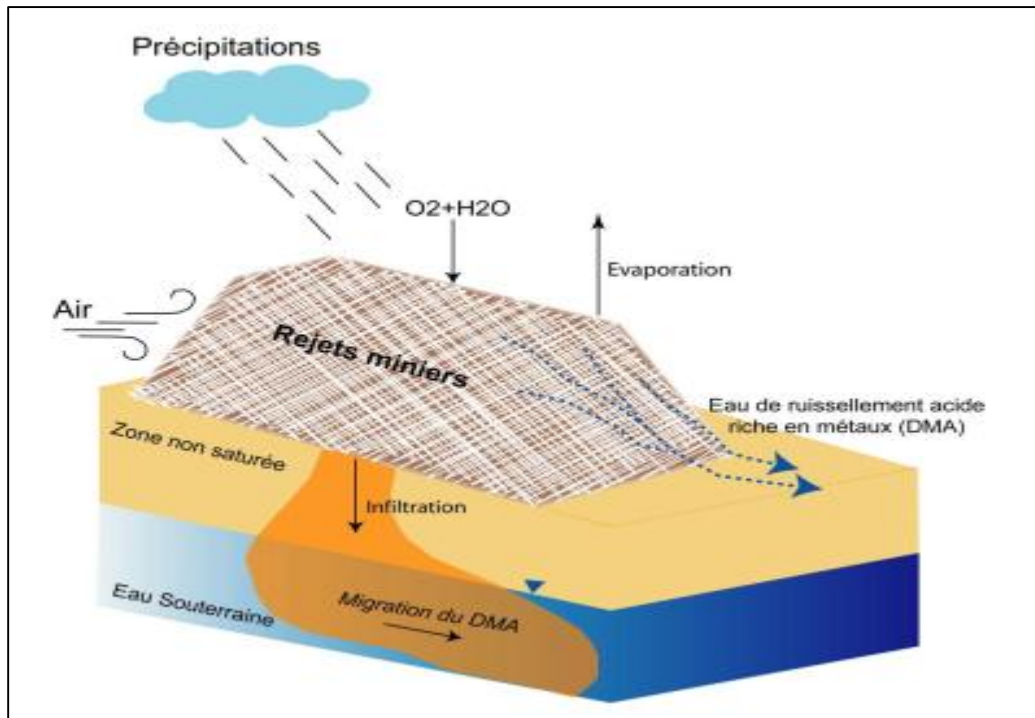


Figure 19 - Schéma montrant les vecteurs de transfert du DMA



Figure 20 - Photos montrant le drainage minier acide (DMA) au niveau (a) d'une rivière au Colorado (USA).



Figure 21 - Photos montrant le drainage minier acide (DMA) au niveau du site de Kettara (Maroc).

III.7.3- Drainage neutre contaminé (DNC)

Comme nous l'avons mentionné précédemment, la baisse du pH causée par l'oxydation des minéraux sulfureux crée des conditions géochimiques favorables à la mise en solution des différents métaux composant le rejet minier. Cependant, certains de ces métaux sont solubles même à des pH près de la neutralité. Le DNC est donc défini comme étant un drainage minier dont la qualité chimique est affectée par le passage à travers le rejet minier, mais qui n'est pas acide (Stantec, 2004). En effet lorsqu'une quantité suffisante de minéraux neutralisants (carbonates et silicates) est présente dans les rejets ou lorsque les minéraux sulfureux ne sont pas générateurs d'acidité, on peut avoir une lixiviation des métaux contenus dans les rejets sans génération d'acide (Villeneuve M, 2004).

Il est à signaler que les risques de contamination chimique peuvent être intensifiés, en particulier, par la présence de bactéries qui accélèrent ces réactions par un facteur de 10³ à 10⁶ (Nordstrom D et Alpers C, 1999 ; Singer P et Stumm W, 1970).

III.8- Méthodes de gestion actuelles

Compte tenu des altérations causées par les rejets miniers, il est indispensable de remédier à cette problématique, et procéder par une gestion contrôlée, afin de limiter les impacts environnementaux engendrés. En raison des différents incitatifs réglementaires et économiques, il est devenu de première importance de trouver des solutions pour la réutilisation et la valorisation des rejets miniers. Dans cette perspective, leur réutilisation, quand ils s'y prêtent, comme matière première secondaire est une solution environnementale prometteuse. En effet, on distingue des méthodes de gestion des rejets miniers qui se font sur même le site minier et d'autres en dehors du site minier dépendamment des propriétés de chaque type de rejet.

III.8.1- Sur le site minier

La gestion des rejets sur site peut se traduire par quelques mesures de prévention et des méthodes de gestion adoptées par les compagnies minières dans l'espoir de réduire les impacts environnementaux des rejets miniers. Il est important de distinguer entre les méthodes de gestions de stériles miniers, des rejets de concentrateurs et des boues de traitement des eaux acides. Les différentes méthodes de gestion de ces différents types de rejets miniers sont présentées dans le Tableau 5. Les stériles miniers sont généralement utilisés pour la construction de digues, de chemins, de parcs à résidus, des remblais de chantiers, de remplissage des excavations souterraines et des fossés à ciel ouvert (Benzaazoua M et al, 2006; Ritcey G, 2005). En ce qui concerne les rejets provenant des usines de concentration, on distingue des méthodes qui consistent en la désulfuration environnementale (Benzaazoua M et al., 2008) pour enlever les sulfures (générateurs d'acidité), leur utilisation pour la préparation des remblais en pâte cimentée, comme composante de recouvrements (barrière d'oxygène, géo membranes ou géo composite bentonitique) pour empêcher l'infiltration des facteurs qui favorisent le drainage minier acide (DMA) (eau et oxygène). Ils sont également retraités et valorisés pour l'extraction des éléments de valeur commerciale demeurant dans ces résidus. D'autres méthodes sont également développées pour la gestion des boues qui proviennent des unités de traitement des eaux acide (UTAE). On distingue à ce niveau des méthodes de leur valorisation et leur réutilisation comme amendements dans les recouvrements ou dans les remblais. Elles peuvent aussi être retraitées pour l'extraction des métaux de valeur commerciale. Cependant, il est à signaler qu'une grande partie de ces méthodes de gestions des boues sont encore à un niveau expérimental (Aubé B et Zinck J,

(1999, 2000) ; Zinck J et Griffith W, 2013). Plus de recherches dans ce sens sont en développement et en amélioration continue avant de passer à une échelle industrielle.

Tableau 5 - Méthodes de gestion de différents rejets de l'industrie minière

Stériles	Rejets de concentrateur	Boues UTAE
- Construction de digues et de chemins - Inclusion de stériles dans les parcs à résidus - Remblai rocheux des chantiers souterrains - Restauration de sites miniers - Comblement des fosses à ciel ouvert	- Désulfuration environnementale - Remblais hydrauliques - Remblais en pate cimentée - Composante de recouvrements - Déposition dans les fosses - Composante de béton - Retraitement et récupération des valeurs économiques	- Valorisation dans les recouvrements (amendements) - Recyclage dans le remblai en pate - Extraction de métaux

III.8.2- En dehors du site minier

Jusqu'à date, les rejets miniers sont surtout utilisés sur le site même. Les exemples de leur réutilisation en dehors du site minier sont très parcimonieux. L'utilisation réelle des rejets ont été reportés dans la littérature. Au Maroc par exemple, des résidus de concentrateurs de la mine de Zeida et de Mibladen, ayant l'apparence du sable naturel, sont utilisés clandestinement par les riverains pour la confection de mortier de finition et de surfacage des murs d'habitations sans se rendre compte des dangers que pourraient présenter cette utilisation (Argane R, 2015). Cependant, Argane R et al. (2015) ont montré que l'utilisation de ces résidus pour la confection du mortier présente une alternative durable de gestion de ce type de déchets et que la lixiviation de métaux lourds à partir du mortier présente des risques mineurs. Une autre utilisation réelle des stériles miniers est reportée au Canada où des stériles de la mine Sigma Lamaque sont utilisés dans le domaine de génie civil. En général, l'utilisation des rejets miniers en dehors du site minier est un concept qui devient de plus en plus intéressant surtout avec l'apparition de nouvelles réglementations à travers le monde qui insistent sur une gestion efficace et durable de tous types de déchets.

III.9- Les couts de gestion et de réhabilitation des rejets miniers

Plusieurs méthodes de gestion de rejets miniers ont été développées récemment permettant de limiter l'impact potentiel des rejets miniers. La plupart de ces méthodes sont appliquées généralement sur même le site minier et ont pour objectif de réduire à des niveaux très faibles la contribution des facteurs favorisant les mécanismes de drainage minier (eau, air, sulfures, etc.) ou de rupture de digues. Dans ce sens, des techniques de recouvrement (matériaux synthétiques, couverture à effet de barrière capillaire, couverture subaquatique, etc.), de désulfuration environnementale et de construction de digues et de parcs à résidus ont été développées récemment surtout dans les pays développés ou les réglementations environnementales sont très sévères.

Ces techniques sont généralement dispendieuses à mettre en œuvre et leurs performances à long terme sont encore imprécises (Bussière B, 2007). Les coûts unitaires varient de 17 k/ha, pour les cas les moins complexes, à une fourchette de 30 à 100 k/ha pour les cas de barrière à l'oxygène, et jusqu'à plus de 200 k\$ pour les cas d'encapsulation (recouvrements étanches à l'aide de géomembranes). Les coûts associés à la restauration des sites générateurs de DNC sont de l'ordre de 70 k/ha (Bussière B et al. , 2005). C'est dans ce sens qu'une valorisation potentielle de ces rejets miniers en dehors du site minier présente une solution incontournable pour contribuer à une gestion durable et respectueuse de l'environnement.

III.10- Valorisation des rejets miniers

L'utilisation des rejets miniers en dehors du site minier est l'une des méthodes qui pourrait résoudre leur impact sur l'environnement tout réduisant leur volume. L'idée est de trouver des voies de valorisation de ces rejets qui peuvent consommer ces grandes quantités. En effet, cela revient à trouver des clients potentiels qui seront intéressés par les propriétés physiques, chimiques et minéralogiques de ces rejets. Il est certain qu'il est impossible de trouver une solution magique de gestion de ces déchets comme chaque déchet présente des propriétés intrinsèques et qui ne sont pas forcément les mêmes dans chaque type de rejet. Souvent, les solutions proposées par les chercheurs pour gérer un type de déchet restent adéquates seulement au type de déchet étudié. Ces solutions peuvent certainement être utilisées par d'autres entreprises minières si leur déchet présente des propriétés similaires. Par contre, il est démontré dans la littérature que grâce à leurs caractéristiques en termes de matière minérale

et de granulométrie, les rejets miniers peuvent être utilisés avec succès dans le domaine des matériaux de construction.

Cette voie de valorisation pourrait être une solution environnementale prometteuse. Il est possible en effet non seulement de réduire les quantités de rejets miniers mais aussi de conserver les ressources naturelles (argiles, sables, granulats, etc.) Consommées dans les constructions. Certes, tous les rejets miniers ne sont pas réutilisables, une caractérisation approfondie est généralement utilisée pour statuer sur la méthode de gestion appropriée des rejets miniers. Cela dans le but de classer préalablement ces rejets en se basant sur une estimation du potentiel de génération d'acidité. Des essais statiques, cinétiques et des modèles numériques de prédiction sont souvent utilisés. Plus de renseignements sur ces méthodes peuvent être consultés dans la littérature (Bouzahzah H, 2013 ; Villeneuve M, 2004). Dans le cadre de l'écologie industrielle et du développement durable, une bonne volonté de symbiose et de synergie entre les différents producteurs de déchets et de consommateurs potentiels est requise pour trouver des embauches réelles d'utilisation des rejets miniers. Ces derniers présentent certainement tout un potentiel à découvrir et à explorer. Ils peuvent être utilisés comme matière première secondaire ou matière alternative pour la fabrication des matériaux de construction écologiques. Dans ce cadre, une multitude d'études toutes récentes ont porté un intérêt majeur aux modes de réutilisation des rejets miniers dans la construction. En général, ces études sont développées à une échelle de laboratoire et une application réelle de ces études n'a pas encore vu la lumière du jour.

Des études ont porté sur la valorisation des rejets du procédé de cuivre comme substituant au sable naturel pour la confection du béton normal (Thomas B et al., 2013).

Un taux de substitution de 60% a été jugé optimal et les matériaux du béton dérivés présentent des propriétés de résistance mécanique et de durabilité satisfaisante. Dans une autre étude en Turquie (Onuaguluchi O et Eren , 2012), des résidus de cuivre ont incorporés dans des produits de mortiers et ont montré que de meilleures propriétés de résistance à la compression, d'abrasion et de durabilité peuvent être obtenues. En Chine, des briques de bonne qualité ont été confectionnées en utilisant jusqu'à 84% des résidus d'hématite (Chen Y et al. 2011b). D'autres études proposent la production de briques à base de rejets miniers en passant par une étape préalable de géopolymérisation (Ahmari S et Zhang L, 2012). Des résidus du minerai de fer ont été également étudiés pour la faisabilité de leur utilisation, après récupération du fer, comme matière première secondaire pour la préparation

d'un matériau cimentaire (Li C et al. , 2010). Les résultats de cette étude ont montré que le mélange de 30% de ces résidus de fer avec 34% de laitier de haut-fourneau, 30% de clinker et 6% de gypse offrent une pâte cimentaire avec des propriétés mécaniques comparables à celles d'un ciment Portland ordinaire. Wong R et al. (2004) ont étudié la faisabilité d'utilisation des résidus miniers de sables bitumineux calcinés (Canada) comme ajout cimentaire (similaire au metakaolin) pour la confection de béton haute performance. Il a été constaté que ces rejets calcinés ont une excellente activité pouzzolanique dans les bétons, rendant leur utilisation potentiellement rentable et respectueuse de l'environnement. D'autres études ont montrés la faisabilité d'utilisation des boues d'ilmenite pour la fabrication des matériaux céramiques (Contreras M et al., 2014). Il a été montré dans cette étude que l'utilisation de la boue comme additif(3-10%) permet d'améliorer les propriétés de frittage tout en augmentant la résistance mécanique (jusqu'à 15%) et en réduisant la porosité apparente et l'absorption d'eau (jusqu'à 50%). Des rejets de l'industrie du bore ont été utilisés aussi pour la préparation des agrégats légers (Kavas T et al, 2011a).

III.11- Défis de réutilisation des rejets miniers

On distingue en général deux grands défis majeurs, le premier est lié à l'acceptabilité sociétale de l'idée d'utilisation des rejets miniers et le deuxième est surtout lié aux défis techniques. Dans un premier lieu, il est à signaler qu'un long trajet est à parcourir pour la réutilisation des rejets miniers dans la construction. On est encore loin pour que les gouvernements et les citoyens acceptent l'idée d'avoir des rejets miniers dans leur maison. Les gens ont toujours tendance à coller cette étiquette noire quand il s'agit de rejets miniers. Avec un recul d'expérience, à chaque fois qu'on parle de rejets miniers, les gens pensent automatiquement au terme risque au lieu du terme opportunité à saisir.

C'est un contrat volontaire qu'il va falloir développer entre les porteurs de projets et les populations avoisinantes dans le but de trouver un compromis entre ces deux parties prenantes, et prendre en considération les craintes des populations vis-à-vis l'activité minière. Le défi majeur à surmonter pour atteindre l'acceptabilité sociétale est lié surtout à un manque de communication entre les exploitants et les collectivités locales.

Dans un second lieu, la collecte, le transport, le tri et la nécessité des fois d'un prétraitement des rejets font également partie des défis majeurs en raison des grands volumes produits. Il est certain qu'il serait impossible d'utiliser la totalité des déchets dans la

construction à cause de leur grande quantité évaluée à des millions de tonnes en Algérie et des milliards de tonnes dans d'autres pays comme le Canada, l'Australie, les États Unis, etc. Aussi, la faisabilité de transport entre les producteurs (industrie minière) et les consommateurs de déchets (ex. construction) pose généralement un grand défi. Les mines sont généralement loin des zones où une grande consommation de matières premières est présente. En outre, l'hétérogénéité des caractéristiques des rejets influence leur traitement et le comportement de leurs produits finis une fois recyclés. Les industriels miniers ont généralement tendance à mélanger les différents types de rejets miniers (stériles et résidus de concentrateurs) et ne pensent pas vraiment à des possibilités de valorisation. Il est des fois impossible de réaliser un tas de rejets miniers qui ont les mêmes propriétés physiques, chimiques ou minéralogiques. Aussi, le caractère toxique d'un certain type de rejets miniers à cause de leur teneur en métaux lourds et métalloïdes pourrait poser un défi. En effet, d'autres charges de prétraitement peuvent s'ajouter pour enlever les éléments pénalisants (métaux lourds, métalloïdes, sulfures ; etc.).

L'industrie de la construction a traditionnellement utilisé depuis des siècles des matières premières naturelles telles que l'argile, le sable et les agrégats pour la fabrication des matériaux de construction. Cependant, les ressources naturelles sont consommées abusivement et d'une manière très rapide que le système naturel n'arrive pas les remplacer avec la même vitesse. Cela provoquera ainsi tôt ou tard une rareté des matières premières et commence déjà à laisser beaucoup d'inquiétudes quant à la sécurité et la fourniture de ces ressources non renouvelables.

III.12- Conclusion

L'un des grands problèmes actuels, d'un point de vue économique et environnemental, est le traitement des volumes importants de déchets produits continuellement par les activités industrielles et urbaines. Il est estimé que la quantité de déchets produits à l'échelle mondiale peut aller jusqu'à des centaines de milliards de tonnes. La grande partie de ses déchets est produite par les industries des pays développés (États-Unis, Canada, Chine, pays de l'Union Européen, etc.). Ces quantités de déchets sont en augmentation continue et vont atteindre des niveaux supérieurs dans les prochaines années.

CHAPITRE IV : Caractérisation physico-chimique et minéralogique des stériles francs de phosphate de djebel Onk.

Sommaire

IV.1- Introduction.

IV.2- Prélèvement et préparation d'échantillons.

IV.2.1- Échantillonnage.

IV.2.2- But de l'échantillonnage.

IV.2.3- Echantillonnage des roches.

IV.2.4- Préparations des échantillons des déchets de phosphate pour analyse.

IV.3- Caractérisation physico-chimique des stériles francs.

IV.3.1- Analyse granulométriques.

IV.3.2- Analyse granulo-chimique des stériles miniers de djebel Onk (stériles francs riche et pauvre en P_2O_5) par fluorescence X (FX).

IV. 3.3- Analyse minéralogique par Diffraction à Rayons X (DRX).

IV.3.4- Analyse par spectrométrie d'absorption atomique (SAA) des stériles miniers de la mine de phosphate de djebel Onk.

IV.4- Conclusion

Chapitre IV : Caractérisation physico-chimique et minéralogique des stériles francs de phosphate de Djebel Onk

IV.1- Introduction

Ce chapitre décrit l'ensemble des caractéristiques réalisées sur les différents échantillons des déchets prélevés (stériles francs et les résidus d'exploitation (stériles de sélectivité) du gisement de phosphate de djebel Onk (Tébessa) en vue d'en établir la composition minéralogique et les méthodologies utilisées pour accéder à cette composition.

La caractérisation conventionnelle est généralement basée sur l'analyse de plusieurs paramètres chimiques et physiques. La caractérisation par l'approche minéralurgique repose principalement sur la distribution dans les différentes fractions granulométriques, sur l'identification de leur composition minéralogique, et l'évaluation de leur degré de libération.

Ces outils de caractérisation seront détaillés dans le présent chapitre. Ensuite, un outil complémentaire et très particulier pour la caractérisation des matériaux visés sera décrit ; il s'agit de l'interprétation modale.

IV.2- Prélèvement et préparation d'échantillons

IV.2.1- Échantillonnage

D'après Hoenig M et Thomas P, 2002 (1) et Ben Ammar, S., 2006 L'échantillonnage est l'une des plus importantes étapes de la caractérisation. Il permet de réduire la taille de la fraction d'un lot à étudier ainsi que la procédure à suivre pour effectuer le prélèvement de manière à garantir la représentativité. En effet, quelle que soit la précision des méthodes analytiques utilisées, si l'échantillon n'est pas représentatif, l'évaluation et les conclusions qui en seront tirées risquent de ne pas être en adéquation avec le lot à étudier (Hoenig M et Thomas P, 2002 ; Nicolas J, 2006 ; Tshamala ,2008).

IV.2.2- But de l'échantillonnage

Le but de l'échantillonnage est d'obtenir une gamme d'échantillons représentatifs qui reflète toutes les caractéristiques physiques et chimiques de l'ensemble du site objet d'étude (Matías M and Aranguren S, 2008 ; Ayadi B, 2010). Selon Pineau J, 1996, l'échantillonnage

permet de réaliser l'estimation la plus fiable de la valeur inconnue et inaccessible d'une propriété d'un lot à partir d'un essai effectué sur un échantillon représentatif. Pendant ce temps, et pour des raisons économiques, le nombre et le volume des échantillons doivent être réduits au minimum. Il est donc important d'obtenir un équilibre acceptable entre la représentativité et le budget disponible (Pineau J ,1996).

D'après l'Association Française de Normalisation (AFNOR), un échantillon est représentatif lorsqu'il manifeste les mêmes caractéristiques que la matière dont il est issu pour une propriété ou des propriétés que l'on veut mesurer. Dans notre cas, il doit comporter les caractéristiques physico-chimiques de l'ensemble du site étudié.

La stratégie d'échantillonnage est basée sur le volume d'échantillon, le nombre d'échantillons, et la sélection de stations d'échantillonnage (nombre, position et positionnement). La représentativité des échantillons dépend en grande partie des choix qui sont faits (Gosselin A et al, 1999).

IV.2.3- Echantillonnage des roches

Les roches ont été échantillonnées à l'aide d'une masse métallique enveloppée par plusieurs couches de papier et nylon pour éviter toutes contaminations possibles. Les points sélectionnés concernant les affleurements rocheux des unités géologiques principales des régions étudiées (Matías M and Aranguren S, 2008).

IV.2.4- Préparations des échantillons des déchets de phosphate pour analyse

Les échantillons sur lesquels repose ce travail ont été prélevés dans des endroits différents afin de couvrir le maximum du secteur d'étude. En général le prélèvement d'échantillons se fait en deux temps :

- Prélèvement sur le chantier, la carrière ou l'usine d'une quantité de matériaux nettement plus grande que celle qui sera utilisée pour les essais.
- Au laboratoire, le prélèvement de la quantité nécessaire pour les essais, doit être représentatif de l'échantillon de départ.

Les échantillons de stériles miniers prélevés (les stériles francs riche et pauvre en P_2O_5) sont acheminés au laboratoire de préparation des échantillons au niveau de complexe minier de djebel-Onk, ils ont séchés et divisés (dans deux rifles) jusqu' à l'obtention de 1.5 à 2 Kg cette

quantité et subi à des étapes de concassages, de quartage, et succession d'homogénéisation pour obtenir un échantillon représentatif. Un échantillon initial de cet échantillon (représentatif) est caractérisé par DRX et MEB, et une quantité de 1000g de cet échantillon (représentatif) est utilisé pour l'analyse granulométrique et granulo-chimique.



Figure 22 - Echantillon représentatif de stériles francs riche en P_2O_5



Figure 23 - Echantillon représentatif de stériles francs pauvre en P_2O_5 .

IV.2.4.1- Concassage

Le concassage est une opération de fragmentation, qui permet de réduire la taille des matériaux tout venant des carrières (dimensions de 0 à plus de 1000 mm) à des dimensions rendant aisé leur traitement ultérieur (séchage et broyage).

