



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique Et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة الشهيد الشيخ العربي التبسي – تبسة
Université Echahid Cheikh Larbi Tebessi – Tébessa
معهد المناجم
Institut des Mines
قسم المناجم والجيوتكنولوجيا
Département Mines Et Géotechnologie



MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de Master

Filière : Génie minier

Option : Valorisation des ressources minérales

**Evaluation technique de la revalorisation des rejets de
dépoussiérage du minerai de phosphate comme additif
dans la fabrication du ciment ordinaire.**

Par :

1.BENLABIOD Malak
2.RAMI Nada

Devant le jury :

LARABA .M	Président	MCA	Université Echahid Cheikh Larbi Tebessi – Tébessa
BOUZENZANA .A	Encadrant	PR	Université Echahid Cheikh Larbi Tebessi – Tébessa
AOUATI .M.S	Examineur	MAA	Université Echahid Cheikh Larbi Tebessi – Tébessa

Année universitaire 2025/2026





Année universitaire : 2025/2026Tébessa le :

Lettre de soutenabilité

Noms et prénoms des étudiants :

- 1 BENLABIOD Malak
- 2 RAMI Nada

3-----

Niveau : Master Option : VRM

Thème : Evaluation technique de la revalorisation des rejets de dépoussiérage
du minerai de phosphate comme additif dans la fabrication ,du ciment
ordinaire.

Nom et prénom de l'encadreur : BOUZENZANA Abdellali

Chapitres réalisés	Signature de l'encadreur
	Saisissez du texte ici
Toutes les parties	

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

مؤسسة التعليم العالي : جامعة العربي التبسي - تبسة

تصريح شرفي
خاص بالالتزام بقواعد النزاهة العلمية لانجاز بحث

أنا الممضي أدناه،

السيد (ة) بن لبيح حلت الصفة : طالب، أستاذ باحث، باحث دائم : طابعت

الحامل لبطاقة التعريف الوطنية رقم 410030364055820006 الصادرة بتاريخ 16.10.2023
المسجل بمعهد المناجم قسم المناجم والجيوتكنولوجيا

و المكلف بانجاز أعمال بحث (مذكرة التخرج، مذكرة ماستر، مذكرة ماجستير، أطروحة دكتوراه)، عنوانها :

Evaluation technique de la revalorisation des rejets de déphosphatage
du minerai de phosphate comme additif dans la fabrication du
Ciment ordinaire.

أصرح بشرفي أنني ألتزم بمراعاة المعايير العلمية و المنهجية و معايير الأخلاقيات المهنية و النزاهة الأكاديمية

المطلوبة في انجاز البحث المذكور أعلاه.

التاريخ: 2026/06/04



04 جوان 2026

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

مؤسسة التعليم العالي : جامعة العربي التبسي - تبسة

تصريح شرفي
خاص بالالتزام بقواعد النزاهة العلمية لانجاز بحث

أنا الممضي أدناه،

السيد (ة) ن. احدي ندي الصفة : طالب، أستاذ باحث، باحث دائم : ط. (م.ب.ت.)

الحامل لبطاقة التعريف الوطنية رقم 110040364016430005 و الصادرة بتاريخ 25/10/2024
المسجل بمعهد الحنا جهم قسم الحنا جهم الجيو تكنولوجيا

و المكلف بانجاز أعمال بحث (مذكرة التخرج، مذكرة ماستر، مذكرة ماجستير، أطروحة دكتوراه)، عنوانها :

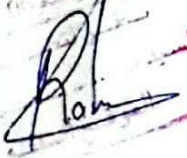
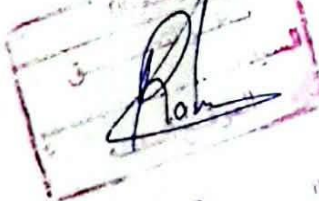
Evaluation technique de la revalorisation des rejets de
décaussierage du minéral de phosphate comme additif dans la
fabrication du ciment ordinaire.

أصرح بشرفي أنني ألتزم بمراعاة المعايير العلمية و المنهجية و معايير الأخلاقيات المهنية و النزاهة الأكاديمية

المطلوبة في انجاز البحث المذكور أعلاه.

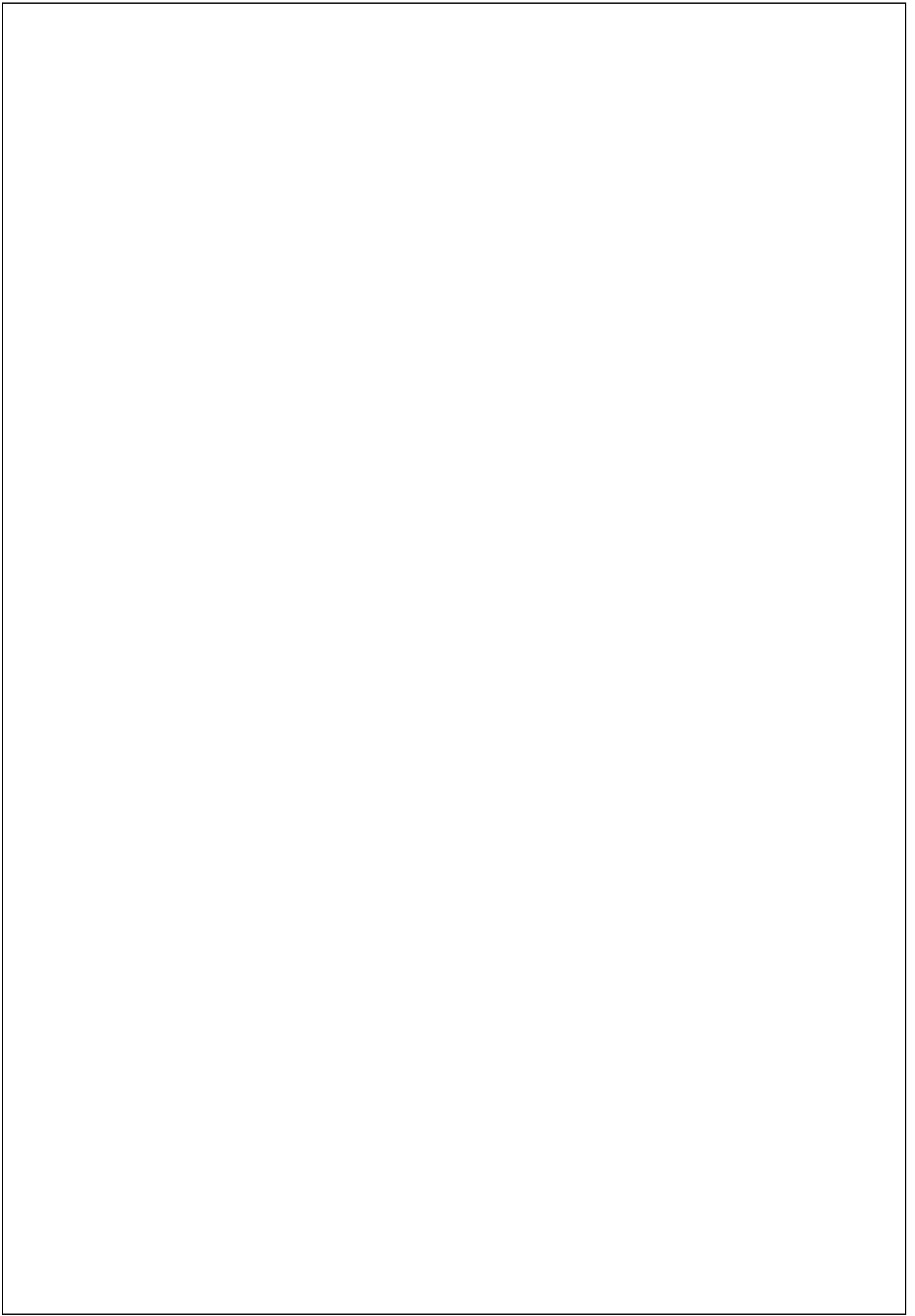
التاريخ: 04/06/2026

إمضاء الممضي (ة)

04 جوان 2026


عن رئيس المجلس العلمي
متصرف المجلس العلمي
سعددي نور الدين





استمارة رفع التحفظات بعد المناقشة

السنة الجامعية:

معلومات خاصة بطالب الماستر:

اسم ولقب المترشح:

..... Rami Neda -
.....
..... Ben Labiod Malak -
..... -

المذكرة:

عنوان

... Evaluation technique de la revalorisation des rejets
de dépeçage du minerai de phosphate comme additif dans la
fabrication du ciment ordinaire.

معلومات خاصة الأستاذ المناقش

..... Aouat Salim Mourad الاسم واللقب:
..... الرتبة:

بناء على التحفظات المسجلة أثناء مناقشة المذكرة:

.....
.....
.....

وبعد متابعة التعديلات والتصحيحات

أصرح بصفتي الأستاذ المناقش ، أن المذكرة قد استوفت شروط مناقشتها، وتؤهل صاحبها لتقديم ملفه للحصول
على شهادة الماستر.

..... Aouat Salim Mourad
.....

الأستاذ المناقش: (الاسم واللقب والإمضاء)



Graduation 2026



Remerciements

Nous remercions le Bon Dieu qui nous a donné le courage et la patience pour achever nos études.

Nous te souhaitons une carrière brillante et pleine de succès en tant que docteur. Nous dressons nos plus vifs remerciements à notre promoteur **Dr BOUZENZANA Abdellali** pour avoir dirigé ce travail, nous le remercions également, pour son aide effective et dont les conseils nous ont été très précieux.

Un grand merci à la plus adorable **Mlle BOUKHAMLIA Yousra**, pour avoir été une vraie source de motivation tout au long de notre stage et notre préparation du PFE. Ton aide précieuse et tes conseils éclairés nous énormément soutenu dans notre parcours

Nous tenons à remercier vivement l'ensemble des professeurs du département des mines et géotechnologies, qui nous ont enseignés ainsi que ceux qui ont contribué à notre formation au sein de notre institut

Au terme de notre stage vous tenons à exprimer notre reconnaissance et notre remerciements les plus sincères à **Mr MESSAOUD Abdelakil** chef de service de laboratoire de SCT de nous avoir accordé cette chance de pousser notre stage au sein de portement ainsi que louer son soutien .

Nous tenons ci remercier chaleureusement toute l'équipe de l'laboratoire notamment Mr BOUBAKKAR Salah. MR MECHRI Abdelaziz .MR BRAKNI Zidan et Mr HARKATI Marouane et pour leur précieuse aide et qui n'ont les de nous consacrer un portier de leur temps.

Nous remercions nos très chers parents, qui ont toujours été là pour nous.

Ce mémoire n'aurait pas été possible sans l'intervention, consciente, d'un grand nombre de personnes qui nos ont encouragés et soutenue de près ou de loin durant la réalisation de ce travail. Merci



Dédicace

À MOI-MÊME,

Pour avoir cru en moi quand tout semblait difficile. Pour chaque nuit blanche, chaque doute surmonté, chaque larme et chaque sourire à la fin d'une étape. Ce PFE est la première pierre de mon rêve. Merci à moi de ne jamais avoir abandonné...

À MES PARENTS,

À toi, mon père, mon pilier, qui as toujours été là pour me remonter et me pousser vers l'avant. À toi, ma mère, mon cœur, qui as prié pour moi à chaque instant. Ce travail est le vôtre avant d'être le mien. Je vous aime plus que les mots ne peuvent l'exprimer.

À MES FRÈRES AIMEN, DHIA ET IYED

Pour votre soutien silencieux, vos encouragements et votre présence à chaque fois que j'en avais besoin. Vous êtes ma force discrète et mon refuge.

À MON BINÔME NADA,

Avec qui j'ai partagé les doutes, les découvertes, les longues heures de travail et aussi les moments de fatigue. Merci d'avoir été à mes côtés, de m'avoir écoutée et épaulée. Sans toi, ce chemin aurait été plus lourd.

À MA SŒUR YOUSRA,

À toi qui as toujours su trouver les mots justes, qui as supporté mes absences et mes stress, et qui n'as jamais cessé de croire en moi. Merci d'être cette étoile dans ma vie.

Malak



Dédicace

Avant tout, je remercie Allah سبحانه وتعالى de m'avoir donné la force, la patience et le courage d'arriver jusqu'à ce jour. Alhamdoulillah pour chaque difficulté dépassée et chaque réussite accomplie.

À mes très chers parents,

aucun mot ne pourra exprimer ma gratitude pour votre amour, vos sacrifices et vos prières qui m'ont toujours portée vers le meilleur. Que Dieu vous protège et vous garde près de moi.

À mes chères sœurs Oumaima et Anfal,

merci d'avoir été une source de joie, de soutien et de réconfort dans les moments les plus difficiles.

À mon cher frère Mohamed Amine,

merci pour ta présence et ton soutien qui ont toujours compté pour moi.

Un remerciement tout particulier à ma binôme Malak,

mon amie d'enfance et ma compagne dans cette aventure. Merci pour ta patience, tes encouragements et tous les moments de fatigue et de joie que nous avons partagés ensemble. Je suis heureuse d'avoir vécu cette expérience à tes côtés et je te souhaite un avenir rempli de réussite et de bonheur.

À ma chère cousine Asma, qui m'a accompagnée par son aide, sa gentillesse et ses encouragements dans les moments importants de ce parcours. Je te remercie du fond du cœur pour ton soutien et ta bienveillance. Avec toute mon affection et ma gratitude.

Un grand merci également à ma chère amie **Rahil**, pour son soutien sincère, ses paroles réconfortantes et sa présence dans les moments où j'en avais le plus

Résumé :

Ce travail de fin d'études porte sur l'évaluation technique et économique de la valorisation des rejets de dépoussiérage du minerai de phosphate, issus du Complexe Minier de Djebel El Onk, comme additif dans la fabrication du ciment ordinaire à la Société des Ciments de Tébessa (SCT). Différentes formulations ont été préparées en incorporant des taux croissants de rejet de phosphate (5% à 30%) avec 5% de gypse fixe et du clinker. Les mélanges ont été caractérisés sur le plan physique, mécanique et chimique conformément à la norme NA 442 / EN 197-1. Les résultats obtenus montrent que le mélange contenant 15% de rejet de phosphate (M15) présente les meilleures performances, avec une résistance à la compression à 28 jours de 74,6 MPa, une expansion nulle et une composition chimique entièrement conforme aux exigences normatives, lui permettant d'être classé en CEM 52,5 R. L'évaluation économique démontre que cette substitution permet de réduire le coût de production du ciment de 95.2%, représentant une économie estimée à près de 4.1 milliards de DA par an pour la SCT. Cette étude confirme la faisabilité technique et l'intérêt économique de la valorisation de ce déchet industriel dans la filière cimentière.

Mots-clés : rejet de phosphate, ciment ordinaire, clinker, valorisation, norme NA 442, CEM 52,5 R, évaluation économique.

Abstract:

This final year project focuses on the technical and economic evaluation of the valorization of phosphate ore deducting rejects, generated at the Djebel El Onk Mining Complex, as an additive in ordinary cement manufacturing at the Tébessa Cement Company (SCT). Different formulations were prepared by incorporating increasing proportions of phosphate rejects (5% to 30%) with a fixed 5% gypsum content and clinker. The mixtures were characterized physically, mechanically and chemically in accordance with the NA 442 / EN 197-1 standard. The results show that the mixture containing 15% phosphate reject (M15) exhibits the best performance, with a 28-day compressive strength of 74.6 MPa, zero expansion and a chemical composition fully compliant with normative requirements, allowing it to be classified as CEM 52.5 R. The economic evaluation demonstrates that this substitution reduces cement production costs by 95.2%, representing an estimated saving of nearly 4.1 milliards DZD per year for SCT. This study confirms the technical feasibility and economic benefit of valorizing this industrial waste in the cement industry.

Keywords: phosphate reject, ordinary cement, clinker, valorization, NA 442 standard, CEM 52.5 R, economic evaluation.

ملخص

تناول هذه المذكرة التقييم التقني والاقتصادي لتنمين مخلفات إزالة الغبار من خام الفوسفات، المنتجة في المركب المنجمي تم تحضير خلطات مختلفة بإدراج نسب (SCT) لجبل العنق، كإضافة في تصنيع الإسمنت العادي في شركة إسمنت تبسة متزايدة من مخلفات الفوسفات (من 5% إلى 30%) مع نسبة ثابتة من الجبس تقدر بـ 5% والكلينكر. خضعت هذه الخلطات أظهرت النتائج أن الخلطة المحتوية على NA 442 / EN 197-1 لتوصيف فيزيائي وميكانيكي وكيميائي وفقاً للمعيار تمتلك أفضل الخصائص، إذ بلغت مقاومة الضغط عند 28 يوماً 74,6 ميغاباسكال، (M15) 15% من مخلفات الفوسفات وأثبت CEM 52,5 R مع تمدد معدوم وتركيب كيميائي مطابق تماماً للمتطلبات المعيارية، مما يجعلها تُصنّف ضمن الفئة CEM 52,5 مقارنةً بسعر بيع إسمنت 95,2% التقييم الاقتصادي أن هذا الإحلال يُتيح تخفيض تكلفة إنتاج الإسمنت بنسبة تؤكد هذه الدراسة الجدوى. مليار دينار جزائري 4,1 المُنْتَج من طرف الشركة، أي ما يعادل توفيراً سنوياً يُقدَّر بأكثر من R التقنية والاقتصادية لتنمين هذه المخلفات الصناعية في قطاع الإسمنت.

، التقييم CEM 52,5 R، NA 442 مخلفات الفوسفات، الإسمنت العادي، الكلينكر، التثمين، المعيار : الكلمات المفتاحية الاقتصاد

TABLE DES MATIERES :

INTRODUCTION GENERALE :	1
--------------------------------	----------

Chapitre01 :

Recherche bibliographique sur le ciment et Situation géologique de la société de ciment d'EL MALABIOD

I. INTRODUCTION :	4
II. GENERALITES SUR LE CIMENT	4
1. Historique et évolution du ciment	4
2. Composition et Types de ciments :	6
3. La production du ciment dans le monde :	7
4. Mode d'emploi :	7
III. LA SOCIETE DES CEMENTS D'EL MA LABIOD :	7
1. Localisation géographique de la société :	7
2. Historique de la société :	8
3. Géologie régionale :	9
4. Topographie :	10
IV. DESCRIPTION DES GISEMENTS :	10
1. Géologie de gisement d'argile DRAA-EL-BAHI :	10
2. Géologie de gisement de calcaire D'EL MAL LABIOD :	12
3. Le sable :	13
4. Le minerai de Fer	14
5. Le gypse :	16
V. CONCLUSION	17

Chapitre02 :

Préparation de la matière première et Fabrication du ciment

I. INTRODUCTION :	19
II. PRINCIPE DE FABRICATION :	20
III. L'EXTRACTION DES MATIERES PREMIERES :	20
1. Carrières du calcaire :	21
2. Carrière d'argile :	22
• Concasseur à cylindre :(conasseur argile)	25
• Concasseur à marteau double rotor:(conasseur ajouts)	26
V. PRE-HOMOGENEISATION :	26

VI. STOCKAGE :	27
VII. DOSAGE ET BROyage CRU	29
Dosage :	29
VIII. CUISSON	31
IX. L'HOMOGENEISATION :	31
X. LE DEPOUSSIERAGE :	31
XII. LA CLINKERISATION :	33
XIII. LE REFROIDISSEMENT :	33
XIV. LE TRANSPORT DU CLINKER :	33
XV. L'ALIMENTATION DU BROyEUR DU CIMENT :	33
XVI. LE BROyAGE DU CIMENT :	34
XVII. STOCKAGE DU CIMENT :	35
XVIII. LA SALLE DE CONTROLE ET LE CONTROLE DE QUALITE :	36
XIX. CONDITIONNEMENT ET EXPEDITION :	36
XX. CONCLUSION :	37

Chapitre 03 :

Aperçu sur le Complexe Minier de Djebel El Onk

I. INTRODUCTION :	40
II. STRUCTURE DE L'ENTREPRISE :	40
III. GEOLOGIE REGIONAL DJEBEL ONK :	40
1. LA SITUATION GEOGRAPHIQUE REGIONALE DU GISEMENT	40
2. GEOLOGIE DU GISEMENT DANS LA REGION :	41
III. STRATIGRAPHIE :	42
IV. LES TENEURS :	43
V. COMPOSITIONS MINERALOGIQUES DE MINERAI PHOSPHATE DE DJEBEL ONK :	43
VI. RESERVES GEOLOGIQUES :	44
VII. CONDITION MINIERE D'EXPLOITATION DU MINERAI DE PHOSPHATE DE DJEBEL EL ONK :	44
VII. TRAITEMENT DE PHOSPHATE :	46
1. Préparation mécanique :	46
1.2. Broyage :	46

1.3.Criblage :	47
2 Traitement par voie humide (Débourbage) :	48
2.1.Débourbage :	48
2.2.Séchage	49
3.Traitement par voie sèche (Dépoussiérage).....	50
3.1.Séchage à lit fluidisé	50
3.2.Criblage à 2mm.....	50
3.3.Broyage à attrition.....	50
Echantillonnage au niveau de chaine de traitement :	53
Préparation des échantillons :	53
IX. METHODES D'ANALYSES CHIMIQUES :	56
2.Dosage du P_2O_5 par la méthode spectrophotométrie automatique (Auto analyseur Technico)	57
3.Dosage du Magnésium MgO par la méthode par absorption atomique.....	60
X. Production des rejets	62
XI. LES REJETS DE LA STATION DE TRAITEMENT :	63
XII. Impact environnementale et gestion des rejets :	63
X. Conclusion :	65

chapitre4: Revalorisation des rejets de dépoussiérage du minéral de phosphate comme additif dans la fabrication du ciment ordinaire

I. INTRODUCTION :	67
II. CARACTERISATION DES MATIERES PREMIERES UTILISEES : ..	67
1.Le clinker :	67
2.Le gypse :	69
3.Le rejet de phosphate :	69
III. PREPARATION DES MELANGES :	73
IV. ANALYSES PHYSIQUES DE CIMENT :	75
1.Détermination de la consistance normale de la pâte de ciment : ..	75
2.Détermination de temps de début de prise de ciment :	78
3.Détermination de l'expansion ciment :	82
V. ESSAIS MECANIQUES DE CIMENT :	83

4.Résistance à la flexion :	87
5.Résistance à la compression :	90
VI. ANALYSE CHIMIQUE DE CIMENT :	93
1.Analyse par les rayons x :	93
2.La perte au feu	97
VII. CHOIX DU DOSAGE OPTIMAL EN REJET DE PHOSPHATE (EVALUATION TECHNIQUE SELON LA NORME NA 442) :	98
VIII. CLASSIFICATION DU CIMENT OPTIMAL M15 SELON LES EXIGENCES MECANQUES ET PHYSIQUES DE LA NORME NA 442 : 99	
IX. EVALUATION ECONOMIQUE DE L'INCORPORATION DE 15% DE REJET DE PHOSPHATE DANS LA FABRICATION DE CIMENT :	100
1.Calcul du prix de revient du clinker (base annuelle SCT)	100
2.Composition et coût par tonne de ciment M15 :	101
3Comparaison économique du produit 52.5R et M15 :	101
X. DOMAINE D'UTILISATION DU CIMENT M15 :	101
XI. CONCLUSION :	102
CONCLUSION	1
GENERALE	1
Références bibliographique :	1

Liste des tableaux

Tableau 1:Type de ciment et leurs compositions	6
Tableau 2:production mondiale du ciment	7
Tableau 3:CARACTÉRISTIQUE d'argile (composition chimique)	11
Tableau 4:composition chimique du gisement de calcaire d'el ma labiod	13
Tableau 5:fiche d'analyse du sable (composition chimique).....	14
Tableau 6:fiche d'analyse de Minerai fer (composition chimique)	15
Tableau 7:fiche d'analyse de gypse(composition chimique).....	16
Tableau 8:caractéristiques techniques du concasseur à marteau.....	24
Tableau 9:Hall de stockage	28
Tableau 10:composition minéralogiques du minerai de phosphate de djebel el onk[18]	43
Tableau 11:Réserve géologique et qualité du phosphate dans la zone de keff essenoun[15]..	44
Tableau 12:Fiches technique de la chargeuse CATERPILAR 986H.....	45
Tableau 13:composition chimique du clinker	68
Tableau 14:composition chimique du gyps (%).....	69
Tableau 15:analyse granulométrique du rejet de phosphate	72
Tableau 16:composition chimique de phosphate	73
Tableau 17:tableau de composition.....	74
Tableau 18:résultats de consistances normale des mélanges	77
Tableau 19:résultats de temps de début de prise	81
Tableau 20: tableau comparative de l'expansion du ciment CPG et du mélange avec phosphate	83
Tableau 21:Tableau de l'évolution de la résistance à la flexion des mélanges	89
Tableau 22:Tableau de l'évolution de la résistance à la compression des mélanges	91
Tableau 23:Analyse chimique par fluorescence X des échantillons de ciment	93
Tableau 24:les résultats de la perte au feu des différents mélanges.....	98
Tableau 25:Tableau des classes de résistance du ciment selon la norme EN 197-1/442	99
Tableau 26:Vérification de la conformité du mélange M15 aux exigences de la classe 52,5 R	99
Tableau 27:Tableau de calcul du prix de revient des matières du clinker (base annuelle SCT)	100
Tableau 28:composition et cout par tonne de ciment M15	101
Tableau 29: comparaison économique	101

Liste des graphiques :

Graphique 1: Résultat de consistance normale des mélanges	78
Graphique 2: Résultat de temps de début de prise des mélanges	81
Graphique 3: Résultat de résistance a la flexion des éprouvettes	89
Graphique 4:Résultat de résistance a la compression des éprouvettes.....	92
Graphique 5: Développement de pourcentage de SiO_2 / Al_2O_3 / FeO_2 et MgO	95
Graphique 6:Développement du pourcentage de CaO dans les mélanges	96
graphique 7: Développement du pourcentage de K_2O / Na_2O / SO_3 ET Cl	97

Liste des figures :

Figure 1 :Localisation géographique de la société	9
Figure 2 :Représentation de la plaine d'El Ma Labiod par Google earth	10
Figure 3 : carrière d'argile	11
Figure 4:carrière de calcaire	12
Figure 5:stock de sable	14
Figure 6:stock de fer.....	15
Figure 7: le gypse	16
Figure 8 :Procèdes de fabrication de ciment	20
Figure 9:chargement et transport du calcaire	21
Figure 10:concasseur à marteau	24
Figure 11 : concasseur à cylindre	25
Figure 12 :Méthode de stockage en strates .Collecteur à portique	27
Figure 13 : broyeur à boulet type TIRAX UNIDAN	30
Figure 14 :broyage de cru avec broyeur à boulet	31
Figure 15: le four de calcination.....	32
Figure 16:cycle de fabrication de ciment	35
Figure 17:silos de stockage ciment	36
Figure 18:l'expédition du ciment	37
Figure 19:Carte de situation géographique et géologique des gisements Djebel El Onk[13]	41
Figure 20: carte géologique de Djebel el Onk.....	42
Figure 21:tir d'un gradin minéral coté nord-ouest (27/11/2023 12:47)	45
Figure 22:chargeuse CATERPILAR 98	46
Figure 23: Opération de quartage.....	54
Figure 24:l'étuve.....	55
Figure 25:le broyeur de type "Retsch"	56
Figure 26:la méthode spectrophotométrie automatique	60
Figure 27:méthode d'absorption atomique	62
Figure 28:clinker utilisée.....	68
Figure 29 : photo présentatif du rejet de phosphate utilisé.....	71
Figure 30:diviseur automatique.....	72
Figure 31 :matière première préparé	73
Figure 32 : broyeur à boulet de laboratoire	74
Figure 33: mélanges préparées	75
Figure 34 :préparation du moule	76
Figure 35 : vérification de la consistance normale du ciment	77
Figure 36:détermination du temps de prise de ciment.....	80
Figure 37:détermination de l'expansion du ciment.....	83
Figure 38:procédé du malaxage	85
Figure 39:moulage des éprouvettes	86
Figure 40 :démoulage des éprouvettes	87
Figure 41:machine a flexion.....	88
Figure 42:machine a compression	91
Figure 43:analyse chimique par fluorescence X	93

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. 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) 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)

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 La production annuelle de cette matière est 2,3 à 2,5 millions de tonnes de minerais titrant entre 25 à 26% en P2O5 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 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.

