



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 العربي التبسي - تبسة
Université Larbi Tebessi – Tébessa
معهد المناجم
Institut des mines
قسم المناجم والجيوتكنولوجيا
Département des mines et de la géotechnologie



MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention d'un diplôme de Master académique

Filière : Génie minier

Option : Minéralurgie.

Analyse et caractérisation des constituants du ciment cas de la cimenterie d'Elma Labiod.

Présenté et soutenu par

Mouna MIZAB

Devant le jury:

		Grade	Etablissement
Président:	Mohamed LAARABA	MCB	Université Larbi Tebessi - Tébessa
Encadreur:	Mansour KRIM	MAA	Université Larbi Tebessi - Tébessa
Co-encadreur :	Salim.M Aouati	MAA	Université Larbi Tebessi - Tébessa
Examineur:	Hamza BENZIAT	MAA	Université Larbi Tebessi - Tébessa

Promotion 2019-2020

Dédicace:

Je dédie ce modeste travail:

*Plus respectivement à mes chers parents
(Taher et Zoubida), pour leurs soutiens,*

je leurs souhaite une bonne santé, que dieux me les gardes.

*A ma sœur Manel, A mes frères: Mohamed et Malek,
je vous souhaite un avenir plein de joie et de tout le bonheur.*

A mon oncle Tarek et sa femme Nabila et leurs enfants:

Ibtissem, Douaâ, Kounouz, Saïf et Marouan.

A mes amies proches: Sara, Dzair, Ikram et Afef.

A la promotion de minérallurgie 2019-2020.

Et a toutes les personnes qui m'ont aidé de proche ou de loin.

MOUNA



Remerciement:

*Tout d'abord, je tiens de remercier mon dieu le miséricordieux,
de m'avoir donné la santé, la volonté et la patience pour accomplir ce travail.*

*Je remercie **Mr. KRIM Mansour** de m'encadrer, conseiller et suivre, que dieu lui donne la santé*

*Je tiens de remercier **Mr. AOUATI Mourad Salim**,
pour ses conseils, son soutien et sa votre gentillesse.*

*Je remercie les membres du jury: le président **Mr. LARAABA Mohammed**
et l'examineur **Mr. BENZIAT Hamza**, d'avoir accepter d'évaluer mon travail,
ainsi que tous le staff d'institut des mines et de la géotechnologie.*

*Je remercie les ingénieurs et les techniciens du département de la matière première
et du laboratoire du contrôle et qualité de la cimenterie d'Elma Labiod
surtout Farouk, Noamane, Abdelakil et Khaoula,
qui m'ont aidé durant toute la période des travaux.*

Je remercie les personnes qui ont contribué à réaliser ce mémoire de proche ou de loin.

*Un remerciement spécial pour **ma famille**,
la réalisation de ce travail n'aurait pas été possible sans votre soutien.*

Merci 



MOUANA

Sommaire

Dédicace

Remerciement

Sommaire

Liste des tableaux

Liste des figures

Liste des graphes

Liste des schémas

Liste des abréviations et symboles

Liste des annexes

Résumé.

Introduction générale 1

CHAPITRE I: SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

I-1-Introduction 3

I-2-Historique du ciment 3

I-3-Définition du ciment 4

I-4-Composition et notation 4

I-5-Désignations des ciments 6

I-6-Mode d'emploi 6

I-7-Constituants principaux du ciment et les additions 6

 I-7-1-Le clinker 6

 I-7-1-1-La composition chimique du clinker 6

 I-7-1-2-La Composition minéralogique 7

 I-7-2-Le laitier de haut fourneau 8

 I-7-3-Cendres volantes siliceuses ou calciques 8

 I-7-4-Les pouzzolanes 8

 I-7-5-La fumée de silice 8

 I-7-6-Les schistes calcinés 8

 I-7-7-Les Calcaires 9

 I-7-8-Les fillers 9

 I-7-9-Le sulfate de calcium 9

I-8-Fabrication du ciment 9

 I-8-1-Principes généraux de la fabrication 9

I-8-2-Différents processus de fabrication du ciment.....	11
I-8-3-Différentes étapes de la fabrication du ciment par voie sèche.....	12
I-8-3-1-La préparation de la matière première.....	12
I-8-3-1-1-Extraction des matières premières.....	12
I-8-3-1-2-Concassage.....	13
I-8-3-1-3-Le pré-homogénéisation.....	14
I-8-3-1-4-Le broyage et le séchage.....	14
I-8-3-1-5-L'homogénéisation.....	14
I-8-3-2-La cuisson du cru.....	15
I-8-3-2-1-Préchauffage.....	15
I-8-3-2-2-La pré-calcination.....	15
I-8-3-2-3-La Clinkérisation.....	16
I-8-3-2-4-Le refroidissement.....	16
I-8-3-3-L'obtention du ciment.....	16
I-8-3-3-1-Broyage du ciment.....	16
I-8-3-3-2-Stockage du ciment.....	17
I-8-3-3-3-La salle de contrôle et le contrôle de qualité.....	17
I-8-3-3-4-Conditionnement et expédition.....	17
I-9-Les réactions chimiques réagissant à la formation du clinker.....	17
I-10-Production du ciment dans le monde.....	18
I-11-Production nationale.....	21
I-12-Production au niveau de la cimenterie d'Elma Labiod.....	23
I-13-Conclusion.....	24
CHAPITRE II: FABRICATION DU CIMENT AU NIVEAU DE LA CIMENTERIE D'ELMA LABIOD	
II-1-Introduction.....	25
II-2-Extraction des matières premières.....	25
II-2-1-Carrière du calcaire.....	25
II-2-1-1-Travaux d'abattage.....	26
II-2-1-2-Débitage secondaire.....	26
II-2-1-3-Enlèvement et alimentation du concasseur.....	26
II-2-2-Carrière d'argile.....	26
II-2-2-1-Travaux d'extraction.....	26
II-2-2-2- Chargement.....	27

II-2-2-3- Transport.....	27
II-2-3-Carrière de sable	27
II-2-3-1-Travaux d'extraction	28
II-2-3-2-Chargement.....	28
II-2-3-3-Transport.....	28
II-2-3-4-Stockage du sable.....	28
II-2-4-Stockage du minerai de fer	28
II-2-5-Stockage du gypse.....	29
II-3-Concassage	29
II-3-1-Types de concasseurs utilisés	29
II-3-1-1-Concasseur EV.....	30
II-3-1-2-Concasseur à cylindre.....	30
II-3-1-3-Concasseur à marteau double rotor.....	31
II-3-2-Calcaire	32
II-3-3-Argile	32
II-3-4-Ajouts.....	33
II-4-La pré-homogénéisation.....	34
II-5-Alimentation du broyeur cru.....	36
II-6-Broyage du cru.....	37
II-7-L'homogénéisation.....	38
II-8-Le dépoussiérage.....	39
II-9-Préchauffage	40
II-10-Alimentation du four	40
II-11-Four	41
II-12-Refroidisseur	43
II-13-Le transport du clinker.....	43
II-14-L'alimentation du broyage du ciment	44
II-15-Le broyage du ciment	45
II-16-Les silos stockage ciment	45
II-17-L'expédition du ciment par vrac et par sac.....	46
II-18-Conclusion	48
Chapitre III: Matériels et méthodes	
III-1-Introduction	49
III-2-Laboratoire de matière première.....	49

III-3-Laboratoire analytique	51
III-3-1-Attaque par acide perchlorique	51
III-3-2-Dosage pour la détermination des oxydes	51
III-3-2-1-Dosage de la silice (SiO ₂).....	52
III-3-2-2-Dosage de l'oxyde ferrique (Fe ₂ O ₃).....	52
III-3-2-3-Dosage d'alumine (Al ₂ O ₃)	53
III-3-2-4-Dosage de la chaux (CaO).....	54
III-3-2-5-Dosage de magnésie (MgO)	54
III-3-2-6-Détermination de la perte au feu.....	55
III-4-Laboratoire de production	63
III-4-1-L'analyse par Rayons X.....	63
III-4-1-1- Préparation de la pastille alimentation four pour l'analyse par Rayon X selon instruction QCX	64
III-4-1-2-Préparation de la pastille clinker pour analyse par Rayon X selon instruction QCX ..	64
III-4-1-3-Préparation pastille ciment pour analyse par Rayon X selon instruction QCX	66
III-4-2-Détermination du refus avec l'appareil ALPINE	68
III-4-2-1-Mode opératoire de la détermination du refus farine crue sur tamis 90μ	69
III-4-2-2-Détermination de refus ciment sur Tamis 45μ	70
III-4-3-Analyse par titre.....	71
III-4-3-1-Analyse de la farine crue par titre.....	71
III-4-4-La chaux libre	72
III-4-4-1-Détermination de la chaux libre du clinker	72
III-4-4-2-Détermination de la chaux libre du ciment	73
III-5- Laboratoire d'essais physiques mécaniques.....	73
III-5-1-Poids litre du clinker	73
III-5-2-Essai mécanique de ciment	74
III-5-2-1-Résistance à la flexion.....	78
III-5-2-2-Résistance à la compression	79
III-6-Conclusion.....	81
Conclusion générale	83
Bibliographie	
Annexes	