Nous distinguons trois genres de concassage, à savoir :

- concassage primaire : réduction du tout venant de gros à très gros calibre à 40 à 80 mm,
- concassage secondaire : réduction du calibre 40 - 80 mm à l'état de gravier,
- concassage tertiaire : réduction de gravier à l'état de sable.

Dans notre cas cette opération a été effectuée dans le laboratoire de valorisation des ressources minérales et environnement (LAVAMINE) du département des mines- l'université d'Annaba à l'aide d'un concasseur à mâchoire de type OMYPCKNN META, il permet de réduire les dimensions des grains jusqu'à une dimension inférieure à 5 mm. Ensuite, les échantillons sont divisés plusieurs fois pour obtenir des échantillons représentatifs



Figure 24 - Concasseur à mâchoire utilisé



Figure 25 - Diviseur

IV.2.4.2- Homogénéisation et quartage

C'est une opération indispensable pour une meilleure représentativité de l'échantillon. Avant cette opération, il est nécessaire de procéder à une homogénéisation du minéral. Elle consiste à construire un cône régulier au moyen d'une petite pelle, qu'on transforme sous forme de galette plate de contour plus au moins rond. Cette galette est ensuite partagée en quatre quarts égaux. On prélève deux quarts opposés, alors que les deux autres seront gardés comme témoins. On recommence la même procédure de fractionnement jusqu'au dernier quartage.

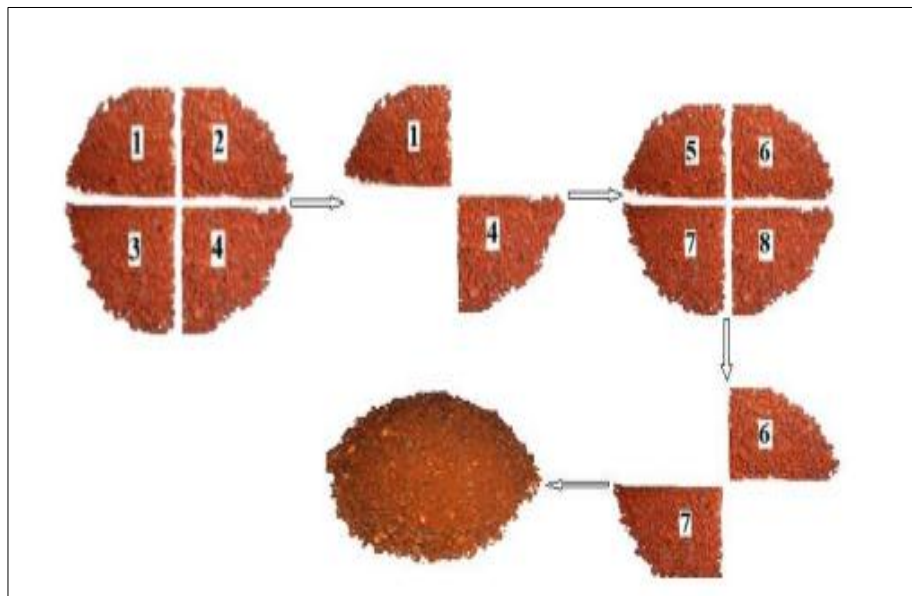


Figure 26 - Opération de quartage

IV.3- Caractérisation physico-chimique des stériles francs

IV.3.1- Analyse granulométriques

Pour la composition granulométrique du minerai, après les différents stades de fragmentations, on procède à l'analyse de tamisage. L'analyse granulométrique permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles de grains appelées fractions granulométriques constituant les échantillons. Ces fractions sont constituées de particules dont la grosseur couvre un intervalle relativement restreint et diminue d'une fraction à l'autre. Il existe plusieurs méthodes d'analyse granulométrique. Parmi ces méthodes, la méthode de tamisage éventuellement utilisée dans notre présente étude, couvrent la presque totalité des gammes de grosseurs de particules visées. De plus, elles permettent la récupération d'échantillons séparés en fonction de la taille des particules.

Le principe d'analyse consiste à classer les différents grains constituant l'échantillon en utilisant une série de tamis, emboîtés les uns sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. Le minerai étudié est placé en partie supérieure des tamis et les classements des grains s'obtiennent par le mouvement vibratoire horizontal, ainsi que des secousses verticales, de la colonne de tamis à l'aide d'une tamiseuse (Figure 27). (Julien H, Rozenn L et Claire L, 2007)

IV.3.1. 1- Tamisage des échantillons

Avant de s'intéresser à la nature chimique de la matière minérale, il est nécessaire de connaître dans un premier temps la distribution de taille des particules de deux types de stériles miniers de djebel Onk (stériles francs et pauvre en P_2O_5). (Mériaux S, 1954)

Le tamisage est effectué au niveau de laboratoire de préparation des échantillons au niveau du complexe de phosphate de djebel Onk Tébessa.



Figure 27 - Tamiseuse utilisé pour l'analyse granulométrique au niveau de laboratoire du complexe de Djebel Onk – Tébessa

Le tamisage a été réalisé à partir de 1000 g pour l'échantillon de stériles francs pauvre en P_2O_5 et 1000 g pour l'échantillon de stériles francs riches en P_2O_5 afin de séparer les échantillons en plusieurs fractions granulométriques différentes. Les tamis normalisés utilisés ont des mailles carrées +10 mm, +8mm, +4mm, +2mm, +1mm, +0.80mm, +0.50mm, +0.20mm, +0.10mm, +0.080mm, +0.040mm, - 0.040mm. Tous les échantillons de stériles ont tamisés pendant 20 minutes sur une colonne de tamis dans une machine à secousse de type CISA fonctionnant avec des tamis dont le diamètre est de 200 mm x 50 mm, les quantités de particules présentent sur les tamis sont pesées par une balance dont la précision est de 0,01 g.

Tranches granulométriques (mm)	Masse (g)	Pourcentage massique (%)	refus cumulés (%)	Passant (%)
> 10	375,4	37,54	0	100
- 10 + 8	84,1	8,41	37,54	62,46
- 8 + 4	170,3	17,03	45,95	54,05
- 4 + 2	80,6	8,06	62,98	37,02
- 2 + 1	40,7	4,07	71,04	28,96
- 1 + 0,80	12,5	1,25	75,11	24,89
- 0,80 + 0,50	31,5	3,15	76,36	23,64
- 0,50 + 0,20	94,7	9,47	79,51	20,49
- 0,20 + 0,10	64,6	6,46	88,98	11,02
- 0,10 + 0,080	7,0	0,70	95,44	4,56
- 0,080 + 0,040	18,3	1,83	96,14	3,86
< 0,040	20,3	2,03	97,97	2,03
Total	1000	100	100	0

Tableau 6 - Résultats d'analyse granulométrique de stériles francs pauvre en P_2O_5 .

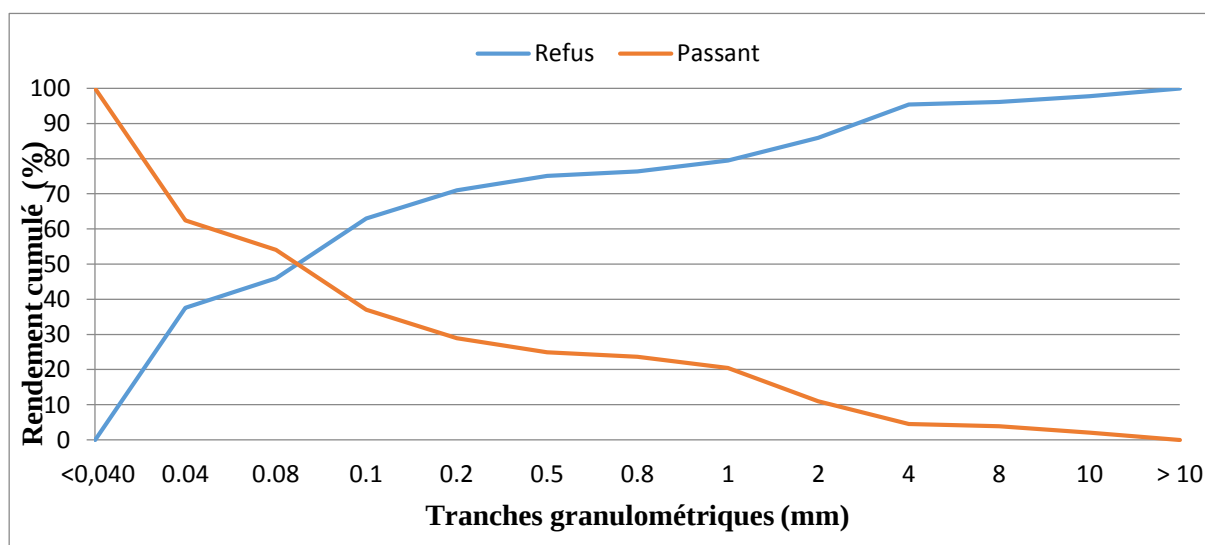


Figure 28 - Courbe de distribution granulométrique pour un échantillon de stériles francs riches en P_2O_5

Tranches granulométriques (mm)	Masse (g)	Pourcentage massique (%)	refus cumulés (%)	Passant (%)
> 10	248,5	24,85	0	100
- 10 + 8	58,6	5,86	24,85	75,15
- 8 + 4	179,3	17,93	30,71	69,29
- 4 + 2	124,7	12,47	48,64	51,36
- 2 + 1	90,8	9,08	61,11	38,89
- 1 + 0,80	43,0	4,30	70,19	29,81
- 0,80 + 0,50	46,9	4,69	74,49	25,51
- 0,50 + 0,20	63,9	6,39	79,18	20,82
- 0,20 + 0,10	42,2	4,22	85,57	14,43
- 0,10 + 0,080	6,5	0,65	89,79	10,21
- 0,080 + 0,040	5,1	0,51	90,44	9,56
< 0,040	90,5	9,05	90,95	9,05
Total	1000	100	100	0

Tableau 7 - Résultats d'analyse granulométrique de stériles francs riche en P_2O_5 .

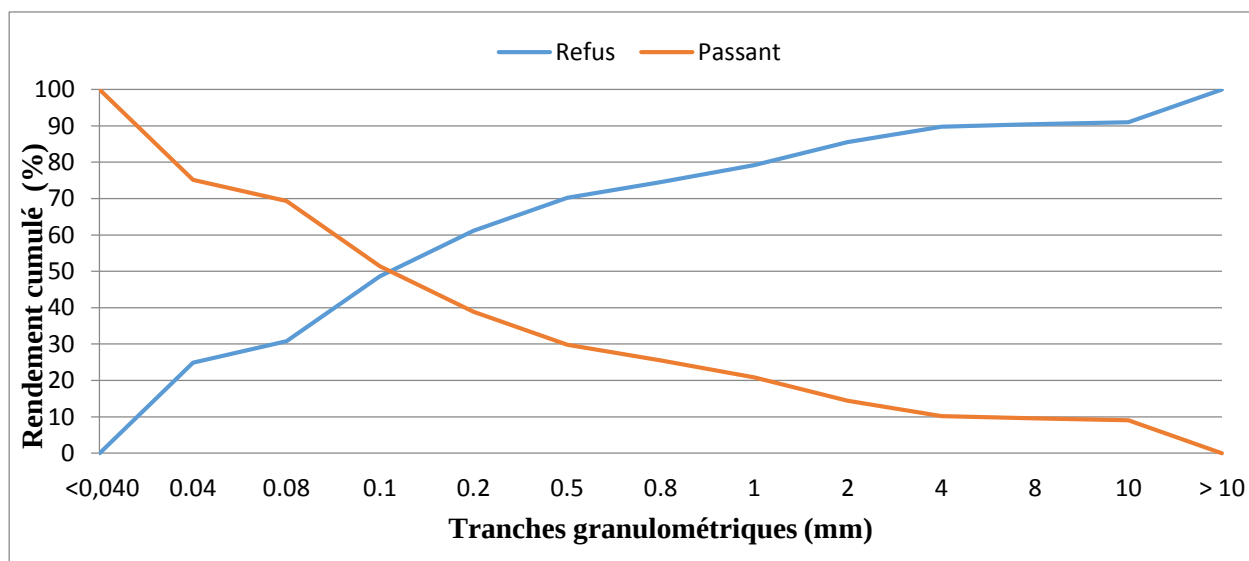


Figure 29 - Courbe de distribution granulométrique pour un échantillon de stériles francs pauvre en P_2O_5

L'analyse granulométrique menée sur des échantillons des stériles miniers de la mine phosphate de djebel Onk concassé à 10 mm montre que :

- Pour les stériles francs pauvre en P_2O_5 un rendement élevé de 37,54 %, ce dernier a été enregistré dans la classe > 10 mm, les résultats obtenus sont montrés dans le tableau 6 et la figure 28.
- Pour les stériles francs riches en P_2O_5 : un rendement élevé de 24,85 %, ce dernier a été enregistré dans la classe > 10 mm, les résultats obtenus sont montrés dans le tableau 7 et la figure 29.

IV.3.2- Analyse granulo-chimique des stériles miniers de djebel Onk (stériles francs riche et pauvre en P_2O_5) par fluorescence X (FX)

IV.3.2. 1- La spectrométrie de fluorescence X(FX)

D'après Thirion-Merle V (2014) La spectrométrie de fluorescence X (SFX ou FX, ou en anglais XRF pour X-ray fluorescence) est une technique d'analyse chimique non destructive qualitative et quantitative utilisant une propriété physique de la matière, la fluorescence de rayons X (Czichos S ,2006 ; eberhard JP ,1997).

Elle permet d'identifier et de doser tous les éléments à partir du carbone, dans des échantillons très divers : minéraux, métaux, huiles, alliages, poudres, céramiques, polymères, ciments, verres ... (McGraw_H, 2004. Merdham J, 2004)

La fluorescence X est une propriété spectrale des atomes, exploitée couramment en analyse pour obtenir des renseignements qualitatifs et/ou quantitatifs sur la composition élémentaire de toutes sortes de mélanges (Rouessac A, 2004).

Elle consiste à irradier l'échantillon soit par un faisceau de rayons X, soit par bombardement avec des particules, généralement des électrons ayant suffisamment d'énergie, pour que les atomes ainsi ionisés émettent un rayonnement de fluorescence également dans le domaine des rayons X (émission secondaire) (higson J, 2003).

Le spectre des rayons X émis par la matière est caractéristique de la composition de l'échantillon. En analysant ce spectre, on peut en déduire la composition élémentaire. Les éléments sont identifiés par les longueurs d'onde du rayonnement de fluorescence (analyse qualitative), tandis que les concentrations des éléments présents dans l'échantillon sont

déterminées par l'intensité de ces rayons X secondaires (analyse quantitative) (Mossbawer X, 2007).

IV.3.2. 2- Principe de l'analyse par fluorescence X (fx)

L'échantillon à analyser est placé sous un faisceau de rayons X. Sous l'effet de ces rayons X, les atomes constituant l'échantillon passent de leur état fondamental à un état excité. L'état excité est instable, les atomes tendent alors à revenir à l'état fondamental en libérant de l'énergie, sous forme de photons X notamment. Chaque atome, ayant une configuration électronique propre, va émettre des photons d'énergie et de longueur d'onde propres. C'est le phénomène de fluorescence X qui est une émission secondaire de rayons X, caractéristiques des atomes qui constituent l'échantillon. L'analyse de ce rayonnement X secondaire permet à la fois de connaître la nature des éléments chimiques présents dans un échantillon ainsi que leur concentration massique. (Valérie T, 2014)

IV.3.2. 3- Résultats de l'analyse

Les différentes fractions granulométriques ont été analysées par fluorescence X. Les résultats, obtenus, sont présentés dans les tableaux (8 et 9) et les figures (30 et 31) Cette étude a montré que :

- **Le stérile francs pauvre** contient une très faible teneur en P_2O_5 , un pourcentage élevé de CaO, MgO et SiO_2 qui peut atteindre 34,76%, 14,39% et 29,70% successivement se sont des élément majoritaire dans notre produit et la présence d'autre éléments de pourcentage minoritaire tels que Fe_2O_3 , K_2O , Na_2O , So_3 , cl^- . Donc ce type de stérile est considéré comme un matériau pauvre en P_2O_5 et économiquement non rentable. En peut aussi dire que ce produit contient tous les éléments qu'on le retrouve dans le calcaire et l'argile et aussi dans les ajouts utilisé pour la fabrication du ciment tel que le laitier de haut fourneaux et la pouzzolane (CaO, MgO, SiO_2 ). Cependant, ces éléments ne contiennent pas de P_2O_5 .
- **Le stérile francs riche** contient une teneur CaO peut atteindre 44,86 %, donc il renferme principalement une gangue carbonaté. La teneur en P_2O_5 atteint 26,40 % cela confirme que ce matériau est riche en P_2O_5 et économiquement sont rentable. Un rendement élevé de (24,32 - 26,40 % de P_2O_5) c'était enregistré dans la tranche granulométrique (- 0,80 + 0,20 mm) donc la maille de libération du minerai est dans les tranches granulométriques (- 0,80 + 0,20 mm).

Tableau 8 - Résultats des analyses chimiques des différentes tranches granulométriques de stérile riche en P_2O_5

Tranches granulométriques (mm)	P_2O_5 (%)	CaO (%)	MgO (%)	SiO_2 (%)	Fe_2O_3 (%)	K_2O (%)	Na_2O (%)	SO_3 (%)	PAF (%)
Initial	20,54	44,86	5,17	7,12	0,43	0,12	0,80	0,74	18,54
> 10	18,76	44,42	5,78	6,20	0,75	0,20	0,75	0,34	21,80
- 10 + 8	20,51	42,25	5,40	7,14	0,47	0,28	0,80	0,78	19,37
- 8 + 4	20,83	40,63	8,17	6,23	0,32	0,53	0,82	0,40	20,07
- 4 + 2	20,96	39,61	4,99	5,43	0,86	0,90	0,83	0,76	22,66
- 2 + 1	21,68	40,17	4,67	7,45	0,50	0,60	0,84	0,98	20,11
- 1 + 0,80	22,82	41,25	4,18	5,82	0,35	0,93	0,90	0,56	21,19
- 0,80 + 0,50	24,32	38,40	3,59	6,93	0,63	0,89	1,01	0,65	21,68
- 0,50 + 0,20	26,40	36,20	2,56	4,81	0,75	0,97	0,87	0,23	26,21
- 0,20 + 0,10	22,70	36,43	4,65	7,75	0,95	0,28	0,87	0,65	21,90
- 0,10 + 0,080	14,99	40,63	4,10	8,95	0,37	0,46	0,64	0,35	29,51
- 0,080 + 0,040	14,54	41,40	7,15	5,48	0,73	0,59	0,64	0,19	22,74
< 0,040	17,36	39,40	6,20	4,04	0,97	0,90	0,71	0,87	28,28

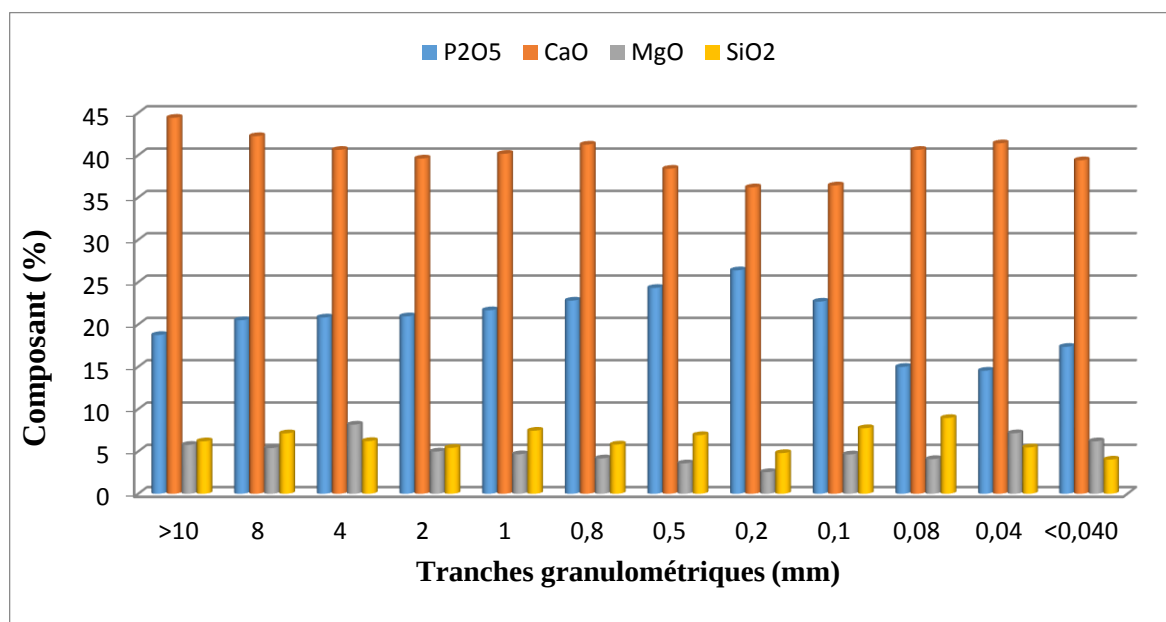


Figure 30 - Evolution des teneurs des principaux éléments chimiques constituant les stériles francs riches en P_2O_5 de la mine de djebel Onk en fonction de la granulométrie

Tableau 9 - Résultats des analyses chimiques des différentes tranches granulométriques de stérile pauvre en P_2O_5

Tranches granulométriques (mm)	P_2O_5 (%)	CaO (%)	MgO (%)	SiO_2 (%)	Fe_2O (%)	K_2O (%)	Na_2O (%)	So_3 (%)	cl^- (%)	PAF (%)
Initial	1,69	28,04	14,39	25,28	0,88	0,25	0,31	0,18	0,017	28,70
> 10	1,00	28,38	12,57	24,97	0,13	0,60	0,14	0,20	0,028	31,03
- 10 + 8	1,13	32,89	9,31	22,38	0,76	0,70	0,21	0,22	0,010	30,65
- 8 + 4	0,87	26,97	11,25	27,07	0,54	0,32	0,21	0,18	0,012	29,54
- 4 + 2	1,36	29,03	13,25	27,98	0,45	0,42	0,25	0,09	0,016	26,87
- 2 + 1	1,26	27,09	12,35	22,65	0,63	0,19	0,25	0,19	0,023	30,98
- 1 + 0,80	2,13	24,98	14,15	19,06	0,79	0,72	0,29	0,15	0,029	27,86
- 0,80 + 0,50	2,87	34,76	14,31	24,56	0,84	0,86	0,31	0,13	0,016	20,56
- 0,50 + 0,20	5,64	26,78	11,96	22,05	0,35	0,26	0,44	0,15	0,015	30,34
- 0,20 + 0,10	7,55	27,87	7,62	14,67	0,56	0,24	0,52	0,12	0,022	39,76
- 0,10 + 0,080	4,59	30,04	8,26	28,97	0,67	0,47	0,40	0,09	0,028	25,87
- 0,080 + 0,040	2,61	25,98	8,73	29,70	0,34	0,60	0,29	0,09	0,014	30,54
< 0,040	0,85	30,97	9,17	25,67	0,76	0,60	0,20	0,12	0,013	30,34

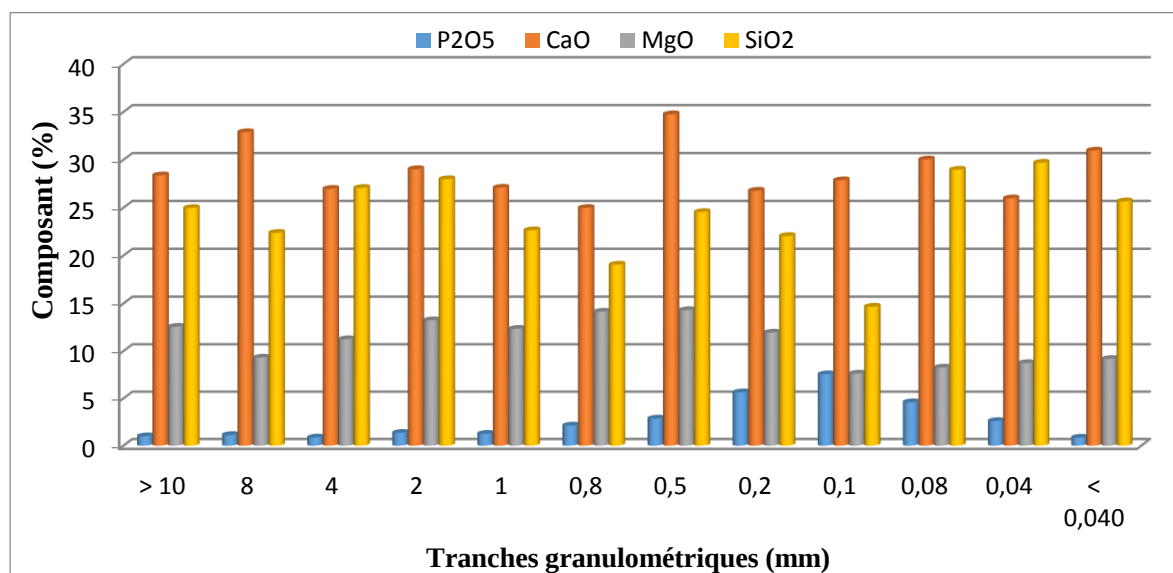


Figure 31 - Evolution des teneurs des principaux éléments chimiques constituant les stériles francs pauvres en P_2O_5 de la mine de djebel Onk en fonction de la granulométrie.