Les stériles sont économiquement exploitables puisqu'ils sont riches en P2O5 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, SiO2).

Le présent document portant sur "L'évaluation technique de la revalorisation des rejets de dépoussiérage du minerai de phosphate comme additif dans la fabrication du ciment ordinaire." est structuré en cinq chapitres comportant une introduction générale et une conclusion générale.

- Le premier chapitre est consacré à une recherche bibliographique sur le ciment ainsi que le cadre géologique de la société des ciments d'El Ma Labiod.
- Le deuxième chapitre contient une étude descriptive du processus industriel, qui consiste à analyser le circuit de préparation des matières premières. Ainsi, les différentes étapes de la fabrication du ciment au niveau de la cimenterie d'El Ma Labiod sont présentées et expliquées afin de comprendre le fonctionnement opérationnel du site.
- Le troisième chapitre présente un aperçu général sur le Complexe Minier de Djebel Onk et son gisement phosphaté.
- Le quatrième chapitre est dédié à la partie expérimentale. Il porte sur l'échantillonnage et la caractérisation des stériles de phosphate de Djebel Onk par diverses analyses. Il englobe également la préparation et la caractérisation des matériaux de base, leur mélange avec des pourcentages bien étudiés, ainsi que les essais d'analyse pour vérifier l'efficacité de cette étude qui présente notre projet .

Chapitre01 :

Recherche bibliographique sur le ciment et Situation géologique de la société de ciment d'EL MALABIOD

I. INTRODUCTION :

Ce chapitre constitue une base théorique essentielle pour la compréhension de cette étude. Il a pour objectif de présenter les notions générales relatives au ciment, notamment sa définition, ses propriétés, son évolution historique ainsi que ses différents types. Il comprend également une présentation de la cimenterie d'El Ma Labiod, en mettant en évidence sa localisation, son historique et ses capacités de production. Par ailleurs, une attention particulière est accordée au cadre géologique de la région, à travers l'étude de la géologie régionale, de la topographie et des principaux gisements des matières premières utilisées dans l'industrie cimentière. L'ensemble de ces éléments permet de mieux situer le contexte général de ce travail et de préparer la compréhension des chapitres suivants.

II. GENERALITES SUR LE CIMENT

Le ciment est une matière pulvérulente formant avec l'eau ou avec une solution saline une pâte plastique liante capable d'agglomérer, en durcissant des substances variées. Son emploi le plus habituel est sous forme de poudre utilisée avec de l'eau pour agréger du sable et des graviers (granulats) pour donner le béton. Comme définition physique, le ciment est un liant hydraulique se présentant sous forme de poudre fine qui est à base de calcaire et d'argile utilisé qui fait prise par ajouts d'eau. Il durcit rapidement et atteint en peu de jours son maximum de résistance. Après durcissement, cette pâte conserve sa résistance et sa stabilité, même sous l'eau. D'un point de vue minéralogique, le ciment peut être défini comme un mélange d'oxyde basique, CaO noté C, et d'oxydes acides ou amphotères comme SiO₂, noté S, AL₂O₃ noté A, ou Fe₂O₃ noté F, en notation cimentaire. [1]

1. Historique et évolution du ciment

Les ciments auraient en premier lieu été découverts par les Égyptiens puis perfectionnés par les civilisations suivantes, tels que les Mayas et les chinois, par l'utilisation de chaux obtenue par cuisson de roches calcaires, suivie d'une extinction à l'eau. Les Grecs d'Italie le renforcèrent avec des cendres pouzzolaniques (cendres volcaniques de la région de Pouzzoles), usage repris et généralisé par les Romains.

Jusqu'au XVIII^{ème} siècle, aucun progrès ne s'est fait. En 1756, afin de réparer le phare d'Eddystone de façon durable, l'ingénieur britannique John Smeaton entreprit des expériences avec des mortiers en eau douce et en eau salée, il découvrit ainsi que du ciment fait de pierre calcaire contenant une forte proportion d'argile durcissait sous l'eau.

En 1817, le Français Louis Vicat, en étudiant scientifiquement et non plus de manière empirique, comme ses prédécesseurs, les propriétés des chaux hydrauliques, découvrirent les principes chimiques des ciments et définit leurs règles de fabrication, il élabore la théorie de l'hydraulicité et fait connaître le résultat de ses recherches concernant la proportion d'argile et la température de cuisson.

Il donne des indications précises sur les proportions de calcaire et de silice nécessaires pour constituer le mélange qui, après cuisson à la température convenable et broyage, sera un véritable liant hydraulique fabriqué industriellement : le ciment artificiel. L'industrie du ciment était née.

L'Anglais Joseph Aspdin fait breveter en 1824 le ciment "Portland", obtenu à partir d'un procédé de calcination combinant la cuisson de calcaire et d'argile dans des fours alimentés au charbon. La dénomination "Portland", due simplement à la similarité de couleur et de dureté avec la pierre de Portland (Sud de l'Angleterre), est à l'heure actuelle toujours employée dans l'industrie. En 1828, Louis Vicat réalise un pont suspendu en ciment, au-dessus de la Corrèze, à Argentat, qui démontre la qualité de son matériau.

Dans les années qui suivent, Vicat parcourt la France afin de découvrir plus de trois cents carrières capables de fournir ces chaux hydrauliques et il publie les listes dans les Annales des Ponts et Chaussées. Mais il faut attendre 1840, et la découverte des principes d'hydraulicité des ciments lents (dits actuellement ciments Portland) toujours par Louis Vicat (société Vicat) - une cuisson à la température de fusion pâteuse soit 1450 °C qui permet d'obtenir le clinker - pour voir une réelle fabrication de ces ciments modernes et apparaître ensuite une architecture de béton coffré puis béton armé. En France, un polytechnicien, Pavin de Lafarge, installe des fours à chaux au Teil, en 1833, la première usine de ciment a été créée par Dupont et Demarle en 1848 à Boulogne-sur-Mer.

La production industrielle de ciment débute alors dans la première moitié du XIXème siècle. Le développement n'a pu se faire que grâce à l'apparition de matériels nouveaux : four rotatif et broyeur à boulets en particulier. Le premier composant du béton est donc opérationnel à la fin de la première moitié du XIXème siècle. Les procédés de fabrication se perfectionnèrent sans cesse, en 1870, pour produire une tonne de clinker (constituant de base du ciment) il fallait 40 heures, actuellement, il faut environ 3 minutes. [2]

2. Composition et Types de ciments :

Tableau 1: Type de ciment et leurs compositions

Principaux types	Notation des 27 produits (types de ciment courant)		Composition (pourcentage en masse)										Constituants secondaires
			Constituants principaux										
			Clinker K	Laitier de haut fourneau S	Fumée de silice D	Pouzzolanes		Cendres volantes		Schiste calciné T	Calcaire		
Naturelle P	Naturelle calcinée Q	Silicieuse V				Calcaïque W	L	LL					
CEM I	Ciment Portland	CEM I	95-100	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
	Ciment Portland au laitier	CEM II/A-S	80-94	6-20	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
		CEM II/B-S	65-79	21-35	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
	Ciment Portland à la fumée de silice	CEM II/A-D	90-94	—	6-10	—	—	—	—	—	—	—	0-5
	Ciment Portland à la pouzzolane	CEM II/A-P	80-94	—	—	6-20	—	—	—	—	—	—	0-5
		CEM II/B-P	65-79	—	—	21-35	—	—	—	—	—	—	0-5
		CEM II/A-Q	80-94	—	—	—	6-20	—	—	—	—	—	0-5
		CEM II/B-Q	65-79	—	—	—	21-35	—	—	—	—	—	0-5
CEM II	Ciment Portland aux cendres volantes	CEM II/A-V	80-94	—	—	—	—	6-20	—	—	—	—	0-5
		CEM II/B-V	65-79	—	—	—	—	21-35	—	—	—	—	0-5
		CEM II/A-W	80-94	—	—	—	—	—	6-20	—	—	—	0-5
		CEM II/B-W	65-79	—	—	—	—	—	21-35	—	—	—	0-5
	Ciment Portland au schiste calciné	CEM II/A-T	80-94	—	—	—	—	—	—	6-20	—	—	0-5
		CEM II/B-T	65-79	—	—	—	—	—	—	21-35	—	—	0-5
	Ciment Portland au calcaire	CEM II/A-L	80-94	—	—	—	—	—	—	—	6-20	—	0-5
		CEM II/B-L	65-79	—	—	—	—	—	—	—	21-35	—	0-5
		CEM II/A-LL	80-94	—	—	—	—	—	—	—	—	6-20	0-5
		CEM II/B-LL	65-79	—	—	—	—	—	—	—	—	21-35	0-5
	Ciment Portland composé	CEM II/A-M	80-94	← 6-20 →									0-5
		CEM II/B-M	65-79	← 21-35 →									0-5
CEM III	Ciment de haut fourneau	CEM III/A	35-64	36-65	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
		CEM III/B	20-34	66-80	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
		CEM III/C	5-19	81-95	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
CEM IV	Ciment pouzzolanique ^{c)}	CEM IV/A	65-89	—	← 11-35 →					—	—	—	0-5
		CEM IV/B	45-64	—	← 36-55 →					—	—	—	0-5
CEM V	Ciment composé ^{c)}	CEM V/A	40-64	18-30	—	← 18-30 →			—	—	—	—	0-5
		CEM V/B	20-38	31-50	—	← 31-50 →			—	—	—	—	0-5

- CEM I - Ciment Portland (CPA dans la notation française) : contient au moins 95% de clinker et au plus 5% de constituants secondaires
- CEM II - Ciment Portland composé (CPJ) : contient au moins 65% de clinker et au plus 35% d'autres constituants : laitier de haut-fourneau, fumée de silice, pouzzolane naturelle, cendres volantes, calcaires.
- CEM III - Ciments de haut fourneau (CHF)- Riche en laitier, il présente une bonne résistance aux milieux agressifs.
- CEM IV -Ciment pouzzolanique (CPZ)- Contient des matériaux pouzzolanique naturels ou artificiels.
- CEM V –Ciment au laitier et aux cendres) [3]

3. La production du ciment dans le monde :

Tableau 2:production mondiale du ciment .

	Pays	Production (Million de tones)	Part mondiale (%)
1	Chine	1 900	47,5 %
2	Indie	450	11,3 %
3	Vietnam	110	2,8 %
4	États-Unis	86	2,2 %
5	Turquie	82	2,1 %
6	Iran	72	1,8 %
7	Brésil	68	1,7 %
8	Indonésie	65	1,6 %
9	Russie	65	1,6 %
10	Égypte	50	1,2 %
-	Autres pays	860	21,5 %
-	Total mondial	4 000	100 %

4. Mode d'emploi :

Les utilisations principales du ciment sont résumées ci-dessous :

- Béton armé pour les structures.
- Remplissage, murs.
- Béton, béton expansé, parpaings, éléments préfabriqués.
- Revêtement et sols : enduits ciments, panneaux, carreaux de ciment.
- Canalisations : buses ciment, tubes et plaques en amiante ciment. [4]

III. LA SOCIETE DES CEMENTS D'EL MA LABIOD :

1. Localisation géographique de la société :

L'unité de production est destinée à produire et vendre du Ciment Portland composé CPJ-CEM II/A 42,5 et du Ciment spécial « Ciment résistant aux sulfates » ou Ciment Portland

CPA-CEM I/ 42,5 ES, avec une capacité annuelle de 525 000 tonnes/an. L'unité de production, appelée la Cimenterie d'El-Ma Labiod, est située à 26 km au sud de Tébessa sur la Route Nationale n°16. Elle se trouve à proximité (100 mètres) de la ligne de chemin de fer « Djebel Onk — Tébessa — Annaba ». La cimenterie utilise une ligne technologique par voie sèche. Elle est équipée d'un système de conduite entièrement automatisé et d'un système de gestion technique et administratif informatisé. [5]

2. Historique de la société :

La Société des Ciments de Tébessa, Entreprise Publique Économique (EPE/Spa), est une filiale créée initialement entre trois entreprises de ciment : ERCE (60%), ERCO (20%) et ECDE (20%). Elle a été rachetée à 100% par le groupe ERCE en 1997.

Actuellement, elle appartient au groupe GICA (Groupe Industriel des Ciments d'Algérie).

- Date de creation: 28 November 1993.
- Capital Social (KDA) : 800 000 à la création, recapitalisé à 1 200 000 en 1997 et à 2 700 000 en 2002.
- Siège Social : Rue BELKACEMI Youcef, Tébessa.
- Produit: Ciment Gris.
- Capacité : 525 000 tonnes de CPA.
- Équipement : Système de conduite, supervision et pilotage entièrement automatisé et système de gestion technique et administrative informatisé

Mise en service :

Allumage du four : 11 octobre 1994.

Production du premier Clinker : 14 octobre 1994.

Production du premier Ciment : 12 janvier 1995.

Première expédition : 12 mars 1995. [5]

Aperçu géographique :

La plaine d'El Ma Labiod est située au Nord-Est du pays, à la frontière Alger-Tunisienne. Elle se trouve dans les hauts plateaux, à une vingtaine de kilomètres au Sud de la wilaya de Tébessa. Cette plaine couvre une superficie de 478 km² , d'une altitude moyenne variant entre 1200 et 1400 mètres. Elle se présente comme une dépression carrée limitée par un cadre montagneux :

Au Nord : par la plaine de Tébessa avec les monts de Djebel Bouramane et Djebel Doukkane.

Au Sud : par Djebel Boudjellal et Djebel Ed-dalaa. À l'Est : par la frontière Algéro-Tunisienne.

À l'Ouest : par Djebel Er-rouisset et Deaa Douamiss.[6]



Figure 1 :Localisation géographique de la société

3. Géologie régionale :

La région d'El Ma Labiod est située à la limite de la frontière Algéro-Tunisienne et fait partie de l'Atlas saharien. Les reliefs y sont contrastés, constitués essentiellement par des massifs calcaires allongés selon un axe SW-NE, séparés par une dépression (plaine cultivée d'El Ma Labiod) d'âge Mio-Quaternaire. Cette structure est due aux phases tectoniques ayant affecté la région. Sur le plan hydrologique, la limite Nord constitue une ligne de partage des eaux entre deux grands bassins versants :

1. Celui de la **Medjerda** qui s'écoule vers le Nord.
2. Celui de Chott **Melghir** qui s'écoule vers le Sud.

La cuvette sédimentaire du sous bassin versant d'El Ma Labiod est constituée de :

Dépôts de type épicontinental avec variation de faciès et d'épaisseur ayant une direction SW-NE (allant de l'Aptien jusqu'au Maastrichtien).

Grès et argiles bariolées de la base du Miocène.[6]

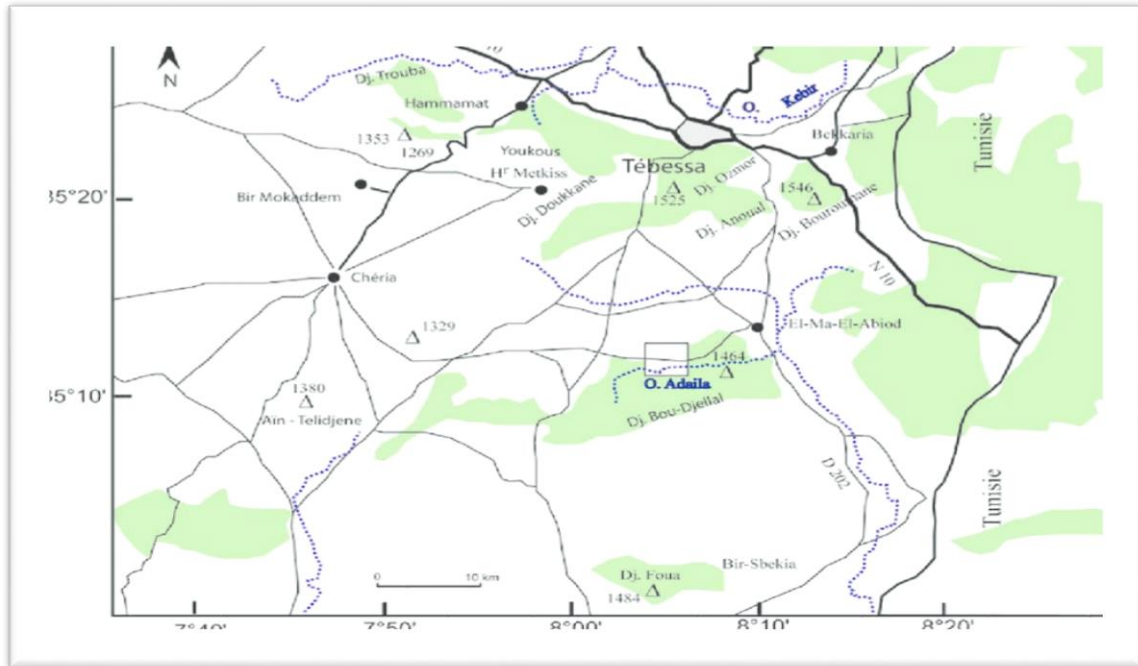


Figure 2 : Représentation de la plaine d'El Ma Labiod par Google earth

4. Topographie :

La région d'El Ma Labiod présente une allure de cuvette, son altitude varie entre 1050 (au centre de la cuvette) et 1300m (le sommet le plus haut de la région) et de DOUKKANE situé au nord et qui présente une altitude de (1712m) La partie centrale de la région est constituée d'une plaine enserrée par des montagnes escarpées au nord et au sud. Il est à noter qu'il existe quelques coteaux remarquables dans l'axe parallèle à la route nationale au sud de l'amont d'Oued El Goussa, leur hauteur relative est comprise entre 10 et 20m. Environ, par rapport à la cuvette. Il s'agit probablement de la remontée des couches imperméables (Marnes). [6]

IV. DESCRIPTION DES GISEMENTS :

1. Géologie de gisement d'argile DRAA-EL-BAHI :

L'argile : désigne une matière rocheuse naturelle à base de silicates ou d'aluminosilicates hydratés de structure lamellaire, provenant en général de l'altération de silicates à charpente tridimensionnelle, tels que les feldspaths..., L'argile est le plus ancien matériau minéral utilisé par l'homme pour la construction, la poterie, la fabrication de briques, de tablettes pour l'écriture, le façonnage de statuettes, de masques.

Localisation : Le gisement de DRAA-EL-BAHI est stratégiquement situé pour l'approvisionnement de la cimenterie. Il se trouve à environ 18 km au Sud-Ouest de la ville de Tébessa. L'accès principal se fait via la Route Nationale n°16 (RN16) sur une distance d'environ 15 km. La liaison logistique entre la carrière et l'usine est assurée par un trajet

moyen de 18 km (aller-retour), ce qui facilite le transport régulier de la matière première.



Figure 3 : carrière d'argile

Tableau 3:Caractéristiques d'argile (composition chimique)

ELEMENTS	Teneur %
SiO ₂	54.82
Al ₂ O ₃	13.82
Fe ₂ O ₃	6.15
CaO	7.95
MgO	1.77
K ₂ O	1.57
Na ₂ O	0.26
SO ₃	0.21
Cl	0.017
PAF	12.58

Interprétation des résultats :

L'analyse de cet échantillon met en évidence une composition argileuse complexe :

Composants Majeurs : La présence de 54,82 % de SiO₂ et 13,82 % d'Al₂O₃ confirme la nature alumino-silicatée du matériau.

Oxydes Fondants : Le taux de fer (Fe₂O₃ : 6,15 %) est notable, ce qui donnera une coloration rouge après cuisson. La présence de chaux (CaO : 7,95 %) indique une argile légèrement calcaire.

Phase Volatile : La Perte Au Feu (PAF : 12,58 %) est importante ; elle correspond au départ de l'eau liée aux minéraux argileux et à la décomposition des carbonates.

Autres Éléments : Les faibles teneurs en MgO et K₂O indiquent la présence possible de minéraux accessoires comme les micas ou les illites.

Il s'agit d'une argile silico-alumineuse contenant des impuretés ferreuses et calcaires. Ses caractéristiques sont favorables pour la fabrication de produits de terre cuite (briques, tuiles) ou comme additif dans l'industrie des liants.

2. Géologie de gisement de calcaire D'EL MAL LABIOD :

Calcaire :

Le calcaire est une roche sédimentaire facilement soluble dans l'eau et qui se compose principalement de calcite ou carbonate de calcium (CaCO₃) (au moins 50%) et de carbonate de magnésium (MgCO₃). Suivant sa localisation, le calcaire peut également contenir de la dolomite et de l'argile (aragonite ou marne)

Localisation :

Le calcaire est la matière première la plus utilisée dans la cimenterie ; il entre dans la composition du mélange cru une proportion de 72 à 75%. Le gisement de calcaire D'EL MAL LABIOD est situé à 10 Km environ de celui de l'argile DRAA-EL-BAHI et au bord de la route nationale N° 16. Moins de deux kilomètres le séparent de village du El Ma LABIOD



Figure 4:carrière de calcaire

Tableau 4: Caractéristiques de calcaire d'el ma labiod

ELEMENTS	Teneur%
SiO ₂	2.26
Al ₂ O ₃	1.52
FeO ₃	0.19
CaO	53.19
MgO	0.39
K ₂ O	0.08
Na ₂ O	0.01
SO ₃	0.25
Cl	0.01
PAF	42.02

Interprétation des résultats :

Les résultats de l'analyse chimique de l'échantillon de calcaire révèlent les points suivants :

Richesse en Carbonate : Avec une teneur en CaO de 53,19 % et une PAF de 42,02 %, nous avons un calcaire très pur. Cela correspond à environ 95 % de CaCO₃.

Faible taux d'impuretés : Les teneurs en silice (SiO₂ : 2,26 %) et en alumine (Al₂O₃ : 1,52 %) sont faibles, ce qui indique que le calcaire est peu argileux.

Qualité minéralogique : La faible présence d'oxyde de fer (0,19 %) et de magnésie (0,39 %) confirme qu'il s'agit d'un calcaire blanc et non dolomitique.

Ce calcaire présente une excellente qualité chimique. Il est conforme aux exigences industrielles pour être utilisé comme matière première (cimenterie ou granulats).

3. Le sable :

Le gisement est constitué par des grès tendres friables. On y rencontre des petites intercalations de grès de 5 à 10cm d'épaisseur qui sont généralement des concrétions de cristaux de quartz hétéro granulaires fortement cimenté avec une matrice gréseuse. La couleur de grès est très variable. Ils sont fins à grossiers. Au sein de ces bancs de grès on note la présence de quelques intercalations d'argile sableuse, de sable argileux ou alternance sable et argile. Ces grès présentent une stratification entrecroisée typique avec alternance de lits à granulométries diverses allant de très grossier à fin. [10]



Figure 5:stock de sable

Le sable est une roche sédimentaire, meuble composée de grains quartzeux. Sa composition chimique est très riche en oxyde de silicium SiO_2 . L'ajout du sable est dans le cas où il y'a un manque de silice dans le mélange cru.

Tableau 5:fiche d'analyse du sable (composition chimique)

Eléments	Teneur %
SiO_2	91.83
Al_2O_3	2.04
Fe_2O_3	0.52
CaO	2.05
MgO	0.04
K_2O	0.76
Na_2O	0.01
SO_3	0.18
Cl	0.005
PAF	2.42

Interprétation des résultats :

L'analyse montre que l'échantillon est composé majoritairement de silice, avec les observations suivantes :

Prédominance de la Silice : Avec 91,83 % de SiO_2 ce matériau est classé comme un sable siliceux de haute teneur.

Faibles impuretés : Les taux d'alumine (2,04 %) et d'oxyde de fer (0,52 %) sont bas, ce qui témoigne d'une bonne pureté minéralogique.

Stabilité chimique : La Perte Au Feu (PAF : 2,42 %) est très faible, confirmant la stabilité du matériau et l'absence de matières organiques ou de carbonates importants.

Traces d'alcalins : Les teneurs en CaO , MgO et K_2O sont minimales, ce qui limite les risques de réactivité chimique.

C'est un matériau à haute teneur en silice, idéal pour une utilisation dans la fabrication du béton, du verre ou comme fondant dans certains procédés industriels.

4. Le minerai de Fer

Le minerai de fer est une roche contenant du fer, généralement sous forme d'oxydes (Hématite), L'ajout de cet élément est dans le but d'apporter un plus d'oxyde de fer (Fe_2O_3)

dans le mélange cru, Les minerais de fer ont une teneur en fer variable selon le minéral ferrique, sachant également que l'isomorphisme, presque toujours présent dans les minéraux naturels. Les principaux minerais de fer sont des sulfures, des carbonates et des oxydes.

Exemples : Magnétite (Fe_3O_4), Pyrite (FeS_2). [12]

A partir du gisement de SOMIFER de Conget Bekkaria.



Figure 6:stock de fer

Tableau 6:fiche d'analyse de Minerai fer (composition chimique)

ELEMENTS	Teneur %
SiO_2	29.27
Al_2O_3	9.52
Fe_2O_3	41.47
CaO	3.69
MgO	1.33
K_2O	0.64
Na_2O	0.01
SO_3	0.83
Cl	0.015
PAF	10.83

Interprétation des résultats :

Teneur en Fer : La prédominance de Fe_2O_3 (41,47 %) confirme que l'échantillon est un minerai de fer. Cette teneur est caractéristique d'un minerai pauvre à moyen (type hématite ou goethite mélangée).

Composition de la Gangue : Le taux de silice est élevé (SiO_2 : 29,37 %), ce qui indique une gangue quartzeuse importante. L'alumine (Al_2O_3 : 9,52 %) suggère également la présence d'une fraction argileuse.

Perte au Feu (PAF) : La valeur de 10,83 % indique la présence probable d'hydrates (comme dans la goethite) ou de traces de carbonates.

Éléments Mineurs : Les faibles teneurs en CaO, MgO et alcalis montrent que la gangue est principalement acide.

Il s'agit d'un minerai de fer silico-alumineux. Bien que le taux de fer soit modéré, ce matériau peut être valorisé après une étape de concentration (enrichissement) pour réduire la teneur en silice avant son utilisation en sidérurgie.

5. Le gypse :

Roche sédimentaire aussi appelé le sulfate de calcium, il est ajouté aux constituants du ciment lors du broyage, pour réguler sa prise. Le sulfate de calcium peut être du gypse $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, du semi-hydrate $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$, de l'anhydrite CaSO_4 ou tout mélange de ceux-ci. Le gypse et l'anhydrite existent à l'état naturel, le semi hydrate et l'anhydrite existent également sous forme de sous-produit de certains procédés industriels.