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau I-01: Type de ciment et leur composition.....	5
Tableau I-02: Composition chimique du clinker de ciment portland ordinaire.	7
Tableau I-03: Composition minéralogique du clinker.....	8
Tableau I-04: Procédés de fabrication du ciment.	11
Tableau I-05: Principaux pays producteurs de ciment dans le monde de 2006 à 2013(en millions de tonnes)	18
Tableau I-06: Principaux pays producteurs de ciment dans le monde de 2014 à 2019 (en millions de tonnes)	19
Tableau I-07: Production du ciment dans le monde du 1994 à 2014 (en milliard de tonne).	21
Tableau I-08: Les 17 cimenteries en Algérie	21
Tableau I-09: Production annuelle du groupe GICA.....	23
Tableau I-10: Production du clinker au niveau de la cimenterie d’Elma Labiod.....	23
Tableau I-11: Production du ciment au niveau de la cimenterie d’Elma Labiod.....	23

Chapitre II

Tableau II-01: Les concasseurs de matières premières	29
Tableau II-02: Hall de stockage	34

Chapitre III

Tableau III-01: Analyses sur le calcaire	49
Tableau III-02: Analyse chimique d’argile.....	50
Tableau III-03: Analyse du minerai de fer	50
Tableau III-04: Analyse du gypse.....	50
Tableau III-05: Résultats composition chimique du ciment.....	55
Tableau III-06: Résultats du calcul de L.S.F du ciment	57
Tableau III-07: Résultats du calcul de M.S du ciment	59
Tableau III-08: Résultats du calcul de M.A.F du ciment	60
Tableau III-09: Résultats d’analyse de la pastille d’alimentation four	64
Tableau III-10: Résultats d’analyse de la pastille du clinker.....	66
Tableau III-11: Résultats d’analyse de la pastille du ciment.....	67
Tableau III-12: Comparaison entre les résultats obtenus du calcul de la composition minéralogique du ciment par la formule de BORGUE et l’analyse par Rayon X.....	67

Tableau III-13: Résultats d'analyse refus de la F.C	70
Tableau III-14: Résultats d'analyse refus du ciment.....	70
Tableau III-15: Résultats d'analyse de la F.C par titre.....	71
Tableau III-16: Résultats des essais da la chaux libre.....	73
Tableau III-17: Les résultats des essais du poids litre du clinker	74
Tableau III-18: Les résultats des essais mécaniques du ciment à l'âge de 2, 7 et 28 jours.....	80
Tableau III-19: Exigences de la résistance à la compression	81

Liste des figures

Chapitre I

Fig I-01: Désignation du ciment.....	6
Fig I-02: Composition du clinker	6
Fig I-03: Composition chimique du clinker	7
Fig I-04: Procédés de fabrication du ciment	12
Fig I-05: L'extraction des matières premières	13
Fig I-06: Le concassage	13
Fig I-07: Préchauffeur à cyclones.....	15

Chapitre II

Fig II-01: Carrière du calcaire – cimenterie d'Elma Labiod – TEBESSA -.....	25
Fig II-02- Carrière d'argile – cimenterie d'Elma Labiod – TEBESSA -	27
Fig II-03: Carrière du sable – cimenterie d'Elma Labiod – TEBESSA-.....	28
Fig II-04: Concasseur EV	30
Fig II-05: Concasseur à cylindre E.....	31
Fig II-06: Les trémies de dosage – cimenterie d'Elma Labiod – TEBESSA -	36
Fig II-07: Broyeur Tirax Unidan - cimenterie d'Elma Labiod - TEBESSA	37
Fig II-08: Les silos d'homogénéisation – cimenterie d'Elma Labiod – TEBESSA -	39
Fig II-09: Le préchauffage.....	40
Fig II-10: Le four rotatif – cimenterie d'Elma Labiod – TEBESSA -	42
Fig II-11: Silos de stockage du clinker.....	43
Fig II-12: Trémie de dosage (clinker, gypse et ajouts).....	44
Fig II-13: Silos de stockage ciment – cimenterie d'Elma Labiod – TEBESSA -.....	46
Fig II-14: L'ensacheuse	47
Fig II-15: L'expédition du ciment par sac	48
Fig II-16: Un sac de ciment	48

Chapitre III

Fig III-01: Mode opératoire d'attaque par acide perchlorique	51
Fig III-02: Creuset taré	52
Fig III-03: Creuset dans le four.....	52
Fig III-04: Dessiccateur.....	52
Fig III-05: Mode opératoire du dosage de l'oxyde ferrique	53

Fig III-06: Dosage d'alumine	54
Fig III-07: Pastilleuse	65
Fig III-08: Rayon X.....	65
Fig III-09: Broyage du clinker	65
Fig III-10: Analyse de la pastille clinker	66
Fig III-11: Appareil Alpine.....	69
Fig III-12: Coloration de la solution en rouge	71
Fig III-13: Bain marin	72
Fig III-14: Remplissage d'eau	75
Fig III-15: Malaxeur.....	76
Fig III-16: Appareil à choc	76
Fig III-17: Surplus du mortier arasé.....	77
Fig III-18: Chambre humide.....	77
Fig III-19: Préparation des éprouvettes pour les essais.....	78
Fig III-20: Appareil d'essais de résistance à la flexion.....	78
Fig III-21: Appareil d'essais de résistance à la compression	79

Liste des graphes

Chapitre I

Graphe I-01: Principaux pays producteurs de ciment dans le monde de 2006 à 2013 (en millions de tonnes)	19
Graphe I-02: Production du clinker au niveau de la cimenterie d'Elma Labiod	23
Graphe I-03: Production du ciment au niveau de la cimenterie d'Elma Labiod.....	24

Chapitre II

Graphe II-01: Courbe avant et après homogénéisation A et B	36
-------------------------------------------------------------------------	----

Chapitre III

Graphe III-01: La courbe de L.S.F du ciment.	61
Graphe III-02: La courbe de M.S du ciment.	62
Graphe III-03: La courbe de M.A.F du ciment.....	63
Graphe III-04: Les courbes de comparaison entre le calcul par la formule de BORGUE et l'analyse par Rayon X de C3S et C2S du ciment	71
Graphe III-05: Les courbes de comparaison entre le calcul par la formule de BORGUE et l'analyse par Rayon X de C3A et C4AF du ciment.....	71
Graphe III-06: Les courbes des résultats des essais de résistance	80

Liste des schémas

Chapitre I

Schéma I-01: Évolution des composants lors de la fabrication	10
---------------------------------------------------------------------------	----

Chapitre II

Schéma II-01: Fabrication du ciment	25
Schéma II-02: Concasseur à marteau à double rotor	32
Schéma II-03: Le processus de concassage et transport du calcaire vers le hall associé.....	32
Schéma II-04: Le processus de concassage et transports d'argile vers le hall associé	33
Schéma II-05: Le processus de concassage et transports des ajouts vers le hall associé.....	33
Schéma II-06: Le processus d'alimentation broyeur cru	37
Schéma II-07: Le processus de broyeur cru	38
Schéma II-08: Le processus d'homogénéisation	39
Schéma II-09: Alimentation four.....	41
Schéma II-10: Four moderne à quatre étages de cyclones	42
Schéma II-11: La clinkérisation (le four).....	43
Schéma II-12: L'alimentation du broyeur ciment	44
Schéma II-13: L'expédition du ciment par vrac	47

Liste des abréviations et symboles

Abréviations:

A: Alumine.

Al_2O_3 : l'alumine

B: Le côté de la section carrée du prisme.