IV. 3.3- Analyse minéralogique par Diffraction à Rayons X (DRX)

La Diffractométrie de Rayons X(DRX) ou bien l'abréviation anglaise XRD(X-Ray Diffraction) : La diffractométrie de rayons X est une méthode d'analyse physico-chimique. La diffraction n'ayant lieu que sur la matière cristalline et fonctionne donc sur la matière cristallisée (minéraux, métaux, céramiques, produits organiques cristallisés). La diffraction fait partie des méthodes de diffusion élastique.(Connolly 2003)(Bunaciu A., Udriștioiu E., et Aboul-Enein H., 2015)

Pour les matériaux non-cristallins, il s'agit de diffusion: La DRX ne fonctionne pas sur la matière amorphe (liquides, polymères, verres) ; puisque la matière amorphe diffuse les rayons X, elle peut être partiellement cristallisée et la technique peut donc se révéler utile.

Un cristal est un agencement d'atomes, d'ions ou de molécules, avec un motif se répétant périodiquement dans les trois dimensions. Les distances interatomiques sont de l'ordre de l'Ångström, du même ordre de grandeur que les longueurs d'onde des rayons X : un cristal constitue donc un réseau 3D qui peut diffracter les rayons X.

IV.3.3.1- Techniques d'analyse DRX

L'appareil de mesure s'appelle un diffractomètre. Les données collectées forment le diagramme de diffraction ou diffractogramme. On prépare l'échantillon sous la forme d'une poudre aplanie dans une plaquette solide plate. On envoie des rayons X sur cet échantillon, et un détecteur fait le tour de l'échantillon pour mesurer l'intensité des rayons X selon la direction. On fait tourner l'échantillon en même temps, ou éventuellement on fait tourner le tube produisant les rayons X.

IV.3.3.2- Interaction rayons X-matière

Les rayons X(ondes électromagnétiques) provoquent un déplacement des électrons par rapport au noyau, les oscillations induites provoquent une réémission d'ondes électromagnétiques de même fréquence, appelée diffusion Rayleigh. Les interférences des rayons diffusés vont être alternativement constructives ou destructives. Selon la direction de l'espace, on obtient un très grand flux de photons X ou au contraire un très faible flux de photons X ; ces variations directionnelles constituent le phénomène de diffraction X. La longueur d'onde des rayons X est de quelques Angström (de l'ordre de grandeur des distances interatomiques). Les directions dans lesquelles les interférences sont constructives, appelées pics de diffraction, sont

déterminées par la loi de Bragg. Les pics de diffraction sont indexés par les indices de Miller {hkl}, car les plans cristallographiques sont repérés par ces indices.

IV.3.3.3- Résultats de l'analyse

Les échantillons des stériles prélevés, ont été finement broyés dans un broyeur à boulet, puis analysés par diffraction des rayons X (DRX) (Figure 32 et 33) dans le but d'identifier la nature et la structure cristalline de notre matériau. Les spectres, obtenus, sont composés de plusieurs pics. Ces analyses ont été réalisées au niveau de laboratoire de Centre d'études et de services technologiques de l'industrie des matériaux de construction (cetim).

D'après la Figure 32, on constate que la composition minéralogique de l'échantillon initial de stériles francs pauvre en P_2O_5 comprend les minéraux suivants : le quartz, la dolomite, la fluorapatite, et la calcite. Cependant, on remarque que : les pics de quartz, calcite et de dolomite ayant une forte intensité sont bien exprimés, ce qui rend leur identification facile.

Fluorapatite : Un minéral phosphaté de formule $Ca_5(PO_4)_3F$

Dolomite : Carbonate de calcium et de magnésium $CaMg(CO_3)$

Calcite : Carbonate naturel de calcium de formule $CaCO_3$,

Quartz : Une espèce minérale du groupe des silicates, composé de dioxyde de silicium, ou silice, de formule chimique SiO_2 ,

D'après la Figure 33, on constate que la composition minéralogique de l'échantillon initial de stériles francs friche en P_2O_5 comprend les minéraux suivants : quartz, Carbonate fluorapatite, albite, montmorillonite, orthoclase, dolomite, et calcite, Cependant, on remarque que : les pics de carbonate-fluorapatite et de la dolomite ayant une forte intensité sont bien exprimés, ce qui rend leur identification facile.

Carbonate fluorapatite : Phosphate de calcium carbonaté

Montmorillonite : La montmorillonite est un minéral composé de silicate d'aluminium et de magnésium hydraté, de formule $(Na, Ca)_{0,3}(Al, Mg)_2 Si_4O_{10}(OH)_2 \cdot n H_2O$, et

Albite : Un minéral de la famille des feldspaths (groupe de silicate), de formule $NaAlSi_3O_8$

Orthoclase : Une espèce minérale de la famille des feldspaths du groupe des silicates. Sa composition chimique est $KAlSi_3O_8$.

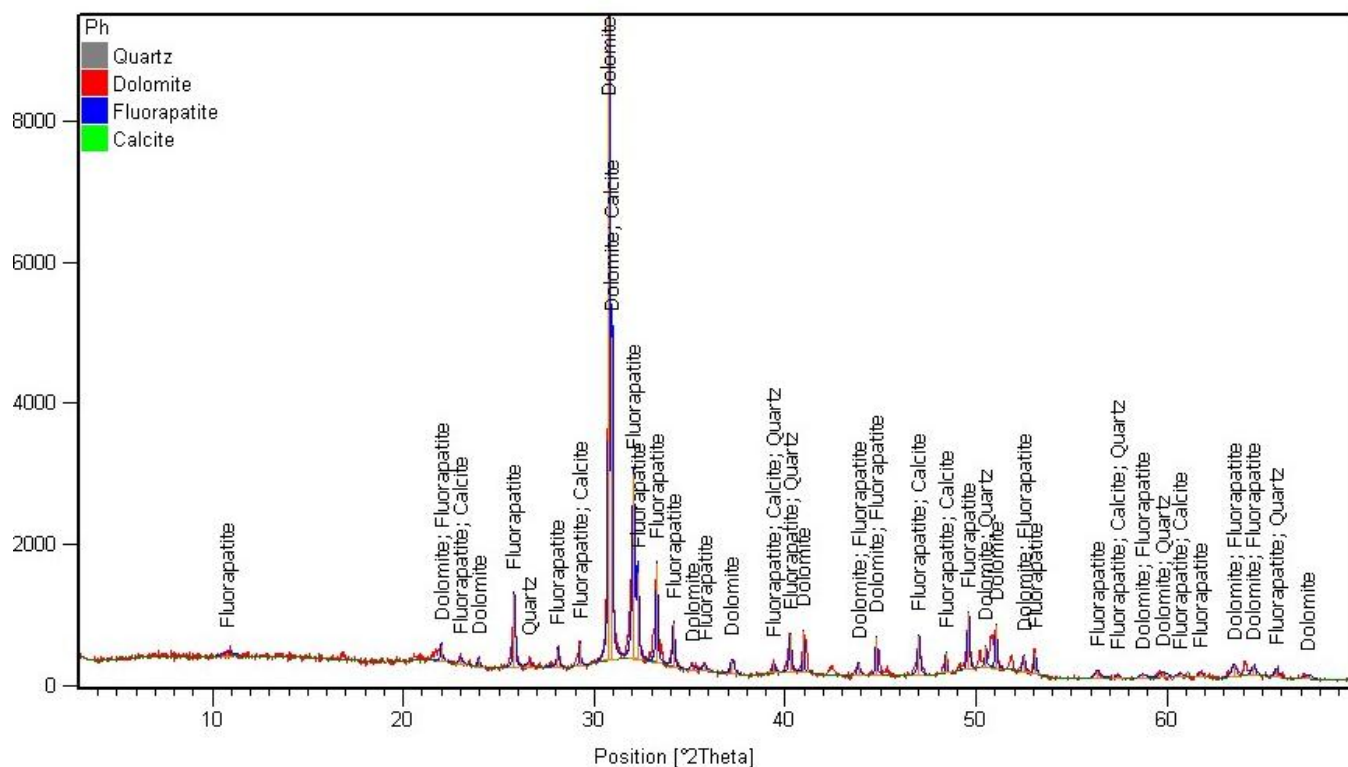


Figure 32 - Analyse par DRX des stériles francs pauvre en P_2O_5

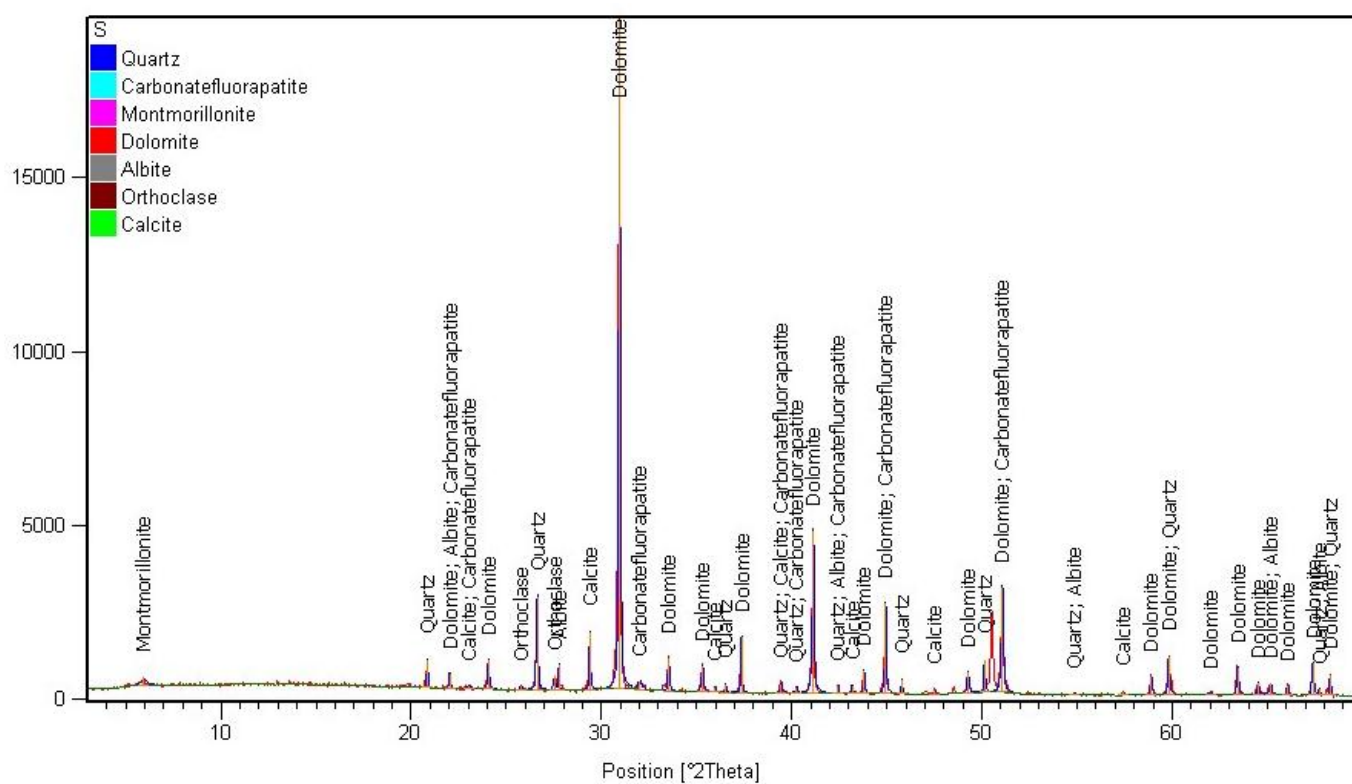


Figure 33 - Analyse par DRX des stériles francs riche en P_2O_5

IV.2.4- Analyse par spectrométrie d'absorption atomique (SAA) des stériles miniers de la mine de phosphate de djebel Onk

IV.2.4.1- Principe d'analyse

L'absorption atomique de flamme est une méthode qui permet de doser essentiellement les métaux en solution. Cette méthode d'analyse élémentaire impose que la mesure soit faite à partir d'un analyte (élément à doser) transformé à l'état d'atomes libres. L'échantillon est porté à une température de 2000 à 3000 degrés pour que les combinaisons chimiques dans lesquelles les éléments sont engagés soient détruites. La spectrométrie d'absorption atomique est basée sur la théorie de la quantification de l'énergie de l'atome. Celui-ci voit son énergie varier au cours d'un passage d'un de ses électrons d'une orbite électronique à une autre : $\Delta E = h\nu$ où h est la constante de Planck et ν est la fréquence du photon absorbé. Généralement seuls les électrons externes de l'atome sont concernés. Les photons absorbés étant caractéristiques des éléments absorbants, et leur quantité étant proportionnelle au nombre d'atomes d'élément absorbant selon la loi de distribution de Boltzmann, l'absorption permet de mesurer les concentrations des éléments à doser. L'analyse par absorption atomique utilise la loi de Beer- Lambert. S'il y a plusieurs éléments à doser, on réalise cette manipulation pour chaque élément de l'échantillon en se plaçant à une longueur d'onde fixée. Il faut donc à chaque manipulation choisir une source adaptée pour éclairer l'élément que l'on cherche à exciter.



Figure 34 - Spectromètre d'absorption atomique (Perkin Elmer AAS 3110)

IV. 3.4.2- Résultats de l'analyse

Les deux échantillons analysés par spectromètre d'absorption atomique (Perkin Elmer AAS 3110, la figure 34), on utilisant des lampes à cathodes creuses appropriées pour chaque élément analysé après avoir effectué les extractions à l'acide nitrique, sauf pour le cas du mercure un traitement aux hydrures a été nécessaire voir les protocoles, des courbes d'étalonnages ont été tracées, les résultats sont portés sur le tableau ci-dessus.

Tableau 10 - Analyses par spectromètre d'absorption atomique des échantillons initiaux des stériles francs riche et pauvre en P_2O_5

Métaux (ppm)	Stérile francs Pauvre en P_2O_5	Stérile francs riche en P_2O_5	Méthodes
Cadmium	7.7	8.4	AAS extraction à l'acide nitrique
Cuivre	136.3	155.8	
Zinc	203,6	211 ,7	
Plomb	123,4	132,8	
Mercure	ND	ND	
Nickel	8,8	9,7	
Antimoine	8,5	6,7	

On remarque bien que les deux échantillons de sols analysés, sont relativement riches en métaux Cu, Zn, Pb cela est due à la présence des minerais de sphalérite, de galène.....etc.

Pour le cas du mercure il est complètement absent.

La serventite, la sénarmontite ainsi que la stibine sont des traces relativement faibles représentées dans l'antimoine.

Ces éléments sont auparavant adsorbés sur des matrices argileuses phosphatées par phénomène de chalcophilie sur les matières cooprolytiques des matières organiques suivant des conditions pH Eh adéquates.

CHAPITRE V : Les clés de succès des déchets miniers de phosphate dans la fabrication des produits cimentiers

Sommaire

V.1- Introduction.

V.2- Caractérisation des matériaux de base utilisés.

V.2.1- Le clinker.

V.2.2- Le gypse.

V.2.3- Les ajouts.

V.3- Matériel et méthodes.

V.3.1- Préparation des mélanges.

V.3.2- Caractéristiques physiques de la pâte de ciment.

V.4- Etude sur mortier normalisé.

V.4.1- Confection des éprouvettes prismatiques.

V.4.2- Mortier normal.

V.5- Essai de résistance mécanique à la traction par flexion.

V.6- Essai de résistance mécanique à la compression simple.

V.7- Conclusion.

Chapitre V : Les clés de succès des déchets miniers de phosphate dans la fabrication des produits cimentiers

V.1- Introduction

Les déchets miniers produits continuellement par les activités industrielles (exploitation, traitement,) est considéré l'un des grands problèmes qui ayant un impact potentiellement négatif sur l'environnement et l'économie du pays. Pour cette raison une réutilisation des déchets comme matière première alternative dans les matériaux de construction est une solution environnementale prometteuse (Kacimi L, 2007). De plus, cette voie de valorisation permet de réduire les grandes quantités des rejets miniers et donc leur impact environnemental ainsi que la préservation des ressources naturelles non renouvelables exploitées intensivement dans la construction (argiles, calcaire, sable....) (Taha Y, 2017. Samhadji Y, 2014).

L'Algérie compte un déficit important en matériaux de construction et en particulier le ciment. Face à la gravité des problèmes environnementaux dû à la surexploitation des ressources, le gouvernement algérien a décidé en 2001 de consacrer une enveloppe financière importante, de près de 970 million de dinars, pour atteindre les objectifs inscrits dans le Plan National d'Actions pour l'environnement et le développement durable (PNAE, 2002).

Dans le cadre de développement durable et spécialement du respect de l'environnement, des producteurs de ciment se sont intéressés à l'incorporation dans le ciment de certains sous-produits industriels, susceptibles de développer des propriétés hydrauliques (Taha Y, 2017. Nabih k, 2012. Abdoulaye T, 2015).

La nécessité de trouver des différents types de ciment moins coûteux et avec des propriétés physico-mécaniques demandées conduit les industriels à produire des ciments contenant outre le clinker des ajouts secondaires (d'origine naturelle ou sous-produits industrielle) avec des proportions plus ou moins importantes (car les ajouts minéraux sont largement utilisés dans le but de résoudre en grande partie le problème d'autosuffisance nationale en ciments, ainsi que celui de la baisse du coût énergétique et que la consommation du clinker baisse en fonction de taux d'ajouts utilisés). (Nigri G, 2009)

Les ajouts minéraux souvent utilisés dans la fabrication du ciment sont principalement le laitier de hauts fourneaux et les pouzzolanes (Deboucha W et al, 2017) (Chaib O et Al, 2015), d'autres matériaux locaux peuvent être utilisés comme les déchets industriels (les déchets des briques, déchets de marbre, déchets de lin textile, les phosphogypse....) (Nigri G, 2009. Raoui A, 2012. El Habib A, 2011. Belhadj M, 2016). Ces types des déchets ne peuvent être considérés seulement comme un déchet mais plutôt comme sous-produits et une source d'un ou plusieurs éléments de valeur commerciale (Taha Y, 2017).

La démarche de notre étude consiste dans un premier temps à caractériser le stérile de phosphate de gisement de djebel Onk Tébéssa et ensuite nous faisons une étude comparative entre l'utilisation de ce type de déchets comme ajout dans la fabrication du ciment et d'autres ajouts tels que le laitier (sous-produit de l'industrie sidérurgique) et la pouzzolane (d'origine naturelle) et voire leurs influences sur la qualité du ciment étudié **CPJ – CEM II 42,5** (sur les paramètres physiques tels que la consistance, mesure de temps de prise et les paramètres mécanique telle que la résistance à la traction par flexion, à la compression simple).

V.2- Caractérisation des matériaux de base utilisés

V.2.1- Le clinker

Le clinker, obtenu à la sortie des fours à la suite de la cuisson des matières premières constituées principalement de calcaire, d'argile et de matières de correction, est un matériaux hydraulique se présentant sous la forme de petits nodules très durs composées essentiellement des quatre phases cristallines suivantes :

- Silicate tricalcique également dénommée «alite», C_3S , dont la formule est : $3CaOSiO_2$.
- Silicate bicalcique ou «bélite», C_2S , de formule $2CaOSiO_2$.
- Aluminate tricalcique C_3A , de formule $3CaO, Al_2O_3$.
- Alumino-ferrite-tetracalcique C_4AF , de formule $4CaOAl_2O_3Fe_2O_3$.

Le clinker utilisé dans tous les essais provenant de la cimenterie d'Ain Touta leur composition chimique a été obtenues par fluorescence X.

Tableau 11 - La composition chimique du clinker (%).

SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	Cl	MgO	K_2O	Na_2O	SO_3	PAF
20,88	5,05	3,47	67,17	0,014	1,52	0,78	0,30	0,54	0,27

▪ **Composition minéralogique du clinker**

En se basant sur certaines hypothèses, Bogue a développé une méthode qui permet de connaître la composition potentielle en minéraux principaux (C_3S , C_2S , C_3A et C_4AF) d'un clinker, ou d'un ciment à partir de sa composition chimique.

Les hypothèses de départ de (Bogue) sont les suivantes :

- Toutes les réactions dans le four sont complètes.
- Tout le fer se combine avec l'alumine pour former le C_4AF .
- Toute l'alumine se combine avec la chaux et avec le fer pour former le C_3A et le C_4AF .
- Toute la chaux se combine avec le fer, l'alumine et la silice pour former le C_4AF , le C_3A , le C_2S et le C_3S .
- La chaux combinée est la différence entre la chaux totale et la chaux libre.
- La substitution élémentaire dans les phases cristallines est négligée.
- Dans le cas des ciments, on considère que tout le SO_3 provient du gypse.

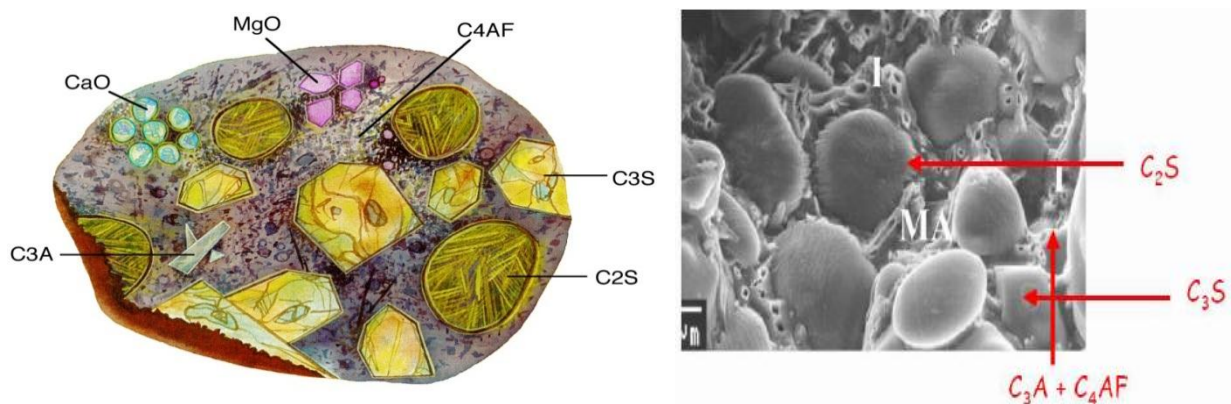


Figure 35 - Composition minéralogique du clinker.