Cette matière est approvisionnée par Société de Batna filiale du groupe GICA, qui se trouvant à 240 km de l'usine. [12]



Figure 7: le gypse

Tableau 7:fiche d'analyse de gypse(composition chimique)

ELEMENTS	TENEURS
SiO_2	4.96
Al_2O_3	1.86
Fe_2O_3	0.97
CaO	26.63
MgO	2.47
K_2O	0.45

Na ₂ O	0.01
SO ₃	35.18
Cl	0.002
PAF	23.60

Interprétation des résultats :

Les analyses confirment qu'il s'agit d'un matériau sulfaté : Teneur en Sulfates : Le taux élevé de SO₃(35,18 %) associé au CaO (26,63 %) est caractéristique du gypse (CaSO₄ \ Cadot 2H₂O).

Pureté et Impuretés : On note une faible présence de silice (4,96 %) et d'alumine (1,86 %), ce qui indique une faible pollution par des phases sableuses ou argileuses.

Perte au Feu (PAF) : La valeur de 23,60 % est importante ; elle correspond principalement au départ des molécules d'eau de cristallisation (déshydratation).

Magnésie : La présence de MgO (2,47 %) suggère une légère trace de dolomite ou de minéraux magnésiens associés.

Cet échantillon est un gypse de bonne qualité. Sa composition chimique le rend apte à être utilisé comme régulateur de prise dans l'industrie du ciment ou pour la fabrication du plâtre.

V. CONCLUSION

À travers ce premier chapitre, une présentation générale du contexte historique, géologique et industriel de la cimenterie a été réalisée. L'étude du cadre géologique régional et local a permis de mieux comprendre la nature des formations géologiques présentes et leur rôle dans la disponibilité des matières premières. L'étude des carrières de calcaire et d'argile, ainsi que des moyens de transport utilisés, met en évidence l'importance de la proximité des ressources naturelles dans le fonctionnement et la rentabilité de la cimenterie. Donc ce chapitre constitue une base fondamentale pour l'étude approfondie du processus de fabrication du ciment et l'analyse des aspects techniques et environnementaux qui seront développés dans les chapitres suivants.

**Chapitre02 :
Préparation de la matière
première et
Fabrication du ciment**

Chapitre02 : préparation de la matière première et fabrication du ciment au niveau de la cimenterie d'ELMALABIOD

I. INTRODUCTION :

Le processus de fabrication du ciment est une succession d'opérations industrielles complexes, allant de l'extraction des ressources minérales jusqu'à l'obtention d'un liant hydraulique finement broyé. La qualité finale du ciment dépend impérativement de la première phase du cycle : la préparation des matières premières. Dans cette étape, l'objectif est de transformer les roches brutes (calcaire, argile et ajouts correcteurs comme le minerai de fer) en un mélange parfaitement homogène et finement divisé, appelé "Cru". Cette préparation est fondamentale pour garantir une clinkérisation optimale à l'intérieur du four rotatif.

Ce chapitre sera consacré à l'étude détaillée du cheminement des constituants au sein de la cimenterie d'El Ma Labiod (SCT), en mettant l'accent sur les procédés de concassage, de dosage, de broyage et enfin sur les transformations physico-chimiques majeures qui régissent la production du clinker et du ciment.

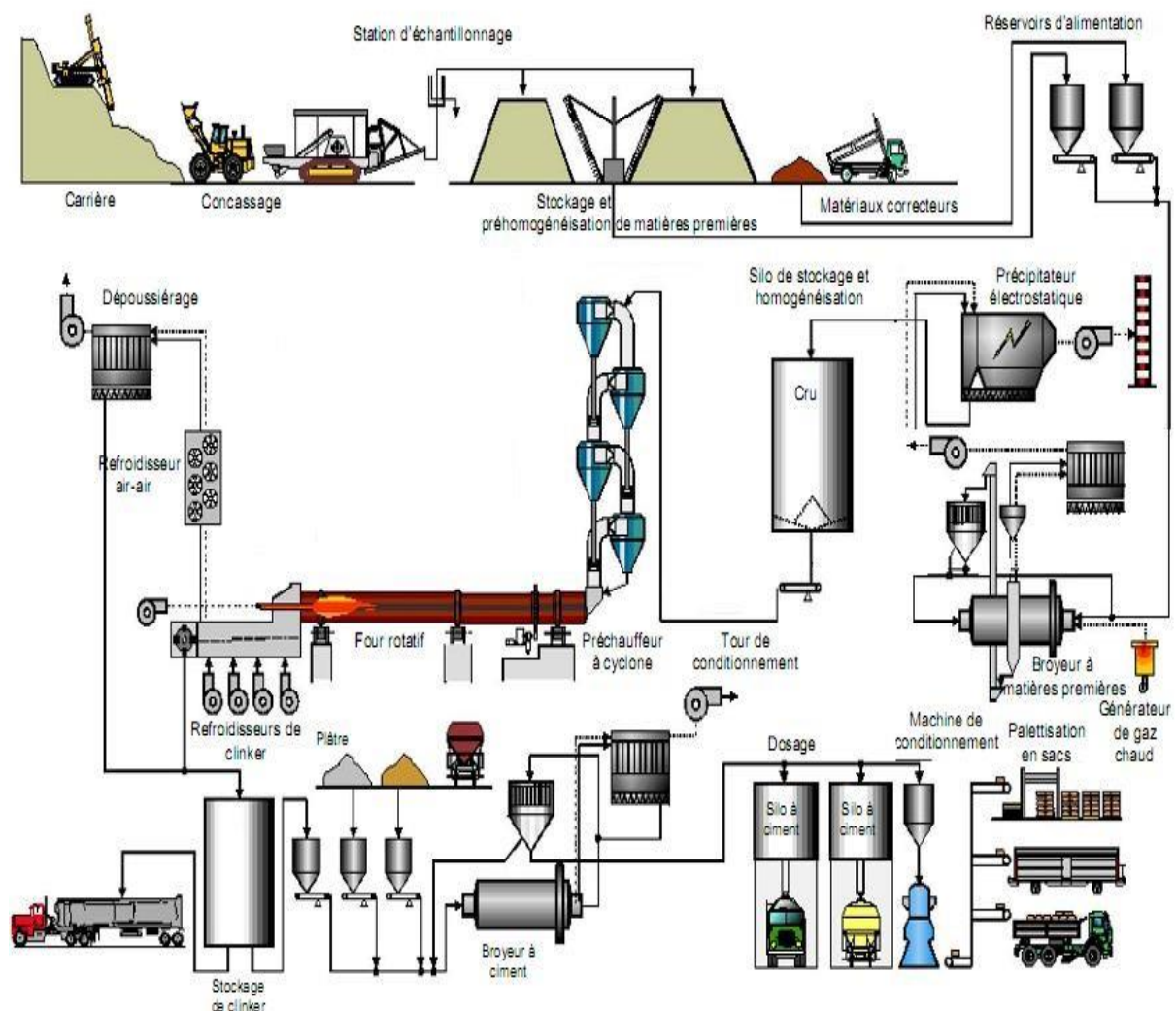


Figure 8 :Procèdes de fabrication de ciment

II. PRINCIPE DE FABRICATION :

Le ciment Portland artificiel, le CPA, résulte du broyage du clinker avec environ 5% de gypse pour réguler la prise. Le clinker est une roche artificielle obtenue par cuisson à 1450°C, constitué le plus souvent d'un mélange d'environ 80% de calcaire (apportant la CaO) et d'environ 20% d'argile (apportant la silice SiO_2 , l'alumine Al_2O_3 , et le fer Fe_2O_3). Les clinkers peuvent être très différents les uns des autres du fait de la composition du cru, du mode de cuisson et du refroidissement. C'est dire qu'en les broyant à des finesses variées avec des teneurs en gypse plus ou moins importantes, on obtiendra des ciments portland artificiels n'ayant pas les mêmes caractéristiques.

La fabrication des ciments se réduit aux 5 étapes principales constituant le processus de fabrication du ciment :

1. L'extraction de la matière dans la carrière et son homogénéisation ;
2. La préparation des matières premières afin de constituer le cru (ou la pâte) ;
3. La cuisson aboutissant à la création du clinker ;
4. Le broyage du clinker et des ajouts pour fabriquer le ciment ;
5. Le stockage et l'expédition des ciments.

En effet, le clinker issu de la cuisson de la matière première provenant de la carrière est stocké dans un hall ou un silo à clinker. Le broyeur, quant à lui, utilise le clinker stocké comme matière première. La consommation de ciment étant très cyclique (forte utilisation en été, faible en hiver), cette indépendance permet ainsi de maintenir une production constante de clinker, et de réduire ou augmenter la production de ciment en utilisant les capacités de stockage d'une usine (en clinker et en ciment) comme tampon. [7]

III. L'EXTRACTION DES MATIERES PREMIERES :

L'extraction consiste à extraire les matières premières vierges (comme le calcaire et

L'argile) à partir des carrières naturelles à ciel ouvert. Ces matières premières sont extraites des parois rocheuses par abattage à ; l'explosif ou à la pelle mécanique. La roche est acheminée par des dumpers et/ou des bandes transporteuses vers un atelier de concassage.

Après un concassage primaire, les matières premières sont transportées vers l'usine où

Elles sont stockées et préparées. Autres matériaux tels que le minerai de fer, le laitier de haut fourneau ou le sable de fonderie sont approvisionnés par d'autres sources.

L'étude du gisement des matières premières permet de définir la composition exacte du cru avec les besoins en ajouts qu'exige le procédé de fabrication. La qualité et la régularité requises pour les matières premières assurent, au final, la qualité de ciment recherchées .[4]



Figure 9:chargement et transport du calcaire

1.Carrières du calcaire :

Travaux d'abattage :

Le fourrage des trous de mines est réalisée en un poste par jour par une machine de forage doté d'un taillant de diamètre 110 mm. La volée d'abattage, lieu d'implantation des trous de mine, doit faire l'objet de préparation et de nivellement pour permettre le déplacement des machines de forage.

Débitage secondaire :

Cette opération est réalisée sur les blocs hors gabarits (> 1 m d'arête supérieure) résultants du tir, dont les dimensions influencent négativement sur les opérations de chargement, de transport et de concassage.

Cette opération exige une réduction maximale de ces blocs et cela en optimisant tous les paramètres de tir (géométriques) de foration. Pour la bonne exécution de l'opération, tous les blocs ayant une arête supérieure de 1m sont rassemblés dans une aire spéciale sur les plates-formes de travail afin d'être débités ensemble. [8]

Une autre manière de faire, dans le cas où la brise roche n'est pas disponible, l'explosifs est utilisé (marmanit est recommandé) dans des trous forés par les marteaux perforateurs à mains de diamètre de 36 mm et /ou 40mm.

Le recouvrement :

Il touche environ les 2/3 de la surface du gisement, sa puissance moyenne est de 1.8m, la nature des roches de recouvrement est différente (sable, limons argileux, croûtes calcaires). [5]

L'assise utile :

Elle est constituée de calcaire gris à beige en banc de 20 à 40 cm et parfois marneux.

- Les réserves géologiques en matière sur dosée évaluées lors de l'étude géologique initial sont : 86.702.000 Tonnes.
- Les réserves restantes s'élèvent à 75.000.000 Tonnes. [5]

Chargement et transport du calcaire :

La carrière utilise dans le chargement une chargeuse de capacité de godet de 7 m³, qui est suffisante pour cette opération. Lors du temps d'attente, le chargeur procède à former le tas de la matière et le triage des gros blocs pour le débitage secondaire.

L'opération de transport se fait par des dumpers d'une capacité de 40 tonnes chacun. La distance entre le front de taille et le concasseur primaire est de 700 m. Ces dumpers sont suffisants pour le transport de matière

2. Carrière d'argile :

Travaux d'extraction :

Il est à noter que le chargement et le transport de substance utile lors de cette phase se feront selon les étapes suivantes :

- Refoulement de la matière brute à partir du relief de la plate-forme.
- Chargement et transport à partir de la plate-forme en activité. D'après les propriétés physico-mécaniques.

L'extraction fait appel au bulldozer à dents. Pour ce faire, deux opérations successives sont nécessaires pour atteindre les objectifs qualitatifs et quantitatifs.

- **Ripage** : Cette opération est indispensable pour le foisonnement préalable des roches argileuses.
- **Refoulement** : C'est le prolongement de la première opération qui consiste au déplacement de la substance utile foisonnée suivant des passes inclinées sur une distance n'excédant pas 50 mètres (pour atteindre un nombre idéal du bulldozer). [9]

Chapitre02 : préparation de la matière première et fabrication du ciment au niveau de la cimenterie d'ELMALABIOD

Le recouvrement :

Le gisement est entièrement recouvert par les alluvions argileuses et la croûtes calcaires, la puissance est de 4m. [5]

L'assise utile :

Elle est constituée d'argile avec des intercalations gréseuse ou sableuse.

- Les réserves géologiques en matière sous dosée évaluées lors de l'étude géologique initial sont : **33.400.000 Tonnes**.
- Le volume total de la couverture est : **2.688.952 m³**
- Les réserves restantes s'élèvent à **30.000.000 Tonnes**. [5]

Chargement :

Le chargement de l'argile s'effectue par une chargeuse sur pneus de volume godet de 3,5 m³ de capacité. Une seule chargeuse sera suffisante pour assurer un rendement journalier de 1 023 t/jour.

Transport :

Conformément à la tache technique, il est nécessaire de transporter 1071 tonnes d'argiles par jour à partir du front de taille jusqu'à l'usine par camions de 20 tonnes de charge utile. La distance de transport de la carrière d'argile à la cimenterie est d de 18 km en moyenne (aller-retour).

- Se trouve a 10km a notre cimenterie, leurs réserves est 33200000 tonne

- **Chargement, transport et stock d'argile :**



Chargement



transport par camion



stockage coté de concasseur

Concassage primaire :

Chapitre02 : préparation de la matière première et fabrication du ciment au niveau de la cimenterie d'ELMALABIOD

L'objectif du concassage primaire est d'obtenir un produit facilement transportable, et compatible avec les contraintes d'alimentation du broyeur cru. L'installation de concassage est ultra simple, puisqu'on passe de la dimension de matériau de carrière (1 m), à la dimension 0.1 à 25 mm en un seul étage. Ceci est réalisable grâce à la bonne aptitude du matériau au concassage et à sa faible abrasion. [11]



Figure 10: concasseur à marteau

Principe de fonctionnement : La matière est déversée dans une trémie, puis elle est percutée par des marteaux fixés sur un rotor tournant à grande vitesse. Les blocs se brisent par impact contre les marteaux et les plaques de blindage.

Caractéristiques techniques du concasseur à marteau : [11]

Tableau 8: caractéristiques techniques du concasseur à marteau

Débit nominal (pour H ₂ O 7 % maximum)	600 t/h
Débit pour H ₂ O comprise entre 7 et 10 %	450-600 t/h
Dimension maximale des blocs à l'entrée concasseur	1 m ³
Granulaire à la sortie	0.1 - 25 mm
Puissance installée rotor	1 1200 KW
Puissance installée rotor	2 1600 KW
Vitesse rotor primaire	345 tr/min
Vitesse rotor secondaire	440 tr/min

Chapitre02 : préparation de la matière première et fabrication du ciment au niveau de la cimenterie d'ELMALABIOD

On observe que la taille des matériaux diminue considérablement, passant de 1 m³ à l'entrée à moins de 25 mm à la sortie. Cela permet d'obtenir un rapport de réduction très élevée grâce à l'utilisation d'un système à double rotor.

Concasseur à cylindre :(concasseur argile)

Les concasseurs à cylindres sont utilisés pour la réduction des matériaux tendres, collants et humides de carrière, tel que l'argile. Le concasseur à cylindre FLS de type E est composé de deux cylindres à bossages moulés. L'un des arbres de cylindres est réglable alors que l'autre est fixe et doté d'un volant. La fente entre les deux cylindres varie en fonction du degré de concassage désiré. Les deux cylindres sont pourvus de racloirs pour gratter la matière collante à la surface. L'équipement est prévu contre les risques de surcharge : un dispositif porte-poinçon est relié au palier du cylindre réglable conjugué à un interrupteur de sécurité du moteur. Au cas où un objet extrêmement dur serait coincé entre les cylindres, le dispositif de poinçonnage se mettra en marche et arrêtera le fonctionnement du concasseur et de l'alimentation. La puissance du moteur se transmet grâce à une double commande par engrenage et à deux arbres de transmission pour permettre le réglage de l'écartement entre les cylindres. La double commande par engrenage assure une vitesse synchronisée des deux cylindres. Ainsi, le rendement du concassage augmente et l'usure se réduit. [4]



Figure 11 : concasseur à cylindre

Concasseur à marteau double rotor:(concasseur ajouts)

Les concasseurs à marteaux à double rotor sont en fait des concasseurs secondaires, mais leur conception robuste et résistante les rend bien appropriés au concassage primaire des matières friables comme le calcaire, le gypse et le charbon brut. Les concasseurs à marteaux FLS avec grille de sortie sont disponibles avec des vitesses périphériques convenant aussi bien au concassage primaire qu'au concassage secondaire et peuvent être adaptés pour traiter de différentes matières premières. L'écartement des fentes dans les grilles de sortie peut s'adapter aux conditions opérationnelles en question. Les arbres de rotor sont dotés de disques sur lesquels pivotent les marteaux. Les arbres de rotor tournent dans des rouleaux à roulement fortement immergés dans des bains d'huile et ils reposent sur le capot du concasseur composé d'un lourd alliage de fer et de sections soudées et boulonnées ensemble. Le capot est recouvert de plaques d'usure remplaçables. [4]

V. PRE-HOMOGENEISATION :

Le ciment nécessite des teneurs proportionnées des différents composants : chaux, silice, alumine et oxyde ferrique. Le composant principal du mélange est le calcaire, riche en carbonate de calcium. L'argile est utilisée comme composant d'appoint.

Après concassage des blocs extraits de la carrière, on mélange de façon aussi homogène que possible les différents composants et les ajouts déterminés lors de la formulation. C'est la phase appelée de pré-homogénéisation.

La pré-homogénéisation permet d'atteindre un dosage parfait des constituants essentiels du ciment et de créer un mélange homogène. Les matières premières doivent être échantillonnées, dosées et mélangées de façon à obtenir une composition régulière dans le temps. La prise de l'échantillons en continu permet de déterminer la quantité des différents ajouts nécessaires (les oxydes de fer, alumine et silice) et à arriver ainsi à la composition chimique idéale. Des roches naturelles, les marnes ou calcaires argileux, ont une composition qui est proche de la composition calcaire-argile. Des correcteurs, minerais de fer qui apporte l'oxyde ferrique Fe_2O_3 , bauxite qui est riche en alumine (Al_2O_3), sable qui apporte le silice (SiO_2), sont ajoutés pour atteindre la composition souhaitée.

Cette opération peut être réalisée soit dans un hall de pré-homogénéisation en disposant la matière en couches horizontales superposées, puis en la reprenant verticalement à l'aide d'une roue-pelle soit dans un silo vertical par brassage par air comprimé. [11]

Les matières de correction :

Chapitre02 : préparation de la matière première et fabrication du ciment au niveau de la cimenterie d'ELMALABIOD

Les matières de correction sont des matériaux ajoutés en faibles proportions lors de la phase de pré-homogénéisation afin d'ajuster la composition chimique du mélange cru. Elles sont appelées ainsi parce qu'elles servent à corriger les teneurs en oxydes principaux tels que la silice (SiO_2) et l'oxyde de fer (Fe_2O_3), afin d'obtenir un mélange équilibré et conforme aux exigences de fabrication du clinker. Parmi ces matières, on distingue :

- **Le sable** : utilisé comme correcteur de silice (SiO_2).
- **Le minerai de fer** : utilisé comme correcteur en oxyde de fer (Fe_2O_3).

VI. STOCKAGE :

Après l'opération de concassage de ces trois constituants de base on obtient une granulométrie de 0 à 25 mm, les constituant sont acheminés vers l'usine par des tapis roulant couvert, puis stockés dans deux halls de pré homogénéisation : un hall avec un stockage circulaire pour le 7 calcaire et un hall a stockage linéaire pour l'argile et le sable et minerai de fer.



Figure 12 :Méthode de stockage en strates .Collecteur à portique

Chapitre02 : préparation de la matière première et fabrication du ciment au niveau de la cimenterie d'ELMALABIOD

Tableau 9: Hall de stockage

Calcaire pure		
Calcaire ajouts		
Argile		
Minerai de fer		

Gypse



VII. DOSAGE ET BROyage CRU

Dosage :

La matière cru est constituée d'un mélange des matières premières de correction dans des proportions qui sont définies suivant les valeurs des modules chimiques de cru, en général la matière crue est constituée de 70% de calcaire, 20% d'argile et 10% entre le sable et le minerai de fer, quatre doseurs sont installés sous les trémies, le calcaire et l'argile et le minerai de fer et le sable sont respectivement extraits par ces doseurs, chaque doseur est systématisé d'une manière automatique.

Broyage du cru :

Le broyage procède par fragmentations successives des grains jusqu'à obtenir des grains de faible dimension pour faciliter leur cuisson. L'échange thermique et les réactions chimiques sont en effet d'autant plus intenses lors de la cuisson que les surfaces de contact entre les grains de matière et les gaz sont importantes.

À la sortie du hall de pré-homogénéisation, le mélange est très finement broyé dans des broyeurs sécheurs, qui éliminent l'humidité résiduelle et permettent d'obtenir une poudre qui présente la finesse requise. Cette poudre, appelé le « cru », est une nouvelle fois homogénéisée par fluidisation. Selon l'origine des matières premières, ce mélange peut être corrigé par apport de bauxite, d'oxyde de fer ou d'autres matériaux fournissant le complément d'alumine et de silice requis. [11]



Figure 13 : broyeur à boulet type TIRAX UNIDAN

Principaux éléments du broyeur cru :

- Un groupe d'entraînement composé d'un moteur électrique asynchrone et d'un réducteur.
- Une table de broyage fixée sur le réducteur et tournant à faible vitesse
- Six galets stationnaires avec des systèmes de tension et d'étanchéité.
- La matière broyée est poussée vers l'extérieur de la table de broyage dans l'anneau à tuyères qui est traversé par les gaz chauds montant de bas en haut puis elle est aspirée par le flux gazeux et traverse le séparateur où elle est séparée en matière fine et matière grossière.
- La matière grossière (gruaux) retombe sur la table de broyage pour continuer à être broyée et la matière fine (produit fini) est véhiculée par le flux gazeux vers les cyclones et le filtre à manches où elle est dépoussiérée.
- La finesse du produit fini (farine crue) peut ajustée par réglage de la vitesse de rotation de la roue du séparateur. [11]

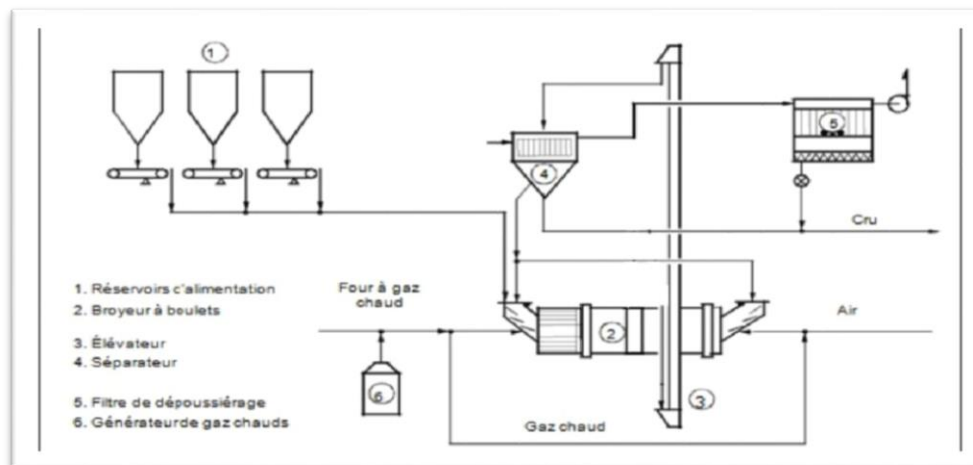


Figure 14 :broyage de cru avec broyeur à boulet

VIII. CUISSON

Réalisée dans des fours rotatifs à une température maximale d'environ 1450°C, la cuisson permet la transformation du cru en clinker (forme de grains de 0,5 à 4 cm de diamètre). A la sortie du four, le clinker est refroidi rapidement (à une température de 50 à 250°C) pour éviter une forte cristallisation.

IX. L'HOMOGENEISATION :

La farine crue est homogénéisée en continu dans deux silos Claudus Peters, d'une capacité unitaire de 8000 t. Les silos de stockage de la farine crue sont équipés par le système d'air de barbotage pour l'homogénéisation de farine crue ; c'est à dire uniformiser les modules chimiques de la farine.

X. LE DEPOUSSIÉRAGE :

Les nouvelles normes d'émission des poussières à l'atmosphère imposent des installations de dépoussiérage plus performantes pour préserver l'environnement d'une part, et d'une autre part pour le recyclage des poussières récupérées du broyeur cru et du four. Le système de dépoussiérage consiste d'éliminer les émissions des poussières par l'utilisation des filtres à manches.

Ces poussières sont acheminées vers les trémies Schnicks ou vers les silos d'homogénéisation afin de réalimenter le four et augmenter la production.

XI. PRÉ-CHAUFFAGE:

Le préchauffage permet essentiellement de préparer la farine du point de vue chimique et thermique. Cette préparation consiste à sécher, déshydrater et décarbonater partiellement la

Chapitre02 : préparation de la matière première et fabrication du ciment au niveau de la cimenterie d'ELMALABIOD

matière crue. La farine crue homogénéisée est ensuite préchauffée à 800 °C dans le tour de préchauffage grâce à la réutilisation de la chaleur produite par le four. La farine crue descend en tourbillons dans les cyclones successifs à contre-courant des gaz chauds.

➤ **Le Four:**

C'est une opération forte consommatrice d'énergie. Le four rotatif est l'élément central de toutes les installations modernes de production de clinker. Dans la cimenterie d'Elma Labiod, le four est un cylindre d'acier rotatif de type UNAX de 68 m de long et de 4,5 m de diamètre, incliné de 3 à 5 degrés par rapport à l'horizontale, ce qui permet à la matière de le traverser en 20 à 30 minutes. Il est calé à intervalles par des terrains porteurs à galets. La rotation lui est transmise à travers une couronne dentée, un pignon et un réducteur à vitesse. Etant donné qu'il est incliné, le four aura tendance à se déplacer vers l'aval au cours de sa rotation. Cette course axiale est freinée par des galets de retenue, installés à proximité immédiate d'un ou deux bandages en s'appuyant sur leurs flancs inférieurs. Le four est protégé contre les très hautes températures de service par revêtement de brique réfractaires maçonnées.

➤ **Alimentation du four :**

Le four est alimenté par la matière stockée (farine crue) dans les deux silos de stockage à travers le circuit suivant : les extracteurs, élévateurs, trémie schenck, aéro-glissières et air lift. Le schéma montre le circuit d'alimentation du four.



Figure 15: le four de calcination

XII. LA CLINKERISATION :

Une fois préchauffée et décarbonatée, la farine crue entre dans le four rotatif et progresse jusqu'à la zone de clinkérisation (à environ 1450 °C). Le temps de parcours est de l'ordre d'une heure.

Sous l'effet de la chaleur, les constituants de l'argile, principalement composée de Silicates (SiO_2), d'alumine (Al_2O_3) et d'oxydes de fer (Fe_2O_3), se combinent à la chaux provenant du calcaire pour donner des silicates et des aluminates de calcium pour former les nouveaux composés chimiques qui entrent dans la composition minéralogique du clinker.