C: CaO

C2S: Bélite (silicate bicalcique)

C3A: Aluminate tricalcique

C3S: Alite (silicate tricalcique)

C4AF: Aluminoferrite tétracalcique

$CaCO_3$: Carbonate de calcium

CaO: Chaux

CEM: Normes de compatibilité électromagnétique

CHF: Ciments de haut fourneau

Cl: Chlorure

CO_2 : Dioxyde de Carbone

CPJ: Ciment portland avec ajouts

CPZ: Ciment pouzzolanique

CRS : Ciment résistant aux sulfates

ECDE: Entreprises des Ciments et dérivés pour Echlef

EDTA: L'acide éthylènediaminetétraacétique.

F: Fer.

F.C: Farine crue

Fc: La charge maximale à la rupture.

Fe_2O_3 : Oxyde ferrique

Ff: La charge appliquée au milieu du prisme à la rupture.

FLS: Fournisseur d'équipements Industriels (Danemark).

GICA: Groupe Industriel du Ciment en Algérie

Hcl: Acide chlorhydrique.

ISO: Organisation internationale de normalisation

K_2O : Oxyde de potassium

KK: Clinker

l: La distance entre les appuis.

L.S.F: Facteur de saturation en chaux de Lea Parker.

M.A.F: Module aluminoferrique.

Mf: Masse finale (produit calciné).

MgO: L'oxyde de magnesium

Mi: Masse initiale (prise d'essai).

Mn₂O₃ : L'oxyde de manganèse(III)

M.S: Module silicique de Kühl.

Na₂O: L'oxyde de sodium

NaOH: L'hydroxyde de sodium.

N_{EDTA}: Normalité d'E.D.T.A (1,2).

NH₃: L'ammoniac.

P1: Le poids du creuset avant la calcination.

P2: Le poids du creuset après calcination.

P₁: Poids de farine crue.

P₂: Refus sur tamis de 90µ

PAF: Pert au feu

P.A.N: Peroxyde azotique naphthol.

PH: Le Potentiel hydrogène.

PL: Poids litre

QCX: Le système QCX de FLSmidth est été onçu pour contrôler la qualité du ciment dans les cimenteries.

R: Résistance

Rc: La résistance à la compression.

Rf: La résistance à la flexion.

S: Silice.

S1: Silo 1.

S2: Silo 2.

S3: Silo 3.

SCT: Société du ciment de Tebessa

SiO₂: Silice

SOMIFER: Société des Mines de Fer d'Algérie

SO₃: Le trioxyde de soufre

T.E.A: Triéthanolamine.

TiO₂: Le dioxyde de titane

V_{EDTA} : Volume d'E.D.T.A en ml.

XRF: Fluorescence des rayons X.

Z: Ciment sortie de broyeur

Liste des symboles:

an: année

cm: centimètre

cm^3 : centimètre cube

cst: constant

g: gramme

h: heure

J: joule

Kg: kilogramme

Km: kilomètre

Kv: kilovolt

Kw: kilowatt

l: litre

m: mètre

m^2 : mètre carré

m^3 : mètre cube

min: minute.

ml: millilitre

mm: millimètre

MPa: micropascal

N: newton

N: quantité de la matière.

s: seconde

t: tonne

v: volt

$^{\circ}C$: degré Celsius

%: pourcentage

μ : micro-mètre

Liste des annexes

Annexes A:

Tableau A-01: Composition chimique du clinker 56

Tableau A-02: Composition minéralogique du clinker 56

Annexe B:

Tableau B-01: Volume de Hcl 72

Résumé:

La production du ciment est une activité industrielle plus pratiquée dans des différents pays, car ce produit est devenu le plus utilisé pour la construction. Le ciment est constitué principalement du calcaire, argile, fer et sable. Ces matières sont broyées et forment une farine crue qui alimente le four. Après la cuisson et à la sortie du four, des grains gris sont obtenus «clinker». Ce produit semi-fini est introduit dans un broyeur du ciment avec le gypse et les ajouts, par des pourcentages spécifiés selon le type de ciment, pour produire le ciment. La vérification et le contrôle du produit sont nécessaires pour garantir la bonne qualité du ciment afin de répondre aux besoins des consommateurs. Cette étude expérimentale consiste à déterminer les principales caractéristiques du ciment et les matières utilisées pour sa fabrication. Ce travail a comme but d'évaluer la qualité du ciment à partir des pourcentages des résultats des analyses effectuées. Parmi ces analyses, les analyses chimiques et la diffraction par Rayon X qui indiquent la composition chimique et minéralogique du ciment, et les essais physiques qui montrent principalement la résistance mécanique, sont effectuées.

Mots clés: ciment, clinker, matières premières, fabrication, analyse, caractérisation.

Abstract:

Cement production is the most practiced industrial activity in many different countries because this product has become the most used for construction. The cement consists mainly of limestone, clay, iron and sand. These materials are crushed and form raw flour that feeds the oven. After cooking and leaving the oven, grey grains are obtained «clinker». This semi-finished product is fed into a cement grinder with the gypsum and the additions, by percentages specified according to the type of cement, to produce the cement. Product verification and control are necessary to ensure the good quality of cement to meet the consumers' needs. This experimental study aims at determining the main characteristics of the cement and the materials used in its manufacture. The purpose of this work is to assess the quality of the cement based on the percentages of the results of the analyses carried out. Among these analyses, chemical analyses and X-ray diffraction that indicate the chemical and mineralogical composition of cement, and physical tests that show mainly mechanical resistance, are conducted

Keywords: cement, clinker, raw materials, manufacturing, analysis, characterization.

المخلص:

يعتبر إن كثير ممارسة في مختلف البلدان، حيث أصبح هذا المنتج هو الأكثر . يتكون الاسمنت بشكل رئيسي من الحجر الجيري، والطين، والحديد، والرم . يتم سحق هذه المواد تكون طحين يغذي الفرن. الطهي يُ رمادية " . يتم تغذية هذا المنتج بنسب مئوية محددة وفقاً لنوع الا جيدة سمنت لتلبية احتياجات المستهلك. إن التحقق من المنتج والتحكم فيه . تهدف هذه الدراسة التجريبية تحديد الخصائص الرئيسية للاسمنت والمواد المستخدمة في تصنيعه. من هذا العمل هو تقييم نوعية الا المئوية لنتائج التحاليل التي أجريت. ومن بين هذه التحاليل اليل الكيميائية و الأشعة السينية التي تشير التركيب الكيميائي والم الفيزيائية التي تبين الميكانيكية بشكل أساسي. ولية، التصنيع، التحليل، ال .

الكلمات المفتاحية:

The background of the page is white and decorated with several dark grey graduation caps (mortarboards) and gold streamers scattered across the surface. The caps are positioned at various angles, and the streamers are in various lengths and curves, creating a festive and celebratory atmosphere.

Introduction

générale

Introduction générale

Le ciment est un élément essentiel dans la construction, et il intervient dans la composition du béton.

La cimenterie d'Elma Labiod compte parmi les principales cimenteries en Algérie. Elle appartient au groupe GICA, et elle est située à la wilaya de TEBESSA. Son objectif est l'extraction et le traitement du ciment. Sa capacité de production annuelle dépasse 500 000 millions de tonnes. Plusieurs études ont été déjà réalisées au niveau de cette usine (mémoires d'ingénieurs et de magistère et des thèses de doctorat) dans des différentes spécialités techniques.

L'objectif de notre travail portera sur des analyses et caractérisations du ciment, pour notre cas, la cimenterie d'Elma Labiod est un sujet intéressant à une étude.

Pour concrétiser ce travail, plusieurs techniques ont été utilisées, telles que les analyses chimiques et les analyses par rayon X:

- Des analyses chimiques des différents constituants du ciment servent à déterminer la composition chimique et minéralogique du ciment.
- Des analyses de la diffraction par rayons X, les prélèvements d'échantillons, ainsi que leurs préparations, se font maintenant de plus en plus au moyen de robots de très grande précision.
- Des analyses physico-mécaniques permettent d'évaluer les performances mécaniques du ciment.

Le travail de recherche s'effectue autour les points suivants:

La première partie de notre travaille est une synthèse bibliographique sur le ciment et les procédés de sa fabrication ainsi que sa production au niveau national et international. Ce chapitre est basé sur des notions générales et des définitions sur le matériau du ciment et sa propriété, ainsi que les différents processus et étapes de sa fabrication (principalement par voie sèche) sont détaillés. Des statistiques concernant la production du ciment au niveau national et mondial représentent aussi une partie de ce chapitre.