- $C_3S = 4,07 [CaO (T) - CaO (L)] - 7,6 (SiO_2 - RI) - 1,43 Fe_2O_3 - 6,72 Al_2O_3$
- $C_2S = [2,865 (SiO_2 - RI)] - [0,754 C_3S]$
- $C_3A = [2,650 Al_2O_3] - [1,692 Fe_2O_3]$
- $C_4AF = 3,04 Fe_2O_3$

RI = 0,21

Les valeurs numériques résumées dans le tableau suivant :

Tableau 12 - La composition minéralogique du clinker (%).

C_4AF	C_3S	C_2S	C_3A
10.55	74.22	3.26	7.51

V.2.2- Le gypse

Le gypse utilisé comme additif fondamental dans le ciment est de provenance locale, nous avons maintenu un dosage de 4 %, pour tous les ciments préparés pour les trois raisons suivantes :

- La qualité du gypse est moyenne.
- Pour ne pas masquer l'influence de la teneur en ajouts sur les propriétés mécaniques du ciment.
- Pour régulariser la prise.

La composition chimique du gypse utilisé est donnée dans le tableau suivant :

Tableau 13 - Composition chimique du gypse (%).

SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	SO_3	Cl	PAF
8.11	3.06	1.11	34.17	3.32	0,58	0,04	39.54	0,0	10,07

V.2.3- Les ajouts

Les ajouts peuvent être naturels, artificiels ou sous-produits d'une autre industrie, déchets industriels polluants. Ils sont ajoutés soit au mélange des matières premières avant le broyage, soit à la farine crue, mais communément, au clinker Portland, avant ou après le

broyage. Leur pourcentage dans la masse varie suivant le but de l'addition et le rôle qu'elle peut jouer. Ainsi on retrouve des ajouts en faible teneur, moyenne ou même en forte teneur. Ce groupe de liants hydrauliques se compose du ciment obtenu par la mouture (broyage) de clinker Portland avec un ajout minéral ou par un mélange soigneux des composants : clinker Portland et ajout minéral suivant la nature du liant principal et celle de l'ajout.

Tableau 14 - Les différents types des ajouts.

Ajouts inertes		Ajouts actifs		
Ajouts naturels	Ajouts artificiels	Ajouts naturels		Ajouts artificiels
		D'origine volcanique	D'origine sédimentaire	
-Craie -Calcaire -Marne -Dolomie	-Déchets métallurgiques -Déchets d'enrichissement -Poussière minéral	-Cendres volcaniques -Tuf volcanique -pouzzolane -Verre volcanique	-Diatomite -Tripolis -Argile cuite	-Laitier de haut fourneau -Casse de brique -Fumées de silice condensées

▪ Les ajouts minéraux inertes

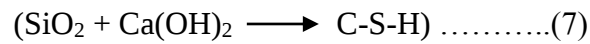
Les roches carbonates telles que CaCO_3 (calcaire, craie, la dolomie et la marne « argile + calcaire ») sont utiles en tant qu'ajouts inertes dans le ciment. La priorité est accordée aux roches dures, du fait que les roches tendres sont considérées comme présentant des difficultés lors de broyage de clinker comme par exemple, la craie dans les roches carbonatées, influe sur les propriétés et la structure du ciment durci. Les ajouts inertes de type silicique peuvent être utilisés pour la fabrication des ciments, mais ils sont plus durs que les roches carbonatées.

▪ Les ajouts minéraux actifs

On appelle ajout minéral actif (hydraulique), toute substance naturelle ou artificielle, qui une fois finement broyée, mélangée avec la chaux en poudre et gâchée avec l'eau, lui confère des propriétés hydrauliques (prise et durcissement)

Ajout actif + la chaux (CaO) + eau $\longrightarrow$ prise + durcissement(6)

Lorsque les ajouts minéraux actifs sont mélangés à un ciment, ils améliorent sa résistance à l'eau. En effet, ils contiennent une substance qui, dans les conditions ordinaires, est capable d'entrer en réaction chimique avec l'oxyde de calcium hydraté Ca(OH)_2 et produire des composés difficilement solubles (réaction 7) comme par exemple : la pouzzolane ou la silice.



Dans les diatomites et tripolis et autres ajouts d'origine sédimentaire, cette substance est la silice aqueuse. Dans les ajouts volcaniques et artificiels, elle est représentée principalement par des silicates d'aluminium. L'activité d'un ajout minéral est aussi caractérisée par la quantité de chaux absorbée par un gramme d'ajout en 30 jours.

V.2.3.1- Le laitier

L'étude du laitier de haut fourneau a fait l'objet de très nombreuses recherches dans le monde industriel.

En Algérie dans le complexe d'El-Hadjar, on obtient en moyenne de 35 – 40% de laitier par tonne de fonte produite. La possibilité de l'utilisation du laitier dans l'industrie cimentière avait été présentée par Vicat aux environs de 1830, qui avait remarqué l'analogie existante entre la composition chimique du laitier et celle du ciment Portland. Cependant la granulation fut utilisée en 1862 dans le but de faciliter l'évacuation du laitier à sa sortie du haut fourneau et sa manutention, il aperçut alors que le produit obtenu présentait, après broyage, et après addition de la chaux, la propriété de faire prise et de durcir sous l'eau.

Le laitier est un déchet minéral de la préparation de la fonte dans des hauts fourneaux à partir du minerai et du coke métallurgique. Il est récupéré à l'état fondu par le trou de la coulée immédiatement après la fonte. Il se sépare de la fonte par différence de densité, la fonte est plus lourde et se trouve au fond (la densité = 7).

Pour que le laitier soit utilisable en cimenterie, il doit être trempé à la sortie du haut fourneau dans un grand bassin d'eau, il se transforme en sable de structure vitreuse de dimension allant jusqu'à 3mm de diamètre. Il a une couleur grise jaunâtre. La composition des laitiers est voisine de celle des ciments, la différence la plus importante tient au fait qu'ils engendrent un ciment relativement pauvre en chaux, la chaux à l'état d'oxyde de calcium s'y trouve dans une proportion voisine de 45 %.

La composition chimique du laitier peut varier dans de grandes limites, suivant la nature du minerai, la composition du fondant calcaire et le type de fonte que l'on produit. Ces variations affectent les quatre principaux constituants à savoir la chaux, la silice, l'alumine et la magnésie en plus de la quantité des constituants secondaires, sous forme de sulfures et oxydes de fer et de manganèse. Généralement, les laitiers utilisés dans les cimenteries ont la composition chimique moyenne qui est représenté sur le tableau 15 :

Tableau 15 - Composition chimique de laitier (%)

SiO₂	Al₂O₃	Fe₂O₃	CaO	MgO	K₂O	Na₂O	SO₃	Cl	PAF
54.34	12.31	3.41	10.93	0.00	3.42	0,0	0.56	0,02	15,01

Donc, pour que le laitier soit utilisable en cimenterie, il doit avoir une structure physique convenable. Dans un haut fourneau le minerai d'oxyde de fer est réduit au moyen de coke en fonte, tandis que l'alumine et la silice se combinent avec la chaux et la magnésie pour former un laitier fondu qui se rassemble au-dessus de la fonte en fusion au fond du haut fourneau. La fonte elle-même dissout certains constituants en faible proportion notamment le silicium, le manganèse et le soufre

V.2.3.2- Les stériles francs de phosphate

Chacune des étapes de l'exploitation minière génère d'importante quantité des déchets miniers que l'on peut les classer principalement en deux catégories : les stériles francs les résidus d'exploitation (stériles de sélectivité).

Concernant les stériles francs (reconnus sous le nom des **déchets rocheux**) sont les roches de recouvrement décapés pour accéder au minerai à traiter, ces déchets miniers sont généralement de tailles assez grossières et ils sont le plus souvent stockés sur place ou déposés sous forme de terrils

Le stérile francs utilisé dans tous les essais provenant de gisement de phosphate de Djebel Onk Tébessa

Tableau 16 - Composition chimique de déchet de phosphate (stériles francs) (%)

P₂O₅	CaO	MgO	SiO₂	Fe₂O₃	K₂O	Na₂O	SO₃	PAF
1,69	28,04	14,39	25,28	0,88	0,25	0,31	0,18	28,70

V.2.3.3- La pouzzolane

Et un produit d'origine volcanique essentiellement composé de silice, d'alumine et d'oxyde de fer ayant naturellement des propriétés pouzzolanique. Elle peut être d'origine volcanique

La pouzzolane naturelle utilisée est d'origine volcanique extraite du gisement de Bouhamedi situé au sud de Beni-Saf (Algérie).

Tableau 17 - Composition chimique de pouzzolane du gisement de Bouhamedi (%)

SiO₂	Al₂O₃	Fe₂O₃	CaO	MgO	K₂O	Na₂O	SO₃	Cl	PAF
37.84	15.45	7.63	14.94	2.69	1,29	1,70	0.56	0,007	17,89

V.3- Matériel et méthodes

V.3.1- Préparation des mélanges

Afin d'étudier l'influence des ajouts sur la qualité du ciment nous avons préparé six mélanges pour chaque type d'ajout (stérile, laitier, pouzzolane) et un échantillon témoin (CPA)

Les mélanges de départ sont préparés selon les proportions suivantes :

- Mélange 1 : Ciment portland sans ajout (96 % clinker + 4 % gypse + 0 % ajout), est nommé CPA

Pour l'ajout laitier :

- Mélange 2 : 91 % clinker + 4 % gypse + 5 % laitier), est nommé CL5
- Mélange 3 : 86 % clinker + 4 % gypse + 10 % laitier), est nommé CL10
- Mélange 4 : 81 % clinker + 4 % gypse + 15 % laitier), est nommé CL15

- Mélange 5 : 76 % clinker + 4 % gypse + 20 % laitier), est nommé CL20
- Mélange 6 : 71 % clinker + 4 % gypse + 25 % laitier), est nommé CL25
- Mélange 7 : 66 % clinker + 4 % gypse + 30 % laitier), est nommé CL30

Pour l'ajout stérile francs :

- Mélange 8 : 91 % clinker + 4 % gypse + 5 % stériles), est nommé CS5
- Mélange 9 : 86 % clinker + 4 % gypse + 10 % stériles), est nommé CS10
- Mélange 10 : 81 % clinker + 4 % gypse + 15 % stériles), est nommé CS15
- Mélange 11 : 76 % clinker + 4 % gypse + 20 % stériles), est nommé CS20
- Mélange 12 : 71 % clinker + 4 % gypse + 25 % stériles), est nommé CS25
- Mélange 13 : 66 % clinker + 4 % gypse + 30 % stériles), est nommé CS30

Pour l'ajout pouzzolane :

- Mélange 14 : 91 % clinker + 4 % gypse + 5 % pouzzolane), est nommé CP5
- Mélange 15 : 86 % clinker + 4 % gypse + 10 % pouzzolane), est nommé CP10
- Mélange 16 : 81 % clinker + 4 % gypse + 15 % pouzzolane), est nommé CP15
- Mélange 17 : 76 % clinker + 4 % gypse + 20 % pouzzolane), est nommé CP20
- Mélange 18 : 71 % clinker + 4 % gypse + 25 % pouzzolane), est nommé CP25
- Mélange 19 : 66 % clinker + 4 % gypse + 30 % pouzzolane), est nommé CP30

V.3.2- Caractéristiques physiques de la pâte de ciment

V.3.2.1- Conditions générales des essais sur la pâte pure

Les essais auxquels on va s'intéresser doivent être conformes à la norme française spécifique aux essais sur les ciments.

▪ Température

Nécessaire pour la préparation de la pâte pure et du mortier, la confection d'éprouvettes d'essais et leur démoulage, ainsi que les essais de prise. La température de la salle de travail et des matériaux servant aux essais doit être de l'ordre de $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$.

La température de l'eau servant à la conservation des éprouvettes doit être de l'ordre de $20 \pm 1^{\circ}\text{C}$.

- **Humidité relative**

L'humidité relative de la salle ne doit pas être inférieure à 65 % (dans nos essais, l'humidité est comprise entre 70 et 80 %).

- **Pression atmosphérique**

La pression atmosphérique doit être normale.

- **L'eau utilisée**

L'eau utilisée pour tous les essais est l'eau potable renfermant peu de sulfates.

- **Outillages et appareillages utilisés**

Les récipients utilisés pour le gâchage et les moules servant aux essais et à la confection d'éprouvettes doivent être étanches et imperméables. Il est nécessaire de huiler les faces intérieures des moules et de colmater éventuellement leur point extérieur avec un produit tel que la graisse épaisse ou la paraffine.

V.3.2.2- Détermination de l'humidité du clinker et des ajouts

- **Mode opératoire**

- Peser 20g d'échantillon dans une capsule en acier propre (P_1).
- Sécher dans un séchoir à 125°C pendant 2 h 30mn (sauf pour le gypse : 100°C).
- Après refroidissement, peser l'échantillon sec (P_2).

L'humidité est donnée par :

$$H_2O\% = [(P_1 - P_2) / P_1] \times 100 \%$$

Les résultats sont résumés dans le tableau suivant

Tableau 18 - Humidité du clinker et des ajouts (%)

Matière	Clinker	Stérile francs	Pouzzolane	Laitier	Gypse
H ₂ O	0,10	3,9	2,7	7,15	5,0

▪ Résultats et discussions

Un excès d'humidité provoque une dépense d'énergie supplémentaire pour le séchage de la matière première. Il y aura colmatage (dépôt de matière) sur les parois du broyeur, ce qui rend le broyage difficile et non fonctionnel

V.3.2.3-Analyse du refus dans le ciment

▪ Mode opératoire

- On pèse 5g de ciment (P_1).
- On opère un tamisage sur un tamis ALPINE propre de 45 μm pendant 3 minutes.
- On retire le refus et on pèse de nouveau (P_2) : $\% \text{ Refus (45}\mu\text{m)} = (P_2 / P_1) \times 100$
- Les normes de laboratoire d'Ain Touta $10\% \leq \text{Refus} \leq 14\%$.
- Le refus des ciments (CPJ) est compris entre : 12% et 17%.



Figure 36 - Tamis de marque ALPINE de diamètre 45 μm .

CPA : ciment portland sans ajout

CPJ : ciment portland avec ajout

Les résultats sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau 19 - Analyse du refus du laitier.

Nature de Ciment	CPA	CPJ avec ajout laitier					
% de laitier	0	5	10	15	20	25	30
% Refus	14,10	13,16	13	12,40	12,30	11,90	11,10

Tableau 20 - Analyse du refus du stérile francs.

Nature de Ciment	CPA	CPJ avec ajout stérile francs					
% de stérile francs	0	5	10	15	20	25	30
% Refus	14,10	13,90	14	13,80	13,70	14,05	13,90

Tableau 21 - Analyse du refus de la pouzzolane.

Nature de Ciment	CPA	CPJ avec ajout pouzzolane					
% de pouzzolane	0	5	10	15	20	25	30
% Refus	14,10	13,50	12	13,60	13,47	12,65	14,10

▪ Résultats et discussions

Les ciments (CPJ) ont un refus plus faible que les ciments (CPA) en raison des ajouts qu'ils contiennent. Ce qui permet un broyage plus facile.

Le refus de ciment avec ajout laitier et pouzzolane est plus faible que celui avec stérile francs.

V.3.2.4- Détermination de la quantité d'eau nécessaire et la consistance

La pâte normale est une pâte pure de consistance selon les mesures effectuées avec l'appareil de Vicat. La lecture donne l'épaisseur de la pâte demeurant entre l'extrémité inférieure de la sonde et le fond du moule lorsque celle-ci a cessé de s'enfoncer, sous son propre poids. La valeur est:

$$h=6 \text{ mm } \pm 1\text{mm}.$$

■ Préparation de la pâte normale

- Malaxage

Il est effectué au moyen d'un malaxeur spécifié dans la norme NFP 15-411 (Figure 37)



Figure 37 - Malaxeur.

Deux vitesses de rotation du batteur doivent être réalisées

- Une vitesse lente d'environ 140 tr/mn.
- Une vitesse rapide, double de la précédente, d'environ 280 tr/mn.

- Mode opératoire

Le malaxeur étant en position de fonctionnement :

- Verser dans le récipient la quantité d'eau préalablement déterminée par tâtonnements successifs de manière à réaliser la consistance normale (l'objectif est de déterminer la quantité d'eau nécessaire pour chaque type de ciment). Lui ajouté le liant 500 g, pour remplir le moule pour chaque malaxage.
- Mettre le malaxeur à la vitesse lente pendant une minute, puis à la vitesse rapide pendant 2 minutes.

- Arrêter le mouvement, avec le batteur démonté de son axe ; racler les parois et le fond du récipient de façon qu'aucune fraction de pâte n'échappe au malaxage.
- Après remontage du batteur, reprendre le malaxage pendant 3 minutes à vitesse rapide.

▪ Confection de l'éprouvette

Introduire immédiatement la pâte malaxée dans le moule tronconique (préalablement placé sur une plaque à base plane en verre légèrement graissée). Remplir le refus sans tassements ni vibrations excessives. Araser la surface au moyen d'une truelle prenant appui sur le bord du moule, perpendiculaire à la surface et déplacer d'un mouvement de scie de faible amplitude.

▪ Vérification de la consistance normale

En utilisant l'appareil de Vicat, plateau ayant été muni de la sonde de consistance, placer immédiatement le moule rempli de la pâte dans l'axe de la sonde.

- La sonde alors s'enfonce dans la pâte. Lorsqu'elle est immobilisée (ou après 30s d'attente), on mesure la distance « d » séparant l'extrémité de la sonde et la plaque de base.

Cette distance « d » caractérise la consistance de la pâte étudiée.

Si $d = 6\text{mm} \pm 1\text{mm}$, on dit que la consistance de la pâte étudiée est normalisée (consistance normalisée).

Si « d » n'atteint pas cette valeur (c.à.d. $d > 7\text{ mm}$ ou $d < 5\text{mm}$), il convient de refaire l'essai avec une valeur différente du rapport E/C jusqu'à atteindre la valeur recherchée de la consistance.

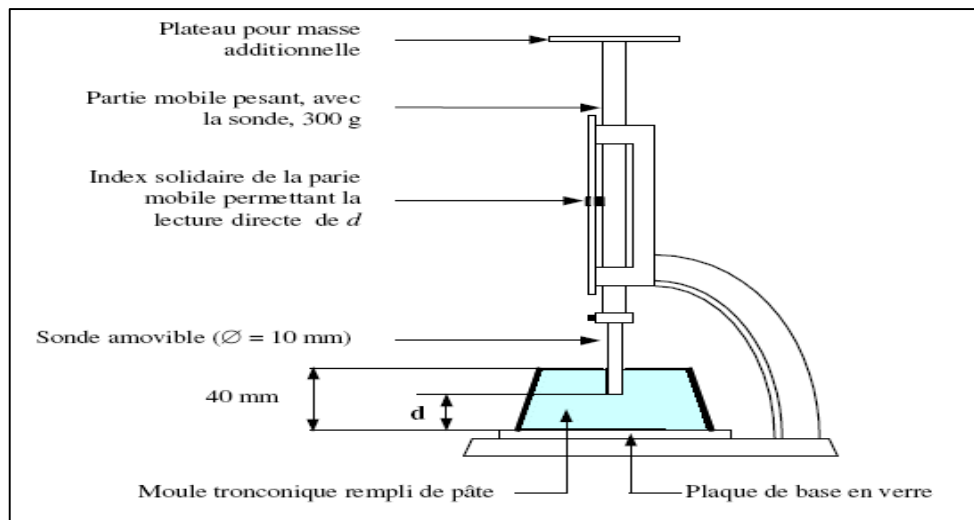


Figure 38 - Appareil de Vicat muni de la sonde de consistance

▪ But de l'essai

La prise d'un ciment dépend, en dehors de sa composition chimique, de l'adjonction de l'eau et de la température. En ce qui concerne la température, les instructions exigent qu'elle soit comprise entre **20 et 21 °C**. Quant à l'adjonction de l'eau, étant donné que les ciments diffèrent dans leurs compositions chimiques et dans leurs degrés de mouture, ils doivent différer aussi, et pour tous les essais, dans la quantité d'eau qu'on leur administre pour atteindre des rigidités égales traduites par le rapport (eau /ciment) et correspondant à la rigidité normale.

Ce rapport doit être connu avant la détermination du temps de prise.

La quantité d'eau à admettre pour avoir un bon mortier est la quantité strictement nécessaire à l'obtention d'une pâte plastique.

La théorie du mortier sec repose sur l'utilisation d'un minimum d'eau pour avoir un maximum de résistance seulement elle rend le mortier difficile à employer, en plus de son adhérence. Le fait d'augmenter la quantité d'eau, va engendrer un mortier poreux, perméable et peu résistant mécaniquement.

▪ Résultats numériques

À une température constante de 20°C et un temps de mélange égal à 5min, on a obtenu les résultats suivants :

Tableau 22 - la quantité d'eau nécessaire pour l'ajout laitier

Nature de ciment	CPA	(CPJ) avec l'ajout laitier					
Pourcentage%	0	5	10	15	20	25	30
Quantité d'eau (ml)	134	128	127	123	121	120	119
Quantité de ciment(g)	500	500	500	500	500	500	500
% d'eau	26.8	25.8	25.6	25.4	24.6	24.2	24

Tableau 23 - Quantité d'eau nécessaire pour l'ajout stérile francs

Nature de ciment	CPA	(CPJ) avec l'ajout stérile francs					
Pourcentage%	0	5	10	15	20	25	30
Quantité d'eau (ml)	134	132	133	135	136	138	139
Quantité de ciment(g)	500	500	500	500	500	500	500
% d'eau	26.8	26.4	26.6	27.0	27.2	27.6	27.8

Tableau 24 - la quantité d'eau nécessaire pour l'ajout pouzzolane

Nature de ciment	CPA	(CPJ) avec l'ajout pouzzolane					
Pourcentage%	0	5	10	15	20	25	30
Quantité d'eau (ml)	134	136	137	139	141	141	142
Quantité de ciment(g)	500	500	500	500	500	500	500
% d'eau	26.8	27.2	27.4	27.8	28.2	28.2	28.4

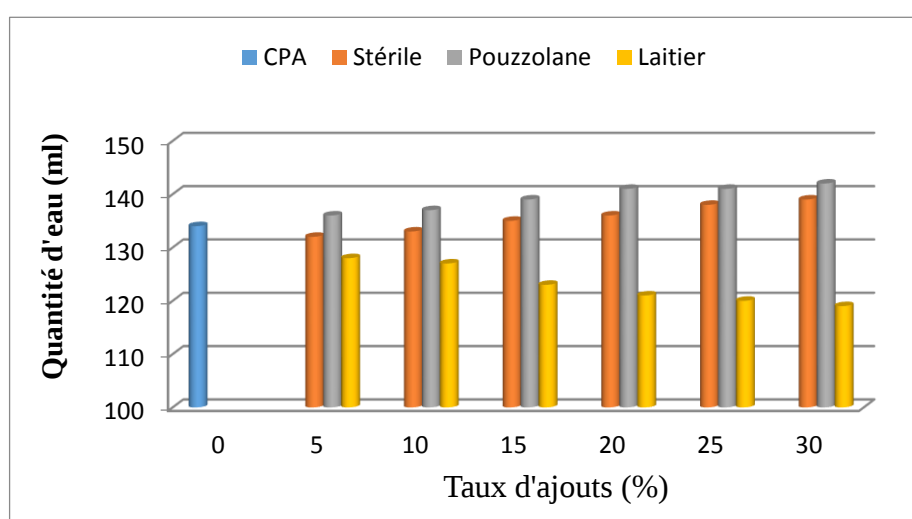


Figure 39 - la variation de la quantité d'eau en fonction de taux d'ajout.