Alors, le processus de calcination est suivi de la cuisson du clinker ou clinkérisation pendant laquelle l'oxyde de calcium réagit à haute température (en général entre 1400 et 1500 °C) avec la silice, l'alumine et l'oxyde ferreux pour former des silico-aluminates de calcium.

Le rôle des refroidisseurs consiste à garantir la trempe du clinker pour avoir une structure minéralogique et des dimensions de cristaux favorables. Les refroidisseurs permettent aussi de baisser la température du clinker pour faciliter la manutention et le stockage. On obtient ainsi des grains solides à 150°C : c'est le clinker, qui est transporté vers d'énormes silos de stockage. Le clinker se présente sous la forme de granules d'environ 2 cm de diamètre. Le refroidissement après cuisson joue un rôle important sur la forme et la réactivité des constituants du clinker.

XIII. LE REFROIDISSEMENT :

Le rôle des refroidisseurs consiste à garantir la trempe du clinker pour avoir une structure minéralogique et des dimensions de cristaux favorables. Les refroidisseurs permettent aussi de baisser la température du clinker pour faciliter la manutention et le stockage. On obtient ainsi des grains solides à 150°C : c'est le clinker, qui est transporté vers d'énormes silos de stockage. Le clinker se présente sous la forme de granules d'environ 2 cm de diamètre. Le refroidissement après cuisson joue un rôle important sur la forme et la réactivité des constituants du clinker.

XIV. LE TRANSPORT DU CLINKER :

Le clinker sorti du four est transporté vers 3 silos de stockage d'une capacité unitaire de 8000 tonnes à travers les transporteurs à augets.

XV. L'ALIMENTATION DU BROYEUR DU CIMENT :

L'alimentation du broyeur du ciment se fait à partir des trois trémies équipées par un système de pesage et dosage (Clinker, ajouts et gypse) dont les taux sont respectivement 75%, 20% et

5%. Il y'a trois silos de stockage de clinker, à savoir que l'ajout est un mélange de l'un des matières suivantes (laitier, tuf et calcaire).

XVI. LE BROYAGE DU CIMENT :

La dernière phase de fabrication est le broyage du clinker provenant du four. Le ciment fabriqué doit être conforme à la norme algérienne. La broyabilité d'un ciment dépend de facteurs suivants : - Composition des minéraux de clinker

- Degré de cuisson du clinker
- Granulométrie du clinker alimenté
- Mouture désirée
- Quantité et genre du produit d'addition.

Dans la cimenterie d'Elma Labiod, le broyage du ciment est assuré par broyeur à boulet UNIDAN (débits : 100 t/h) en circuit fermé, de 40 x 12 m équipé d'un séparateur à vitesse réglable qui sépare les fines des grosses ; les fines passent aux silos pour stockage et les grosses retournent vers le broyeur. Le clinker est normalement sec et ce broyeur est doté à son entrée d'une roue à pales au lieu d'un compartiment de séchage et il n'y a pas de tirage d'air chaud.

Les ajouts :

Les ajouts sont des constituants secondaires introduits lors du broyage du clinker afin d'améliorer les propriétés du ciment. Ils permettent de modifier certaines caractéristiques telles que la résistance mécanique, la durabilité et la résistance aux agressions chimiques.

➤ Le gypse :

Roche sédimentaire aussi appelé le sulfate de calcium, il est ajouté aux constituants du ciment lors du broyage, pour réguler sa prise. Le sulfate de calcium peut être du gypse $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, du semi-hydrate $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$, de l'anhydrite CaSO_4 ou tout mélange de ceux-ci. Le gypse et l'anhydrite existent à l'état naturel, le semi hydrate et l'anhydrite existent également sous forme de sous-produit de certains procédés industriels. [12]

➤ La Pouzzolane

Le terme de pouzzolane provient de Pouzzoles, nom d'une ville italienne de la région de Naples. Il y désigne un matériau volcanique cendreuse de composition trachytique de couleur claire et friable, utilisé pour la fabrication de mortier et de ciment. Par extension tout matériau naturel ou artificiel présentant de propriétés pouzzolaniques est parfois qualifié de «

pouzzolane » [12]

➤ **Le tuf**

Le tuf est un type de roche à structure vacuolaire pouvant avoir deux origines : - Le tuf volcanique, qui provient des téphras de petite taille emprisonnant parfois des fragments plus gros s'accumulent et sont consolidés par l'eau. - Le tuf calcaire ou travertin, d'origine sédimentaire et qui provient des ions carbonate dissous dans l'eau qui a précipité en milieu continental (ruisseau, source riche en carbonate dissous, etc...) en incluant souvent des traces de végétaux ou de coquilles [12]

➤ **Le laitier**

Le laitier se compose principalement de silice (SiO_2), chaux (CaO), alumine (Al_2O_3) et d'oxyde de magnésium (MgO), Il est obtenu par refroidissement rapide (trempe) de certaines scories fondues provenant de la fusion du minerai de fer dans un haut fourneau. [12]



Figure 16: cycle de fabrication de ciment

XVII. STOCKAGE DU CIMENT :

Des systèmes de transport mécaniques et pneumatiques peuvent être utilisés pour acheminer le ciment jusqu'aux silos de stockage. Le ciment produit sorti de broyeur est

acheminé vers 3 silos de stockage hermétiques d'une capacité unitaire 8000 t. Le stockage du produit dans les silos permet d'assurer l'expédition du ciment régulièrement dans le cas où les ateliers sont à l'arrêt pour maintenance.

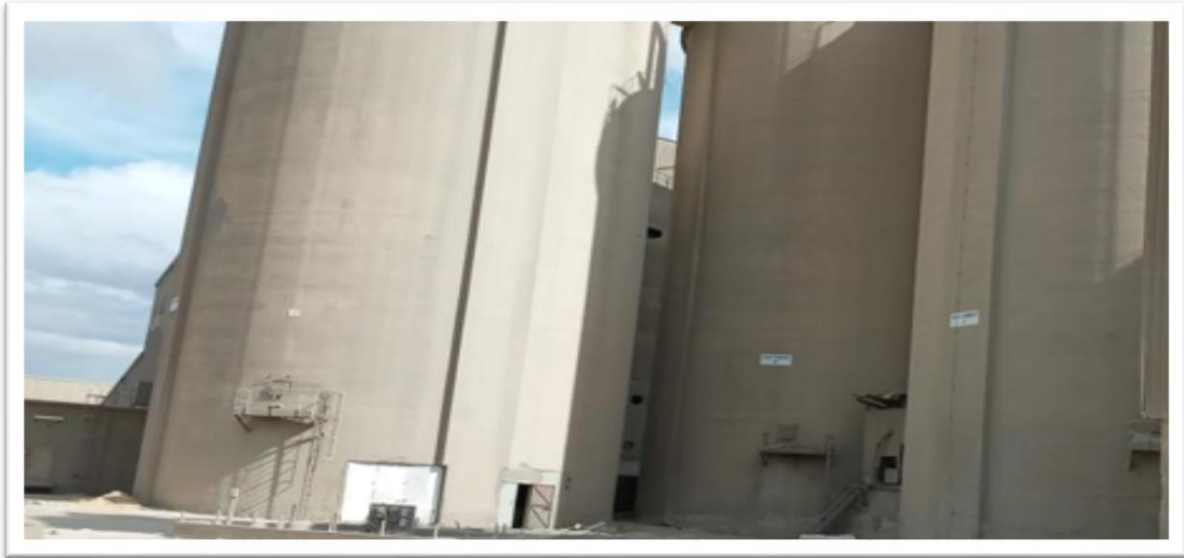


Figure 17:silos de stockage ciment

XVIII. LA SALLE DE CONTROLE ET LE CONTROLE DE QUALITE :

Les techniciennes de la salle de contrôle conduisent l'usine depuis leurs écrans où s'affichent toutes les informations.

Lors de son stockage, le ciment est prélevé, analysé chimiquement et physiquement et des essais de résistance sur mortiers normalisés sont réalisés. Afin de garantir son niveau de qualité, les analyseurs du laboratoire de la cimenterie sont à la pointe des technologies d'analyse comme la Fluorescence X et la Diffraction des rayons X.

La qualité d'un ciment se reconnaît par la régularité de sa composition et de ses performances.

XIX. CONDITIONNEMENT ET EXPEDITION :

L'expédition du ciment se fait en deux manières, soit chargé directement par une bouche vrac ; 250 t/h en vrac transporté dans des camions, citernes spéciaux, benne de chemin de fer ou bateaux. Les camions citernes roulent directement sous le silo et le ciment est rempli par le fond du silo. L'extraction se fait par flexible branché au fond du silo. Ou le ciment est chargé en sac d'un poids de 50 Kg par l'ensacheuse Flux RU qui consiste en un réservoir rotatif vertical doté de 12 systèmes de pesage distincts avec becs de remplissage montés sur le côté extérieur du réservoir, et tournant avec lui. L'ensacheuse est manœuvrée par un seul opérateur qui accroche

Chapitre02 : préparation de la matière première et fabrication du ciment au niveau de la cimenterie d'ELMALABIOD

les sacs vides aux becs de remplissage dès qu'ils passent devant lui. Immédiatement après l'accrochage, la soupape du bec s'ouvre automatiquement, et lorsque le sac est presque plein, la machine s'arrête un instant pour permettre le désaérage, après que le remplissage reprend. Lorsque le sac est rempli, il est immédiatement décroché du bec avant que ce dernier n'arrive devant l'opérateur, et le bec est prêt à recevoir le sac suivant une fois qu'il est retourné à sa position de départ.

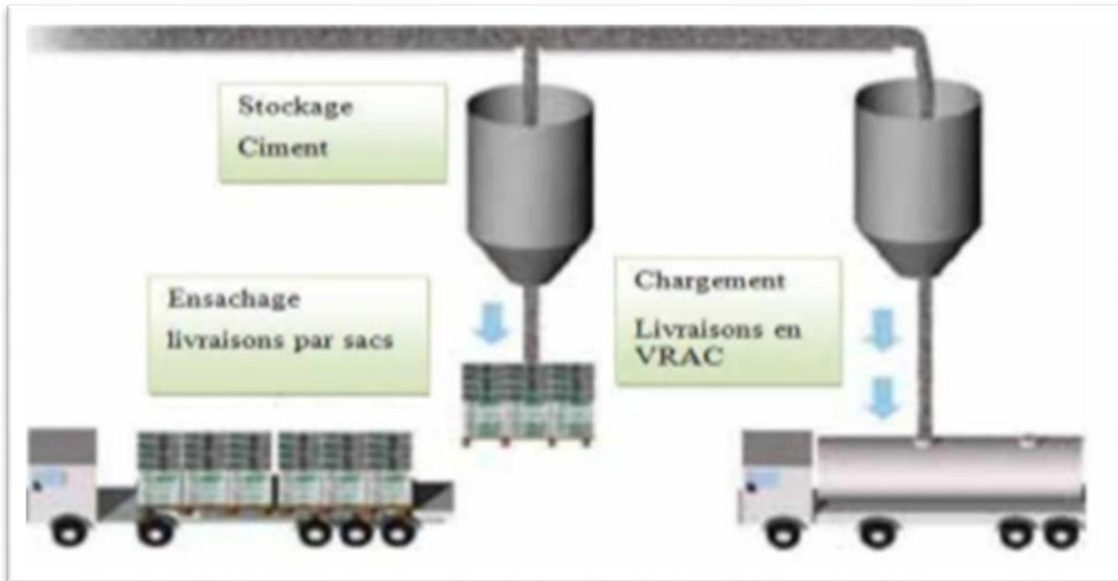


Figure 18:l'expédition du ciment

XX. CONCLUSION :

Ce chapitre a constitué une analyse approfondie et méthodique du processus industriel de fabrication du ciment au sein de la cimenterie d'El Ma Labiod.

L'examen rigoureux de chaque étape du circuit de production, depuis l'extraction et le concassage des matières premières jusqu'au conditionnement et à l'expédition du produit fini, a permis de mettre en évidence l'interdépendance fonctionnelle des différentes unités opérationnelles et la criticité de chaque maillon dans la chaîne de fabrication. Il ressort de cette étude que la maîtrise du dosage pondéral, la stabilité de la composition chimique du cru, ainsi que le contrôle thermique rigoureux au niveau du four rotatif, représentent les facteurs déterminants dans l'obtention d'un clinker de haute qualité.

De surcroît, l'intégration d'un système de dépoussiérage performant et d'un contrôle qualité continu tout au long du procédé témoigne d'une approche industrielle soucieuse à la fois de la performance et du respect des exigences environnementales et normatives.

Chapitre02 : préparation de la matière première et fabrication du ciment au niveau de la cimenterie d'ELMALABIOD

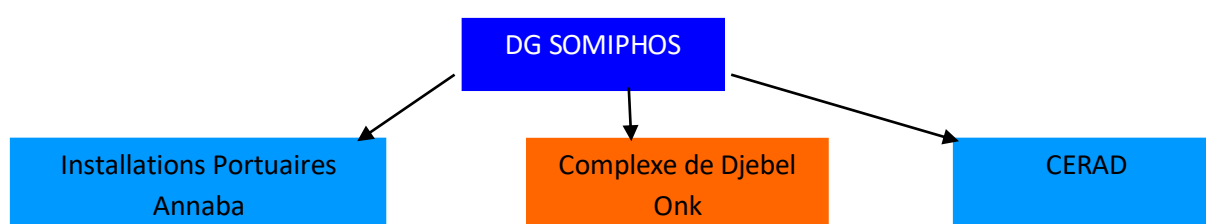
Ces acquis fondamentaux serviront de référentiel technique essentiel pour évaluer, dans les chapitres ultérieurs, la faisabilité et l'impact de l'incorporation des rejets de dépoussiérage du minerai de phosphate de Djebel Onk en tant qu'additif partiel dans la fabrication du ciment ordinaire, ouvrant ainsi la voie à une valorisation industrielle durable de ces sous-produits miniers.

Chapitre 03 :

Aperçu sur le Complexe Minier de Djebel El Onk

I. INTRODUCTION :

L'industrie phosphatière algérienne est née à la fin du XIXème siècle avec la découverte et la mise en exploitation de plusieurs gisements à l'Est du pays (El Kouif, Mzaita, Ras El Oued, Bordj El Ghedir). En 1962 commença l'exploitation du plus grand gisement algérien de phosphate, "Le Djebel Onk".[13] Les phosphates de cette région font partie d'une succession d'assises sédimentaires, développées dans l'Est et le Sud-est constantinois (Algérie), Elle présente une série tertiaire au passage entre le Paléocène et l'Eocène inférieur. L'Algérie est un producteur de minerais de phosphates, couvre une partie non négligeable dans le marché nationale et internationale puisque les réserves algériennes en minerai de phosphate sont plus de deux milliards de tonnes, situées à Djebel Onk. [14]



II. STRUCTURE DE L'ENTREPRISE :

Schéma n°06 : Différentes unités de l'entreprise SOMIPHOS

III. GEOLOGIE REGIONAL DJEBEL ONK :

1. LA SITUATION GEOGRAPHIQUE REGIONALE DU GISEMENT

La région de Djebel Onk est située au Sud – Est de l'Algérie, à 100 km de la Wilaya de Tébessa et à 20 km de la frontière Algéro-Tunisienne, sur la route qui relie Tébessa à El Oued. Cette région constitue la limite géographique naturelle entre les hauts plateaux constantinois et le domaine saharien. Le massif de Djebel Onk forme un ensemble calcaire de 20 km de longueur qui culmine à 1198 m d'altitude au Djebel Tarfaya. Ce massif constitue l'extrémité orientale des monts de Nememcha qui prolonge vers l'Est le massif des Aurès. Les altitudes les plus basses au pied du Djebel Onk sont d'environ 635m [13]

La région de Djebel Onk est subdivisée en 5 secteurs miniers :

-

2. GEOLOGIE DU GISEMENT DANS LA REGION :

Les principaux anticlinaux de la région ,à cœur de Crétacé ,sont ceux du Djebel Onk ,du Djebel Zrega (à l'est, situé en Tunisie) et du Djebel Brikiss -Rmitta (au sud, également situé en Tunisie).ces structures majeures sont bordées par de petits anticlinaux à cœur de Palécène superieur-Eocène inferieur (Djebel Djem Djema dans la région du Djebel Onk, Djebel El Karit dans la région du Djebel Brikis).tous ces anticlinaux,surélevés par des mouvements tectoniques d'âge plio-quaternaire ,constituent des reliefs montagneux. Ils sont séparés par des zones synclinales plus basses comblées par les sédiments détritiques du Miocène et de Quaternaire. [13]

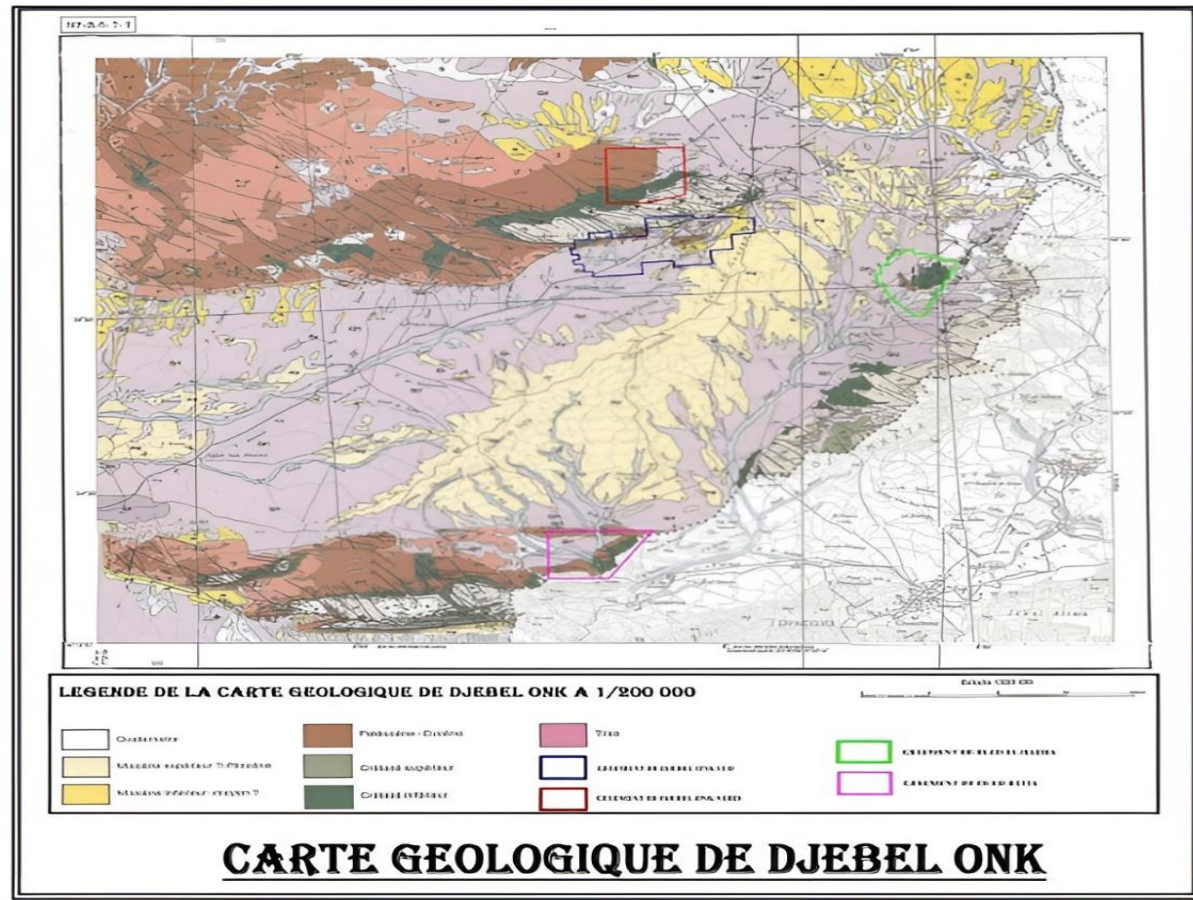


Figure 20: carte géologique de Djebel el Onk

III. STRATIGRAPHIE :

A djebel El Onk, la séquence rencontrée de bas en haut est la suivante :

- Calcaires blancs compacts (mæstrichtien),
- Argiles marneuses gris - foncées à vertes intercalées de marnes dures (Danien inférieur),
- Calcaires durs, blancs très fins intercalés de marnes tendres, argileuses et renfermant de minces niveaux phosphatés (Danien supérieur)
- ✓ Calcaires à lumachelles avec des intercalations des marnes et de dolomies (mon tien),
- ✓ Marnes gris - foncées à noires schistosités avec des intercalations phosphatées, gisant sur une couche phosphatée coprolithique et très argileuse (thanétien inférieur),
- ✓ Couche principale de phosphate gisant sur un niveau dolomitique et recouvert par une alternance de dolomies marneuses et dolomies phosphatées (thanétien supérieur), Alternance de calcaires marneuses blancs, marnes et dolomies renfermant des nodules de silex et de minces couches phosphatées surmontant un niveau conglomératique (yprésien inférieur),

- ✓ Alternance de calcaires, calcaires dolomitisés , marnes et marnes phosphatées. Les tous renfermant des nodules de silex (yprésien supérieur),
- ✓ Calcaires marneux blancs et marnes blanches crayeuses avec la présence de nodules de silex à la mie hauteur de la couche. Plus haut il y a du gypse (Lutétien inférieur),
- ✓ Alternance de marnes blanches, d'argilites vertes parfois phosphatées renfermant de minces bancs de calcaire et de niveaux gypseux (Lutétien supérieur),
- ✓ Formation continentale de sable quartzeux à lentilles argileuses (Miocène),
Alluvions et éboulis de pente (quaternaire), [3]

IV. LES TENEURS :

La moyenne de teneurs au P_2O_5 sont assez constantes sur toute l'étendue du gisement et oscillent entre 25,05 et 27,94 % avec une teneur moyenne générale pour tous les sondages de 26,53 %. La moyenne de teneurs en MgO est faible et constantes sur pratiquement toute l'étendue du gisement, elles sont comprises entre 2 et 3 % avec une moyenne générale de 2,61 % et du rapport CaO/P_2O_5 de 1,73. La couche productive est représentée par des phospharénites grises noires, d'épaisseur variant de 22m au Nord – Est à 43m au Sud- Ouest. [14]

V. COMPOSITIONS MINERALOGIQUES DE MINERAI PHOSPHATE DE DJEBEL ONK :

Le minerai de phosphate dans la région de Djebel Onk se caractérise par ces deux qualités noir et beige qui diffèrent en pourcentage de la matière organique et MgO qui sont très grandes dans le phosphate noir et par un dégagement d'une mauvaise odeur. [18]

Tableau 10:composition minéralogiques du minerai de phosphate de djebel el Onk[18]

Eléments composants	Symboles
Phosphate tricalcique	$Ca_3 (PO_4)_2$
Carbonate de calcium	$CaCO_3$
Carbonate de magnésium	$MgCO_3$
Dolomite	$CaMg(CO_3)_1$
Alumine	Al_2O_3
Hématite (oxyde de fer)	Fe_2O_3
Sulfate de soude	$Na_2Ca (SO_4)_2$
Gypse	$CaSO_4$

Chapitre 03 :

Aperçu sur le Complexe Minier de Djebel El Onk

Chlorure de calcium	CaCL ₂
Quartz	SIO ₂
Sulfate , Fluor et matières organiques	S,F,C
Autres éléments en traces (Cadmium,Uranium,Titane ..)	Cd ,U ,Ti

VI. RESERVES GEOLOGIQUES :

Les travaux de découverte réalisés en 2023 et en dehors de la quantité consommée pour l'alimentation de la chaîne de traitement durant l'année ont permis aussi de dégager au 31/12/2023 des réserves prêtes à l'exploitation et qui sont repris dans le tableau ci-dessous :

Tableau 11: Réserve géologique et qualité du phosphate dans la zone de Kef Essennoun [15]

Désignation	Partie Nord-Ouest de Kef Essennoun		Djemi-Djema ZII	Total
Bloc	Zone Est et Sud-Est (Bloc A)	Zone Ouest et Sud-Ouest (Bloc B)		
Phosphate découvert	2.3 MT	1.1 MT	0.1 MT	3.5 MT
Phosphate prêt à l'exploitation pour 2024	1.3 MT	0.8 MT	0.05 MT	2.15 MT
Qualité de phosphate	Destinée pour la Fabrication du (66-68% TPL)	Destinée pour la Fabrication du (63-65% TPL)	Destinée pour la Fabrication du (63-65% TPL)	

VII. CONDITION MINIERE D'EXPLOITATION DU MINERAI DE PHOSPHATE DE DJEBEL EL ONK :

A Djebel Onk le gisement de Kef Essennoun constitue le gîte principal actuellement exploité à ciel ouvert. [15].

1. Méthode d'exploitation :

La méthode d'exploitation est une succession de réalisation des travaux d'enlèvement de stériles et de minerai dans un ordre bien déterminé.

2. Travaux d'exploitation :

Les travaux d'exploitation sont comme suite :

3. Terrassement:

Il s'agit de creuser et de décaper les matériaux en vue de réaliser les travaux de découverte, et ouverture dépiste.

4. Forage et tir:

La foration primaire est assurée par 4 sondeuses sur pneus de type Atlas Coopco.

La foration secondaire est assurée par un Crawlair pour le débitage secondaire des blocs hors gabarit.

Le tir consiste à détacher des massifs rocheux à l'aide d'explosif dans des conditions préalablement définies dans le cadre d'un schéma de tir. [15].



Figure 21: tir d'un gradin minier coté nord-ouest (27/11/2023 12:47)

5. Chargement et transport:

Le chargement du minerai abattu se fait à l'aide de 4 chargeuses pneumatiques. [14].

Tableau 12: Fiches technique de la chargeuse CATERPILAR 986H

Machine type / marque	Poids / dimension
Marque : CATERPILLAR	Longueur : 10340 mm
N° de série : 50W 10598	Largeur : 3645 mm
TYPE : 986H	Hauteur : 4126 mm
puissance : 375 CV	Poids : 43717 kg
Moteur (marque) : CATERPILLAR	Débit capacité : 6 m³
N° de série du moteur : 48W31472	Arrangement : 2w988
Transmission : série : 1JE03083	Arrangement : 9w0782
Convertisseur : 6V17203	



Machine type / marque	Poids / dimension
Marque : CATERPILLAR	Longueur : 10340 mm
N° de série : 50W 10598	Largeur : 3645 mm
TYPE : 986H	Hauteur : 4126 mm
puissance : 375 CV	Poids : 43717 kg
Moteur (marque) : CATERPILLAR	Débit capacité : 6 m³
N° de série du moteur : 48W31472	Arrangement : 2w988
Transmission : série : 1JE03083	Arrangement : 9w0782
Convertisseur : 6V17203	



Figure 22:chargeuse CATERPILAR 98

VII. TRAITEMENT DE PHOSPHATE :

1. Préparation mécanique :

La préparation mécanique a pour but de réduire les dimensions des blocs de minerais pour libérer les composants utiles de leurs gangues. Elle comporte les trois opérations suivantes : Concassage, broyage et le criblage [16]

1.1. Concassage :

Cette opération a pour but la réduction des blocs du tout-venant alimentant l'usine de traitement d'une dimension d'un mètre jusqu'à une grosseur inférieure à 200 mm.