La deuxième partie contient une partie observatoire qui consiste à suivre la chaîne de production avec un peu de théorie. Ainsi, les différentes étapes de la fabrication du ciment dans la cimenterie d'Elma Labiod sont présentées et expliquées.

La troisième partie est une partie expérimentale qui contient les essais effectués au niveau du complexe de la cimenterie. Les principaux essais d'analyse et de caractérisation des matériaux sont utilisés pour contrôler la qualité du ciment et l'interprétation des résultats d'après les données obtenues.

A decorative border surrounds the central text, featuring several black graduation caps (mortarboards) with gold tassels and gold streamers or confetti scattered throughout.

Chapitre I

I-1-Introduction:

Dans cette première partie du chapitre, nous avons donné un petit passage historique avec des notions et des définitions et presque tout ce qui est lié au matériau du ciment en détail. Ainsi, les différents processus et les étapes de fabrication du ciment, depuis la préparation des matières premières jusqu'à l'obtention du produit fini (le Ciment), sont présentés. Dans la deuxième partie, des statistiques sur la production de ce matériau sont données au niveau national et international.

I-2-Historique 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. [1]

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, étudiant scientifiquement et non plus empiriquement, comme ses prédécesseurs, les chaux hydrauliques, découvrit les principes chimiques des ciments et définit leurs règles de fabrication, [2] 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. [1]

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. [2]

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. [1]

I-3-Définition du 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 durci 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. [1]

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. [3] On peut aussi donner une définition chimique à ce matériau: alors, un ciment artificiel est un produit provenant de la cuisson de mélanges artificiels de silice, d'alumine et de carbonate de calcium (de chaux), sur lesquels l'eau n'a aucune action (ou qu'une action particulièrement lente avant la trituration), et qui sont réduits en poudre mécaniquement. [1]

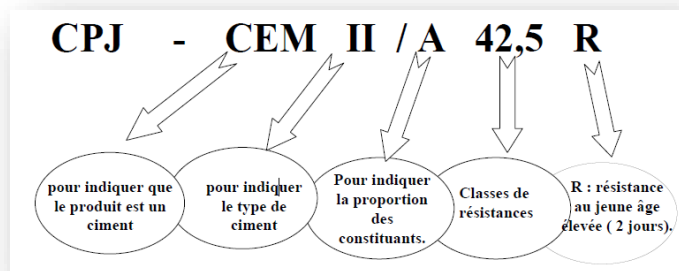
I-4-Composition et notation:

Le ciment est regroupé en cinq types principaux comme suit:

- 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)-
- CEM IV -Ciment pouzzolanique (CPZ)-
- CEM V –Ciment au laitier et aux cendres)-

Tableau I-01: Type de ciment et leur composition. [4]

Principaux types	Notation des 27 produits (types de ciment courant)		Composition (pourcentage en masse)										Constituants secondaires	
			Constituants principaux											
			Clinker	Laitier de haut fourneau	Fumée de silice	Pouzzolanes		Cendres volantes		Schiste calciné	Calcaire			
K	S	D	Naturelle P	Naturelle calcinée Q	Silicieuse V	Calcique W	T	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		

I-5-Désignations des ciments:**Fig I-01:** Désignation du ciment.**I-6-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. [5]

I-7-Constituants principaux du ciment et les additions:**I-7-1-Le clinker:**

Le constituant principal du ciment est le clinker qui est obtenu à partir de la cuisson d'un mélange approprié de calcaire et d'argile, en proportion moyenne de 80 % de calcaire et 20% d'argile (silico-aluminates). [6]

**Fig I-02:** Composition du clinker. [7]**I-7-1-1-La composition chimique du clinker:**

Le clinker est principalement composé d'oxydes métalliques, les quatre principaux: l'oxyde de calcium (CaO), de silicium (SiO₂), d'aluminium (Al₂O₃) et de fer (Fe₂O₃). [8]

La composition chimique moyenne du clinker est présentée dans le tableau suivant :

Tableau I-02: Composition chimique du clinker de ciment portland ordinaire. [9]

Composants du clinker.	Notations cimentières.	Teneur limites (%).	Sources (matière première).
CaO	C	62-67	Calcaire
SiO ₂	S	19-25	
Al ₂ O ₃	A	2-9	Argile
Fe ₂ O ₃	F	1-5	
MgO	M	0-3	Calcaire et argile
K ₂ O	K	0-6	
Na ₂ O	N	0-6	
SO ₃	S	1-3	

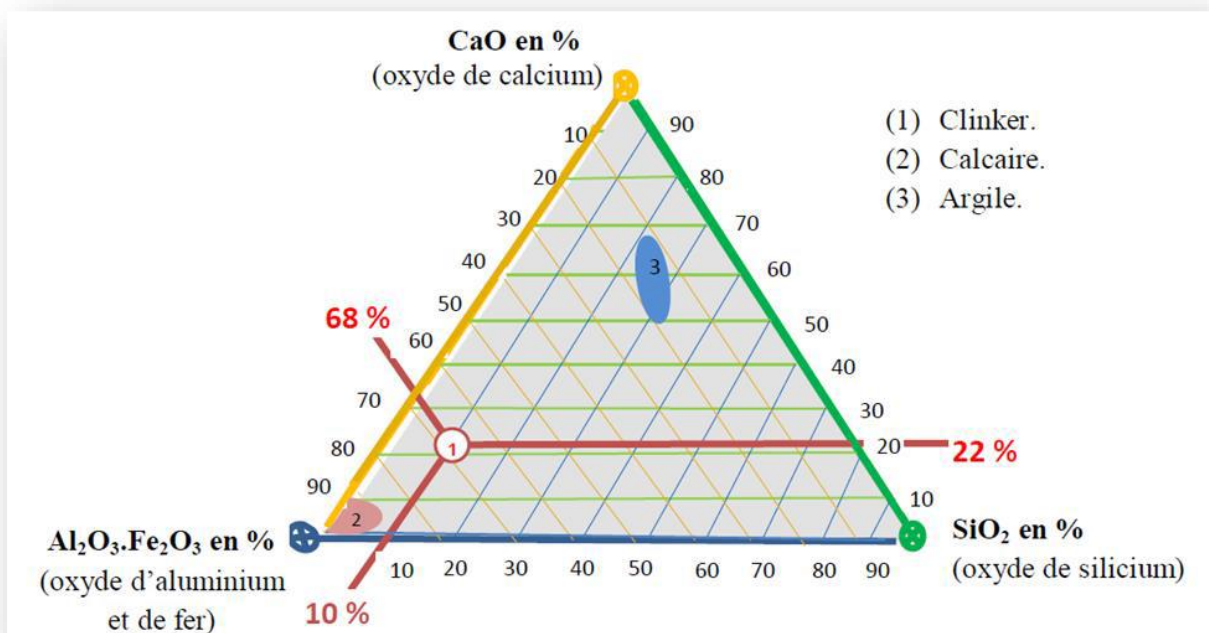


Fig I-03: Composition chimique du clinker. [8]

I-7-1-2-La Composition minéralogique:

Tableau I-03: Composition minéralogique du clinker.

Composés.	Formule.	Appellation abrégée.	Taux.
Alite (silicate tricalcique)	3 CaO.SiO ₂	C2S	45 à 65%
Bélite (silicate bicalcique)	2 CaO.SiO ₂	C3S	15 à 35%
Aluminate tricalcique	3 CaO.Al ₂ O ₃	C3A	4 à 14%
Aluminoferrite tétracalcique	4CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃	C4AF	10 à 18%

I-7-2-Le laitier de haut fourneau (L):

Le laitier est un sous-produit de l'industrie métallurgique ayant des propriétés hydrauliques, il est obtenu par refroidissement rapide (trempe) de certaines scories fondues provenant de la fusion du minerai de fer dans un haut fourneau, il est composé de la chaux CaO (45 à 50%), de silice SiO₂ (30 à 35%), d'alumine Al₂O₃ (10 à 15%) et de manganèse MgO (7 à 10%).

I-7-3-Cendres volantes siliceuses ou calciques:

Ce sont des produits pulvérulents de grande finesse, provenant du dépoussiérage des gaz de combustion des centrales thermiques. On distingue:

- Les cendres volantes siliceuses (V) qui ont des propriétés pouzzolaniques.
- Les cendres volantes calciques (W) qui ont des propriétés hydrauliques et parfois pouzzolaniques.