Tableau 25 -Variation de la consistance en fonction de la variation de taux d'ajout pour tous les types des ciments étudié.

Type de ciment	CPA	Ciment avec ajout stérile		Ciment avec ajout Pouzzolane		Ciment avec ajout Laitier	
La consistance (%)	26,8	CS5	26,4	CP5	27,2	CL5	25,8
		CS10	26,6	CP10	27,4	CL10	25,6
		CS15	27,0	CP15	27,8	CL15	25,4
		CS20	27,2	CP20	28,2	CL20	24,6
		CS25	27,6	CP25	28,2	CL25	24,2
		CS30	27,8	CP30	28,4	CL30	24,0

▪ Résultats et discussions

- D'après la lecture de l'histogramme (figure 39) on remarque que l'augmentation du pourcentage de l'ajout laitier dans le ciment, abaisse la quantité d'eau dans le ciment par contre la quantité d'eau augmente avec l'augmentation de taux l'ajout stérile francs ou pouzzolane.
- La variation de la diminution et de l'augmentation de la quantité d'eau est différente lorsque l'on ajoute le franc stérile, la pouzzolane et le laitier.
- d'après le tableau 25 on a remarqué que la variation de la consistance normale rependre à l'exigence de la norme NA 229 pour tous les types des ciments étudié.
- Pour les ajouts stérile et pouzzolane la consistance est proportionnelle aux taux d'ajouts, plus le taux d'ajout augmente plus la consistance augmente.

V.3.2.5- Le temps de prise

La prise est caractérisée par le passage de la pâte ou du mortier de ciment de l'état fluide à un état plus ou moins consistant.

Il y a deux facteurs principaux qui influencent la durée de prise : D'une part la température (la chaleur l'accélère et la froid, la retarde), et d'autre par l'utilisation de retardateurs ou d'accélérateurs de prise ou de durcissement.

L'une des caractéristiques indispensables pour valider la qualité d'un ciment est le temps de commencement de sa prise dans des conditions bien définies de gâchage.

Il est nécessaire pour la bonne réussite des travaux que le metteur en œuvre sache à quel moment la pâte de ciment commence à faire prise. La fin de prise correspond à un phénomène particulier, elle ne fait pas l'objet d'une clause de normalisation.

L'essai de prise a donc pour but de déterminer le temps de prise, et le temps qui s'écoule entre l'instant où le liant a été mis en contact avec l'eau de gâchage et le début de prise. Le début de prise doit être supérieur à 1 h.

▪ **Mode opératoire**

- Régler préalablement l'appareil Vicat muni de l'aiguille.
- Remplir le moule Vicat de pâte de consistance normale et arasée.
- Conserver le moule rempli et arasé ainsi que la plaque de base dans l'armoire et au bout d'un temps convenable, les placer dans l'axe de l'aiguille de Vicat.
- Abaisser l'aiguille avec précaution jusqu'à ce qu'elle arrive au contact de la pâte.
- Observer une pause de 2 secondes à cette position de manière à éviter une vitesse initiale ou une accélération forcée des parties mobiles.
- Lâcher alors rapidement les parties mobiles, l'aiguille doit pénétrer verticalement dans la pâte.
- Effectuer la lecture de l'échelle à la fin de la pénétration ou 30 secondes après la libération de l'aiguille.
- La lecture qui indique la distance entre l'extrémité de l'aiguille et la plaque de pause doit être enregistrée conjointement avec le temps écoulé depuis l'instant zéro.
- Respecter l'essai de pénétration sur la même éprouvette à des positions convenablement espacées à plus de 10 mm du bord du moule, à des intervalles de temps espacés.
- Conserver l'éprouvette entre les essais de pénétration dans l'armoire humide.
- Nettoyer l'aiguille aussitôt après chaque pénétration.

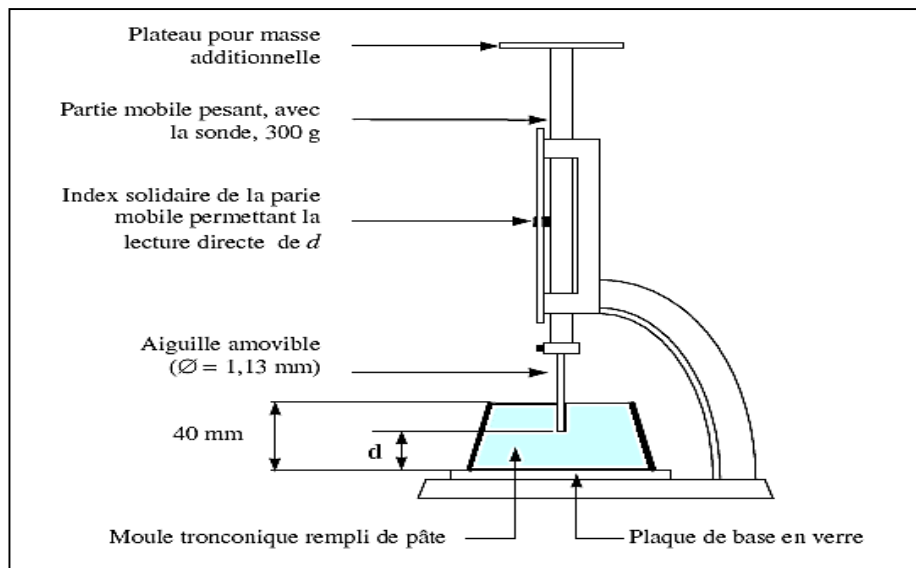


Figure 40 - appareil de Vicat muni de la sonde de prise.

▪ **Calcul:**

Le temps mesuré depuis l'instant zéro au bout duquel la distance entre l'aiguille et la plaque de pause soit (T).

Le temps de fin de prise est le moment où l'aiguille ne pénètre plus dans le moule soit (T_f) d'où le début de prise:

$$T_D = T_f - T_i$$

T_f : temps de fin de prise.

T_i : début de prise.

NB : T_D : doit être supérieur à 1h.

▪ **Résultats numériques**

À une température constante de 20°C et un temps de mélange égal à 5 mn.

Les résultats de cet essai sont illustrés sur les figures 41, 42, 43 et les tableaux 26, 27, 28 suivantes :

Tableau 26 - Variation du temps de prise en fonction de taux de l'ajout laitier

Nature de Ciment	CPA	CPJ avec ajout laitier					
% de laitier	0	5	10	15	20	25	30
Début de prise (Ti)	2h 05mn	1h 45mn	1h 50mn	2h 05mn	2h 10mn	2h 15mn	2h 25mn
Fin de prise (Tf)	4h 10mn	3h 50mn	4h00mn	4h 10mn	4h 25mn	4h 30mn	4h35mn
$T_D=T_f-T_i$	2h 05mn	2h 05mn	2h10mn	2h 05mn	2h 15mn	2h 15mn	2h 10mn

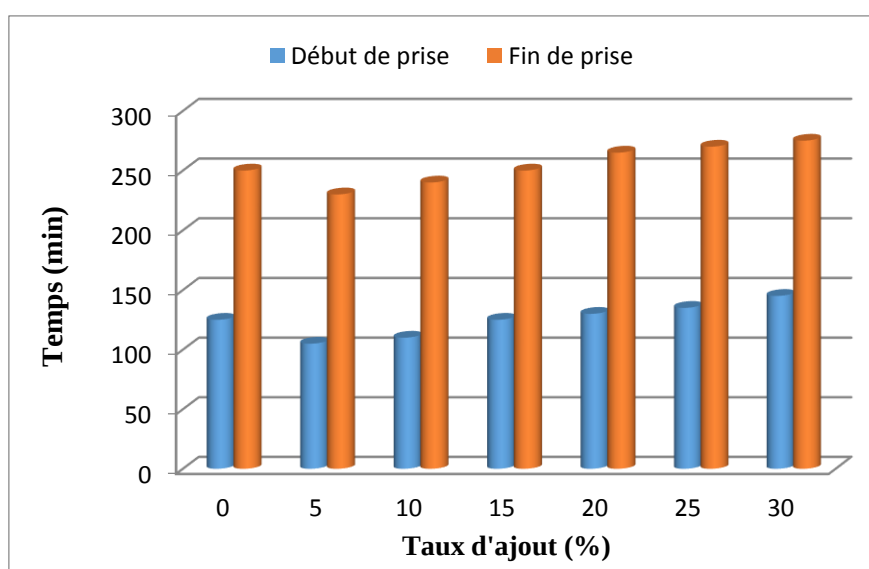


Figure 41 - Variation du temps de prise en fonction de taux de l'ajout laitier

Tableau 27 - Variation du temps de prise en fonction de taux de l'ajout stériles francs

Nature de Ciment	CPA	CPJ avec ajout stériles francs					
% de stériles francs	0	5	10	15	20	25	30
Début de prise (Ti)	2h 05 mn	1h 30mn	1h 35mn	1h 40 mn	1h45 mn	1h40 mn	1h 55 mn
Fin de prise (Tf)	4h 10mn	3h 30 mn	3h 40mn	3h40 mn	3h 55 mn	3h 55mn	4h 05 mn
$T_D=T_f-T_i$	2h 05mn	2h	2h 5mn	2h	2h 10mn	2h 15 mn	2h 10 mn

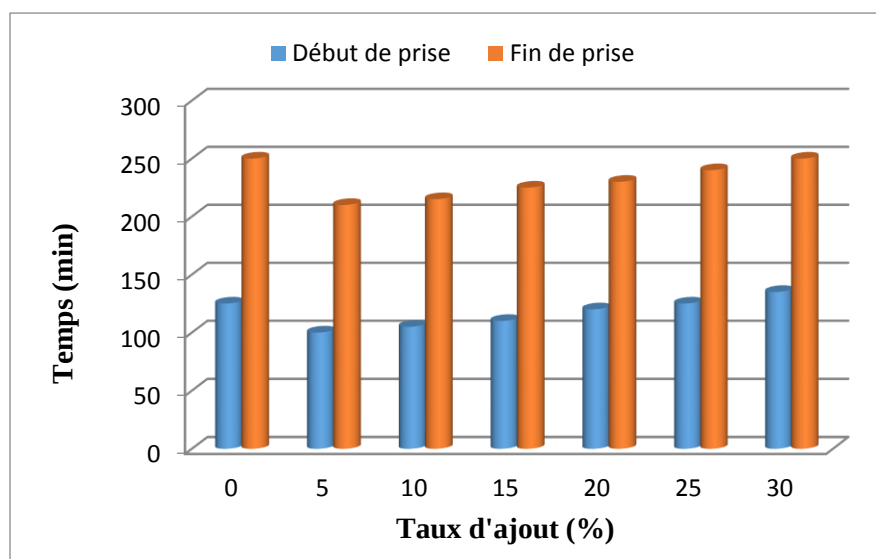


Figure 42 - Variation du temps de prise en fonction de taux de l'ajout stérile

Tableau 28 - Variation du temps de prise en fonction de taux de l'ajout pouzzolane

Nature de Ciment	CPA	CPJ avec ajout pouzzolane					
% de pouzzolane	0	5	10	15	20	25	30
Début de prise (Ti)	2h	1h	1h	1h	1h	1h	2h
	05mn	40mn	45mn	50mn	55mn	55mn	00mn
Fin de prise (Tf)	4h	3h	3h	3h	4h	4h	4h
	10mn	40mn	45mn	55mn	00mn	00mn	10mn
$T_D = T_f - T_i$	2h	2h	2h	2h	2h	2h	2h
	05mn	00mn	00mn	05mn	05mn	05mn	10mn

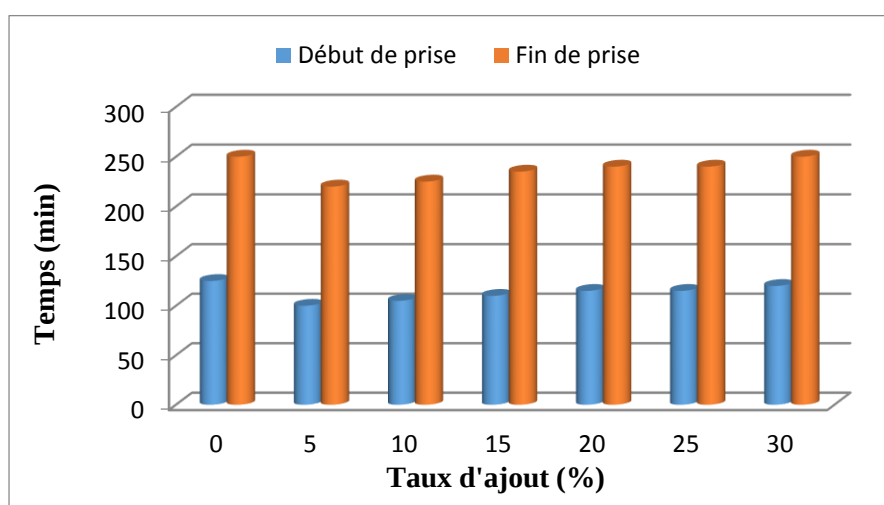


Figure 43 - Variation du temps de prise en fonction de taux de l'ajout pouzzolane

D'après les tableaux et les figures 41,42 et 43 on peut dire que : tous les ciments avec ajouts étudiés ont un temps de prise conforme aux exigences de la norme algérienne NA 442 (15) qui impose un temps de prise minimale de 60 minutes pour la classe de ciment CPJ-CEM II/ A ou B 42,5

V.4- Etude sur mortier normalisé

Le mortier normal est un mortier qui sert à définir certaines caractéristiques des ciments et notamment leurs résistances à la compression et à la flexion. Le mortier se compose de ciment (C), d'eau (E) $\{E/C = 0,50\}$ et de sable (S).

L'eau et le ciment forment une pâte, qui fait prise et durcit dans le temps ce qui permet de solidariser entre eux les grains de sable. On rajoute le sable normalisé à 2, 7 et 28 jours

L'étude se résume à calculer les résistances mécaniques à la flexion et à la compression simple, en variant les pourcentages des ajouts de (5 à 30 %) avec un pas de 5%, et en respectant les normes des ciments Portland composé de classe (42,5), ainsi que leurs garanties.

V.4.1- Confection des éprouvettes prismatiques «4 x 4 x 16»

Les éprouvettes sont destinées aux essais mécaniques (compression simple et flexion).

▪ Sable normal

Le sable normal utilisé est un sable naturel, siliceux (le plus quartzeux possible en particulier dans sa partie fine), propre et à grains arrondis secs.

Il est constitué par un mélange de sable provenant de la région de Leucate (France) avec un appoint de sable fin quartzeux répondant à la norme NF P 15- 403.

Tableau 29 - Résultat du tamisage du sable

Tamis ouverture des mailles carrées	Refus cumulés (%)	Fractionnement du sable
0,08	98 ±2	Fraction fine (subdivisée en 2 fractions de masses égales). Faction, moyenne. Fraction, grosse.
0,16	88 ±5	
0,50	67 ±5	
1 ,00	33 ±5	
1,60	5 ±5	
2,00	0	

▪ **Division du sable**

Les sables sont divisés, au moins, en quatre fractions distinctes afin d'éviter les fractions de sable de composition granulaire trop étendue pouvant entraîner leur ségrégation. Les fractions sont mélangées en proportions convenables pour obtenir la granularité définie ci- dessus (tableau 20).

▪ **Vérification de la granularité**

La vérification de la granularité du sable se fait sur un échantillon représentatif de **100 g** de sable au moyen de six tamis indiqués dans le tableau 29.

Le sable et les tamis de contrôle doivent être parfaitement secs. Le tamisage est effectué conformément aux normes NF P18-304, il est poursuivi jusqu'à ce que moins de **0,5 g** passe en 1mn à travers chaque tamis.

▪ **Livraison du sable**

Le sable normal est habituellement livré, pré pesé et mis en sacs étanches contenant la quantité correspondante à la préparation de trois (3) éprouvettes prismatiques «**4x4x16**».

V.4.2- Mortier normal

▪ Pesée des constituants

La masse des constituants nécessaire aux essais est déterminée en fonction du nombre d'éprouvettes d'essais à préparer, la pesée est faite avec une précision de 0,5 %. Dans le cas de la préparation de trois éprouvettes (**4x4x16**), on utilise les quantités suivantes:

Sable normal sec..... 1350 g.

Liant..... 450 g.

Eau..... 225 g (E/C = 0,5).

▪ Malaxage

- Le malaxage doit être effectué au moyen du malaxeur spécifié par la norme.
- Le malaxeur étant en position en fonctionnement:
- Mettre 225 ml d'eau
- Mettre 1350 g de sable
- Mettre 450 g de ciment
- Malaxer pendant 10 s à vitesse lente, puis malaxer pendant 2 min à vitesse rapide.
- Arrêter le mouvement avec le batteur, démonté de son axe,
- Racler les parois et le fond du récipient de façon qu'aucune partie de mortier n'échappe au malaxage.
- Après remontage du batteur, reprendre le malaxage pendant 2min à vitesse rapide.



Figure 44 - Malaxeur.

▪ Confection des éprouvettes

Les éprouvettes sont moulées au moyen de l'appareil à chocs (TONITECHNIC) conformément au mode opératoire suivant:

- Le malaxage étant terminé, former une galette rectangulaire.
- La partager en 06 fractions égales, le moule ayant été fixé sur la table à choc muni de sa hausse.
- Introduire dans chacun des trois compartiments une fraction de la galette. Egaliser la surface du mortier au moyen de la raclette maintenue verticale. Déplacer dans un double aller et retour.
- Recommencer les mêmes opérations pour la deuxième couche après 60 nouveaux chocs.
- Le moule étant tiré de la machine et débarrassé de la hausse, araser le mortier avec l'arrête de la règle métallique plate, maintenue verticale et déplacer par un mouvement de scie de faible amplitude et sur la longueur des éprouvettes.

Dans la présente étude, nous avons préparé 19 batteries de trois éprouvettes « **4 x 4 x 16** » pour chaque âge (**2, 7 et 28 jours**) soit un total de 57 éprouvettes. Les besoins en matières pour une batterie de trois éprouvette au total (19 batteries)

- Sable normalisé (sec) : 1350g $\longrightarrow$ 25,65kg.
- Liant (ciment) : 450g $\longrightarrow$ 8,55kg.
- Eau : 225ml $\longrightarrow$ 4,275 litres



Figure 45 - Appareil à chocs (TONITECHNIC)



Figure 46 - Moule prismatique.

V.5- Essai de résistance mécanique à la traction par flexion

L'éprouvette utilisée dans l'essai de flexion est une éprouvette prismatique (4x 4x16) en mortier, et la rupture est effectuée sous charge concentrée dans une machine munie d'un dispositif à 3 rouleaux.

▪ Dispositif de l'essai

Le dispositif de flexion comporte 2 à rouleaux de 10 mm de diamètre distants de 100 ou 106,7 mm comme appuis, sur lesquels repose l'éprouvette prismatique suivant une face latérale de moulage. Un troisième rouleau de même diamètre équidistant des deux premiers, va transmettre la charge F .

Pour transmettre une répartition uniforme des efforts sur l'éprouvette, deux des rouleaux doivent pouvoir osciller légèrement autour de leur centre, suivant un plan vertical perpendiculaire au grand axe de l'éprouvette.

▪ Machine d'essai

Le dispositif à rouleaux est adapté suivant une machine d'essai permettant d'exercer et de mesurer de faibles charges (inférieure à 1000 daN) avec une précision de 0,01(1%)



Figure 47 - Machine de compression et flexion pour mortier.

▪ Contrainte de rupture à la traction par flexion (NA 234)

La contrainte de rupture à la traction par flexion « F », est indiquée directement sur la machine.

▪ Résultats et discussion

Les résultats obtenus sont donnés dans le tableau suivant :

Tableau 30 - Résistance à la traction par flexion en fonction de l'âge pour tous les types des ciments étudiés

Type d'ajout	Temps (Jours)	Taux de l'ajout (%)						
		0	5	10	15	20	25	30
Laitier	2	5,90	5,50	5,40	5,10	4,90	4,70	4,30
	7	8,30	6,50	6,40	6,20	5,90	5,60	5,30
	28	8,80	8,70	8,50	8,20	8,00	7,80	7,50
Stérile Francs	2		6,40	6,20	5,70	5,80	5,40	5,20
	7		8,00	7,90	7,50	7,40	7,20	7,10
	28		9,30	8,20	8,40	7,80	7,50	7,60
Pouzzolane	2		5,60	5,50	5,30	5,20	5,40	4,90
	7		7,50	7,40	7,20	6,80	6,30	6,10
	28		8,20	8,40	8,20	7,40	7,80	7,60

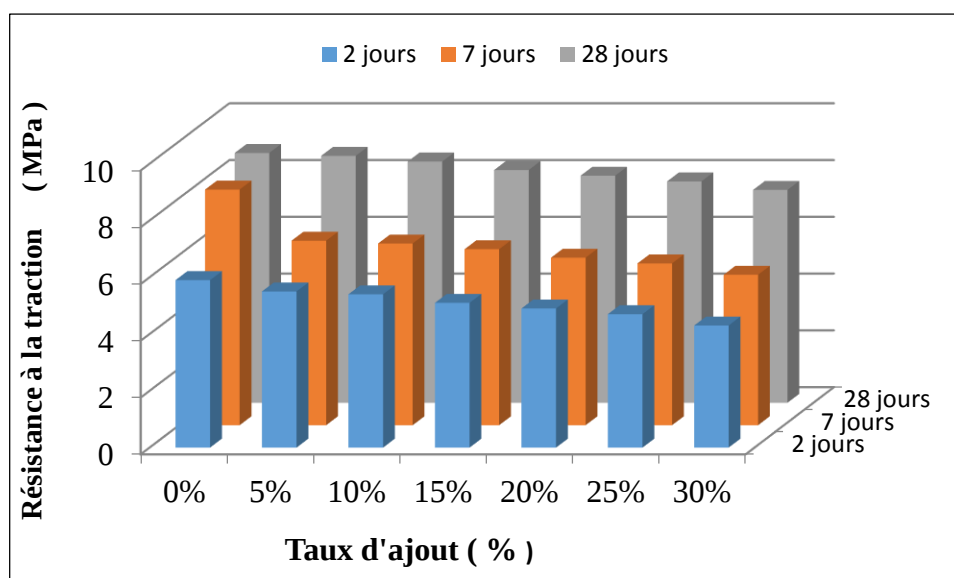


Figure 48 - Histogramme présente la résistance à la traction par flexion en fonction de l'âge pour un ciment CPA et un ciment avec laitier.