Elle se fait au moyen des deux concasseurs :

- Concasseur à cône giratoire « BABITLESS » d'une capacité de 1000 T/h ;
- Concasseur à percussion « HAZEMAG » menu d'un système de scalpage d'une capacité de 1200 T/h. [16]

1.2. Broyage :

Cette opération consiste à réduire le produit concassé jusqu'à une dimension de 20mm et ce au moyen de trois broyeurs à marteaux articulés « WEDAG » d'une capacité de production de 300 T/ h/ broyeur. [16]

1.3.Criblage :

Cette dernière opération de la préparation mécanique consiste à éliminer le produit dont la dimension est supérieure à 15 mm au moyen de trois cribles vibrants à résonances « WEDAG » d'une capacité de 300 T/h/crible et deux cribles vibrants inclinés « HAZEMAG » d'une capacité de 600 T/ h/crible et une ouverture de 10 mm. Le passant du crible ayant une granulométrie inférieure à 15 mm alimente les deux voies pour l'obtention le produit marchand.

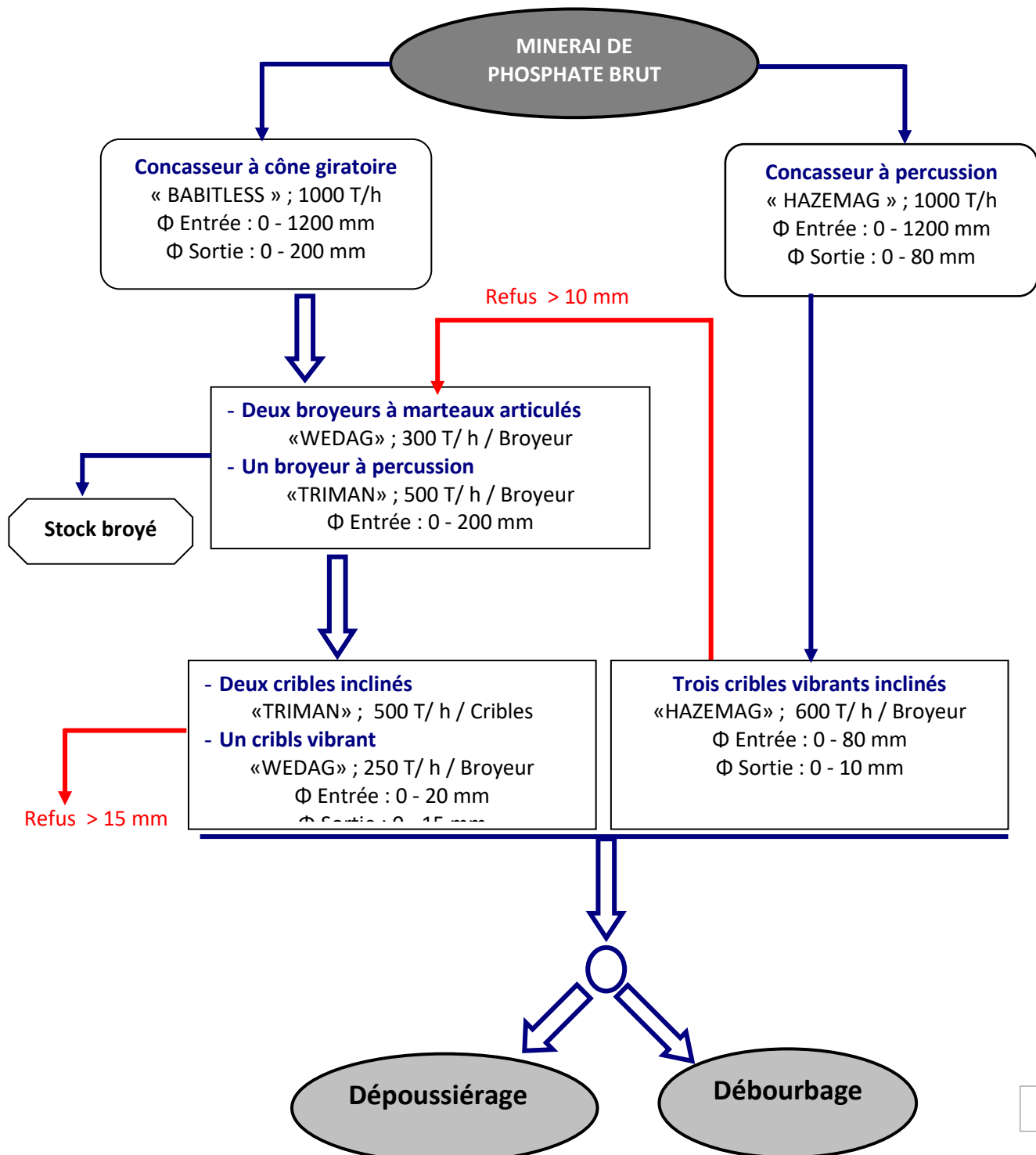


Schéma n°07 : flux des opérations de réduction de granulométrie [16]

2 Traitement par voie humide (Débourbage) :

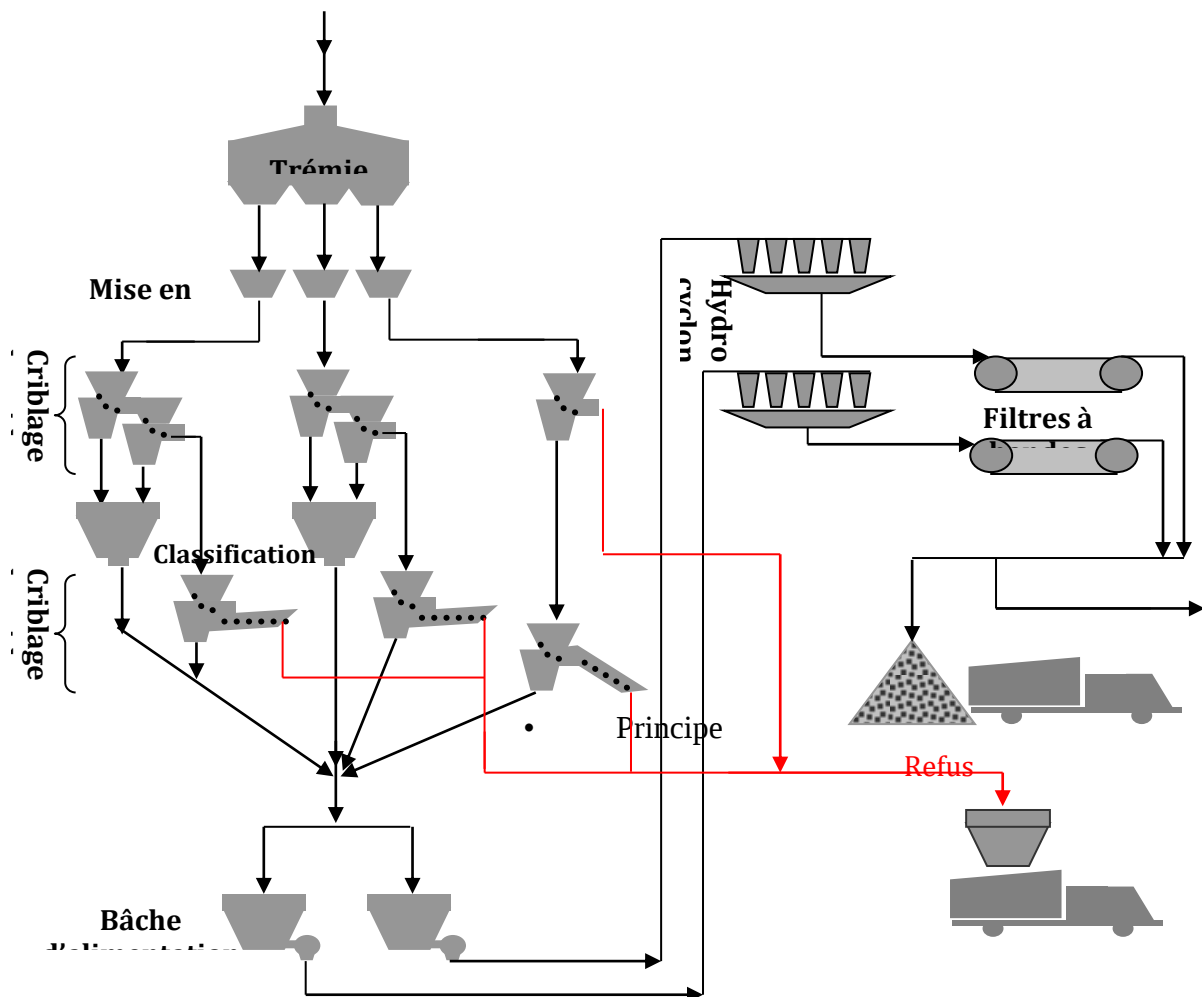
Cette opération s'effectue dans les ateliers de calcination (**DK1**), elle permet d'enrichir le minerai à une teneur au tricalcique de (63 à 65%) et (66 à 68%) TPL.

Ce type de traitement comporte les opérations suivantes :

2.1. Débourbage :

Le but de cette opération pour d'éliminer les argiles, les silicates, les matières organiques ainsi que les sels.... Il est constitué des opérations suivantes : une mise en pulpe, criblage humide (grilles courbes), classification, hydro cyclonage et une filtration. [16]

Schéma n°08 : Procédés de traitement minérale



- **Principe :**

Le passant crible de dimensions inférieure à 15 mm est mise pulpe avec de l'eau dans un rapport solide/liquide égale à 2/3 (T/m^2), alimente les grilles courbes qui opèrent à une

coupure de 1,00mm. Les hydro cyclones à mouvement hélicoïdal de rotation récupèrent le passant grilles courbes dont le but est d'éliminer la tranche inférieure à 0.8mm. Les fines particules très pauvres en phosphate seront acheminées vers l'épaississeur et la qualité noble est essorée aux moyennes essoreuses le produit débourbe et essoré titrant de (63 à 64.5 %) TPL est expédié pour la deuxième opération. [16]

2.2.Séchage

Le produit débourbé étant un produit semi fini humide et qui nécessite une déshydratation jusqu'à l'obtention d'un produit marchand d'une humidité de 1%. Le séchage se fait au moyen de deux méthodes à savoir :

- Séchage par four B1 (calcination)
- Séchage par four horizontal

➤ Séchage par four B1 (calcination)

À cet effet, on a modifié le processus de calcination en four de séchage vertical avec un débit horaire de 70 T/h/ligne (compartiment de préchauffage) et une température atteignant les 100°C. [16]

➤ Séchage par four horizontal

Cet atelier comporte deux fours horizontaux rotatifs dont la température ajustée est à $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$.

Ces fours sont à mouvement rotatif dans lequel le produit débourbé est séché dans une chambre de fluidisation et ce en formant un lit fluidisé en suspension qui à travers la longueur du four le produit subisse une évaporation de l'eau imbibée dans le produit.

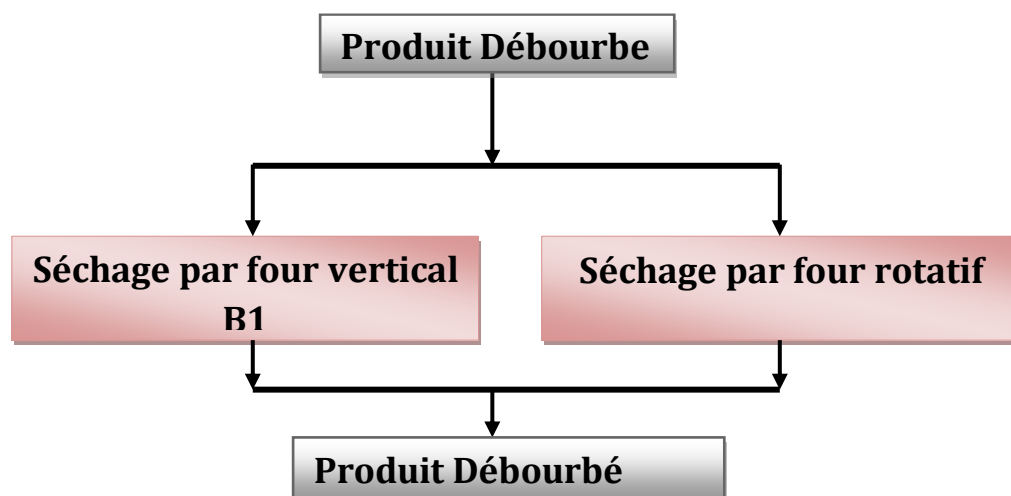


Schéma n°09 : processus de séchage du produit débourbé [16]

3. Traitement par voie sèche (Dépoussiérage)

Cette opération s'effectue dans les ateliers de dépoussiérage (DK2 et DK3), est un procédé physico-mécanique d'enrichissement du minerai phosphate pour l'obtention d'un concentré moyen de 29 à 30 % P_2O_5 c'est un procédé issu d'une technologie de traitement à sec, basé essentiellement sur la décarbonation par impacte et aménagement granulométrique.

Le but principal de ce type de traitement est d'enrichir à sec un produit provenant de la carrière ayant 54 à 56 % de TPL, broyer et cribler à 15 mm contenant 3 à 7 % d'humidité pour ramener à la qualité commerciale titrant 62.5 % à 63.5 de TPL et des granulométries comprises entre 800 μ et 90 μ . Chaque ligne est d'une capacité de 230 T/h à l'alimentation et 137.5 T/h à la sortie d'un rendement poids de 60 à 62 % pour pouvoir traiter et enrichir à sec le produit il doit subir cinq opérations de préparation et d'enrichissement. [16]

3.1. Séchage à lit fluidisé

Cette opération élimine aussi une partie des solides les plus fines en les entraînant avec les gaz de fluidisation. Il consiste deux fours sécheurs, ils sont divisés en deux comportements :

- Combustion et dilution.
- Séchage par fluidisation.

3.2. Criblage à 2mm

Cette opération consiste à éliminer le produit dont la dimension est supérieure à 2mm au moyen des cribles revus équipé d'un tamis de 2 mm, permet le rejet des gros supérieurs à 2mm qui sont du calcaire, les moins de 2 mm sont admis et acheminés vers les broyeurs (rendement poids 88%).

3.3. Broyage à attrition

Pour libérer une partie de l'exogangue aux grains de phosphate, et permettre un meilleur enrichissement final par séparation granulométrique et ce au moyen des broyeurs « Broyeur DRAGAN » équipés d'un rotor sur lequel sont portés des marteaux et chambre de broyeur.

3.4. Sélection par un turbo séparateur

Cette opération a pour but d'enrichissement du produit en éliminant les fines moins de 80 microns à l'aide des ventilateurs.

3.5. Criblage à 0,8mm

Le même principe que les cribles de 2 mm d'où ils sont rejetés les grains de phosphate supérieurs à 0,8 mm [1]



VIII. . CONTROLE DE QUALITE DU PHOSPHATE :

L'objectif principal du laboratoire en tant que processus de support est la maîtrise des techniques de prélèvements des échantillons et des techniques des analyses physicochimiques nécessaires à la conduite des installations de productions et de stockage de phosphate,

- Des qualités des matières premières et des additifs à la réception rentrant dans les processus de fabrications de produits.
- Des qualités des produits finis à leur sortie des chaines de la production et avant leur livraison aux clients.
- Des produits intermédiaires dans les chaines de production.
- Des rejets liquides, des émissions de poussière à l'atmosphère et des déchets solides dans le cadre des dispositions réglementaires et des exigences de l'entreprise pour la protection de l'environnement.

Le laboratoire dispose de moyens matériels et humains pour la réalisation des opérations suivantes selon un programme préétabli et à la demande :

- ✓ Les prélèvements des échantillons aux niveaux des unités de productions et de stockage.
- ✓ Les analyses physicochimiques pour déterminer quantitativement les éléments contenus dans les différentes qualités de phosphate, [18

1. Echantillonnage

Prendre un échantillon d'un matériau, c'est prendre une fraction de ce matériau pour fin d'essai telle que la partie prélevée représente le plus fidèlement possible l'ensemble du matériau dont on désire déterminer les caractéristiques.

En d'autre terme, la partie prélevée doit être identique à la partie restante.

En d'autre terme, Ensemble des pratiques qui permettent d'obtenir une quantité de masse réduite et ayant les même propriétés physico-chimiques que la masse totale du lot.

- **Echantillon global** : On appelle échantillon global, la quantité totale de matériaux représentatives du matériau et prélevée au hasard dans le stock de granulats.
 - **Echantillon** : On appelle échantillon la quantité de matériau nécessaire pour réalise les essais.
 - **Prélèvement** : On appelle prélèvement, une fraction constituant l'échantillon global.
- En d'autre terme, Portion de minéral, de roche, de fluide prélevé, pour être étudiée.

- **Prise** : On appelle prise la quantité de matériaux soumise à l'essai. La valeur des prises est généralement indiquée dans les modes opératoires. [18]
- **Echantillon représentatif** : qui reflète les caractéristiques de l'ensemble, pour ceci, l'échantillon doit être aléatoire, homogène...

Echantillonnage au niveau de chaîne de traitement :

Le laboratoire doit disposer d'un plan et d'une méthode d'échantillonnage lorsqu'il procède à l'échantillonnage de substances, de matériaux ou de produits en vue d'essais ou d'étalonnages ultérieurs. La méthode d'échantillonnage doit aborder les facteurs à contrôler pour garantir la validité des résultats d'essai ou d'étalonnage ultérieurs. Le plan et la méthode d'échantillonnage doivent être disponibles sur le site où l'échantillonnage est effectué. Les plans d'échantillonnage doivent, chaque fois que cela est raisonnable, reposer sur des méthodes statistiques appropriées.

- ✓ Les modalités de sélection des échantillons ou des sites.
- ✓ Le plan d'échantillonnage.
- ✓ La préparation et le traitement des échantillons à partir d'une substance, d'un matériau ou d'un produit pour livrer l'information requise pour l'essai ou étalonnage ultérieur.

Le laboratoire doit enregistrer les données d'échantillonnage pertinentes en tant que partie intégrante des travaux d'essai ou d'étalonnage entrepris. Ces enregistrements doivent notamment indiquer :

- ✓ La référence à la méthode d'échantillonnage utilisée.
- ✓ La date et l'heure de l'échantillonnage.
- ✓ Les données pertinentes permettant d'identifier et de décrire l'échantillon (par exemple le numéro, la quantité, le nom).
- ✓ Identification du préleveur. [18]
- ✓ Identification de l'équipement utilisé.
- ✓ S'il y a lieu, les conditions ambiantes et les conditions de transport.
- ✓ Les diagrammes ou autres moyens équivalents permettant d'identifier le lieu de prélèvement le cas échéant.
- ✓ Les écarts, ajouts ou exclusions à la méthode d'échantillonnage et au plan d'échantillonnage.

2. Préparation des échantillons :

Au laboratoire, les échantillons sont soumis aux étapes de préparation suivantes :

2.1. Homogénéisation :

On mélange les échantillons prélevés au toit et au mur de chaque couche pour qu'ils soient bien homogènes, ensuite on procède par quartage ou **l'échantillon** est divisé en quatre parties égales dont on ne retient que la moitié en réunissant deux quarts opposés. Cette sélection est homogénéisée et un nouveau quartage est effectué, l'opération pouvant se répéter trois ou quatre fois. On obtient ainsi un échantillon représentatif du matériau initial. [18]

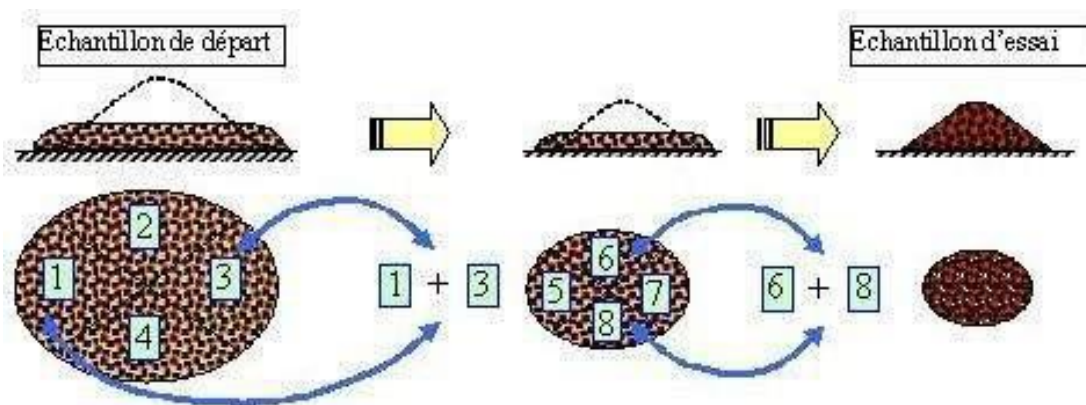


Figure 23: Opération de quartage

1.2. Séchage : (Produit Humide)

A une température compatible avec les caractéristiques des composants recherchés. Le séchage des échantillons souvent réalisé à puis à l'étuve à une température $105 \pm 5^\circ\text{C}$.

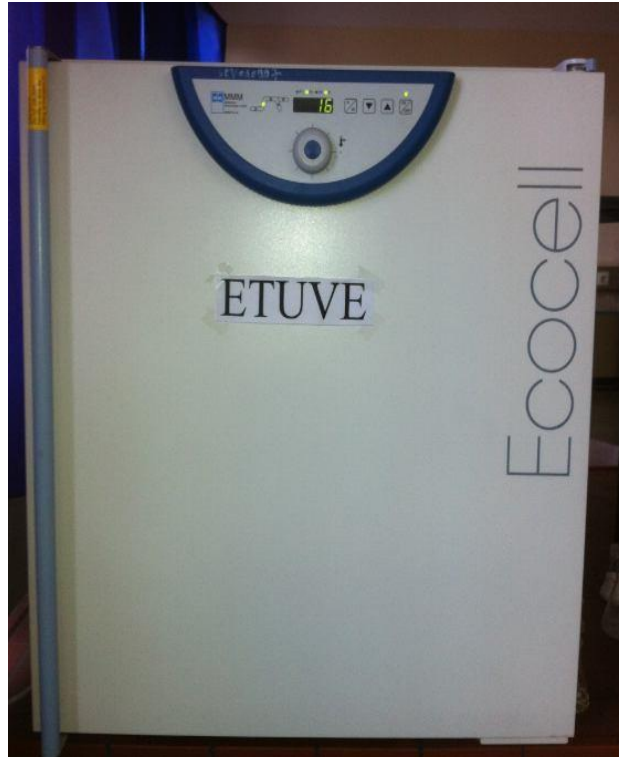


Figure 24:l'étuve

I.3. Division :

Les diviseurs d'échantillon sont des appareils au moyen desquels un échantillon est divisé en portions représentatives

- ✓ Diviseur à couloir « échantillonneurs » ou diviseurs à riffles pour la séparation en fractions égales d'une qualité bien déterminée de l'échantillon. Les étapes suivies sont :
- ✓ Verser les matériaux à l'aide d'une pelle dans le diviseur et veiller à ce qu'il soit uniformément reparti sur toute la surface de la pelle
- ✓ Régler la largeur des couloirs. Cette largeur doit être supérieure ou égale à $2 \times D_{\max}$
D : exprimé en mm est la grande dimension spécifiée.

Si la quantité obtenue dans chaque bac est trop important pour l'essai envisagé, recommencer l'opération avec le matériau récupéré dans l'un des deux bacs.

- ✓ Les diviseurs rotatifs sont des diviseurs d'échantillons nécessitant de l'énergie électrique pour être utilisés. Ils sont utilisés pour les solides en vrac ou pour les liquides. Les grandes quantités d'échantillons ou les grands flux de matières sont partagées avec ce type de diviseur. [18]

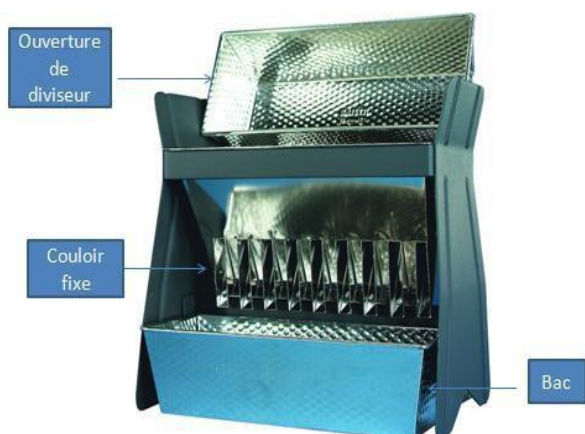


Figure n°30 : Diviseur à rille.



Figure n°31 : Diviseur rotatif.

I.4. Broyage :

L'échantillon de phosphate est broyé à l'aide d'un pulvérisateur pendant 20 min pour réduire les dimensions du produit jusqu'à une grosseur < 0.040 mm. - La vitesse : 40



Figure 25: le broyeur de type "Retsch"

IX. METHODES D'ANALYSES CHIMIQUES :

Au labo Chimie nous avons effectué les analyses chimiques, des éléments importants.

1. Attaque perchlorique:

Au labo chimie l'attaque du phosphate naturel s'effectuera habituellement par l'attaque perchlorique ou à défaut par l'attaque nitro-chlorhydrique applicable aux méthodes spectrophotométries et l'attaque sulfonitrique applicable à la méthode gravimétrique du P_2O_5 .

◆ Principe :

Mise en solution à chaud des échantillons de phosphate naturel soit $Ca_3(PO_4)_2$ par l'attaque à l'acide perchlorique $HClO_4$ concentré.

◆ Réactifs :

Acide perchlorique pur pour analyse $d = 1,62$; 70% en poids.

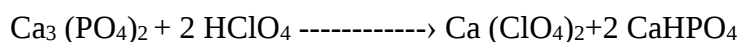
♦ **Mode opératoire :**

- Peser 01 g d'échantillon finement moulu ou non séché dans un Becher de 250 ml ;
- Verser quelque ml de H₂O distillée et ajouter 15 ml de l'acide perchlorique ;
- Laisser chauffer au bain de sable jusqu' à disparition de toute coloration blanche ;
- Laisser refroidir transvaser quantitativement dans une fiole jaugée de 500 ml en rinçant soigneusement le Becher avec de l'eau distillée.
- Ajuster au trait de jauge. Homogénéiser filtrer sur filtre plisser, rejeter les premiers ml du filtrat et recueillir dans un flacon sec. [18]

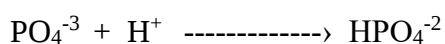
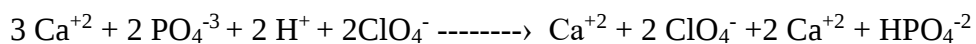


Figure 26 : Attaque perchlorique

La réaction d'attaque pour le phosphate naturel est :



La réaction ionique est :



2. Dosage du P₂O₅ par la méthode spectrophotométrie automatique (Auto analyseur Technico)

Le système Technico Auto analyseur est le dernier né d'une gamme complète d'instruments pour l'analyse chimique automatique en phase liquide.

L'Auto analyseur met en œuvre les techniques les plus évoluées de la mécanique de fluide pour réaliser la mesure rapide et fiable des paramètres industriels les plus critiques, à des cadences de dosages pouvant atteindre 120 échantillons par heure.

Les systèmes l'Auto analyseur ont une caractéristique commune : leur conception modulaire. Cette particularité permet de les adapter à tous les besoins analytiques spécifique et en fait un remarquable outil de recherche doté d'une souplesse extraordinaire.

Dans l'Auto analyseur, les réactions prennent place au sein de veines liquides à écoulement contenu, segmentées par des bulles d'air. Toutes les étapes de l'analyse sont automatiques, depuis l'aspiration de l'échantillon jusqu'à la mesure de la concentration de la substance dosée. L'enregistrement graphique des résultats et éventuellement leur présentation par une imprimant digitale.