I-7-4-Les pouzzolanes (P):

Elles peuvent être d'origine volcanique (cendres de volcans), animale ou végétale. Certains matériaux comme l'argile et les schistes peuvent, après chauffage, broyage, développer des propriétés analogues.

I-7-5-La fumée de silice:

Les fumées de silices sont un sous-produit de l'industrie du silicium et de ses alliages. Elles sont formées de particules sphériques de très faible diamètre (de l'ordre de 0,1µm). Pour entrer dans la composition d'un ciment en tant que constituant principal, elles doivent être présentées pour au moins 85 % (en masse).

I-7-6-Les schistes calcinés:

Ils sont produits dans un four à 800°C, ils contiennent des phases de clinker, des petites quantités de chaux libres (CaO) et des sulfates de calcium, ainsi que des oxydes en quantité

plus importantes. Ils ont de fortes propriétés hydrauliques pouzzolaniques. Les schistes calcinés finalement broyés doivent avoir une résistance à la compression d'au moins 25MPa à 28 jours. Leurs expansion doit être inférieure à 10mm en utilisant un mélange de 30% en masse de schistes calcinés broyés et de 70% en masse de ciment de référence.

I-7-7-Les Calcaires:

Lorsqu'ils sont utilisés dans une proportion excédant 5% en masse, les calcaires doivent satisfaire aux spécifications suivantes :

- Teneur en calcaire : $\text{CaCO}_3 \geq 75\%$ en masse
- Adsorption de bleu méthylène : $\leq 1,20 \text{ g}/100\text{g}$
- Teneur en matières organiques : $\leq 0,50\%$ en masse.

I-7-8-Les fillers (F):

Ce sont des "constituants secondaires" des ciments, donc ils ne peuvent jamais excéder 5 % en masse dans la composition du ciment. Ce sont des matières minérales, naturelles ou artificielles qui agissent par leurs granulométries sur les propriétés physiques des liants (maniabilité, pouvoir de rétention d'eau).

I-7-9-Le sulfate de calcium:

Le sulfate de calcium doit être ajouté en faible quantité aux autres constituants du ciment au cours de sa fabrication, en vue de réguler la prise. Le sulfate de calcium peut être du gypse (sulfate de calcium déshydraté, $\text{SaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) de l'hémihydraté ($\text{SaSO}_4 \cdot 1/4 \text{H}_2\text{O}$), de l'anhydrite de calcium anhydre (SaSO_4) ou tout mélange de ceux-ci. [4]

I-8-Fabrication du ciment

I-8-1-Principes généraux de la fabrication:

Le ciment portland est constitué principalement de clinker. Ce dernier est obtenu par mélange des matières premières naturelles de composition chimique adéquate. La préparation du cru consiste à mélanger de manière homogène du calcaire (80%) et des minéraux riches en silice et alumine (20%): l'argile ou le kaolin, le cru est ensuite calciné à 1450°C pour former le clinker. [3]

Le ciment est fabriqué à partir de l'oxyde de calcium CaO , de l'oxyde de silice SiO_2 , de l'oxyde d'aluminium Al_2O_3 et d'oxyde ferrique Fe_2O_3 qui se lient pour former le clinker pendant la cuisson dans le four. Mais on peut aussi trouver dans les matières premières d'autres composants indésirables en petites quantités, tels que le manganèse MgO et les alcalins, mais ils sont inévitables. CaO est le composant principal du ciment. Il ne se trouve pas à l'état libre mais dans le calcaire et la craie sous forme de carbonate de calcium. A la cuisson dans le four, CaCO_3 se décompose suivant la formule: $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$.

L'acide carbonique CO_2 est gazeux et il disparaît lors du processus de fabrication alors que l'oxyde de calcium CaO participe à la clinkérisation.

SiO_2 , Al_2O_3 et Fe_2O_3 se trouvent dans le sable, l'argile, le schiste et la marne. Si l'un d'eux se trouve en qualité insuffisante, on les rajoute comme matériau de correction.

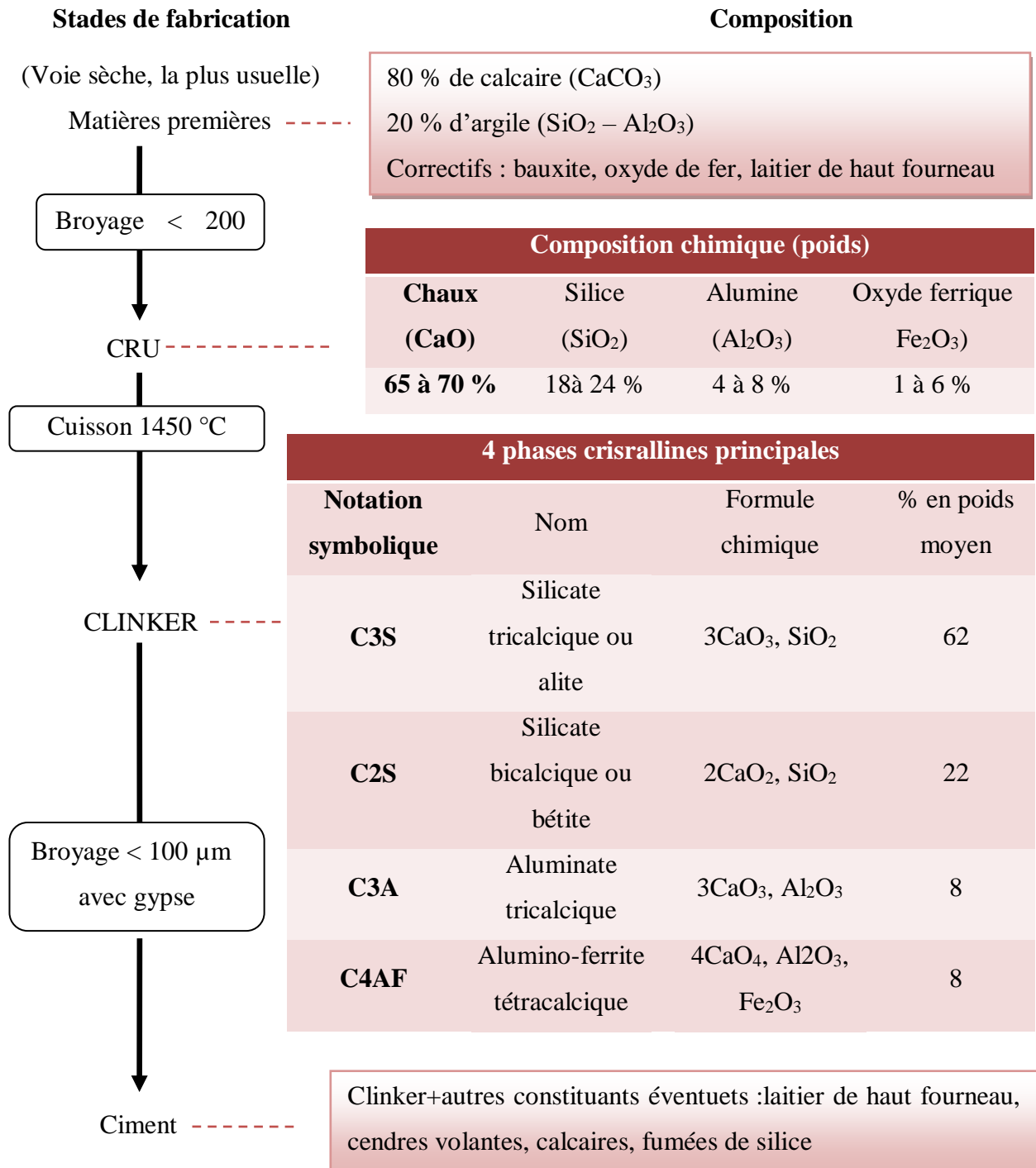
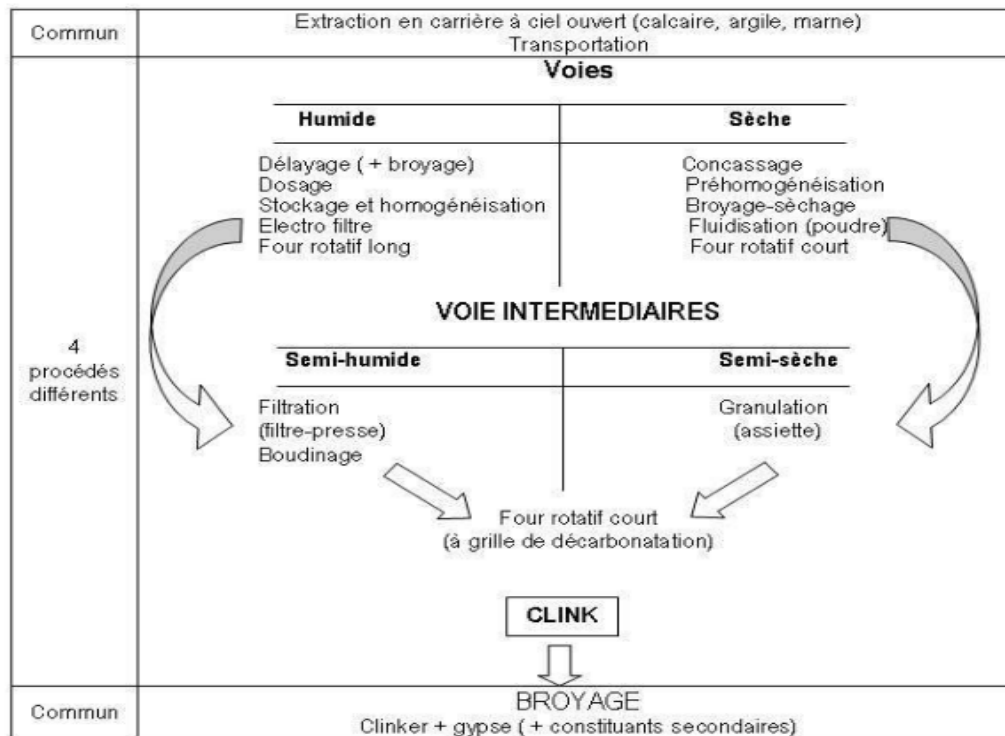