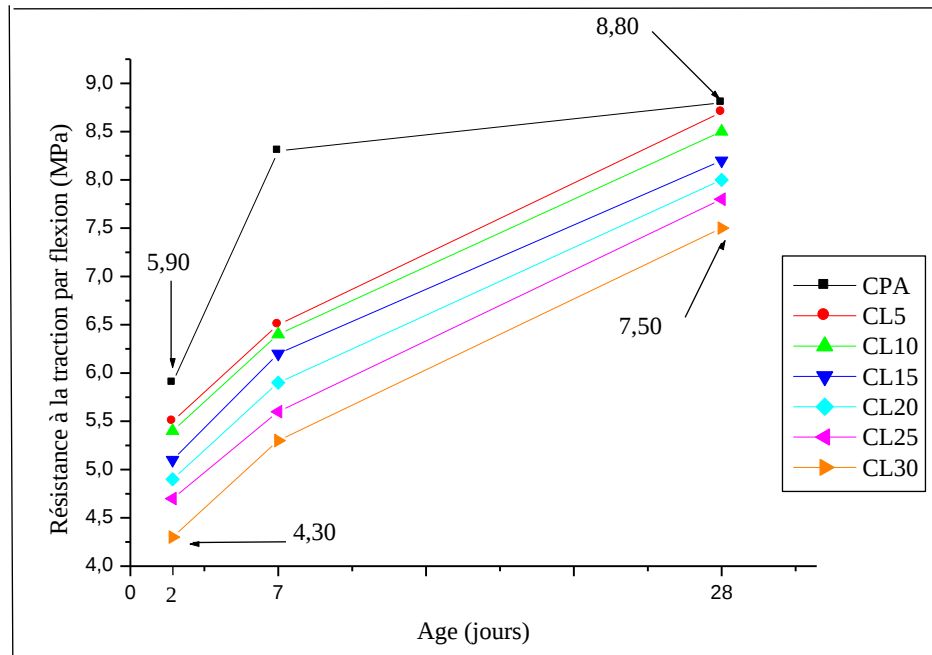


Figure 49 - Résistance à la traction par flexion en fonction de l'âge pour un ciment CPA et un ciment avec ajout laitier.

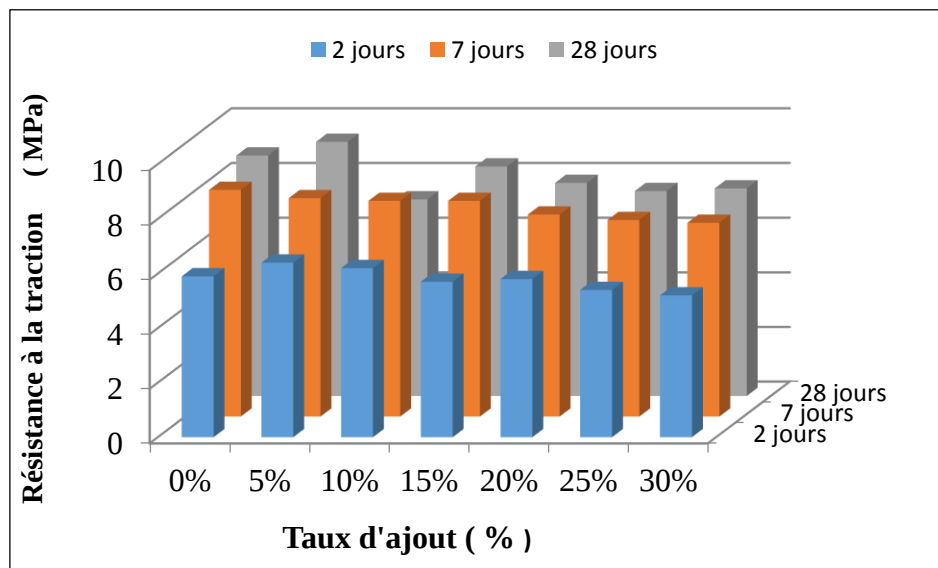


Figure 50 - Histogramme de la résistance à la traction par flexion en fonction de l'âge pour un ciment CPA et un ciment avec ajout stérile francs.

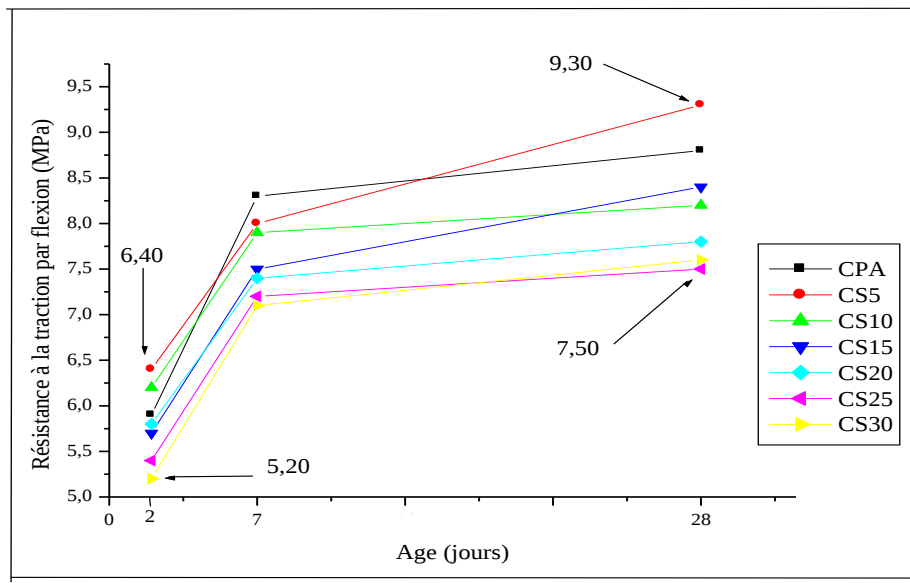


Figure 51 - Résistance à la traction par flexion en fonction de l'âge pour un ciment CPA et un ciment avec ajout stérile francs.

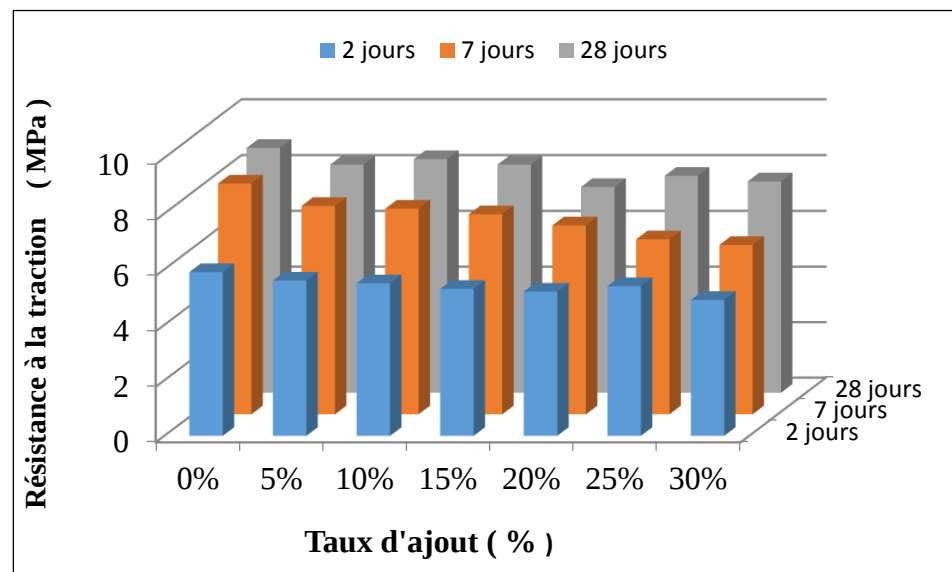


Figure 52 - Histogramme présente la résistance à la traction par flexion en fonction de l'âge pour un ciment CPA et un ciment avec ajout pouzzolane.

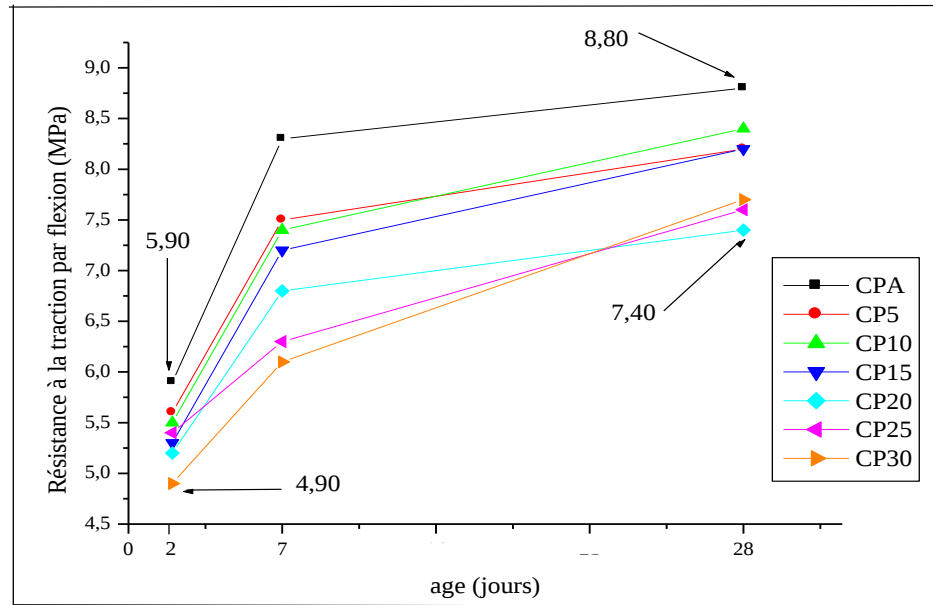


Figure 53 - Résistance à la traction par flexion en fonction de l'âge pour un ciment CPA et un ciment avec ajout pouzzolane.

■ Résultats et discussions

Il est évident que les résistances mécaniques à la traction par flexion du ciment portland (CPA-CEM I) (42,5), sont meilleurs comparées à celles du ciment composé avec ajouts (CPJ-CEM II/A ou B) (42,5).

Avec fixation de l'âge, on remarque que, plus le pourcentage de l'ajout augmente (0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30%), plus la résistance à la traction par flexion du ciment CPJ-CEM II/ A ou B diminue.

Tous les types de ciment étudiés ayant des résistances à la traction par flexion conformes à l'exigence de la norme algérienne NA 442

L'ajout des stériles francs de phosphate confère une meilleure résistance à la traction par flexion pour tous les âges et pour tous les pourcentages

L'utilisation du ciment sans ajouts dans le mortier, offre les meilleurs résultats des résistances à la traction par flexion et à tous les âges (2,7, 28jours). Plus l'âge (2, 7, 28jours) augmente plus la résistance mécanique à la traction par flexion augmente quel que soit la nature de ciment.

V.6- Essai de résistance mécanique à la compression simple

L'essai de compression est exécuté sur une presse pour matériaux durs, sur les demi-éprouvettes provenant de l'essai de flexion.

▪ Dispositif de l'essai

Chaque demi-prisme est soumis en compression sur ses faces de moulage, sous une section de $(40 \times 40) \text{ mm}^2$ entre deux plaques de métal dur d'au moins 10 mm d'épaisseur et de $(40 \text{ mm} \pm 1,0, 1)$ de largeur, de longueur supérieure à 40 mm et dont la tolérance de planéité est de 0,01 mm. Ces plaques sont en acier dur d'une dureté Vickers d'au moins 600 N/mm², de préférence en carbure de tungstène. Le demi-prisme est placé entre les plaques de manière que son extrémité intacte dépasse d'environ 1 cm.

▪ Machine d'essai

L'ensemble du dispositif des éprouvettes est placé entre les plateaux d'une presse répondant aux spécifications du fascicule de documentation FD P N°18-306.

« Spécification de construction, d'emploi et de contrôle des presses destinées à l'essai de compression des matériaux durs ».

▪ Contrainte de rupture à la compression

La charge doit croître jusqu'à la rupture à une vitesse telle que l'accroissement de contrainte soit compris entre 1 et 2 MPa/s. Toutefois la charge peut croître rapidement jusqu'à la moitié de la charge de rupture présumée. La contrainte de rupture par compression est mesurée sur les deux demi éprouvettes résultantes, rompues par compression.

▪ Résultats numériques

Les résultats obtenus pour les différentes compositions du ciment sont donnés dans les tableaux 31.

Chaque Valeur obtenue représente la moyenne de deux demi éprouvettes rompues par compression:

$$R_c = F_m \times 0.625$$

Rc : La résistance mécanique à la compression simple.

F_m : La résultante moyenne de deux demi éprouvettes rompues par compression.

Tableau 31 - Résistance à la compression en fonction de l'âge pour tous les types des ciments étudiés.

Type d'ajout	Temps (Jours)	Taux de l'ajout (%)						
		0	5	10	15	20	25	30
Laitier	2	25,35	27,00	24,80	22,50	21,60	20,40	20,03
	7	39,80	41,70	39,70	38,59	36,50	34,50	33,60
	28	50,25	51,10	50,20	49,80	49,00	47,95	46,50
Stérile francs	2	25,35	31,40	30,25	29,60	29,05	27,08	22,85
	7	39,80	44,85	43,95	42,60	39,70	38,10	37,35
	28	50,25	54,45	53,35	52,75	50,75	49,65	48,40
Pouzzolane	2	25,35	27,95	27,32	27,25	25,15	25,95	21,00
	7	39,80	40,20	39,40	30,20	37,35	36,70	35,10
	28	50,25	52,75	51,70	50,95	49,70	47,20	45,60

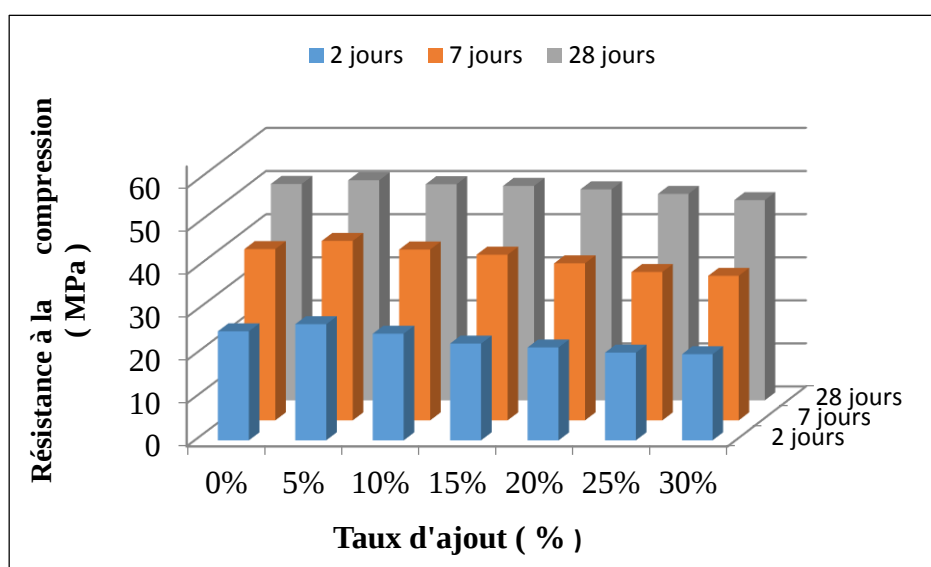


Figure 54 - Histogramme présente la résistance à la compression en fonction de l'âge pour un ciment CPA et pour un ciment avec ajout laitier.

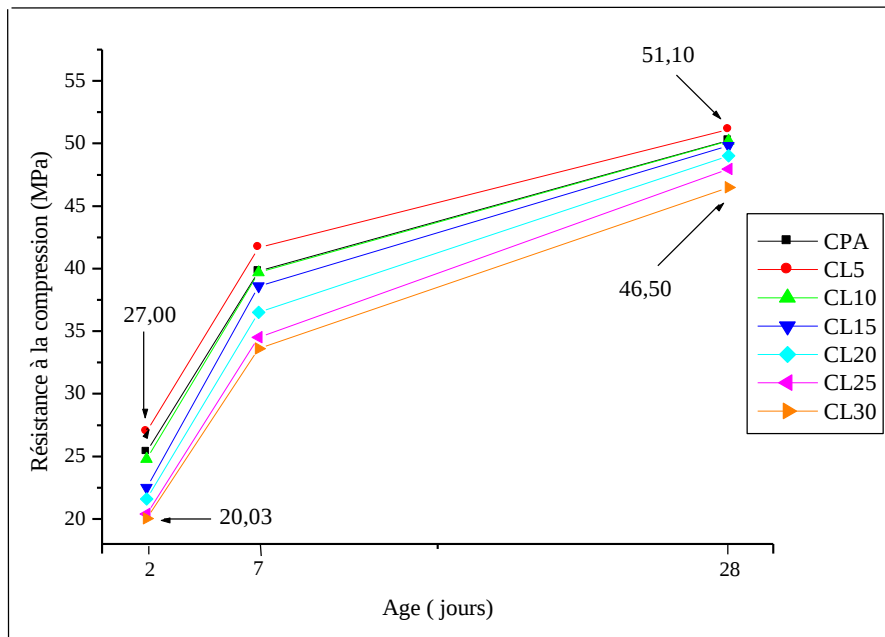


Figure 55 - Résistance à la compression en fonction de l'âge pour un ciment CPA et un ciment avec ajout laitier.

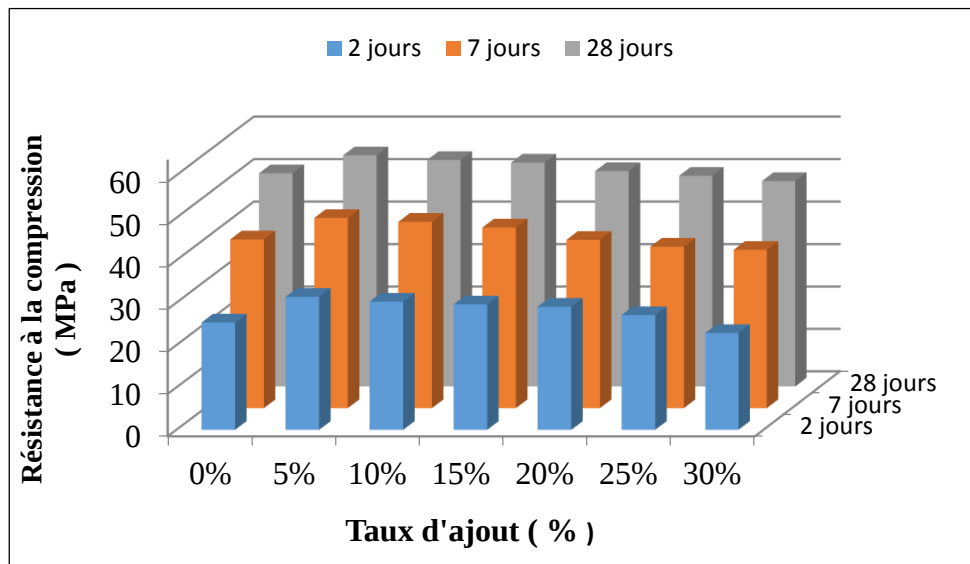


Figure 56 - Histogramme présente la résistance à la compression en fonction de l'âge pour un ciment CPA et un ciment avec ajout stérile francs.

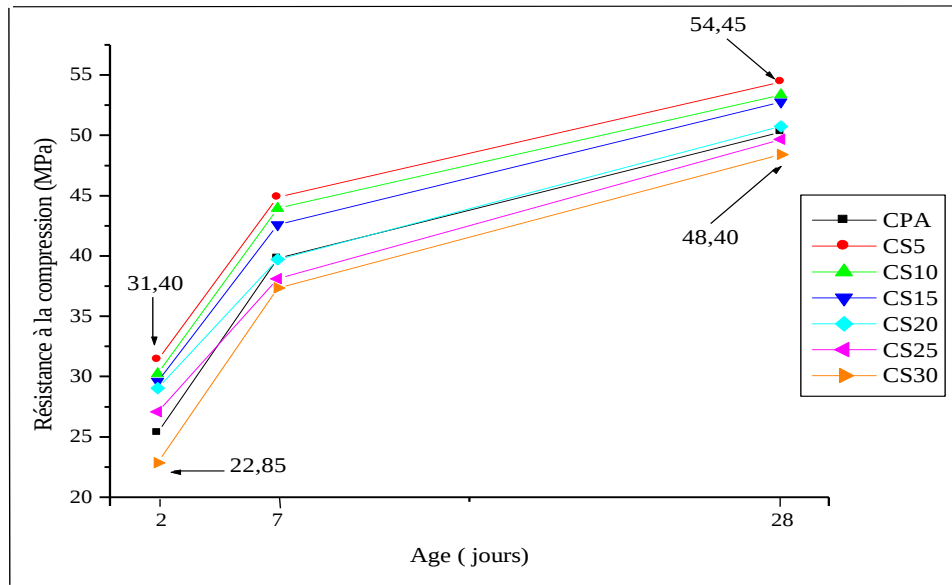


Figure 57 - Résistance à la compression en fonction de l'âge pour un ciment CPA et un ciment avec ajout stériles francs.

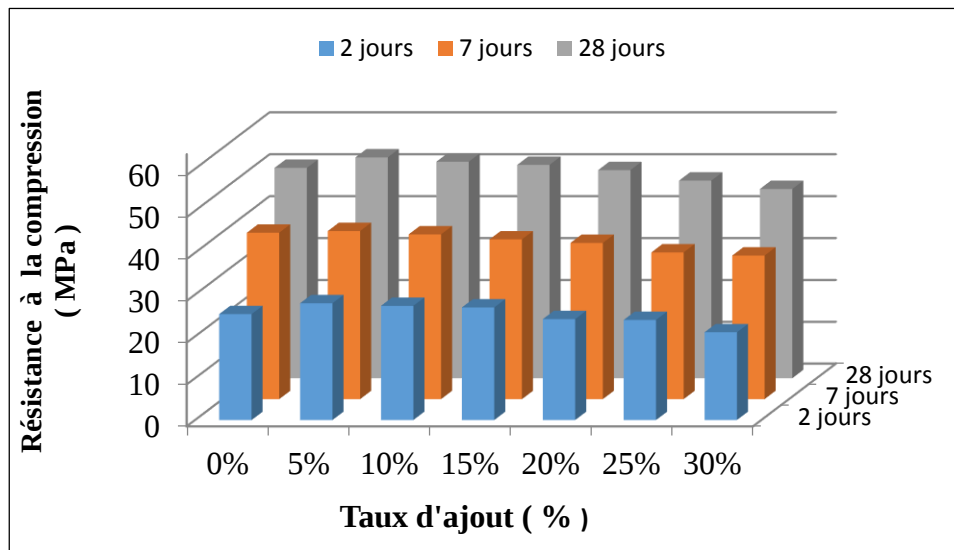


Figure 58 - Histogramme présente la résistance à la compression en fonction de l'âge pour un ciment CPA et un ciment avec ajout pouzzolane.

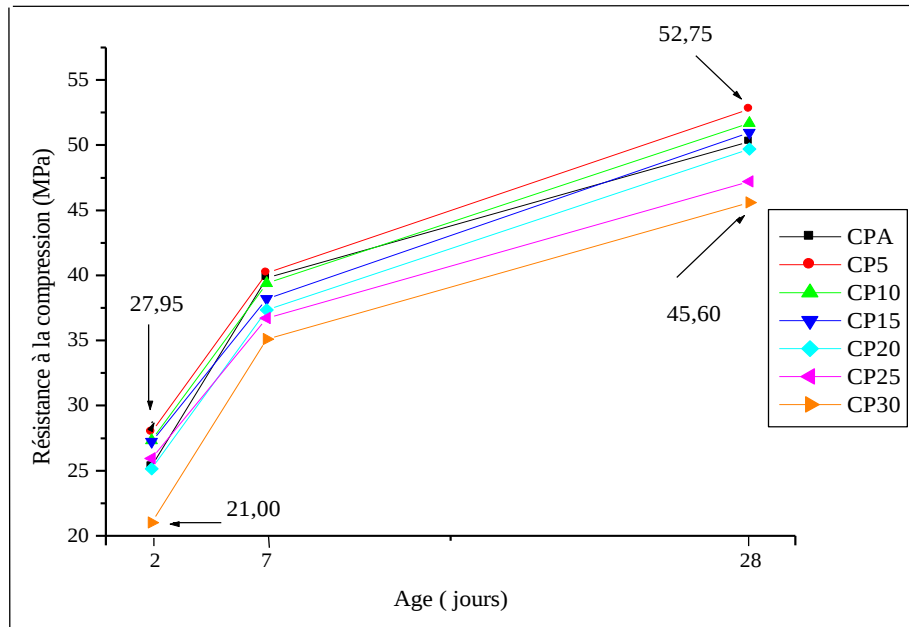


Figure 59 - Résistance à la compression en fonction de l'âge pour un ciment CPA et un ciment avec ajout pouzzolane.