Dans le système l'Auto analyseur, on dépose les échantillons dans godets du distributeur. Une pompe proportionnant péristaltique fonctionnement en contenu assure leur prélèvement et les fait avancer ainsi que les étalons et les réactifs dans le circuit analytique. La réaction de coloration prend place dans une bobine de délai ou celle d'un bain-marie. Le colorimètre mesure la densité optique de la solution tandis que les résultats s'inscrivent en une série de pics sur la feuille d'enregistrement.

La réponse de l'enregistrement est directement proportionnelle à la concentration de la substance dosée. [18]

♦ Principe :

- Formation d'un complexe jaune entre les ions phosphoriques vanadiques molybdiques ;
- Détermination spectrophotométrie automatique à l'aide de l'auto analyseur Technico.

♦ Attaque

Attaque perchlorique.

♦ Réactifs :

- 1) Acide nitrique HNO_3 = 1.38 mg/ml ($d = 1.38$, 65% en poids) ;
- 2) Acide perchlorique HClO_4 = 1.61 mg/ml ($d = 1.61$, 70% en poids) ;
- 3) Réactif canado-molybdique. [18]

♦ Préparation du réactif canado-molybdique :

Mélanger dans l'ordre et en proportion égales les trois solutions :

➤ Solution A:

Préparer 2000 ml d'une solution contenant un volume d'acide nitrique et deux volumes d'eau distillée.

➤ **Solution B:**

Dissoudre 5g de Meta vanadate d'ammonium (NH_4VO_3) dans 500 ml de l'eau distillée bouillante.

Ajouter 40 ml d'acide nitrique et compléter à 2000 ml avec de l'eau distillée, après refroidissement.

➤ **Solution C:**

Dissoudre 100 g de molybdate d'ammonium ($\text{Mo}_7\text{O}_{24}(\text{NH}_4)_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) dans 1500ml de l'eau bouillante et compléter à 2000 ml par l'eau distillée chaude. [24].

◆ **Préparation de la solution étalons d'anhydride phosphorique**

- **Solution mère de concentration 10 mg/ml en P_2O_5**

Préparer la solution étalon mère à partir de $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ (phosphate monoammonique) où KH_2PO_4 (phosphate mono potassique) sécher à 105°C pendant 2heures.

Peser 19,174 g de KH_2PO_4 déjà séché et l'introduire dans une fiole jaugée de 1000 ml avec l'eau distillée.

➤ **Solutions étalonsfilles**

A partir de la solution étalon mère préparer alors sept solutions étalons filles de la façon suivante :

Dans une série des fioles de 500 ml introduire les volumes de solution mère respectivement : 5, 10, 15, 20, 25 et 30 ml.

Dans toutes les fioles ajouter 15ml d'acide nitrique, compléter le volume au trait de jauge avec de l'eau distillée, homogénéiser. Elles correspondent selon l'attaque perchlorique à des teneurs en % P_2O_5 suivants : 5, 10, 15, 20, 25, 30 et 35%. [18]

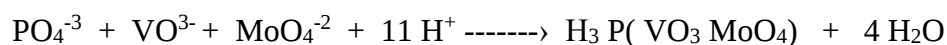
◆ **Appareillage :**

- Matériel courant de laboratoire ;

- Auto Analyseur TECHNICON, équipé d'un manifold pour le dosage de l'anhydride phosphorique (Figure II.1) et muni d'un filtre à de 430 nm.

Faire passer les solutions étalons et les solutions analyses dans l'appareil et déterminer les concentrations en % P_2O_5 en fonction des densités optiques pour une longueur d'onde à 430 nm.

Réaction de la formation du complexe phosphovanado molybdique est :



Le dosage du P_2O_5 nous permet de savoir la teneur du phosphate Tricalcique qui est le TPL (triple phosphate of lime) soit :

$$\% \text{P}_2\text{O}_5 * 2.185 = \% \text{TPL}$$

Tel que :

$$2.185 = \text{Mm} [\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2] / \text{Mm} [\text{P}_2\text{O}_5]$$

Et

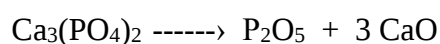


Figure 26: la méthode spectrophotométrie automatique

3. Dosage du Magnésium MgO par la méthode par absorption atomique

Dans le cas particulier de l'absorption atomique, on travaille sur des atomes libres à l'état fondamental ($W_i = 0$) : ces atomes peuvent absorber des photons et passer ainsi à leurs différents états excités peu nombreux à cause des règles de sélection qui interdisent le nombre total de combinaisons que l'on pourrait réaliser entre les états excités et l'état fondamental.

Pour un atome, on peut donc faire de l'absorption sur les raies qui correspondent au passage état fondamental - états excités, mais avec une sensibilité différente liée aux coefficients d'Einstein différents pour chaque niveau excité. Ces raies sont appelées raies de résonance bien que l'on réserve quelquefois cette appellation à la plus sensible d'entre elles.

Les photons absorbés étant caractéristiques des éléments absorbants, et leur quantité étant proportionnelle au nombre d'atomes d'élément absorbant, l'absorption permet de mesurer les concentrations des éléments que l'on a décidé de doser. [18]

L'appareil est schématisé ci-dessous

♦ **Principe :**

Détermination de la teneur en magnésium dans une solution d'essai par spectrométrie d'adsorption atomique en présence de l'oxyde de lanthane ou chlorure de lanthane.

♦ **Réactifs :**

- Acide chlorhydrique concentré $d = 1,19$; 37% en poids.
- Solution étalon mère de : 1g/litre de magnésium.
- Solution fille de : 100 mg/litre en magnésium (50ml dans 500ml de solution).
- Tampon spectrochimique au lanthane : Peser 58,64 g de (La_2O_3) et le dissoudre dans une fiole jaugée d'un litre puis lentement et avec précaution, ajouter 250ml d'acide chlorhydrique concentré après dissolution ajuster et jauger avec de l'eau distillée.

♦ **Gamme d'étalonnage :**

Dans une série des fioles de 100 ml ajouter successivement 1 ml, 2 ml, 4 ml, 6 ml de la solution fille puis 2 ml d'oxyde de lanthane et 2 ml d'acide chlorhydrique dans chaque fiole ajuster aux traits de jauge avec de l'eau distillée.

Ce volume correspond à : 0.5 mg/l, 1 mg/l, 2 mg/l et 3 mg/l en magnésium.

Appareil spectrométrie d'absorption atomique équipé d'un brûleur air-acétylène et d'une lampe à cathode creuse en magnésium pour une longueur d'onde de 285,2 nm pour ce dosage de magnésium.

♦ **Appareillage :**

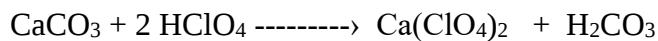
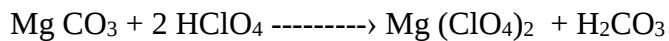
- Matériel courant de laboratoire
- Spectrophotomètre d'absorption atomique, muni d'une lampe à cathode creuse pour le dosage du magnésium et d'un brûleur air-acétylène. AAS3300
- Installation d'air comprimé.
- Acétylène.

♦ **Mode opératoire :**

Prélever 5ml de la solution d'attaque perchlorique ou nitro-chlorhydrique dans une fiole jaugée de 100ml ajouter 2ml de lanthane et 2ml d'acide chlorhydrique concentré ajuster la fiole à 100ml et passer au spectrophotomètre d'absorption atomique.

A partir de la gamme d'étalonnage et le blanc des réactifs tracer la courbe d'étalonnage en ordonné les absorbances et en abaisse les concentrations en mg/l de magnésium. [18]

Réaction de l'attaque :



♦ **Calcul :**

$$\% \text{MgO} = C \cdot V_T \cdot 200 \cdot 100 / V_P \cdot E = C \cdot 3,316$$

C = Concentration en mg/l, d'après la courbe d'étalonnage.

V_T = Volume de la solution d'attaque (500ml).

E = Prise d'essai en gramme (1g).

V_P = Volume prélever pour l'essai (5ml).



Figure 27:méthode d'absorption atomique

X. Production des rejets

Selon les secteurs de la chaîne de traitement, les rejets produits sont :

- Secteur de la préparation mécanique :
 - Les refus + 15 mm (8 à 10 %).
- Secteur de traitement par voies humides (30%) :
 - Les refus + 1mm
 - Les boues de débouage

- Secteur de traitement par voie sèche (31 à 36%) :
- Les refus + 2 mm de dépoussiérage
- Les refus + 1 mm de dépoussiérage
- Les fines de dépoussiérage

À l'état actuel les rejets produits sont :

- ☐ La préparation mécanique produite environ 288 000 tonnes/ an.
- ☐ Traitement par voie sèche produit environ 390 000 tonnes/ an.
- ☐ Traitement par voie humide produit environ 530 000 tonnes / an [18]

XI. LES REJETS DE LA STATION DE TRAITEMENT :

- Refus : Les stocks de rejets grossiers de l'usine de traitement ont été réservés pour permettre leur utilisation future. L'emplacement des stocks des rejets grossiers de l'usine de traitement a été sélectionné à proximité de l'usine suivant les directives et les recommandations du bureau d'études Allemand DMT.
- Rejets liquides : Le traitement de phosphate par l'atelier de débouillage, rejette des quantités liquides importantes composées de matériaux solides et des éléments chimiques. Un bassin de décantation a été créé au niveau de la carrière de Djemidjema zone II pour la récupération des eaux boueuses prévenantes de débouillage.

L'eau surnageant est utilisée pour l'arrosage des pistes des carrières et de l'usine de traitement

- Les rejets gazeux : Les émissions de gaz (les NOx) sont un groupe de gaz hautement réactifs, provenant de la combustion de carburants dans des sources mobiles, et par des combustibles fossiles et de quelques procédés industriels (fabrication d'engrais...).

Des polluants atmosphériques réglementés comme les oxydes NO et NO2 contribuent à l'effet de serre et au dérèglement climatique et sont acidifiant et eutrophisants, leurs conséquences sont graves ; la source des pluies acides et de l'acidification des eaux douces. [18]

XII. Impact environnementale et gestion des rejets :

- **La poussière :** Toutes les étapes d'un projet minier tel que l'extraction, le traitement, le transport génèrent des quantités importantes de poussières. Des particules de matière transportées par le vent, après des opérations de fouilles, d'abattage par

explosion, de transport de matériaux, de l'érosion par le vent. Des poussières fugitives provenant des installations de résidus, des stations de culbutage, des décharges de résidus et des routes de pénétration. [17]

- **Paysage** : Changement de la topographie et modification du paysage. Pendant l'exploitation de la carrière de Djebel Onk, les activités d'extraction ont un effet direct sur la morphologie des lieux aussi. Les terrils des résidus sont disposés autour de l'usine de façon aléatoire, ce qui détruit le paysage.
- **Bruit** : Le bruit est associé à l'exploitation minière, soit les bruits des engins, le chargement et le déchargement de roches dans les tombereaux, les toboggans, ainsi d'autres source : le bruit du tir, le bruit des engins au niveau de la carrière. Le bruit dans l'unité de traitement comme dans le broyage et le concassage des roches. Ces bruits peuvent affectés la santé du personnage ainsi que sur la faune et les proches résidents.
- **Stérile** : Les roches stériles se composent principalement de calcaire et des marnes, la taille des décharges a été estimée à partir des facteurs de foisonnement présumés appliquées au volume extrait in –situ. [17]

On distingue deux types de décharges :

- **Décharges externes** : Les stérile sont transportés par des camions depuis l'intérieur de la fosse jusqu'aux décharges.

Les zones des décharges externes se trouvent en dehors du contour final des réserves exploitables pour éviter de stériliser des ressources potentielles futures

- **Décharges internes** : Les décharges internes sont créées à l'intérieur de la zone d'exploitation minier, les principaux avantages sont :

· Réduction de l'empreinte de laminée la réduction des distances de camionnage.

· Le remplissage de la fosse existante à Kef Essnoun pour de raison de stabilité, ainsi que la récupération de phosphate adjacent à la fosse de Kef Essnoun. Pour permettre une stabilisation rapide de la paroi nord de KefEssnoun.. [17]



Figure 30 : stock des refus grossiers djemidjema zone 2. [17]

.

X. Conclusion :

L'étude du complexe minier de Djebel El Onk met en évidence la richesse et la complexité du gisement de phosphate, tant sur le plan géologique qu'industriel. La maîtrise des étapes d'extraction, de traitement et de contrôle qualité est essentielle pour garantir des teneurs marchandes compétitives.

Cependant, ce processus de valorisation génère des volumes considérables de rejets, notamment ceux issus du dépoussiérage, dont la gestion constitue un défi environnemental et économique majeur pour l'entreprise.

La caractérisation physico-chimique et minéralogique de ces résidus, présentée précédemment, révèle un potentiel intéressant qui mérite d'être exploité. C'est dans cette optique de valorisation que s'inscrit la suite de notre travail, où nous testerons l'intégration de ces rejets comme ajout

Minéral dans la fabrication du ciment, afin d'allier performance technique et développement durable.

Chapitre04 : Caractérisation physico- chimique et performances mécaniques du ciment formulé à base de rejets de phosphate

I. INTRODUCTION :

L'industrie minière, tout en étant un pilier de l'économie, génère des quantités massives de sous-produits qui posent des défis environnementaux et logistiques majeurs. C'est le cas notamment de la mine de Djebel Onk, où les opérations de traitement du phosphate produisent des rejets de dépolssiérage. La gestion de ces résidus nécessite aujourd'hui des solutions innovantes s'inscrivant dans une démarche de développement durable et d'économie circulaire.

L'objectif de ce volet pratique est d'étudier la faisabilité technique de la valorisation de ces rejets en tant qu'ajout minéral dans la fabrication du ciment.

L'étude consiste à préparer des mélanges de ciment en substituant une partie de clinker par des rejets de phosphate avec des taux allant de 0 à 30%. Ces mélanges subissent ensuite des analyses physico-chimiques et des essais mécaniques suivant la norme NA442 pour évaluer l'impact de cet ajout sur les performances du ciment produit.

Sur le plan économique, cette valorisation permet de réduire la consommation de clinker, constituant le plus coûteux en énergie et en matières premières. En transformant les rejets de Djebel Onk en ressource utile, on diminue les frais de gestion des déchets tout en abaissant le coût de revient du ciment, offrant ainsi une solution rentable et durable pour l'industrie.

II. CARACTERISATION DES MATIERES PREMIERES UTILISES :

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 matériau hydraulique se présentant sous la forme de petits nodules très durs composées essentiellement des quatre phases cristallines suivantes :

- Silicate tricalcique également dénommée « alite », C3S, dont la formule est : 3CaOSiO_2 .
- Silicate bi calcique ou « bélite », C2S, de formule 2CaOSiO_2 .
- Aluminate tricalcique C3A, de formule $3\text{CaO}, \text{Al}_2\text{O}_3$.
- Alumino-ferrite-tetracalcique C4AF, de formule $4\text{CaOAl}_2\text{O}_3\text{Fe}_2\text{O}_3$.

Chapitre04 :

Revalorisation des rejets de dépoussiérage du minerai de phosphate comme additif dans la fabrication du ciment ordinaire

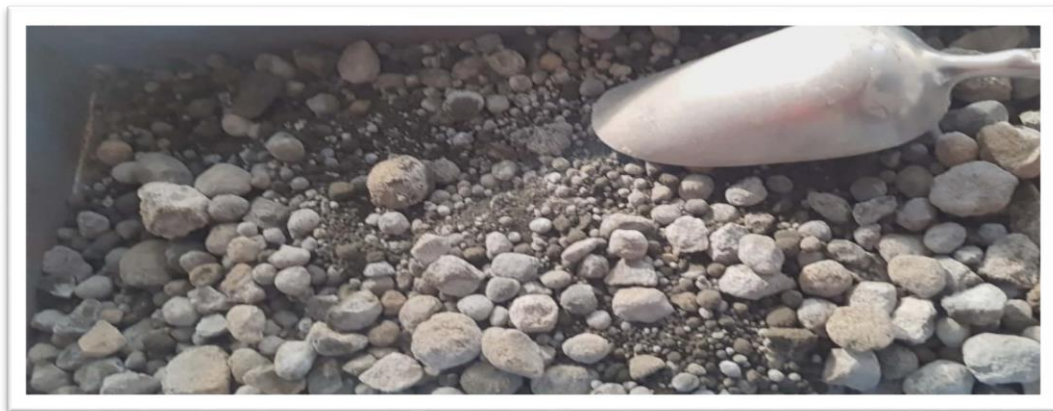


Figure 28:clinker utilisée

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

Tableau 13:composition chimique du clinker

ELEMENTS	Teneur %
SiO ₂	22.37
Al ₂ O	4.49
Fe ₂ O	4.28
CAO	66.08
MgO	1.10
K ₂ O	0.49
Na ₂ O	0.14
SO ₃	0.29
CL	0.006
PAF	0.11
Cao lib	0.90
LSF	90.71
MAF	2.55
MS	0.97
C ₃ S	57.07
C ₂ S	21.11
C ₃ A	4.66
C ₄ AF	13.01

2. Le gypse :

Le gypse utilisé comme additif fondamental dans le ciment est de provenance locale, nous avons maintenu un dosage de 5 %, pour tous les ciments préparés suite d'une simple pulvérisation au niveau de laboratoire pour les raisons suivantes :

-Il réagit avec le C3A pour former de l'étrangéité à la surface des grains de ciment. Cette couche protectrice ralentit l'hydratation initiale, laissant le temps de transporter, de couler et de travailler le béton.

-Les rejets de dépoussiérage de minerai de phosphate sont des particules extrêmement fines. Cette finesse augmente la surface spécifique du mélange, ce qui peut accélérer la demande en eau et la vitesse de réaction chimique.

L'ajout de 5 % de gypse permet de maintenir un équilibre cinétique. Il s'assure que l'augmentation de la réactivité due aux rejets de phosphate ne mène pas à une perte de maniabilité trop précoce.

-Il optimise la structure chimique pour garantir que le ciment soit solide dès les premiers jours.

-Il aide à limiter le retrait (contraction) du ciment lors du séchage, ce qui évite les fissures

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

Tableau 14:composition chimique du gypse (%)

SiO ₂ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	K ₂ O (%)	Na ₂ O (%)	SO ₃ (%)	Cl (%)	PAF
5,174	0,811	2,036	27,861	3,55	0,314	0,013	30,689	0,003	25,76

3. Le rejet de phosphate :

La phase expérimentale a débuté par la préparation de la matière première faisant l'objet de notre étude : le rejet de dépoussiérage du minerai de phosphate de la mine de Djebel el Onk.

- **Les principales raisons qui justifient le choix du refus de dépoussiérage comme additif dans le ciment :**

-Il est constitué de particules très fines contrairement au minerai brut ou aux rejets de criblage qui nécessitent un broyage intensif. Cela facilite son intégration au mélange clinker/gypse et peut même améliorer la compacité du ciment final.

Chapitre04 :

Revalorisation des rejets de dépoussiérage du minéral de phosphate comme additif dans la fabrication du ciment ordinaire

- Les stocks de poussières occupent de l'espace et peuvent causer une pollution atmosphérique locale ; les transformer en "matière première secondaire" pour le ciment règle le problème du stockage et crée de la valeur à partir d'un déchet.
- Le phosphate, selon sa composition minéralogique (présence de silice ou d'alumine), peut présenter une propriété effet Filler qui améliore la texture et la perméabilité. Et une réactivité qui peut participer aux réactions d'hydratation et renforce la résistance mécanique à long terme.
- La revalorisation peut créer des opportunités économiques, notamment en réduisant les coûts de production et en favorisant l'innovation.

- **Le protocole adopté :**

- a. **Échantillonnage :**

Chapitre04 :

Revalorisation des rejets de dépoussiérage du minéral de phosphate comme additif dans la fabrication du ciment ordinaire

Les prélèvements ont été effectués directement au niveau de la chaîne de traitement du phosphate, plus précisément à l'unité de dépoussiérage. Cette étape est cruciale pour récupérer les fines particules rejetées lors du processus industriel.

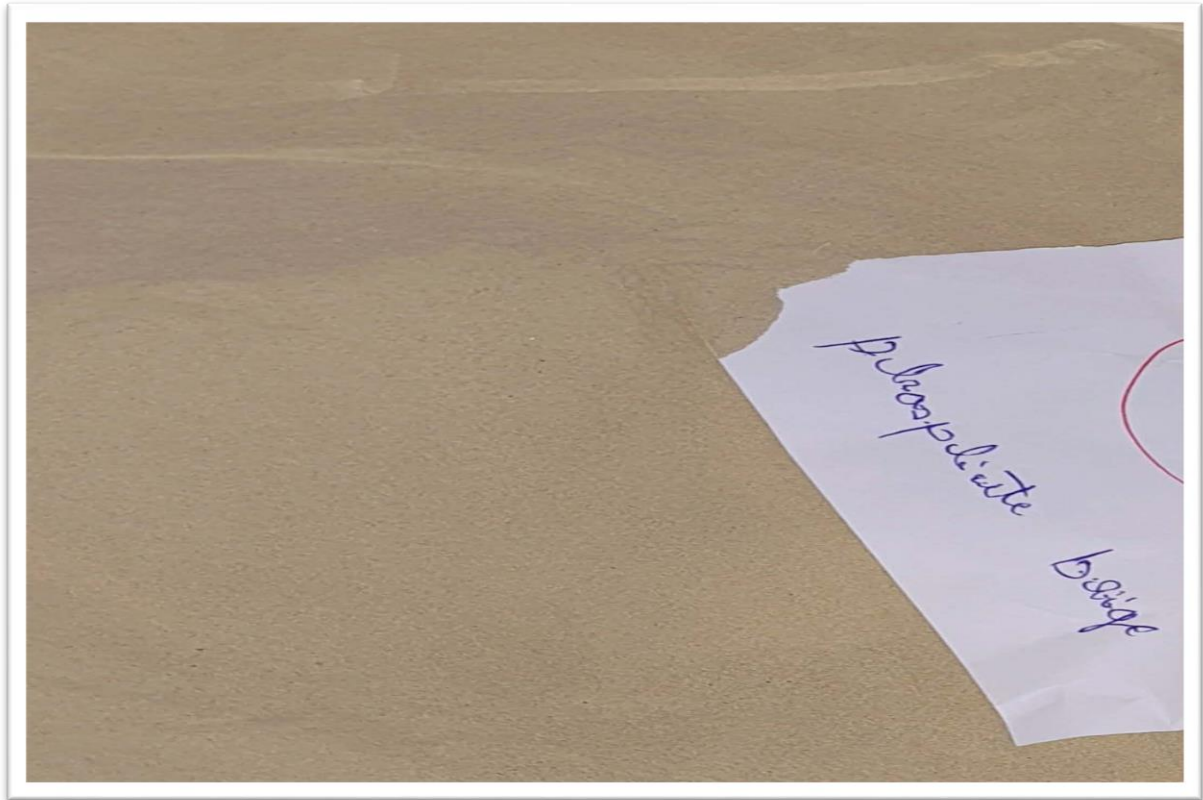


Figure 29 : photo présentatif du rejet de phosphate utilisé

b. Transport et Conservation :

Les échantillons ont été acheminés vers le laboratoire dans des conditions de scellement optimales afin de préserver leurs propriétés physico-chimiques initiales et d'éviter toute contamination externe ou variation d'humidité.

c. Préparation au Laboratoire :

Une fois au laboratoire, le matériau a subi une homogénéisation à l'aide d'un diviseur à riffle pour garantir leur homogénéisation avant de procéder aux analyses.

Chapitre04 :

Revalorisation des rejets de dépoussiérage du minéral de phosphate comme additif dans la fabrication du ciment ordinaire

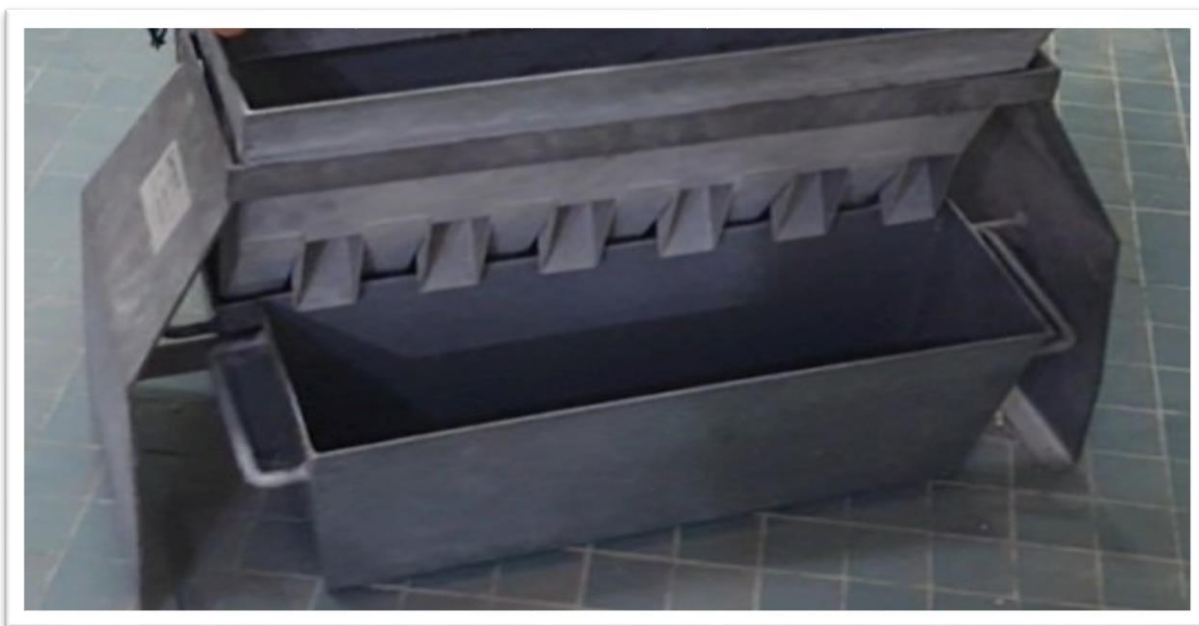


Figure 30:diviseur automatique

Figure33 : diviseur a riffle

d. Analyse granulométrique :

Tableau 15:analyse granulométrique du rejet de phosphate

Classes(mm)	Poids(g)	Rendement (%)	Cumulé refus	Cumulé passant
0.315	2.02	0.36	0.36	100
0.250	1.1	0.2	0.56	99.6
0.200	1.5	0.27	0.83	99.4
0.125	9.1	1.64	2.47	99.13
0.100	32.3	5.85	8.32	97.49
0.080	77.6	14.06	22.38	91.64
0.050	312.8	56.64	79.02	77.58
0.045	36.4	6.6	85.62	20.94
0.040	79.2	14.34	100	14.34

e. Analyses chimiques :

Chapitre04 :

Revalorisation des rejets de dépeussierage du minerai de phosphate comme additif dans la fabrication du ciment ordinaire

Tableau 16:composition chimique de phosphate

Elément Majeurs	%
Anhydride Phosphorique (P_2O_5)	20
Anhydride Carbonique (CO_2)	12-14
Anhydride Sulfurique (SO_3)	1-2
Oxyde de calcium (CaO)	37-43
Oxyde de Magnésium (MgO)	3-5
Oxyde de Fer (Fe_2O_3)	0.30-0.50
Oxyde de d' Aluminium (Al_2O_3)	0.45-0.65
Oxyde de Sodium (Na_2O)	0.5-1.5
Oxyde de Potassium (K_2O)	0.10-0.20
Oxyde de Silicium (SiO_2)	4.5-6.5
Perte au feu (CO_2 déduit)	4-8
Fluor (F)	2-3
Chlore (Cl) ppm	200-400



Figure 31 :matière première préparé

III. PREPARATION DES MELANGES :

Cette étape consiste à élaborer une série de ciments composés en substituant partiellement le clinker par le refus de dépeussierage de phosphate. Le taux de gypse est constant pour régler la prise de manière uniforme sur tous les mélanges.