Schéma I-01: Évolution des composants lors de la fabrication. [10]

I-8-2-Différents processus de fabrication du ciment:

Il existe quatre grands procédés de fabrication du ciment: la voie sèche, semi-sèche, semi humide et humide.

Tableau I-04: Procédés de fabrication du ciment. [3]

Procédé par voie sèche: la matière première broyée et séchée passera d'abord dans un préchauffeur à cyclone avec ou sans précalcinateur, puis dans un four tubulaire de 80 m. C'est le procédé le plus récent et le plus répandu car il est moins énergivores, mais il nécessite la mise en œuvre de moyens importants de captation des poussières (électro filtres, filtres cyclones et multi-cyclones, dépoussiéreurs électrostatiques...).

Dans le procédé par voie semi-sèche, la poudre est agglomérée sous forme de boulettes de 10 à 20 mm de diamètre par ajout de 12 à 14 % d'eau, séchée et préchauffée puis dans le four.

Dans le procédé par voie semi-humide, la pâte est d'abord débarrassée de son eau dans des filtres presses. Le gâteau de filtre-presse est ensuite extrudé sous forme de granules et introduit dans un préchauffeur à grilles ou directement dans un sécheur pour la fabrication du cru.

Le procédé par voie humide: le processus le plus ancien des quatre est celui de la voie humide. La matière première est extraite en carrière et peut être très humide, elle est concassée et homogénéisée, la farine crue est transformée en pâte liquide par ajout d'eau puis

broyage et malaxage avant d'être introduite directement dans un four qui sera alors plus long (jusqu'à 200 m). Ce procédé consomme beaucoup de combustible pour évaporer l'eau excédentaire: c'est pourquoi avec le 1^{er} choc pétrolier de 1973, les procédés par voie sèche et semi-sèche lui sont préférés car ils sont plus économiques en besoin énergétique. La voie humide est amenée à disparaître car elle présente l'inconvénient de consommer de 30 à 40 % d'énergie en plus par rapport à la voie sèche. [11]

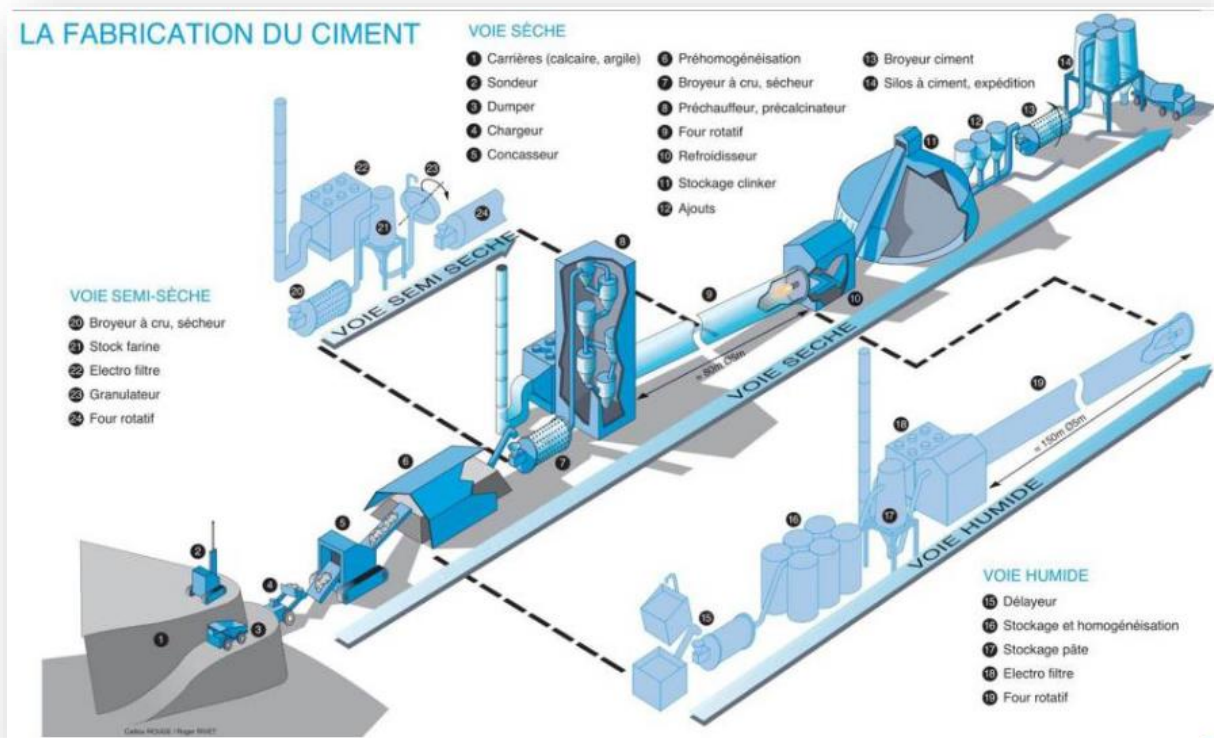


Fig I-04: Procédés de fabrication du ciment.

I-8-3-Différentes étapes de la fabrication du ciment par voie sèche:

La fabrication de ciment peut être décomposée en trois opérations élémentaires :

- la préparation du cru.
- la cuisson.
- l'obtention du ciment. [12]

I-8-3-1-La préparation de la matière première:

I-8-3-1-1-Extraction des matières premières:

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. [13]

Après un concassage primaire, les matières premières sont transportées vers l'usine où elles sont stockées et préparées. D'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 recherchée. [1]



Fig I-05: L'extraction des matières premières.