▪ Résultats et discussions

L'analyse des différentes figures (figure 54 à 59) permet d'apporter les commentaires suivants :

- Avec fixation de l'âge, on remarque que, plus le pourcentage de l'ajout augmente (0 à 30%), plus la résistance mécanique à la compression de ciment CPJ-CEM II/ A ou B diminue.
- Tous les types de ciment étudiés ayant des résistances conformes à l'exigence de la norme algérienne NA 442
- L'ajout stérile francs de phosphate confère une meilleure résistance mécanique à la compression simple pour tous les âges et pour tous les pourcentages à comparer avec l'ajout pouzzolane et laitier.

V.7- Conclusion

Tous les types de ciment étudiés ayant des résistances à la traction par flexion et à la compression simple conformes à l'exigence de la norme algérienne NA 442

L'utilisation du ciment sans ajouts dans le mortier, offre les meilleurs résultats des résistances à la traction par flexion et à tous les âges (2, 7, 28 jours). Plus l'âge (2, 7, 28 jours) augmente plus la résistance mécanique à la traction par flexion augmente quel que soit la nature de ciment.

L'ajout des stériles francs de phosphate confère une meilleure résistance à la traction par flexion et à la compression simple pour tous les âges et pour tous les pourcentages à comparer avec l'ajout laitier et pouzzolane.

A partir des résultats des différents essais il est clair que l'utilisation des stériles francs de phosphate comme ajout dans la fabrication du ciment donne des meilleures résistances à la compression simple pour tous les âges et tous les pourcentages par rapports aux autres ajouts donc cette étude a montré qu'il est possible d'incorporer au ciment une considérable quantité de stérile francs de phosphate de Djebel Onk, puisque il permet en outre de procurer au ciment des propriétés physico-mécaniques intéressantes et ce même avec pourcentage d'ajout allant jusqu'à 30 % .

D'après les résultats des essais on peut conclure que ce type de ciment peut être utilisé dans : Le béton armé en général coulé sur place ou préfabriqué décoffrage rapide, mise en service rapide béton étuvé ou auto-étuvé.

Conclusion Générale et perspectives

La mine de phosphate de Djebel Onk est exploitée à ciel-ouvert qui produit environ une tonne de minerai de phosphate et génère entre neuf et dix tonnes de stériles miniers. Depuis plusieurs années, des millions de tonnes des déchets miniers sont stockés sur le carreau occupant une très grande surface ce qui posent de gros problèmes et des nuisances par la pollution de l'eau, de l'air et du sol et des milieux environnants de la daïra de Bir-El-Ater de la wilaya de Tébessa.

D'après l'étude de cas menée sur une gestion et une revalorisation des déchets miniers de phosphate les conclusions et les perspectives ainsi tirées sont comme suit :

- Un prélèvement d'échantillons de déchets miniers phosphatés (stériles francs) est effectué sur une grande surface de la zone d'étude afin de cerner les caractéristiques naturelles de ces déchets et la représentativité de la masse prélevée.
- La quantité de chaque échantillon prélevé est de 70 kg avec un diamètre des morceaux de 100 à 120 mm. Après une préparation mécanique (homogénéisation, quartage, concassage et broyage) pour réduire ses dimensions à environ 8 mm, les échantillons sont séchés et divisés jusqu'à l'obtention de 1 kg, les deux échantillons des stériles miniers de phosphate prélevés (stérile francs riche et pauvre en P_2O_5) sont acheminés au laboratoire de préparation des échantillons dans l'usine de traitement de phosphate de djebel Onk, ces échantillons ont été soumis à certains essais de caractérisation par différentes méthodes d'analyses (classement dimensionnel par tamisage, analyses chimiques des éléments majeurs et mineurs ou éléments traces des métaux lourds...)
- L'analyse granulométrique menée sur des échantillons des stériles de la mine phosphate de djebel Onk montre que : les stériles francs riches en P_2O_5 à un rendement élevé de 24,85 %, ce dernier a été enregistré dans la classe > 10 mm et pour les stériles francs pauvre en P_2O_5 un rendement élevé de 37,54 %, ce dernier a été enregistré dans la classe > 10 mm.
- L'analyse chimique des échantillons de différentes fractions granulométriques montre que : les stériles francs pauvres renferment une très faible teneur en P_2O_5 contre un taux élevé de CaO, MgO et SiO_2 correspondant respectivement à 34,76 %, 14,39 % et 29,70 %, d'autres éléments néanmoins mineurs tels que Fe_2O_3 , K_2O , Na_2O , SO_3 et Cl. les stériles francs riches contiennent une teneur en CaO de 44,86 % représentés principalement par une gangue carbonatée. La teneur en P_2O_5 a atteint une teneur significative de 26,40 % ce qui confirme que ce matériau est économiquement rentable. Un rendement élevé de (24,32 à 26,40 %) se trouvant dans la fraction granulométrique (- 0,80 + 0,20 mm).
- Selon les résultats de l'analyse chimique les stériles francs pauvres sont considérés

comme un matériau économiquement non rentable suite à leur teneur très faible et en deçà de la coupure souhaitée pour un éventuel enrichissement. Cependant ces déchets renferment tous les éléments qu'on retrouve dans le calcaire et l'argile et aussi dans les ajouts utilisés pour la fabrication du ciment tel que le laitier de haut fourneaux et la pouzzolane (CaO , MgO , SiO_2 ...). Donc nous pouvons déduire que ces déchets ne peuvent être considérés seulement comme un déchet mais plutôt comme sous-produit et une source d'un ou plusieurs matériaux de valeur commerciale. Pour se faire nous préconisons mise en valeur de ces déchets miniers comme ajout dans le mélange cru pour une éventuelle fabrication du ciment.

- Une étude comparative entre l'utilisation de ce type de déchet comme ajout dans la fabrication du ciment et d'autre ajouts tel que le laitier (sous-produit de l'industrie sidérurgique) et la pouzzolane (d'origine naturelle) afin de connaître leurs influences sur la qualité du ciment étudié CPJ – CEM II 42,5 en agissant sur les paramètres physiques tels que la consistance, mesure de temps de prise ainsi que les paramètres mécaniques tels que la résistance à la traction par flexion et à la compression simple)

Les résultats obtenus à partir des différents essais réalisés montrent que :

- L'augmentation du pourcentage de l'ajout de laitier dans le ciment, réduit la quantité d'eau dans le ciment par contre la quantité d'eau augmente avec une élévation de taux d'ajout de stériles miniers ou de pouzzolane.
- La variation de la diminution et de l'augmentation de la quantité d'eau est différente par rapport à l'ajout de stériles miniers, de pouzzolane et de laitier.
- la variation de la consistance normale répond à l'exigence de la norme NA 229 pour tous les types des ciments étudiés. Pour les ajouts stériles miniers et pouzzolane la consistance est proportionnelle aux taux d'ajouts, plus le taux d'ajout augmente plus la consistance augmente.
- tous les ciments avec ajouts étudiés ont un temps de prise conforme aux exigences de la norme algérienne NA 442 qui impose un temps de prise minimale de 60 minutes pour la classe de ciment CPJ-CEM II/ A ou B 42,5.
- il est évident que les résistances mécaniques à la traction par flexion et à la compression simple du ciment portland (CPA-CEM I) (42,5), sont meilleurs comparativement à celles du ciment composé avec ajouts (CPJ-CEM II/A ou B) (42,5). Avec maintien de l'âge, on remarque que, plus le pourcentage de l'ajout augmente (0 -30%), plus la résistance à la traction par flexion et à la compression simple du ciment CPJ-CEM II/ A ou B diminue. Tous les types de ciments étudiés ayant des résistances à la traction par flexion et à la compression simple sont conformes à l'exigence de la norme algérienne NA 442.

- L'utilisation du ciment sans ajouts dans le mortier, offre les meilleurs résultats des résistances à la traction par flexion et à tous les âges (2,7, 28jours). Plus l'âge (2, 7, 28jours) augmente plus la résistance mécanique à la traction par flexion augmente quel que soit la nature de ciment. L'ajout des stériles francs de phosphate confère une meilleure résistance à la traction par flexion et à la compression simple pour tous les âges et pour tous les pourcentages à comparer avec l'ajout laitier et pouzzolane.
- D'après les résultats des différents essais, l'utilisation des stériles francs de phosphate comme ajout dans la fabrication du ciment révèle des meilleures résistances à la traction par flexion et à la compression simple pour tous les âges et tous les pourcentages par rapport aux autres ajouts. De ce fait, cette étude montre qu'il est possible d'une part d'ajouter au ciment une certaine quantité de stériles francs de phosphate de Djebel Onk, et d'autre part de procurer au ciment des propriétés physico-mécaniques intéressantes et ce même avec un pourcentage d'ajout allant jusqu'à 30 % .

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

A

- Ahmari, S., & Zhang, L. (2012).** Production of eco-friendly bricks from copper mine tailings through geopolymerization. *Construction and building materials*, 29, 323-331.
- Aissaoui D. (1984).** Les structures liées à l'accident sud-atlasique entre Biskra et le Djebel Manndra, Algérie. *Evolution géométrique et cinématique*.
- Argane, R. (2015).** Valorisation des rejets miniers à faible teneur en sulfures comme granulats pour mortiers (Doctoral dissertation, Lyon, INSA).
- Argane, R., Benzaazoua, M., Hakkou, R., & Bouamrane, A. (2015).** Reuse of base-metal tailings as aggregates for rendering mortars: Assessment of immobilization performances and environmental behavior. *Construction and Building Materials*, 96, 296-306.
- Armstrong, A. (1965).** Phosphorus in chemical oceanography. Academic press London and NewYork. 1, p. 323-364.
- Aubé, B. C., & Zinck, J. M. (1999, September).** Comparison of AMD treatment processes and their impact on sludge characteristics. In *proceedings for Sudbury* (Vol. 99, pp. 261-270).
- Aubertin, M., Bussiér, B., Bernier, L. (2002a).** Environnement et gestion des résidus miniers. (On CD). Les Presses Internationales Polytechnique, École Polytechnique de Montréal, Québec, Canada.
- Aubertin, M. Bussière, B., Bernier, L. (2002b).** Environnement et gestion des résidus miniers.. CD-ROM, Presses Internationales Polytechnique, Montreal (Canada).
- Aubertin, M; Bussière, B; Pabst, T; James, M; Mbonimpa, M. (2016).** Review of the reclamation techniques for acid-generating mine wastes upon closure of disposal sites. In *Geo-Chicago*, 343-358.
- Aubertin, M; Bussiere, B; James, M; Mbonimpa, M; Chapuis, R.P. (2013).** Revue de divers aspects liés à la stabilité géotechnique des ouvrages de retenue de résidus miniers. Partie I : mise en contexte et caractéristiques générales. *Déchets Sciences et Techniques*. 64, 28-36.
- Aubertin, M; James, M; Mbonimpa, M; Bussiere, B; Chapuis, R.P. (2013).** Partie II : analyse et conception. Revue de divers aspects liés à la stabilité géotechnique des ouvrages de retenue de résidus miniers. *Déchets Sciences et Techniques*, 64, 38-50.
- Ayadi B., (2010).** Caractérisation et choix d'un schéma de traitement du minerai cuivre-fer de Douamis (Ouenza). Thèse Magister. Université Badji Mokhtar Annaba, p 136.

B

Bailey, B. L., Blowes, D. W., Smith, L., & Sego, D. C. (2016). The Diavik Waste Rock Project: Geochemical and microbiological characterization of low sulfide content large-scale waste rock test piles. *Applied Geochemistry*, 65, 54-72.

Baioumy H.M. (2005): Preliminary data on cadmium and arsenic geochemistry for some phosphorites in Egypt. *Journal of African Earth Sciences* 41, pp. 266–274.

Bakun, A. (1990). Global climate change and intensification of coastal ocean upwelling. *Science*, vol. 247, p. 198-201

Banu M. (2005). Mise en forme d'apatites nanocristallines : céramiques et ciments. Thèse de Doctorat. Institut National Polytechnique de Toulouse, France, 183p.

Barr, J.A. (1971). Phosphate rock *Industrial Mineral and rocks*, pp. 649-668

Baturin, G.N. (1969). Authigenic phosphate concretions in recent sediments of the Southwest African shelf. *Dokl. Akad. Nauk. S.S.S.R.*, 189. n° 6, *Dokl. Earth Sc. Sed.*, 189, p. 227-230

Baturin G.N. et A. V. Kochenov (2000). Uranium in Phosphorites. *Lithology and Mineral Resources*, Vol. 36, No. 4, 2001, pp. 303–321. Translated from *Litologiya i Poleznye Iskopaemye*, No. 4, 2001, pp. 353–373.

Baturin G.N. et A. V. Kochenov (2000). Uranium in Phosphorites. *Lithology and Mineral Resources*, Vol. 36, No. 4, 2001, pp. 303–321. Translated from *Litologiya i Poleznye Iskopaemye*, No. 4, 2001, pp. 353–373.

Baturin, G.N. (1974). Les conséquences géologiques de la mort massive de poissons dans l'océan. *Okeanologiya S.S.S.R.*, 14, n° 1, p. 101-105.

Bechade, E. (2008). Nouveaux matériaux de structure apatite: synthèse, structure et mécanismes de conduction ionique (Doctoral dissertation, Limoges).

Belayouni, H., Slansky, M., & Trichet, J. (1990). A study of the organic matter in Tunisian phosphates series: Relevance to phosphorite genesis in the Gafsa Basin (Tunisia). *Organic geochemistry*, 15(1), 47-72.

Ben Ammar, S. (2006). Les enjeux de la caractérisation des déchets ménagers pour le choix des traitements adaptés dans les pays en développement : résultats de la caractérisation dans le grand Tunis : mise au point d'une méthode adaptée. (Doctoral dissertation, Vandoeuvre-les-Nancy, INPL, 327 p).

Benzaazoua, M., Bussière, B., Demers, I., Aubertin, M., Fried, É., Blier, A., (2008). Integrated mine tailings management by combining environmental desulphurization and

cemented paste backfill: Application to mme Doyon, Quebec, Canada. *Minerais Engineering* 21, 330-340.

Benzaazoua, M., Fiset, J.-F., Bussière, B., Villeneuve, M., Plante, B., (2006). Sludge recycling within cemented paste backfill: Study of the mechanical and leachability properties. *Minerais Engineering* 19, 420-432.

Bertholus M. et Defranceschi M. (2004). Les apatites des phosphates naturels. *Techniques de l'Ingénieur AF 6610*.

Boujo, A et Rahhali, I. (1971). Sur les microfossiles du bassin phosphaté Crétacé-Eocène du Ganntour. *Note préliminaires N.S.G.M. t. 31, n° 237, p. 141-143.*

Boussen (2007). Valorisation de l'acide phosphorique par précipitation du cadmium et per-traction de l'uranium. Thèse de Doctorat d'Etat, Faculté des Sciences, Rabat – Maroc. 131p 47-72.

Bouzenoune, A. (1993). Minéralisation périadiapiriques de l'Aptien calcaire : les carbonates de fer du gisement hématitique de l'Ouenza (Algérie orientale). Thèse de doctorat, Université Paris VI, 209 p.

Bouzahzah, H., (2013). Modification et amélioration des tests statiques et cinétiques pour une prédiction fiable di drainage minier acide Thèse du doctorat en sciences de l'environnement. Université de Québec en Abitibi Témiscamingue, Québec (Canada).

Bréard L M. (2017). Caractérisation des propriétés hydrogéologiques de la couche de contrôle des écoulements placée sur la halde à stériles expérimentale à la mine du lac Tio. Ecole Polytechnique, Montreal (Canada).

Bushinski, G.I. (1964). On shallow water origin of phosphorite sediments. *Developments in Sedimentology.*, 1, p. 6270.

Bussière, B. (2007). Colloquium 2004: Hydrogeotechnical properties of hard rock tailings from metal mines and emerging geoenviromental disposal approaches. *Canadian Geotechnical Journal*, 44(9), 1019-1052.

Bussière, B., Aubertin, M., Zagury, G.J., Potvin, P., Benzaazoua, M., (2005). Principaux défis et pistes de solution pour la restauration des aires d'entreposage de rejets miniers abandonnées. *Symposium 2005 sur l'environnement et les mines. Rouyn-Noranda.*

BRGM (1997). Les résidus miniers français typologie et principaux impacts environnementaux potentiel, *Rap. R 39503*, 83 p., 14 fig, 10 tabl, 1 ann.

Bruno Debray (1997). Systèmes d'aide à la décision pour le traitement des déchets industriels spéciaux. *L'institut national des sciences appliquees de lyon*, 313 p.

C

Carpena, J. et Lacout, J. L. (2002). Utilisation des phosphates de calcium dans le stockage des déchets radioactifs. Proceedings de l'Ecole franco maghrébine sur les phosphates et les composés du phosphore, Monastir 2002.

Chabou-Mostefai, S. (1987). Etude de la série phosphatée tertiaire du Djebel Onk (Algérie): stratigraphie, pétrographie, minéralogie et analyse statistique (Doctoral dissertation, Aix-Marseille 3) 136p.

Chaib, O., Mouli, M., Hanifi, M., Hamadache, M., Benosmane, S., & Dif, F. (2015). Étude de l'influence de la pouzzolane naturelle sur la résistance mécanique des mortiers à base ciments composés. In Rencontres Universitaires de Génie Civil.

Chaïrat, C. (2005). Etude expérimentale de la cinétique et des mécanismes d'altération de minéraux apatitiques. Application au comportement d'une céramique de confinement d'actinides mineurs (Doctoral dissertation, Université Paul Sabatier-Toulouse III).

Chen, Y.L., Lin, C.J., Ko, M.S., Lai, Y.C., Chang, J.E., (2011). Characterization of mortars from belite-rich clinkers produced from inorganic wastes. Cement and Concrete Composites 33, 261-266.

Cheney, T.M. et Sheldon, R.P. . (1959). Permian stratigraphy and oil potential in Wyoming and Utah. U.S. Geol. Surv. 10th annual field Congr.

Chérait, Y., & Nafa, Z. (2007). Eléments de matériaux de construction et essais. Direction de la publication universitaire de GUELMA.

Cherniak D. J. (2000). Rare earth element diffusion in apatite. Geochimica et Cosmochimica Acta, Vol. 64, No. 22, pp. 3871–3885.

Chevenine, A., Popov, Y., Douha, Dj., Benzeroual, M. (1989). Rapport sur les résultats de l'étude géologique complémentaire des feuilles 124 (Oued Kebarite), 125 (Ouenza), 150 (El Ouinet) et 151 (Boukhadra). Chouani, N. et Callaud M., (2005).

Cielensky, Benchernine (1987). Travaux de prospection et d'évaluation des phosphates dans la région de Bir El Ater. Rapport interne, EREM, 80p.

Cogel J. E., (2006), Industrial Minerals And Rocks: Commodities, Markets, And Uses. 7th Edition by Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, USA, pp 19.

Contreras, M., Martín, M.I., Gázquez, M.J., Romero, M., Bolívar, J.P., (2014). Valorisation of ilmenite mud waste in the manufacture of commercial ceramic. Construction and Building Materials 72, 31-40.

Cook, P.J., Mc Elhinny M.W. . (1979).A Réévaluation of the Spatial and Temporal Distribution of Sedimentary Phosphate Deposits in the Light of Plate Tectonics. *Economic Geology*, Vol. 74, p. 315-330

D

Dassamiour M., (2012). Eléments En Traces Et Valorisation Des Minerais De Phosphate Du Gisement De Kef Essennoun - Dj. Onk (Algérie Orientale). Thèse De Doctorat. Université Badji Mokhtar-Annaba, pp. 143-144.

Deboucha, W., Leklou, N., Khelidj, A., Pertue, A., & Oudjit, M. (2017). L'effet du laitier de haut fourneau sur la porosité du mortier. *Academic Journal of Civil Engineering*, 35(1), 190-193.

Deschamps,T.,(2009). Étude du comportement physique et hydrogéochimique d'un dépôt de résidus miniers en pate dans des conditions de surface. Thèse de doctorat UQAT, Canada, 315p.

Dubourdiou, G, (1956). Etude géologique de la région de l'Ouenza (confins Algéro-Tunisiens). Pub. du service de la carte géologique de l'Algérie, Alger, N.S., 10, 659 p.

Dubourdiou, G, (1959). Exquise géologique du Djebel. Mesloul. Publ. Serv. Carte géol. Algérie, nouvelle série, Bull., n°21.

E

Eberhart J.-P., (1997) Analyse structurale et chimique des matériaux. Dunod (Paris).

El habib A, Thierry L, Amar B, Michèle Q (2011). Propriétés d'un composite cimentaire cellulaire à base de déchets de lin textile

Erhart, H. (1956).La genèse des sols en tant que phénomène géologique. Paris. Masson et Cie.

Éthier, M. P. (2011). Évaluation du comportement géochimique en conditions normale et froides de différents stériles présents sur le site de la mine Raglan (Doctoral dissertation, École Polytechnique de Montréal).

F

Fisher A.G. et Jérôme D. (1973). Geochemistry of minerals containing phosphorus, in *Environmental Phosphorus Handbook*, 141p – John Wiley and Sons. New-York, London, Sydney, Toronto.

Fitoussi R. Et Helgorsky J. (1982). Purification de l'acide phosphorique. Société Rhône Poulenc Recherches.

Flandrin J., (1948). Contribution à l'étude stratigraphique du Nummulitique algérien. Bull. Serv. Carte géol. Algérie. 2ème série, stratig. Alger, n°19, 340p.

Fleury, J. J. (1969). Stratigraphie du Crétacé et de l'Eocène. Notice de la carte (Aptien à Lutétien de la feuille 1/50 000ème

Francis Rouessac, Annick Rouessac, Daniel Cruché (2004), 6ème édition, Dunod, Paris, Analyse chimique: méthodes et techniques instrumentales modernes.

G

Galaup S , Baudoin C. (1996). Droit et politique des déchets industriels analyse comparative de six stratégies nationales en Europe. Déchets science et techniques, , n° 1, p.4-8.

Gosselin A., Blackburn D., Bergeron M., (1999). Protocole D'évaluation De La Traitabilité Des Sédiments, Des Sols Et Des Boues A L'aide Des Technologies Minéralurgiques. Sainte-Foy, Canada, p 148.

Gremillion L.R., McClellan G.H., (1975). Importance of chemical and mineralogical data in evaluating apatitic phosphate ores. Society of Mining Engineers of AIME. Transactions. Vol. 270.

Guibrandsen, R.A. (1966): Chemical composition of phosphorites of the Phosphoria formation. *Geochim. Cosmo-chim. Acta*, 30, p. 365-382.

Guillemot J., (1986). Éléments De Géologie, Edition Technip, Paris Et Institut Français Du Pétrole, Pp. 38-44.

Gulbrandsen, R.A. (1969). Physical and chemical factors in the formation of marine apatite. *Econ.Geol.* 64, n° 4, June-July 1969, p. 365-382

Gulbrandsen, R.A. (1966) Chemical composition of phosphorites of the Phosphoria Formation. *Geochim. Cosmo-chim. Acta*, 30, p. 769-778.

H

Hakkou, R ; Benzaazoua, M ; Bussiere, B. (2016). Valorization of Phosphate Waste Rocks and Sludge from the Moroccan Phosphate Mines: Challenges and Perspectives. *Procedia Engineering*. 138, 110–118.