Une élaboration d'un échantillon témoin(CPJ0) est nécessaire.

Chapitre04 :

Revalorisation des rejets de dépoussiérage du minéral de phosphate comme additif dans la fabrication du ciment ordinaire

Tableau 17:tableau de composition

Mélange	Clinker(%)	Rejet de phosphate(%)	Gypse(%)
CPJ0	95	/	5
M5	90	5	
M10	85	10	
M15	80	15	
M20	75	20	
M25	70	25	
M30	65	30	

M : mélange

Le passage de chacun de ces mélanges à un ciment normatif nécessite un broyage industriel à l'aide d'un broyeur à boulets de laboratoire en ajoutant un agent d'aide (TOA) en très faible quantité de 3 à 5 gouttes dans le but de diminuer la charge électrostatique et la neutraliser. Le temps de broyage est variable entre 10h et 5h selon le taux des rejets de phosphate dans le mélange (le phosphate n'a pas la même broyabilité que le clinker).



Figure 32 : broyeur à boulet de laboratoire

La seule façon de garantir que les mélanges ont tous la même distribution granulométrique c'est d'arrêter le broyage et mesurer le refus à l'aide d'un tamis de 45 μ m pour atteindre un refus d'environ 18%.

On récupère la poudre et on passe maintenant à la vérification de la qualité.



Figure 33: mélanges préparées

IV. ANALYSES PHYSIQUES DE CIMENT :

1. Détermination de la consistance normale de la patte de ciment :

Dans le but de déterminer la quantité d'eau nécessaire pour obtenir une pâte de fluidité standard, on mélange 500g de ciment avec une quantité d'eau convenable selon le protocole suivant :

- Introduire la quantité d'eau dans le récipient de malaxeur et ajouter les 500 gr de ciment soigneusement.
- mettre le malaxeur en marche à la vitesse lente une minute puis à la vitesse rapide pendant deux minutes.
- arrêter le mouvement et racler les parois et le fond du récipient de façon qu'aucune fraction de la patte n'échappe du malaxeur puis reprendre le malaxage pendant deux minutes à vitesse rapide.
- introduire la pâte malaxée dans un moule tronconique préalablement placé sur plaque de base en verre légèrement graissé, enlever l'excès de la pâte avec un outil droit de manière à Laisser la surface supérieure lisse. [19]

Chapitre04 :

Revalorisation des rejets de dépoussiérage du minéral de phosphate comme additif dans la fabrication du ciment ordinaire



Figure 34 :préparation du moule

- régler l'appareil Vicat muni de la sonde en vue de l'ajustement du repère au zéro de l'échelle.
 - relever la sonde en position d'attente de telle façon qu'elle arrive au contact de la pâte.
 - lâcher rapidement la sonde qui doit pénétrer verticalement au centre la pâte.
 - après 30 secondes de pénétration, effectuer la lecture indiquée par la distance entre la face inférieure de la sonde et la plaque de base .si la lecture ne dépasse pas 6 ± 1 mm enregistrer
- Les résultats trouvés[19]

Chapitre04 :

Revalorisation des rejets de dépoussiérage du minéral de phosphate comme additif dans la fabrication du ciment ordinaire



Figure 35 : vérification de la consistance normale du ciment

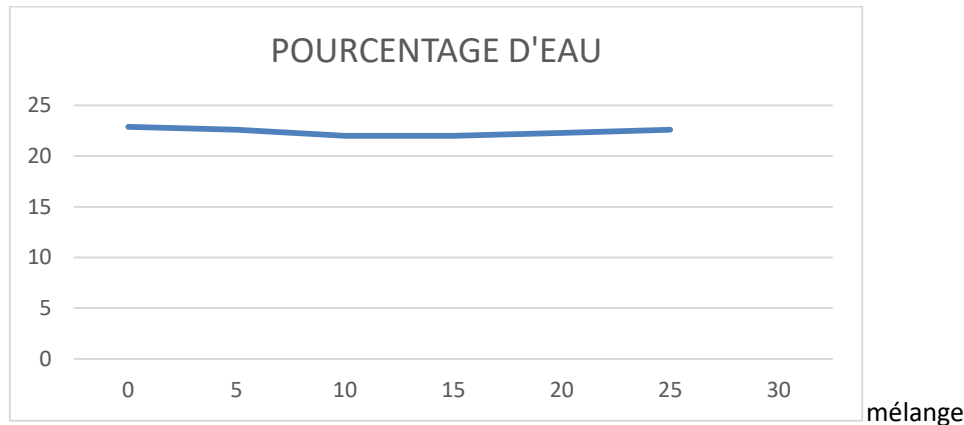
$$\%H_2O = (\text{quantité d'eau / masse}) \times 100$$

-conserver le moule remplis et arasé ainsi que sa plaque de base dans l'armoire humide pour L'essai début et fin de prise. [19]

Résultats :

Tableau 18: résultats de consistances normale des mélanges

Mélange	Quantité d'eau (ml)	Pourcentage d'eau(%)
CPJ0	114.5	22.9
M5	113	22.6
M10	110	22
M15	110	22
M20	111.5	22.3
M25	113	22.6
M30	114	22.8



Graphique 1: Résultat de consistance normale des mélanges

Discussion des résultats :

L'introduction de rejets de phosphate dans le mélange influence la demande en eau de manière non linéaire. Les résultats montrent deux phases distinctes :

-L'effet "Optimiseur" (0% à 15% de rejet) : On observe une baisse de la quantité d'eau (de 22,9% à 22%). Les fines de phosphate remplissent les vides entre les grains de ciment (effet filler). Cela libère l'eau initialement piégée dans ces vides, rendant la pâte plus fluide avec moins de liquide.

-L'effet "Absorbant" (20% à 30% de rejet) : La courbe s'inverse et la demande en eau augmente (jusqu'à 22,8%). À ces dosages élevés, la grande surface spécifique (finesse) des phosphates prend le dessus : il faut plus d'eau pour mouiller la surface de toutes ces nouvelles particules.

Conclusion : Le mélange à 10-15% est le plus performant en termes de compacité, car il nécessite le moins d'eau pour atteindre la consistance normale. C'est un indicateur positif pour une structure plus dense.

2. Détermination de temps de début de prise de ciment :

Dans le but de vérifier que le ciment durcit dans des délais prévisibles et compatibles avec les travaux de bétonnage. On respecte les étapes suivantes :

-Sortir le moule tronconique rempli et à raser de l'armoire humide au bout de 1h30 de gâchage.

(Moule conservé selon : essai consistance normale).

-placer le moule qui repose sur la plaque en verre dans l'axe de l'aiguille de l'appareil Vicat.

Chapitre04 :

Revalorisation des rejets de dépoussiérage du minéral de phosphate comme additif dans la fabrication du ciment ordinaire

- mettre l'appareil en marche puis à appuyer sur la touche [START].
- abandonnée à elle-même sans vitesse initiale, laisser l'aiguille descendre perpendiculairement à la surface de la pâte pendant un court arrêt.
- lorsque l'aiguille rencontre de la résistance et ne pénètre plus qu'à une distance de 2.5mm de la base inférieure de la pâte, cela indique automatiquement le temps de début de prise. [19]

Chapitre04 :

Revalorisation des rejets de dépoussiérage du minéral de phosphate comme additif dans la fabrication du ciment ordinaire



Figure 36:détermination du temps de prise de ciment

-calcul :

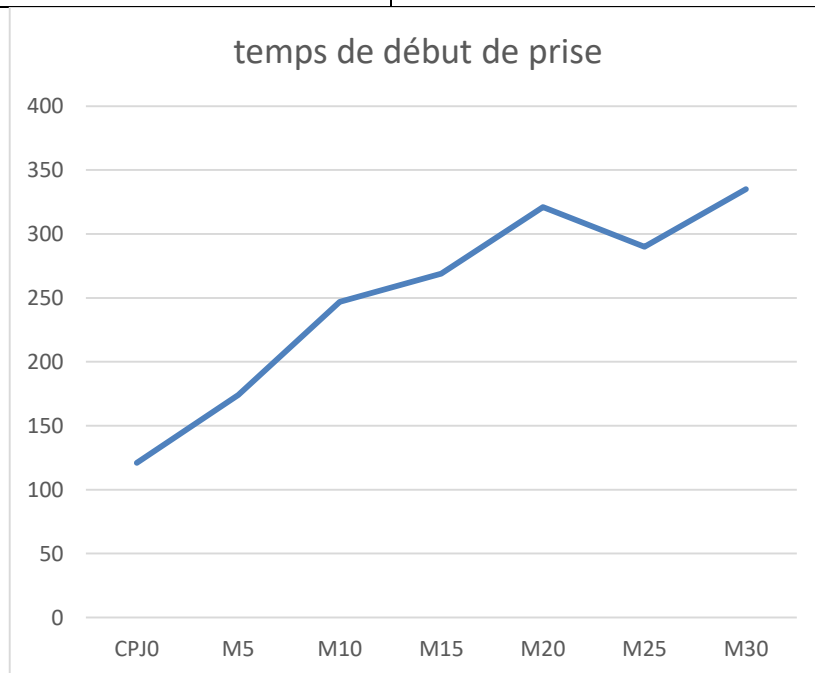
Temps de début de prise =le temps ou l'aiguille ne pénètre plus qu'à une distance de 2.5mm de la base (temps d'essai) -le temps de gâchage.

Chapitre04 :

Revalorisation des rejets de dépoussiérage du minéral de phosphate comme additif dans la fabrication du ciment ordinaire

Tableau 19: résultats de temps de début de prise

Mélange	Temps de début de prise (min)
CPJ0	121
M5	174
M10	247
M15	269
M20	321
M25	290
M30	335



Graphique 2: Résultat de temps de début de prise des mélanges

Discussion des résultats :

Le tableau montre que l'ajout croissant de rejet de dépoussiérage de phosphate au mélange retarde globalement le début de prise par rapport au témoin CPJ0 (121 min). Le phosphate est

Revalorisation des rejets de dépolssiérage du minéral de phosphate comme additif dans la fabrication du ciment ordinaire

un retardateur de prise puissant. Les impuretés présentes dans les rejets (comme le P_2O_5 soluble) perturbent la cristallisation des silicates de calcium (principalement le C_3S). Ils forment une couche protectrice autour des grains de ciment, ce qui empêche l'eau de réagir rapidement

Conclusion : Le dosage idéal semble se situer entre 5% et 15% si l'on veut maintenir un temps de prise raisonnable (entre 3 et 4h30) tout en valorisant les déchets.

3. Détermination de l'expansion ciment :

Dans le but de vérifier la stabilité dimensionnelle du ciment durci et détecter les risques de fissuration ou de dégradation après prise. On respecte les étapes suivantes :

- utiliser une quantité de pâte de consistance normale.
- placer le Chatelier sur une plaque en verre légèrement huilé
- remplir le moule par la pâte sans tassement.
- araser la surface supérieure avec un outil à bord et éviter l'ouverture de la fente du moule soit avec les doigts ou tout moyen mécanique.
- recouvrir la surface supérieure avec une autre plaque de verre légèrement huilé.
- porter l'ensemble dans un bain d'eau avec un poids supplémentaire sur la plaque recouvre pendant 24h à $20^{\circ}C \pm 1$ et taux d'humidité 98%.
- Après 24h mesurer l'écartement entre les points des aiguilles (E1).
- chauffer graduellement le moule (pâte comprise) jusqu'à ébullition en 30min maintenir le bain d'eau à la température d'ébullition pendant 3h+5min.
- au bout de 3h mesurer l'écartement entre les points des aiguilles (E2).

Expansion à chaud = $E2 - E1$. (E1 et E2 sont exprimés en mm). [19]

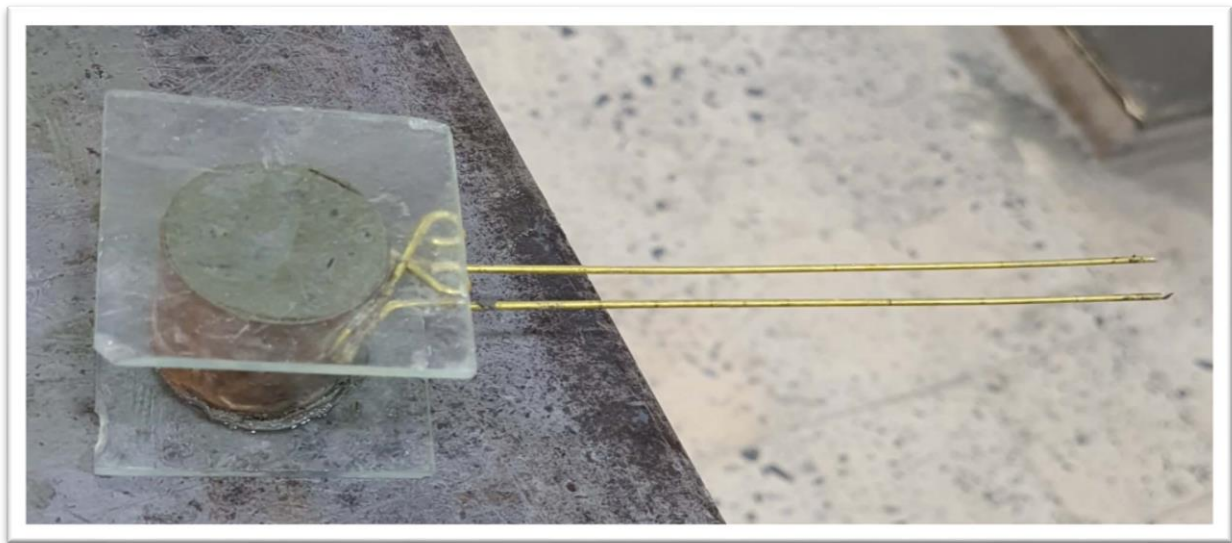


Figure 37:détermination de l'expansion du ciment

Tableau 20: tableau comparative de l'expansion du ciment CPG et du mélange avec phosphate

	CPJ0	Mélange avec phosphate
E1(mm)	20	17
E2(mm)	25	17
Expansion (mm)	5	0

Discussion des résultats :

- Le ciment CPJ0 seul est conforme (5 mm est généralement en dessous de la limite normative de 10 mm).
- Le mélange avec phosphate est ultra-stable. L'expansion nulle indique que le phosphate a neutralisé les facteurs d'instabilité volumique du ciment.
- L'expansion est généralement causée par l'hydratation tardive de la chaux libre. Le phosphate peut réagir avec cette chaux pour former des phosphates de calcium stables (comme l'hydroxyapatite ou le phosphate tricalcique). Ces nouveaux composés ne gonflent pas à la chaleur ainsi qu'il modifie la solubilité des ions durant l'hydratation. Il peut ralentir la formation de certains cristaux expansifs (comme l'étrangéité tardive) ou modifier la structure du gel C-S-H pour le rendre plus compact.

V. ESSAIS MECANIQUES DE CIMENT :

Matériaux utilisés pour la préparation des (03) éprouvettes (40×40×160) mm³ :

- Sable sec : 1350gr

Chapitre04 :

Revalorisation des rejets de dépoussiérage du minéral de phosphate comme additif dans la fabrication du ciment ordinaire

-Ciment : 450gr

-Eau : 225gr

1. Malaxage:

-le malaxeur étant en état de fonctionnement verser l'eau dans le récipient, puis ajouter le ciment.

-mettre le malaxeur à vitesse lente pendant une minute dans les (30s) secondes dernières introduire le sable. Mettre le malaxeur à vitesse rapide pendant deux minutes.

-arrêter le mouvement du malaxeur et racler les parois et le fond du récipient de façon qu'aucune partie du mortier n'échappe au malaxeur.

-repandre le malaxage pendant deux minutes à ne vitesse rapide. [19]



Figure 38:procédé du malaxage

2. Moulage des éprouvettes:

Le moulage est effectué au moyen d'appareil à choc.

- disposer le mortier sur une plaque non réactive au ciment et absorbante.
- former une galette approximativement rectangulaire partagée en six (06) fractions sensiblement égales.
- fixer le moule sur la table à choc.
- introduire dans chacun des compartiments une fraction de la galette.

Chapitre04 :

Revalorisation des rejets de dépoussiérage du minéral de phosphate comme additif dans la fabrication du ciment ordinaire

- mettre la machine en mouvement pour 60 chocs.
- recommencer les mêmes opérations pour la deuxième couche de la galette.
- retirer le moule de la machine, débarrasser et araser le surplus de mortier avec une règle métallique à déplacer en mouvement de scie sur la longueur des éprouvettes.
- identifier les éprouvettes sur le moule (ex : Z1, S1, S2, S3).
- le moule remplie de mortier est conservé dans une armoire humide (98%) et à une température de $20^{\circ}\text{C} \pm 2$ et sans empilage les uns sur les autres. [19]



Figure 39:moulage des éprouvettes

3. Démoulage des éprouvettes:

- Au bout de 24 heures de conservation procéder au démoulage des éprouvettes avec précaution.

Chapitre04 :

Revalorisation des rejets de dépoussiérage du minéral de phosphate comme additif dans la fabrication du ciment ordinaire

- Marquer les éprouvettes « code d'échantillon, lieu d'échantillon : Z1, S1, S2, S3 » sans utiliser la face de compression puis immerger dans l'eau à une température de $20^{\circ}\text{C} \pm 1$ jusqu'à le moment d'essai.
- les éprouvettes doivent être sortie de l'eau au moins 15 minutes avant l'essai et essuyées avec chiffon.
- l'âge des éprouvettes est compté à partir du moment de malaxage jusqu'à début d'essai. [19]



Figure 40 :démoulage des éprouvettes

4. Résistance à la flexion :

L'essai de flexion sert à vérifier la conformité normative du ciment et sa résistance à la fissuration selon les étapes suivantes :

- placer le prisme entre le plateau supérieur et le plateau inférieur.
- faire monter la charge verticalement avec vitesse de $50\text{N/s} \pm 10\text{ N/s}$ jusqu'à rupture.
- enregistrer le résultat affiché sur pupitre d'affichage.
- calculer la résistance moyenne. [19]

Chapitre04 :

Revalorisation des rejets de dépoussiérage du minéral de phosphate comme additif dans la fabrication du ciment ordinaire



Figure 41: machine à flexion

*La résistance à la flexion est calculée au moyen de la formule suivante :

$$R_f = 1.5 \times F_f \times l / b^3$$

Où :

R_f est la résistance à la flexion, en newton.

B est le côté de la section carrée du prisme, en millimètre.

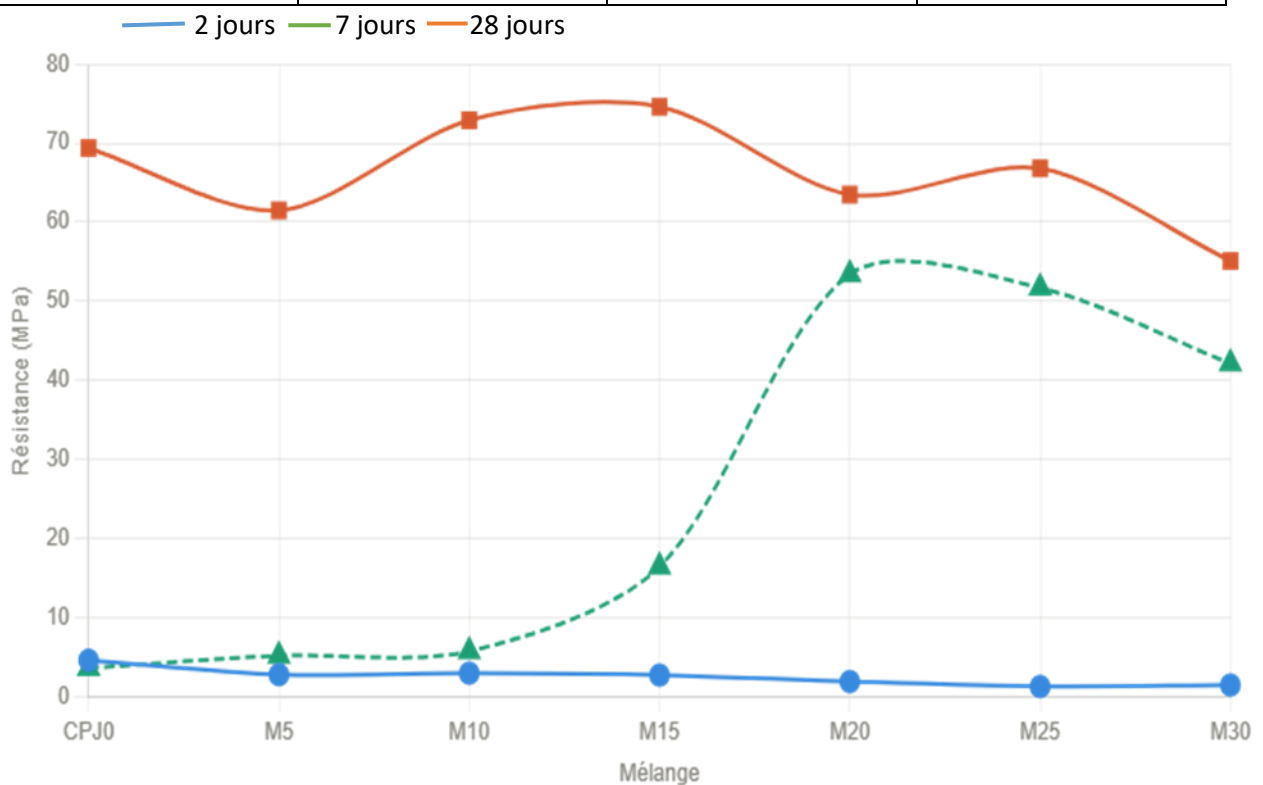
F_f est la charge appliquée au milieu du prisme à la rupture, en newton.

L est la distance entre les appuis, en millimètres. [19]

Résultats :

Tableau 21: Tableau de l'évolution de la résistance à la flexion des mélanges

Mélange	2jours	7jours	28jours
CPJ0	4.58	3.57	69.4
M5	2.77	5.14	61.5
M10	2.92	5.71	72.9
M15	2.71	16.41	74.6
M20	1.87	53.4	63.5
M25	1.27	51.7	66.8
M30	1.41	42.1	55.1



Graphique 3: Résultat de résistance a la flexion des éprouvettes

Discussion des résultats :

Résistance Initiale (2 jours) : On observe désormais une tendance claire. Plus le taux de rejet de phosphate augmente, plus la résistance initiale diminue à cause de L'incorporation des phosphates qui agit comme un retardateur de durcissement durant les premières 48 heures.

Évolution à Moyen Terme (7 jours) : C'est ici que le comportement change radicalement. Alors que le témoin CPJ0 stagne presque, tous les mélanges avec rejets voient leur résistance s'envoler.

Chapitre04 :

Revalorisation des rejets de dépoussiérage du minerai de phosphate comme additif dans la fabrication du ciment ordinaire

Les mélanges M20 et M25 dépassent les 7 jours, montrant une activité chimique très intense après la phase d'induction initiale

Résistance Finale (28 jours) : Le mélange à 15% reste le plus performant à long terme. Jusqu'à 25% de rejets, les performances restent comparables ou supérieures au ciment pur (CPJ0). La chute n'intervient réellement qu'à 30%.

Conclusion : Le point optimal est M15 ; il offre la meilleure résistance structurelle à 28 jours. On confirme que le phosphate ralentit l'hydratation initiale du clinker. Chimiquement, les ions phosphates peuvent précipiter à la surface des grains de ciment, formant une couche protectrice qui retarde la formation des premiers cristaux de C-S-H.

5. Résistance à la compression :

L'essai de résistance à la compression est le test ultime et le plus important : il sert à déterminer la capacité de charge maximale du ciment une fois durci, définissant ainsi sa classe de performance pour garantir la sécurité et la stabilité des structures face à l'écrasement.

- placer le demi- prisme latéralement entre le plateau supérieur et le plateau inférieur.
- faire monter la charge verticalement avec vitesse de $2400\text{N/s} \pm 200\text{ N/s}$ jusqu'à rupture.
- enregistrer le résultat affiché sur pupitre d'affichage. [19]



Chapitre04 :

Revalorisation des rejets de dépoussiérage du minerai de phosphate comme additif dans la fabrication du ciment ordinaire

Figure 42:machine a compression

-calculer la résistance moyenne.

*La résistance à la compression est calculée au moyen de la formule suivante :

$$R_c = F_c / 1600$$

Où :

R_c est la résistance à la compression, en newton par millimètre carrée.

F_c est la charge maximale à la rupture, en newton.

1600 = 40mm×40mm est l'aire des plateaux ou des plaques auxiliaires, en millimètre. [19]

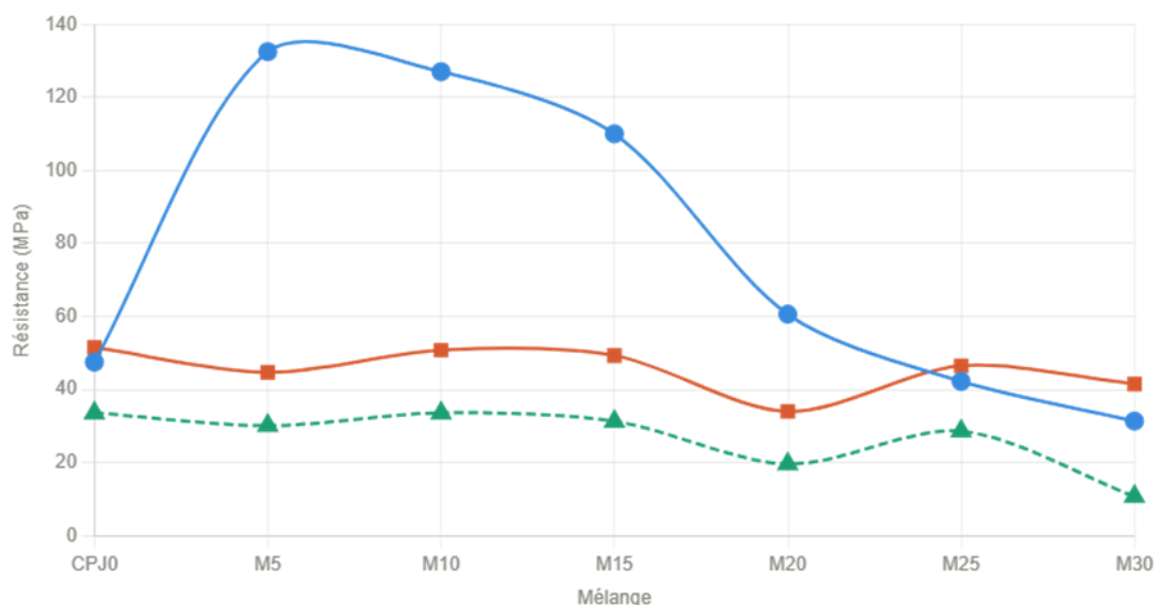
Résultats :

Tableau 22:Tableau de l'évolution de la résistance à la compression des mélanges

Mélange	2jours	7jours	28jours
CPJ0	47.5	33.6	51.5
M5	132.5	30.1	44.7
M10	127	33.6	50.8
M15	110	31.3	49.3
M20	60.6	19.6	34
M25	42.2	28.6	46.5
M30	31.4	10.7	41.5

— 2 jours — 7 jours — 28 jours

Revalorisation des rejets de dépoussiérage du minéral de phosphate comme additif dans la fabrication du ciment ordinaire



Graphique 4: Résultat de résistance à la compression des éprouvettes

Discussion des résultats :

Résistance Initiale (2 jours) : Les mélanges M5, M10 et M15 affichent des résistances hors norme pour un ciment classique à 2 jours, dépassant largement le témoin. Les rejets de phosphate pourraient agir comme des accélérateurs de durcissement ultra-rapides au tout début (formation massive d'étrangéité ou de sels complexes), mais cette structure initiale semble se fragiliser ou se transformer lors de la poursuite de l'hydratation.