I-8-3-1-2-Concassage:

En vue d'optimiser et faciliter le stockage et la manutention des matières premières, [6] les blocs obtenus sont réduits, dans des concasseurs situés généralement sur le site même de la carrière, en éléments d'une dimension de 80 à 150 mm maximums. [1] Le concassage consiste à soumettre les matières premières à des efforts d'impact, de cisaillement ou de compression. Le type du concasseur est choisi en fonction du procédé de concassage adopté par la cimenterie. [6] La matière ainsi obtenue est amenée par bande transporteuse ou convoyeur jusqu'à l'usine. [1]

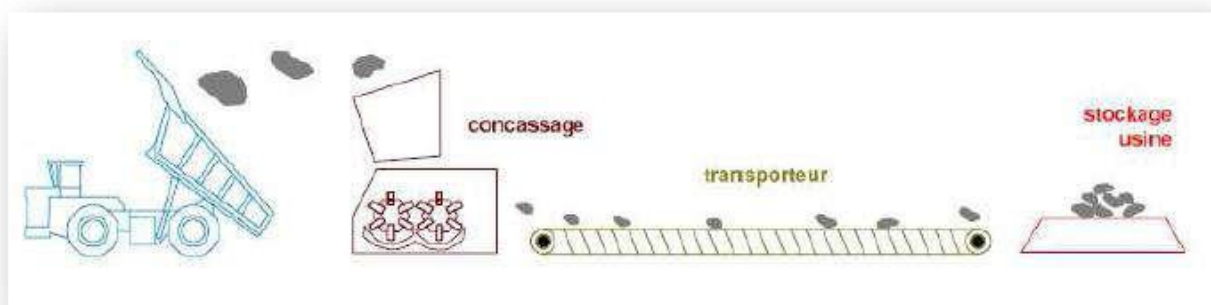


Fig I-06: Le concassage. [6]

I-8-3-1-3-La pré-homogénéisation:

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 d'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.

I-8-3-1-4-Le broyage et le séchage:

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. [1]

I-8-3-1-5-L'homogénéisation:

L'homogénéisation et le stockage sont réalisés dans la même tour qui comporte à sa partie supérieure un silo d'homogénéisation dans lequel le cru est brassé par air comprimé, il est ensuite stocké dans le silo à la partie inférieure de la tour. [5]

I-8-3-2-La cuisson du cru:**I-8-3-2-1-Préchauffage:**

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 matière crue. [14] 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. [15]

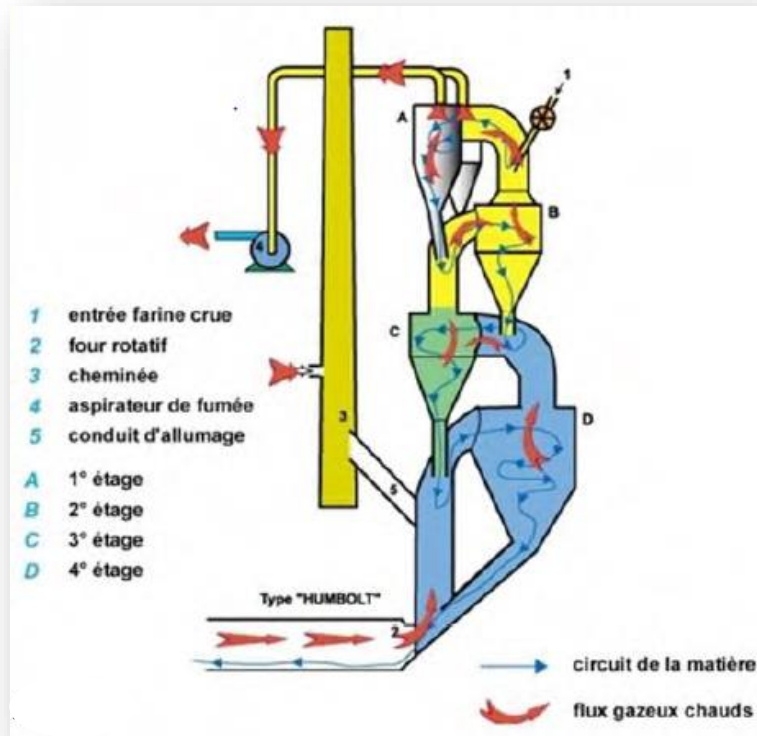


Fig I-07: Préchauffeur à cyclones.

I-8-3-2-2-La pré-calcination:

Le procédé utilisant une tour de pré-calcination est très similaire au précédent. La différence essentielle réside dans le fait que lorsque la farine descend une chambre de pré-calcination où elle va atteindre une température de l'ordre de 1000 °C,[16] permet de libérer le gaz carbonique pour obtenir la chaux (oxyde calcium) nécessaire à la fabrication de clinker. [1] Dans cette chambre, on peut injecter jusqu'à 40% de la totalité des combustibles utilisés dans ce processus. [16]

I-8-3-2-3-La Clinkérisation:

Une fois préchauffée et décarbonatée, la farine crue entre dans le four rotatif et progresse jusqu'à la zone de clinkerisation (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 composant le clinker. [1]

I-8-3-2-4-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. [14]

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. [1] Le refroidissement après cuisson joue un rôle important sur la forme et la réactivité des constituants du clinker. [6]

I-8-3-3-L'obtention du ciment:**I-8-3-3-1-Broyage du ciment:**

À la fin de la cuisson, la matière brusquement refroidie se présente sous forme de granules qui constituent le clinker, celui-ci, finement broyé avec du gypse (environ 5 %) pour régulariser la prise, donne le ciment Portland. [1]

Les ciments à ajouts sont obtenus par l'addition lors de la phase de broyage d'éléments minéraux supplémentaires contenus dans des matériaux tels que :

- Le laitier de hauts fourneaux (résidus de la sidérurgie).
- Les cendres volantes de centrales électriques.
- Les fillers calcaires (granulats).
- Les pouzzolanes naturelles ou artificielles. [13]

A la sortie du broyeur, les matériaux broyés sont entraînés dans un séparateur qui renvoie les particules les plus grosses dans le broyeur, alors que les plus fines sont dirigées vers les silos de ciment.

L'air qui sert de moyen de transport est filtré et les particules récupérées sont envoyées également vers les silos de ciment. [16]

I-8-3-3-2-Stockage du ciment:

Des systèmes de transport mécaniques et pneumatiques peuvent être utilisés pour acheminer le ciment jusqu'aux silos de stockage. En règle générale, les premiers exigent des investissements plus importants que les seconds mais leurs coût d'exploitation est bien inférieur. Le système de transport actuellement le plus courant combine le transport pneumatique et des transporteurs à vis sans fin ou à chaînes avec un élévateur à godets. Les différents types de ciments sont stockés dans des silos différents. [1]

I-8-3-3-3-La salle de contrôle et le contrôle de qualité:

Les pilotes 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.

I-8-3-3-4-Conditionnement et expédition:

Les expéditions comprennent le stockage du ciment, son conditionnement (ensachage), en cas de livraison par sacs et son chargement sur l'outil de transport (camion, train).

Les ciments quittent l'usine en sacs (92.81% de l'expédition) ou en vrac (7.19% de l'expédition).

Les sacs contiennent généralement 50 kg de ciment et l'ensachage atteint fréquemment 100 tonnes par heure, les sacs sont acheminés vers des palettiseurs qui constituent des palettes de 1500 kg transportées par camion. Le ciment livré en vrac est transporté par camion-citerne.

I-9-Les réactions chimiques réagissant à la formation du clinker:

Les réactions chimiques réagissant à la formation du clinker sont donc :

Zone de décarbonatation:

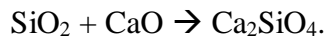
900 à 1000 °c :

$\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$ (réaction fortement endothermique).

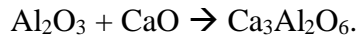
Zone de transition :

Combinaison de CaO avec:

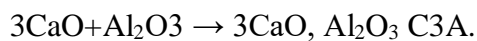
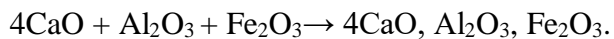
Si pour former silicate bicalcique.



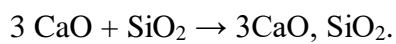
Al pour former Alumine tricalcique.



1000 à 1250°C : formation de C4AF.

**Zone de cuisson :**

1250 à 1350°C : commencement de formation de l'Alite C3S (début de clinkérisation).



1350 à 1450°C : réaction de formation de l'Alite C3S et cristallisation de l'Alite et la Bélite (clinkérisation).

Zone de refroidissement :

1450 à 1200°C : refroidissement.

1200 à 80°C : refroidissement totale et stabilisation de C3S « minéraux de bogue ». [9]

I-10-Production du ciment dans le monde:

Tableau I-05: Principaux pays producteurs de ciment dans le monde de 2006 à 2013(en millions de tonnes). [1]

	2006	2008	2011	2012	2013
Chine	1 237,0	1 400,0	2 080,0	2 184,0	2 414,0
Inde	160,0	185,0	240,5	246,7	255,8
Etats-Unis	99,7	87,6	67,9	74,2	76,6
Iran	33,0	44,4	67,8	67,6	74,4
Brésil	39,5	52,0	64,1	68,8	70,2
Turquie	47,5	54,0	56,1	61,6	66,3
Russie	54,7	53,5	66,4	70,2	68,7

Vietnam	32,7	40,0	52,0	54,0	61,0
Japon	69,9	62,8	56,4	59,3	61,7
Arabie saoudite	27,1	31,8	45,2	52,3	56,7
Corée du sud	54,0	51,7	48,4	53,2	55,7

Graphe I-01: Principaux pays producteurs de ciment dans le monde de 2006 à 2013(en millions de tonnes).