Hite, R.J. (1978). Possible genetic relationships between eva-porites, phosphories and iron-rich sediments. The Moun-tain Geol., 14, 3, p. 97-107.

Hoening M et Thomas P. (2002). Préparation d'échantillons de l'environnement pour analyse minérale, Dossier P4150, Techniques de l'Ingénieur, p 12.

Holtan H., Kamp-Nielsen L., Stuanes A. O., (1988). Phosphorus In Soil, Water And Sediment: An Overview, Pp. 20.

Horst C, Tetsuya S, Smith L (Eds.), Springer, (2006). Springer Handbook of Materials Measurement Methods.

Hustel B. T. Kovaleski, S. D., Baxter, E. A., & Kwon, J. W (2013) Charged-particle Emission and self biasing of piezoelectric transformer plasma source. . IEEE Transactions on Plasma Science, 41(1), 99-105.

I

IAEA., (2002). Assessment of soil phosphorus status and management of phosphatic fertilizers to optimize crop production. IAEA-TECDOC-1272. Vienna.

J

Jasinski, S. M. (2011). Phosphate rock statistics and information. U.S. Geological Survey 2011

Julien, H L Rozenn & L Claire (2007). Etude par diffraction et absorption des rayons X de l'amorphisation sous pression dans des matériaux Analogues de la silice/ Institut Charles Gerhard (CNRS - Université Montpellier II)

K

Kacimi, L., Ghomar, A., Salem, S., & Derriche, Z. (2007). Obtention d'un clinker Portland consommant peu d'énergie. Sciences & Technology. A, exactes sciences, 49-54.

Kassatkine Y., Yahiaoui A. et Chatilov S., (1979). Rapport sur les travaux de prospection et d'évaluation sur les phosphates exécutés en 1976-1978 dans le district minier du Djebel Onk, 2 vol., sonarem , 140 p.

Kavas, T., Christogerou, A., Pontikes, Y., Angelopoulos, G.N., (2011a). Valorisation of different types of boron-containing wastes for the production of lightweight aggregates. Journal of hazardous materials 185, 1381-1389.

Kavas, T., Christogerou, A., Pontikes, Y., Angelopoulos, G.N., (2011b). Valorisation of different types of boron-containing wastes for the production of lightweight aggregates. *Journal of hazardous materials* 185, 1381-1389.

Kazakov, A.V. (1937). Faciès à phosphate de chaux et genèse des phosphates de chaux sédimentaires. *Trav. Inst. Rech. Engrais et inscto-fongicides*, fasc. 142, pp. 100-119.

Kazakov, A.V. (1950). l'équilibre du système fluoapatite dans les conditions de formation des roches sédimentaires. *Trav. Inst. Geol. Akad Nauk, URSS*, n°114, sér. Géologie, n°40. pp. 1-21.

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

Kechiched R., (2016). Les phosphates du nord de tébessa (dyr et elkouif): étude sédimentologique, gitologique et géochimique, thèse doctorat, pp 219

Kechiched, R. (2017). Les phosphates du nord de Tébessa (dyr et elkouif). Etude sédimentologique, gîtologique et géochimique. Thèse de Doctorat de l'Université d'Annaba.

Keyser, F., Cook, P.J(1972). Geology of the Middle Cambrian Phosphorites and Associated Sediments of Northwestern Queensland. *Dep. of Nation. Development, Bur. Minera. Res. Geol. Geophys. Bull. Canberra*, n° 138.

Krea M. et Khalaf H. (2000). Liquid-liquid extraction of uranium and lanthanides from phosphoric acid using a synergistic DOPPA-TOPO mixture. *Hydrometallurgy* 58, pp. 215-225.

Kulaif Yara (1997). The new configuration of the phosphate fertilizer industry ; in Brazil thesis, Polytechnic School. Pages 103-114.

L

Lacout J-L. (1983). Contribution à l'étude de l'extraction par vapo-métallurgie du manganèse et du vanadium des apatites, Thèse de Doctorat, INP Toulouse (France)

Lamontagne, A. (2002). Étude de la méthode d'empilement des stériles par entremêlement par couches pour contrôler le drainage minier acide. Ph. D. Thesis, Université Laval, Quebec City, QC, Canada.

Lanoix, M. L. B. (2017). Caractérisation des propriétés hydrogéologiques de la couche de contrôle des écoulements placée sur la halde à stériles expérimentale à la mine du lac Tio. Ecole Polytechnique, Montreal (Canada).

Larouci M., (1988). Etude de la caractérisation et de la valorisation du minerai de phosphate de Djebel Onk – Algérie- thèse de doctorat ingénieur. Université orléans. 1 vol texte, 194p.

Leenars, R. (2006). Valorisation des phosphogypse dans le domaine des matériaux de construction Université de louvaine ISBN 9954-8734-1-4

Legoule M. (2016). Apport de la géophysique, de l'hydrogéochimie et de la modélisation du transfert du drainage minier acide au projet de réhabilitation de la mine abandonnée de Kettara (région de Marrakech, Maroc).

Lehr J.R., Mc Clellan G.H., Smith J.P. et Frazier A.W. (1967). Characterization of apatites. in commercial phosphate rocks. In Colloque international sur les phosphates minéraux solides. Toulouse, 16-20 février 1967, pp. 29-44.

Leroy. J.B., (1997). Les déchets et leurs traitement : les déchets solides industriels et ménagers. Edition : Presse Universitaires de France, Paris, 3ème édit. 127 p.

Leroy J.B. (1981 révisé 1994). Les déchets et leur traitement», Collection Que sais-je ?, Paris : Presses universitaires de France, 127 p.

Li, C., Sun, H., Yi, Z., Li, L., (2010). Innovative methodology for comprehensive utilization of iron ore tailings: Part 2: The residues after iron recovery from iron ore tailings to prepare cementitious material. Journal of hazardous materials 174, 78-83.

London C. (1996), La notion juridique de déchet ou quelques interrogations d'ordre sémantique. Déchets, sciences et techniques, , n°1, p.8-10.

Lucas, J. Prévôt, L. (1981). Synthèse d'apatite à partir de la matière organique phosphatée (A.R.N.) et de calcite par voie bactérienne. C.R.A.S., Paris, 292, 11, pp. 1203-1208.

Lucas, J. Prévôt, L.(1984). Synthèse d'apatite par voie bactérienne à partir de la matière organique phosphatée et de divers carbonates de calcium dans les eaux douces et marines naturelles.Chem. Géol., 82, pp. 101-118.

Lucas, J. Prévôt, L. (1985). The syntesis of apatite by bacterial activity: Mechanism. Sci. Geol., Mem.,77, Starsbourg, pp. 83-92.

Lucas, J. Prévôt, L(1975). Les marges continentales, pièges géochimiques ; l'exemple de la marge atlantique de l'Afrique à la limite Crétacé - Tertiaire. Bull. Soc. Géol. Fr. (7), 17, 4. pp. 496-501.

Lucas, J. Prévôt, L. El Mountassir, M. (1979). Les phosphorites rubéfiées de Sidt Daoui. Transformation météorique locale du gisement de phosphate des Ouled Abdoun (Maroc). Sci. Géol., Bull. 32, 1-2, pp. 21-37.

M

Maknoon, M. (2016). Slope stability analyses of waste rock piles under unsaturated conditions following large precipitations. Ecole Polytechnique, Montreal (Canada).

Martin, T. (2015). Contribution à l'étude des générateurs piézoélectriques pour la génération des décharges plasmas (Doctoral dissertation, Université Paul Sabatier-Toulouse III).

Matías Miguel Salvarredy Aranguren., (2008). Contamination en métaux lourds des eaux de surface et des sédiments du Val de Milluni (Andes Boliviennes) par des déchets miniers. Approches géochimique, minéralogique et hydrochimique, en vue de l'obtention du Doctorat de l'université de TOULOUSE, p 489.

Maystre L.Y. et al. 1994, Déchets urbains : nature et caractérisation , Lausanne : Presses polytechniques et universitaires romandes (Collection Gérer l'Environnement), , 220 p

McClellan G.H., Lehr J.R., (1969). Crystal chemical investigation of natural apatites, Am. Min., 54, pp 1374-1391.

McClellan G.H., Gremillion, L.R., (1980). Evaluation of phosphatic raw materials. In F.E. Khasawneh, ed. The role of phosphorus in agriculture, pp. 43-80. Madison, USA, ASASSSA.

McClellan G.H., Van-Kauwenbergh S.J., (1990). Mineralogy of sedimentary apatites. In A.J.G. Notholt & I. Jarvis, eds. Phosphorite research and development. Geological Society Special Publication 52, 23-31.

McGraw_Hill, New York, (2004) Dean's Analytical Chemistry Handbook. Patnaik J. Mendham, R.C. Denney, J.D. Barnes, M.J.K Thomas Analyse chimique quantitative de Vogel., 6ème édition, De Boeck Université, 2005

McKelvey, V.E., Swanson, R.W. Sheldon R.P. (1953) The Permian phosphorite deposits of western United States. Congrès géol. intern. Alger 1952. Section XI. fase. XI, Origine des gisements de phosphates de chaux, pp. 45-64.

Mériaux, S. (1954). Contribution à l'étude de l'analyse granulométrique. Institut National de la Recherche Agronomique, Université de Paris (France), 125 p.

Mezghache H. et Hani A. (2002) : Typologie chimique des phosphates du gisement de Djemi-Djema, bassin de Djebel Onk (Algérie orientale). **Géologie Méditerranéenne. Tome XXVII n° 1/2, 2000, pp 95-106.**

Mezghache H., Toubal A., Bouima T., Bouarroudj M.T., (2000). Localisation des différents types de minerais à l'aide de méthodes statistiques multivariées dans le gisement de phosphate de Kef Es – Sennon – Djebel Onk –Algérie. 5th international conference on the geology of the Arab world. Cairo University, Egypte.

Mezghache H. et Hani A. (2000). Typologie chimique des phosphates du gisement de Djemi Djima – bassin de Djebel Onk (Algérie orientale). Géologie Méditerranéenne. Tome XXVII n° 1/2, 2000, pp 95-106.

Mezghache, H. (1991). Détermination, localisation et estimation globale des différents types de minerais de phosphate dans le gisement de Kef Es Sennoun Djebel Onk – Algérie. Rapport E. N. Ferphos, 42 p.7.

Mihai Banu (2005). Mise en forme de l'apatite monocristalline: céramique et ciment thèse de Doctorat de l'Université de Toulouse 2005.

Mlayah, A., Yoshida, M., Charef, A., Noronha, F., da Silva, E. F., et Patinha, C. (2005). Impact des rejets miniers et domestiques sur la qualité des sédiments et des eaux de l'oued Mellègue (Nord-Ouest de la Tunisie): diagnostic des métaux lourds, pp. 621-625.

Mohammed B., Mahi, A., Aouel, M. K., Derbal, R., & Abdelhadi, H. Valorisation du déchet de marbre et de la pouzzolane naturelle dans les mortiers (Valorization of waste marble and natural pozzolan in mortars).

Monir M. A., Nabawia A. M. (1999): Recovery of lanthanides from Abu Tartur phosphate rock, Egypt. Hydrometallurgy, 52, pp.199–206

Montel G., Bonel G Trombe., J-Ch, Heughebaert J-C., Rey Ch. (1980): Progrès dans le domaine de la chimie des composés phosphorés solides à structure d'apatite. Application à la biologie et au traitement des minerais. Pure & Appl. Chem., Vol.52, pp.973—987.

Mouflih, M. . (1991). La série phosphatée du gisement de Benguerir séquences de faciès, évolution séquentielle, minéralogie et géochimie (Maastrichtien-lutétien). Thèse de 3ème cycle, Univ. Cadi Ayyad, Marrakech. p.246

N

Nabih, K. (1997). Caractérisation et traitements thermiques des schistes bitumeux des sous couches R de Tarfaya sous différentes atmosphères (N₂, He, air et vapeur d'eau), Utilisation du Ciment dans la production du ciment. D Etat thesis, University of Mohamed V, Rabat, Morocco.

Nathan Y., Benalioulhaj N., Prévôt L. et Lucas J. (1996): The geochemistry of cadmium in the phosphate-rich and organic-rich sediments of the Oulad-Abdoun and Timahdit basins (Morocco). Journal of African Earth Sciences, Vol. 22, No. 1, pp. 17-27.

Nettour, D., Chettibi, M., & Bulut, G. (2016). Tailings Phosphate reprocessing by flotation in the case of Djebel Onk deposit, Algeria.

Nettour, D ; Chettibi, M ; Bouhedja, A ; Bulut, G ; (2018), Determination of physicochemical parameters of djebel onk phosphate flotation (algerie), Solid state physics, mineral processing. Solid State physics, Mineral processing. 4, 43- 49

Nettour, D., Chettibi, M., & Bulut, G. (2016). The beneficiation of Djebel-Onk proceeding BMPC 2017. phosphate ore from Algeria by flotation

Nicolini P. (1990): Gîtologie et exploitation minière. Edition Tec&doc, Lavoisier.

Nicolasj., (2006) .Principes de l'échantillonnage dans l'environnement, Université de Liège, Liège, p 89.

Nigri G, Chetaï Y, Bnouïs H (2009). Vers l'élaboration d'un nouveau ciment composé à base de déchets des briques Algérie équipement n°50

Nordstrom, D.K., Alpers, C.N., (1999). Geochemistry of acid mine waters. In The environmental Geochemistry of mineral deposits Part A: Processes, Techniques, and Health Issues. In: G. S. Plumlee and M. J. Logsdon, Society of Economic Geologists 6, 133-160.

Norme algérienne NA 229 (7 janvier 2016). << Ciment : détermination de la consistance normale de la pâte de ciment >> éditées par l'institut algérien de la normalisation Algérie.

Norme algérienne NA 442 (7 janvier 2016)<<Ciment : composition, spécification et critères de conformité des ciments courantes >> éditées par l'institut algérien de la normalisation Algérie

Norme algérienne NA 234 (7 janvier 2016).<< Méthodes d'essais des ciments détermination des résistances mécaniques >> éditées par l'institut algérien de la normalisation Algérie

Norme française P15- 403 (1996). «Sable normal et mortier normal » AFNOR – Paris –

O

Ogihara, S. (1999). Geochemical characteristics of phosphorite and carbonate nodules from the Miocene Funakawa Formation, western margin of the Yokote Basin, northeast Japan. Sedimentary Geology, 125(1-2), 69-82.

Onuaguluchi, O., & Eren, Ö. (2012). Recycling of copper tailings as an additive in cement mortars. Construction and Building Materials, 37, 723-727.

Othmanine, A. (1987). Les minéralisations en fluorine, barytine, Pb, Zn et fer sidérifique autour du fossé de Tebessa-Morsott (Algérie). Relation entre paléogéographie aptienne, diapirisme, structure et métallogénie. Thèse de 3^{ème} Cycle, Université Pierre et Marie Curie, Paris VI, France, 221 p.

P

Peaver, D. R. (1966). The estuarine formation of United States Atlantic coastal plain phosphorite: *Econ. Geology*, 61(2), 251-256.

Pineau, J. L. (1996). Application des techniques séparatives a l'échantillonnage des solides à faible teneur en vrac. *Industrie minérale mines et carrières les techniques*, 76-84.

Plan National d'Actions pour l'Environnement et le Développement Durable (PNAE-DD), Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement, Algérie.

Poulard, F., Daupley, X., Didier, C., Pokryska, Z., D'HUGUES, P., Charles, N., ... & Save, M. (2017). Exploitation minière et traitement des minerais. INERIS, Rapport technique. Tome 6, 77 p. 43 fig. 2 ann.

Prévôt, L. (1988). Géochimie et pétrographie de la formation à phosphate des Ganntour (Maroc): Utilisation pour une explication de la genèse des phosphorites Cretacé-Eocènes (Doctoral dissertation, Université Louis Pasteur (Strasbourg)(1971-2008)).

Prevôt, L., Lucas, J. (1979) : Comportement de quelques éléments traces dans les phosphorites. *Scl. Géol., Bull., 32n 1-2, p. 91-105.*

Prian G. P. et Cortiel Ph. (1993): Etude de développement du gisement de phosphate de Djebel Onk (Algérie). Rapport d'expertise géologique, B.R.G.M. France, 288 p.

Price, N. B., & Calvert, S. E. (1978). The geochemistry of phosphorites from the Namibian shelf. *Chemical Geology*, 23(1-4), 151-170.

R

Radier, H. (1959). Contribution à l'étude géologique du Soudan oriental (AOF): Le bassin crétacé et tertiaire de Gao. Le détroit soudanais (Doctoral dissertation, Grande imprimerie africaine) n° 26, S.G.P.M. Dakar..

Rakovan J. et Reeder R.J. (1996): Intracrystalline rare earth element distributions in apatite: Surface structural influences on incorporation during growth. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 60, No. 22, pp. 4435-4445.

Ranchin G., (1963). Gisement de phosphate de chaux sédimentaire de Djebel Onk (Algérie), Société de Djebel Onk, SERMI, Paris.

Ranchin, G. (1963, a). Les phosphates de chaux sédimentaires de la région de djebel Onk (Algérie).S.E.R.E.M. Paris, 85p.

Ranchin, G. (1963, b). Les phosphates de chaux sédimentaires de la région de Djebel Onk. Étude géologique et minière de Djemi – Djema (Algérie). S.E.R.M. Paris, 2 vol

Raoui, A., Diouri, A., Kamali-Bernard, S., & Talbi, M. A. (2012). Ajout de phosphogypse à des mortiers à base de cendres volantes et filler calcaire. In MATEC Web of Conferences (Vol. 2, p. 01018). EDP Sciences.

Ripley, E. A., Redmann, R. E., & Crowder, A. A. (1996). Environmental effects of mining. St.

Ritcey, G. M. (1989). Tailings management.: Problems and Solutions in the Mining Industry. Elsevier Science Publishers, B.U. Amsterdam, The Netherlands.

Ritcey, G. M. (2005). Tailings management in gold plants. Hydrometallurgy, 78(1-2), 3-20.

Roberson, C. E. (1966). Solubility implications of apatite in seawater. US Geological Survey, Professional Paper, 550, 178-185.

Rudowicz, I. (1975). Application de la radiométrie aéroportée pour la recherche des phosphates. Rapport SONAREM, Alger

S

Sassi, A. B., & Sassi, S. (1999). Le cadmium associé aux dépôts phosphatés en Tunisie méridionale. Journal of African Earth Sciences, 29(3), 501-513.

Sassi, S. (1974). La sédimentation phosphatée au Paléocène dans le Sud et le Centre Ouest de la Tunisie. These de Doct. d'etat es Sci., Univ. de Paris Sud.

Schilderman, T., Mason, K., 2009. Using residues as fuel in small-scale brickmaking proceedings of the 11th International Conference on Non-conventional Materials and technologies (NOCMAT 2009) 6-9 September 2009, Bath, UK.

Séamus P., J. Higson, (2003). Oxford University Press, Analytical Chemistry.

Senhadji, Y., Escadeillas, G., Mouli, M., & Khelafi, H. (2014). Influence of natural pozzolan, silica fume and limestone fine on strength, acid resistance and microstructure of mortar. Powder technology, 254, 314-323.

Singer, P. C., & Stumm, W. (1970). Acidic mine drainage : the rate-determining step Science ,167(3921), 1121-1123.

Slansky, M. (1962). Contribution à l'étude du bassin sédimentaire côtier du Dahomey et du Togo. Paris, France, Éditions Technip, Mémoires du Bureau de recherches géologiques et minières, 11, 227.

Slansky M., (1975). Disponibilité et besoins futurs un minerais phosphatés compte tenu de la lutte anti-pollution et de nouvelles applications possibles, BRGM, 75 SGN 219 GEO.

Slansky M. (1980). Géologie des phosphates sédimentaires. Mémoire B.R.G.M. n°114, France, 92 p.

Slansky, M. (1980). Géologie des phosphates sédimentaires. Mémoire du BRGM N° 114, 3 p.

Smith, P. A. et Thirion E. (1991). Réduction des impacts causés sur l'environnement par la production d'acide phosphorique. Prayon Rupel Technologies.

T

Taha, Y. (2017). Valorisation des rejets miniers dans la fabrication de briques cuites: Évaluations technique et environnementale (Doctoral dissertation, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue).

Taylor, H.K. (1972). General background theory of cutoff grades, Trans. Inst. Mining Met., Sec. A, vol. 81

Thiam, A., Samb, F. M., & Diop, C. G. M. (2015). Ajout du mélange de silicate de calcium et du fluorure de calcium à des mortiers à base de clinker/Adding a mixture of calcium silicate and calcium fluoride to clinker mortars. Journal de la Société Ouest-Africaine de Chimie, 40, 41.

Thibiéroz, J., Madre, M. (1976). Le gisement de sédirite du Dj. Ouenza (algérie) est contrôlé par un golf de mer aptienne. Bulletin de la société d'Histoire Naturelle de l'Afrique du Nord, 67, 3-4, pp.

Thomas, B. S., Damare, A., & Gupta, R. C. (2013). Strength and durability characteristics of copper tailing concrete. Construction and Building Materials, 48, 894-900.

Truong B., Beunard P., Diekola K., Pichot J., (1982). Caractérisation et comparaison des phosphates naturels de Madagascar en vue de leur utilisation en agriculture. Agron. Trop., 37(1): 9-16.

V

Valérie Thirion-Merle. (2014) Spectrométrie de fluorescence X. Circulation et provenance des matériaux dans les sociétés anciennes, Editions des archives contemporaines, , Collection Sciences Archéologiques,

Vega, J. M. D. (2012). Apport des modèles géo-métallurgiques et de la catégorisation des ressources à la définition de la fosse ultime d'une mine à ciel ouvert: Application à la mine de cuivre de Mantos de la Luna au Chili (Doctoral dissertation, Paris, ENMP) .

Verma H.R. Schmeling, M.; (2007). Atomic and Nuclear Analytical Methods: XRF, Mössbauer, XPS, NAA and Ion-Beam Spectroscopic Techniques By HR Verma (Punjabi University, Patiala, India). Springer: Berlin, Heidelberg, New York. 2007. xiv+ 376 pp. \$169.00. ISBN 978-3-540-30277-3.

Villain J.M., (1979). Le Crétacé du permis Dj. BOTTENA (région de Tébessa), N.E. Algérie), Total-C.F.P. (SONATRACH-Algérie), 6 p.

Villeneuve, M. (2004). Évaluation du comportement géochimique à long terme de rejets miniers à faible potentiel de génération d'acide à l'aide d'essais cinétique. École Polytechnique de Montréal.

Visse, L. (1952). Genesis of the southeasterly Algerian–Tunisian phosphatic deposits. In XIX International Geological Congress., set (Vol. 1, p. 60).

Visse, L. (1951). Le gisement de phosphate de chaux de Djebel Onk. Rapport interne Soc. Djebel Onk, 152 p, 32 pl., 10 pl. h.t.

VULCANO N. (2006). Observation français des ressources dès les infrastructures (OFRIR)

W

Westin Fred, C. de Brito Julia, G. (1969). Phosphorus fractions of some Venezuelan soils as related to their stage of weathering. Soil Science, 107, n°3, p. 194-202.

Wong, R. C. K., Gillott, J. E., Law, S., Thomas, M. J., & Poon, C. S. (2004). Calcined oil sands fine tailings as a supplementary cementing material for concrete. Cement and concrete research, 34(7), 1235-1242.

Z

Zapata., Roy. (2004). Engrais et nutrition végétal, Bulletin FAO, N°13, 175p.

Zinck, J. M., & Aubé, B. C. (2000). Optimization of lime treatment processes. CIM bulletin, 93(1043), 98-105.

Zinck, J., Griffith, W. (2013). Review of mine drainage treatment and sludge management operations. MEND report, 3(1), 111.