À partir de 20% de rejet, la résistance s'effondre rapidement.

Évolution à 7 jours : On observe une baisse de résistance entre 2 et 7 jours pour presque tous les mélanges. Ce phénomène peut indiquer une instabilité précoce des hydrates ou une réorganisation interne de la matrice cimentaire.

Résistance Finale (28 jours) :

Tous les mélanges regagnent en force entre 7 et 28 jours. Le mélange à 10% de rejets est quasiment à égalité avec le témoin, confirmant une excellente compatibilité.

Conclusion :

L'intégration des rejets de phosphate dans ce ciment produit un matériau aux caractéristiques uniques :

-Ciment à Haute Résistance Initiale (HRI) : Les dosages à 5%, 10% et 15% transforment le

Revalorisation des rejets de dépeussierage du minerai de phosphate comme additif dans la fabrication du ciment ordinaire

ciment en un matériau extrêmement dur dès 48 heures. Cela est idéal pour des applications nécessitant un durcissement éclair (préfabrication, réparations urgentes).

-Taux de substitution recommandé : Pour maintenir une stabilité à 28 jours comparable au ciment standard, le taux de 10% (M10) est le plus performant.

VI. ANALYSE CHIMIQUE DE CIMENT :

1. Analyse par les rayons x :

- Préparation des pastilles pour les analyses au Rayons X
- Pesse 7.5 g du produit broyé + 1 g du serre (inerte, juste pour le compactage)
- Destination compacteur pour crée les pastilles et on place ces pastilles dans la machines QCX (rayons x) [19]



Figure 43:analyse chimique par fluorescence X

Résultats :

Tableau 23:Analyse chimique par fluorescence X des échantillons de ciment

Nom de l'échantillon	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	K ₂ O (%)	Na ₂ O (%)	SO ₃ (%)	Cl (%)
CIMENT 20%	19,68	4,3	3,45	59,03	2,2	0,4	0,344	2,42	0,031

Chapitre04 :

Revalorisation des rejets de dépoluissérage du minéral de phosphate comme additif dans la fabrication du ciment ordinaire

CIME NT 15%	20,79	4,57	3,77	59,02	2,11	0,43	0,318	2,27	0,0 21
CIME NT 10%	20,12	4,41	3,61	60,76	1,74	0,4	0,262	2,23	0,0 15
CIME NT 05%	20,56	4,47	3,76	58,52	2,07	0,43	0,316	2,2	0,0 26
CIME NT SANS P2O5	20,75	4,37	3,88	61,63	1,16	0,38	0,173	2,1	0,0 1
ciment 30	17,91	3,61	3,09	57,09	2,35	0,36	0,347	2,49	0,0 25

Discussion des résultats :

1. SiO₂ — teneur en silice

La silice varie entre 17,91% (M30) et 20,79% (M15). Les mélanges M5 à M15 maintiennent des teneurs proches du référence CPJ0 (20,75%), ce qui traduit une dilution encore limitée du clinker. À partir de M20 (19,68%) et surtout M30 (17,91%), la chute devient significative. Cette baisse reflète la dilution progressive des phases siliceuses du clinker (C₃S et C₂S) par le rejet de phosphate qui est naturellement pauvre en SiO₂. Ces phases étant les principales responsables de la résistance à long terme, leur appauvrissement est un indicateur préoccupant.

2. Al₂O₃ — teneur en alumine

L'alumine suit la même tendance décroissante, de 4,57% (M15) à 3,61% (M30), avec le CPJ0 à 4,37%. Les valeurs restent relativement stables entre M5 et M20 (4,30–4,57%), puis chutent nettement à M30. L'alumine conditionne la formation du C₃A, phase responsable de la prise initiale et de la résistance précoce. La valeur légèrement élevée de M15 (4,57%) par rapport au CPJ0 peut s'expliquer par une hétérogénéité du rejet ou une variabilité d'échantillonnage.

3. Fe₂O₃ — teneur en oxyde de fer

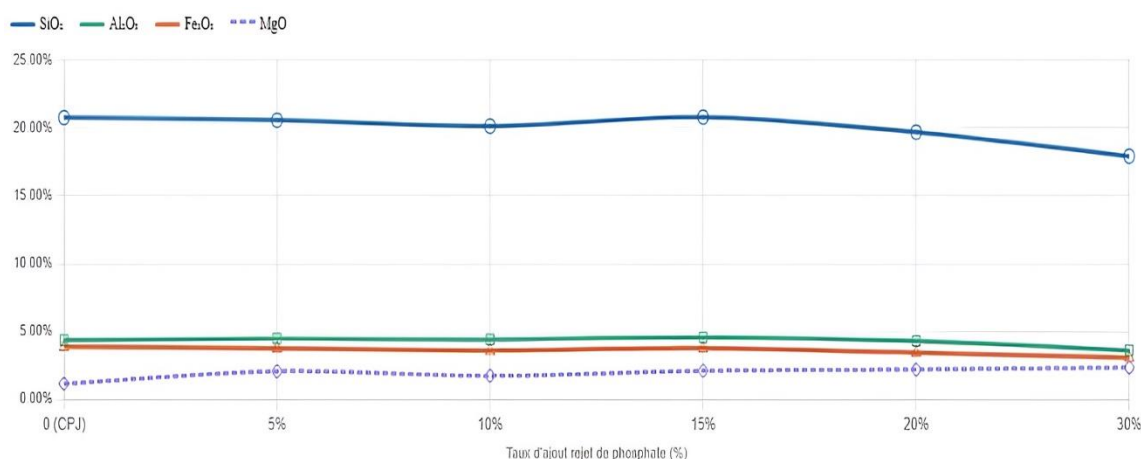
Le Fe₂O₃ varie de 3,09% (M30) à 3,88% (CPJ0), avec une diminution progressive et régulière

Revalorisation des rejets de dépeussierage du minerai de phosphate comme additif dans la fabrication du ciment ordinaire

en fonction du taux d'ajout. Cette baisse traduit la dilution de la phase C_4AF du clinker. Bien que le C_4AF contribue peu aux résistances mécaniques, il joue un rôle dans la couleur du ciment et dans la résistance aux sulfates. La diminution reste modérée jusqu'à M20 et s'accroît à M30.

4. MgO — teneur en magnésie

Le MgO présente une évolution inverse aux autres oxydes : il augmente avec le taux d'ajout, passant de 1,16% pour le CPJ0 à 2,35% pour M30. Cela indique clairement que le rejet de phosphate est porteur de magnésie. Toutes les valeurs restent bien en dessous de la limite NA 442 (5,0%), donc pas de risque d'expansion par la périclase. Néanmoins la tendance croissante mérite d'être surveillée si des taux d'ajout plus élevés devaient être envisagés.

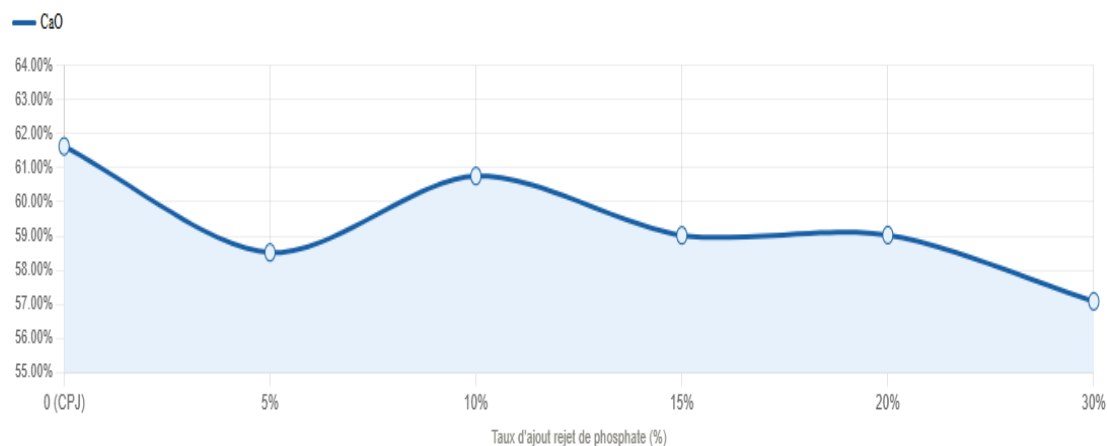


Graphique 5: Développement de pourcentage de SiO₂/ Al₂O₃/FeO₂ et MgO

5. CaO — teneur en chaux totale

C'est le paramètre le plus important pour un ciment Portland. Le CPJ0 présente la teneur la plus élevée (61,63%), confirmant un clinker bien dosé en chaux. On observe une tendance générale à la baisse avec l'augmentation du taux de phosphate, atteignant 57,09% pour M30. Cependant la corrélation n'est pas parfaitement linéaire — M5 affiche 58,52%, valeur inférieure à M10 (60,76%) et M15 (59,02%), ce qui peut indiquer une hétérogénéité dans le prélèvement ou le mélange de cet échantillon. La baisse du CaO total traduit la dilution du clinker et une moindre disponibilité en chaux pour former les silicates de calcium hydrauliques.

Revalorisation des rejets de dépolssiérage du minéral de phosphate comme additif dans la fabrication du ciment ordinaire



Graphique 6: Développement du pourcentage de CaO dans les mélanges

6. K_2O et Na_2O — alcalins

Les teneurs en K_2O restent stables et faibles (0,36–0,43%) sans tendance claire. En revanche le Na_2O augmente progressivement avec le taux d'ajout, passant de 0,173% (CPJ0) à 0,347% (M30), soit un doublement. Cette hausse montre que le rejet de phosphate apporte des alcalins solubles. Des teneurs élevées en Na_2O peuvent déclencher des réactions alcali-silice (RAS) dans le béton en présence de granulats réactifs, un point à surveiller notamment pour M25 et M30

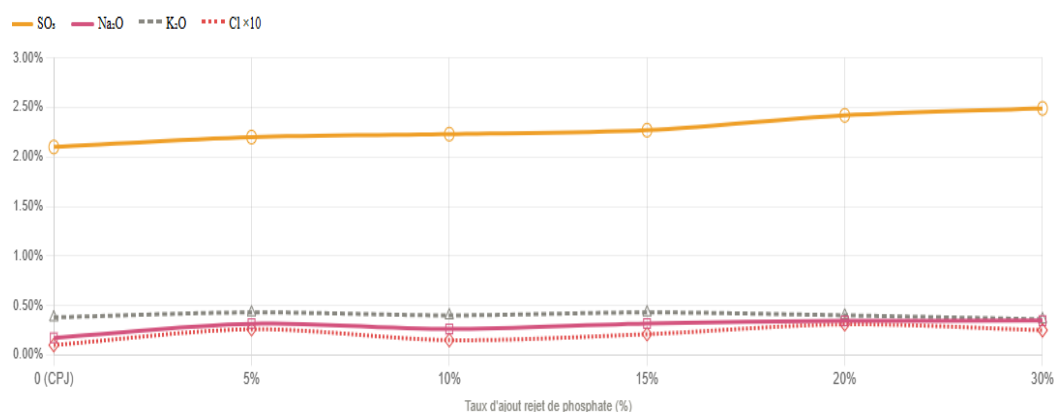
7. SO_3 — teneur en sulfates

Le SO_3 augmente régulièrement de 2,10% (CPJ0) à 2,49% (M30), restant en dessous de la limite NA 442 de 3,5%. Cette hausse progressive confirme que le rejet de phosphate apporte des sulfates. L'augmentation reste modérée mais elle est systématique — couplée à la hausse du Na_2O , elle peut perturber l'équilibre sulfurique de la pâte de ciment, notamment la conversion étrangéité/monosulfite à moyen terme

8. Cl — teneur en chlorures

Les teneurs en chlorures sont très faibles (0,010–0,031%), largement en dessous de la limite de 0,10% fixée par la NA 442. Le rejet de phosphate n'introduit pas de chlorures significatifs — c'est un point positif pour la durabilité des armatures en béton armé.

Revalorisation des rejets de dépoluissérage du minérail de phosphate comme additif dans la fabrication du ciment ordinaire



Graphique 7: Développement du pourcentage de K₂O / Na₂O /SO₃ ET Cl

Conclusion :

La composition chimique évolue de façon cohérente avec le taux d'ajout de rejet de phosphate. Les effets principaux sont une dilution progressive des oxydes constitutifs du clinker (SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, CaO) et un enrichissement en éléments apportés par le phosphate (MgO, Na₂O, SO₃). Le mélange M10 présente le meilleur équilibre chimique, avec des teneurs en CaO et SiO₂ proches de la référence et des teneurs en éléments indésirables encore faibles. Au-delà de 15%, la dégradation chimique devient trop prononcée pour garantir la qualité du ciment

2. La perte au feu

Déterminée par calcination. Le gaz carbonique et l'eau sont chassés et les éléments oxydables éventuellement présents sont oxydés.

- On pèse 1g de matière sèche dans un creuset en platine propre
- Mettre le creuset et son contenu, muni de son couvercle dans le four dont la température est stabilisée à 975 C
- Retirer le couvercle du creuset du four au bout de 5 min et laisser le creuset dans le four Pendant 10min supplémentaire, refroidir le creuset de dans un dessiccateur à température ambiante,
- peser, remettre le creuset et son contenu dans le four pour une durée de 15 min
- repeser La différence entre les deux pesées doit être 0.0005 sinon émettre de nouveau le creuset dans le four pendant 15 min autre jusqu'à satisfaction de cette condition par les deux dernières pesées successives. [19]

Elle est déterminée selon la formule suivante : Perte au feu = (Mi-Mf)*100

Chapitre04 :

Revalorisation des rejets de dépoussiérage du minerai de phosphate comme additif dans la fabrication du ciment ordinaire

Mi : masse initiale (prise d'essai)

Mf : masse finale (produit calciné)

Résultats :

Tableau 24: les résultats de la perte au feu des différents mélanges

Mélanges	PAF(%)
CPJ0	2
M5	4
M10	4.8
M15	4
M20	8
M25	6
M30	9

Discussion des résultats :

Les mélanges M5, M10 et M15 respectent la limite de PAF ($\approx 5\%$) de la norme NA 442. Au-delà de 15 % d'ajout, la PAF devient non conforme.

VII. CHOIX DU DOSAGE OPTIMAL EN REJET DE PHOSPHATE (EVALUATION TECHNIQUE SELON LA NORME NA 442) :

15% rejet de phosphate est le pourcentage optimal pour plusieurs raisons :

- Résistances mécaniques : M15 donne la meilleure R_c 28j de toute la série (74.6 MPa), supérieure même au CPJ0 de référence (51.5 MPa). La résistance à la flexion 28j est aussi la plus haute (74.6 MPa).
- Durabilité : Expansion nulle (0 mm), bien en dessous de la limite NA 442 de 10 mm. Tous les mélanges avec phosphate ont d'ailleurs une meilleure stabilité volumique que le CPJ0.
- Chimie (NA 442) : $SO_3 = 2.27\%$ (limite 3.5%), $PAF = 4\%$ (limite 5% pour CPJ), CaO cohérent, Cl très faible (0.021%).

- Début de prise :269 min, dans une plage acceptable pour un ciment ordinaire
- Consistance normale :22%, pratiquement identique au CPJ0 (22.9%), ce qui est favorable pour la maniabilité.

VIII. CLASSIFICATION DU CIMENT OPTIMAL M15 SELON LES EXIGENCES MECANIQUES ET PHYSIQUES DE LA NORME NA 442 :

On peut classer notre mélange optimal selon les exigences normatives suivante :

Figure47 : exigence mécanique et physique définie en termes de valeurs caractéristiques

Tableau 25:Tableau des classes de résistance du ciment selon la norme EN 197-1/442[19]

Classe de résistance	Résistance à la compression MPa				Temps de début de prise min	Stabilité (expansion) mm
	Résistance à court terme		Résistance courante			
	2 jours	7 jours	28 jours			
32,5 N	—	≥ 16,0	≥ 32,5	≤ 52,5	≥ 75	≤ 10
32,5 R	≥ 10,0	—				
42,5 N	≥ 10,0	—	≥ 42,5	≤ 62,5	≥ 60	
42,5 R	≥ 20,0	—				
52,5 N	≥ 20,0	—	≥ 52,5	—	≥ 45	
52,5 R	≥ 30,0	—				

Résultats : Le mélange M15 satisfait toutes les exigences de la classe 52,5 R — la classe la plus élevée de la norme EN 197-1 / NA 442.

Vérification :

Tableau 26:Vérification de la conformité du mélange M15 aux exigences de la classe 52,5 R

Critère	Exigence 52.5R	M15
Résistance à la compression 2jrs	≥ 30,0 MPa	110 MPa
Résistance à la compression 28jrs	≥ 52,5 MPa	74.6 MPa
Début de prise	≥ 45 min	269 min
expansion	≤ 10 mm	0mm

IX. EVALUATION ECONOMIQUE DE L'INCORPORATION DE 15% DE REJET DE PHOSPHATE DANS LA FABRICATION DE CIMENT :

En se basant sur les données réelles de production de la Société des Ciments de Tébessa et les prix unitaires des matières premières, on peut faire toute une étude économique dans le but de diminuer les tarifs de production et en gardons la même qualité souhaitable

1. Calcul du prix de revient du clinker (base annuelle SCT)

Le prix de revient du clinker a été estimé à partir des consommations annuelles réelles de la cimenterie, en intégrant les coûts des matières premières entrant dans sa fabrication (calcaire, argile, sable et minéral de fer), auxquels s'ajoutent les charges énergétiques et d'exploitation.

Tableau 27: Tableau de calcul du prix de revient des matières du clinker (base annuelle SCT)

Matière	Conso. annuelle (T)	PU (DA/T)	Coût total (DA)	DA/T
Calcaire	52 763	210	11 080 230	28,8
Argile	14 176	180	2 551 680	6,6
Sable	988	280	276 640	0,7
M/Fer	5 110	2 875	14 691 250	38,2
Total matières	73 037	—	28 599 800	74,4
Production clinker annuelle (T)			384 653 T	

Note : coût matières premières uniquement.

Un forfait énergie+ exploitation de 412 DA/T est ajouté pour obtenir le coût complet du clinker (486 DA/T).

2. Composition et coût par tonne de ciment M15 :

* Coût transport estimé : $78 \text{ km} \times 0,67 \text{ DA/T/km}$ (tarif moyen camion vrac Algérie) $\approx 52 \text{ DA/T}$ de rejet.

Tableau 28: composition et cout par tonne de ciment M15

Composant(%)	M15 %	PU (DA/T)	Coût M15 (DA/T)
Clinker	80	486	388.8
Gypse	5	1680	84
Rejet de phosphate	15	0	0
Transport de phosphate	/	52	7.8
Total	100		480.6

3 Comparaison économique du produit 52.5R et M15 :

Tableau 29: comparaison économique

Produit	Cout d'un (DA/T)	Total annuel (DA)	Différence(DA/an)	Différence(%)
52.5R	10 000	4 318 550 000	4 110 807 745	95,2
M15	481	207 742 255		

X. DOMAINE D'UTILISATION DU CIMENT M15 :

- Bétons à hautes performances (BHP) : structures nécessitant des bétons de classe C40 à C60 et plus.
- Ouvrages d'art et génie civil : Ponts, tunnels, barrages où la résistance mécanique et la durabilité sont critiques.
- Bétons préfabriqués La classe R est idéale pour le décoffrage rapide en usine.
- Travaux en conditions difficiles : Milieux agressifs, sols sulfatés, zones sismiques grâce à la stabilité chimique (SO_3 et Cl^- très faibles).
- Fondations et infrastructures lourdes : Immeubles de grande hauteur, centrales, installations industrielles.

XI. CONCLUSION :

Ce chapitre a été consacré à l'évaluation technique et économique et à la sélection du pourcentage optimal d'incorporation des rejets de dépoussiérage de minéral de phosphate dans la fabrication du ciment ordinaire. Pour ce faire, différentes formulations ont été préparées en substituant le clinker par des taux croissants de rejet de phosphate allant de 5% à 30%, avec un taux fixe de gypse de 5%. L'ensemble des mélanges a été soumis à une série d'analyses physiques, mécaniques et chimiques conformément aux exigences de la norme NA 442 / EN 197-1.

L'analyse comparative des résultats obtenus a montré que l'incorporation des rejets de phosphate influence de manière significative les propriétés du ciment. En effet, une augmentation progressive du taux d'ajout entraîne un retard du début de prise, une amélioration de la stabilité volumique ainsi qu'une évolution notable des résistances mécaniques.

Sur la base d'une évaluation multicritère intégrant les performances mécaniques, la conformité chimique, la durabilité et l'aspect économique, le mélange M15a été retenu comme formulation optimale. La classification de ce mélange selon les critères de la norme confirme qu'il appartient à la classe 52,5 R, classe de résistance la plus élevée, ce qui témoigne de l'apport positif des rejets de phosphate sur les performances cimentaires lorsqu'ils sont incorporés à un dosage maîtrisé.

CONCLUSION GENERALE

Le présent travail de fin d'études avait pour objectif d'étudier la faisabilité technique et économique de la valorisation des rejets de dépoussiérage du minerai de phosphate comme additif dans la fabrication du ciment ordinaire, en s'appuyant sur une démarche scientifique rigoureuse allant de la recherche bibliographique jusqu'à l'évaluation économique comparative.

Le premier chapitre a posé les bases théoriques nécessaires à la compréhension de cette étude, à travers une recherche bibliographique approfondie sur le ciment, ses constituants, ses propriétés et ses différentes classifications normatives. Il a également présenté la Société des Ciments de Tébesa — Elma Labiod (SCT), son implantation géologique et ses caractéristiques de production, fournissant ainsi le cadre industriel dans lequel s'inscrit ce travail.

Le deuxième chapitre a décrit en détail le processus de préparation des matières premières et les différentes étapes de fabrication du ciment au sein de la cimenterie, depuis l'extraction et le broyage des matières crues jusqu'à la cuisson au four rotatif et le broyage final du clinker avec les ajouts. Cette description a permis de comprendre les mécanismes de production et d'identifier les leviers d'optimisation possibles.

Le troisième chapitre a présenté le Complexe Minier de Djebel El Onk, principal gisement de phosphate de la région, en mettant en lumière les volumes importants de rejets de dépoussiérage générés lors du traitement du minerai. Ces rejets, jusqu'alors considérés comme des déchets industriels sans valorisation, constituent la matière première de substitution au cœur de cette étude.

Le quatrième et dernier chapitre a constitué le cœur de ce travail. Sur le plan technique, différentes formulations de ciment ont été préparées en incorporant des taux croissants de rejet de phosphate (5% à 30%), avec un taux fixe de gypse de 5%. L'ensemble des mélanges a été soumis à une caractérisation physique, mécanique et chimique complète, conformément aux exigences de la norme NA 442 / EN 197-1. L'analyse multicritère des résultats a permis de retenir le mélange M15 (15% de rejet de phosphate) comme formulation optimale, affichant la meilleure résistance à la compression à 28 jours (74,6 MPa), une stabilité volumique parfaite (expansion nulle), et une composition chimique entièrement conforme aux exigences normatives. Ce mélange a été classé en CEM 52,5 R, classe de résistance maximale selon la norme EN 197-1. Sur le plan économique, la substitution de 15% du clinker par ce déchet industriel disponible gratuitement permet de réduire le coût de production du ciment de 10000 DA/T à 481 DA/T, soit une économie de 95.2% représentant près de 4.1 milliards de

DA par an pour la SCT.

En définitive, les résultats obtenus démontrent que la valorisation des rejets de dépoussiérage du minéral de phosphate dans la fabrication du ciment ordinaire est une démarche triplement bénéfique : techniquement performante, puisqu'elle améliore les propriétés mécaniques du ciment au-delà même du témoin de référence ; économiquement avantageuse, en réduisant significativement les coûts de production par la diminution de la consommation en clinker ; et environnementale ment responsable, en transformant un déchet industriel contraignant en une ressource valorisable, contribuant ainsi à une industrie cimentière plus durable et plus compétitive

Références bibliographique :

- [1] KADRI. M. R, ROUIGUEB. S et CHIKH. H. A. (2017). Contribution à la réduction des émissions de CO₂ et de la consommation énergétique dans l'industrie cimentaire par l'amélioration d'un système de production : Cas de la cimenterie de Béni-Saf. Mémoire de master en génie industriel, Université de Tlemcen.
- [2] CECOFORMA Belgique. (1992). Cours de Cimenterie : Théorie et Technologie. Liège, Belgique : Conception Etudes et Coopération de Formation.
- [3] MOUMENE. S. (2013). Ciment et cimenteries en Algérie : Production et normalisation. Mémoire master de 2 en génie civil, Université de Guelma.
- [4] MIZAB, M. (2020). Analyse et caractérisation des constituants du ciment cas de la cimenterie d'Elma Labiod. Mémoire de Master, Université Larbi Tebessi, Tébessa, Algérie.
- [5] Elaboration de la carte territoriale des opportunités d'investissement de commune de wilaya de Tébessa
- [6] HEDMESSAOUD, F. & SAAD, F. (2020). Influence des processus de chargement et de transport sur la productivité d'une carrière : Cas de la carrière de la Cimenterie El MA LABIOD, Tébessa. Mémoire de Master, Université Larbi Tebessi , Tébessa, Algérie.
- [7] MOUMENE, S. & ATHAMNIA, G. (2013). Ciment et Cimenteries en Algérie : Production et Normalisation. Mémoire de Mastère, Université 8 Mai 1945, Guelma, Algérie.
- [8] Société du ciment d'elma labiod 2019 « Plan d'exploitation annuel du gisement de calcaire».
- [9] Société du ciment d'elma labiod 2019 « Plan d'exploitation annuel du gisement d'Argile»
- [10] Société du ciment d'elma labiod 2019 « Plan d'exploitation annuel du gisement de Sable».

[11] ABID Khaled, Etude AMDEC D'un Broyeur à Boulets Type Unidan, Mémoire de Master, Spécialité : Maintenance Industrielle et Fiabilité Mécanique, Département de Génie Mécanique, Université Badji Mokhtar Annaba, 2013/2014.

[12] Ghermaoui, A. (2015). Effets de certains métaux sur les propriétés physico-chimiques des mortiers de ciment de Béni-Saf sans ou avec ajout de pouzzolane [Mémoire de Master, Université Abou-Bekr Belkaïd – Tlemcen].

[13] 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

[14] M.SLANSKY, [1975] - disponibilité et besoins futurs en minerais phosphatés
Compte tenu de la lutte anti-pollution et de nouvelles applications possibles,
B.R.G.M

[15]. Plan d'exploitation 2024

[16] 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

[17] Bouaraba lounes, Contribution à l'étude environnementale et valorisation des rejets de la mine de phosphate du Djebel Onk – Tébessa (N'Algérien). Mémoire de Master : Option : Ressources Minérales, Géomatériaux et Environnements 2021/2022

[18] Ghoul Oussama. Valorisation des rejets miniers pour la fabrication des terres cuites Cas (les rejets phosphatés de la mine de Djebel Onk –Tébessa). Mémoire de Master. Option : Valorisation Des Ressources Minérales 2021/2022

[19] Norme algérienne NA442 diffusée par IANOR 2005