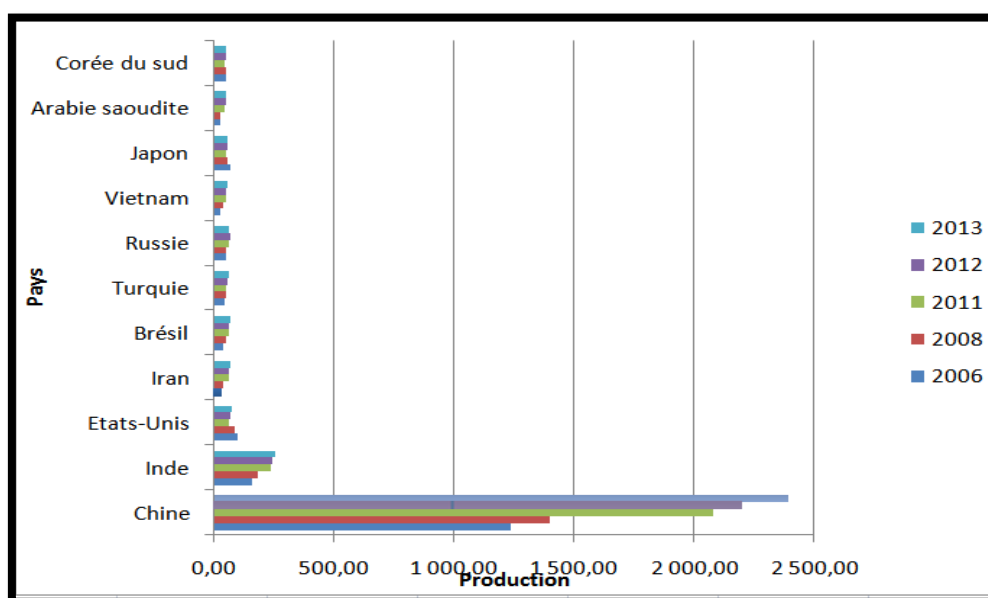


Tableau I-06: Principaux pays producteurs de ciment dans le monde de 2014 à 2019 (en millions de tonnes). [17]

	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Chine	2 480,0	2 350,0	2 410,0	2 000,0	2 200,0	2 200,0
Inde	260,0	300,0	290,0	290,0	300,0	320,0
Etats-Unis	83,2	84,3	85,9	107,0	87,0	89,0
Iran	65,0	58,6	53,0	54,0	58,0	60,0

Brésil	72,0	65,3	60,0	53,0	53,0	55,0
Turquie	75,0	71,4	77,0	80,6	72,5	51,0
Russie	68,4	62,1	56,0	54,7	53,7	57,0
Vietnam	60,5	67,4	70,0	78,8	90,2	95,0
Japon	53,8	54,8	56,0	55,2	55,3	54,0
Arabie saoudite	55,0	61,9	61,0	47,1	45,0	-
Corée du sud	63,2	51,7	55,0	56,5	57,5	55,0

La Chine reste, et de loin, le premier producteur avec 57,5 % du total mondial, avec ses 2,3 milliards de tonnes annuelles, soit 1,7 tonne par habitant. Elle représentait 47 % du total mondial en 2006 et 29 % en 1994. La Chine a produit, seule, en 2013, l'équivalent de la production mondiale de 2005: 2,3 milliards de tonnes en 2013, contre 2,31 milliards de tonnes pour la production mondiale.

L'Inde reste un second loin derrière, mais progresse régulièrement: ses 280 millions de tonnes annuelles représentent 12 % de la production chinoise, mais 7 % de la production mondiale. La production en 2013 représente 227 kg par habitant.

Les Etats-Unis sont 3èmes: 77,8 millions de tonnes, soit 244 kg par habitant, et demeure un troisième qui décroît régulièrement: sa production représentait 5,7 % de la production mondiale en 1994, 3,9 % en 2006, et 1,9 % en 2013.

L'Iran, est 4ème: 75 millions de tonnes, soit 928 kg par habitant, a réalisé en 2013 nettement plus du double de sa production en 2006 de 33 millions de tonnes.

Le Brésil est 5ème: un peu plus de 70 millions de tonnes, soit 344 kg par habitant: il progresse lui aussi très vite, car sa production n'était que de 26 millions en 1994, et de 39 millions en 2006.

La Turquie est 6ème: 70 millions de tonnes, soit 858 kg par habitant. Sa vitesse de progression s'est un peu ralentie ces dernières années : 47,5 millions en 2006, et 64 millions en 2011. [1]

Tableau I-07: Production du ciment dans le monde du 1994 à 2014 (en milliard de tonne).

Année	1994	2003	2006	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Production mondiale	1 370,0	2 000,0	2 600,0	2 850,0	2 960,0	3 300,0	3 638,7	3 782,7	4 074,8	4 181,3

Au total, la production mondiale de ciment augmente régulièrement, grâce à la croissance de la production dans les Pays émergents: 1,37 milliard de tonnes en 1994, 2,55 milliards en 2006, 3,4 milliards de tonnes en 2011: soit 2,8 % de plus par rapport à 2010. [10] En moyenne, et selon des statistiques de l'année 2013, sur le plan mondial, la production s'élève à 555 kg de ciment par habitant et par an.

Après 2 années de ralentissement dû à la crise (principalement en 2008), la production mondiale de ciment avait relevé la tête en 2010 avec une croissance de 9,2 % par rapport à l'exercice précédent. La production mondiale de ciment était de 3,3 milliards de tonnes en 2010, soit 9,2 % de plus par rapport à l'année 2009, elle était de 2,96 milliards de tonnes en 2009.

Les marchés émergents consomment aujourd'hui 90 % de la production de ciment, contre 65 % au début des années 1990.

La production cimentière reste avant tout locale: 95 % en moyenne du ciment consommé dans le monde sont utilisés dans le pays de production. [1]

I-11-Production nationale:

Cette filière regroupe actuellement 17 cimenteries, réparties à travers le territoire national, avec une production de plus de 22 millions de tonnes en 2016 et des prévisions de dépasser les 25 millions de tonnes en 2017.

Tableau I-08: Les 17 cimenteries en Algérie.

N°	Cimenterie.	Nom.	Opérateur.
1	SCSEG.	Société des Ciments de Sour El Ghozlane -Bouira-.	GICA.
2	SCMI.	Société des Ciments de la Mitidja (partenariat) –Blida-.	
3	SCIZ.	Société des Ciments de Zahana – Mascara-.	

4	SCHB.	Société des Ciments de Hamma Bouziane –Constantine-.		
5	SCT.	Société des Ciments de Tebessa.		
6	SCAEK.	Société des Ciments d’Ain El Kebira – Sétif-.		
7	SCAL.	Société des Ciments de l’Algérois.		
8	SCIS.	Société des Ciments de Saida.		
9	SCIMAT.	Société des Ciments d’Ain Touta – Batna-.		
10	SCHS.	Société des Ciments de Hadja Soud – Skikda-.		
11	SCIBS.	Société des Ciments de Béni Saf –Ain Témouchent-.		
12	ECDE.	Société des Ciments et Dérivés Ech- Chlef.		
13	LCM.	Lafarage Ciment M’sila.		LAFARAGE.
14	LCO.	Lafarage Ciment Oggaz.		
15	CILAS.	Ciment Lafarage Souakri (partenariat).		
16	BISKRIA.	Groupe Lamouri.	Privé.	
17	STG.	Entreprise HAMEL (en phase d’essai).		

Le groupe public GICA représente le premier producteur de ciment en Algérie qui avoisine les 13 millions de tonnes en 2016 soit près de 60% de la production nationale. L’opérateur étranger Lafarge-Holcim, qui produit actuellement plus de 8 millions de tonnes par an, occupe la deuxième place, suivi par deux opérateurs algériens privés qui se sont lancés dans cette activité récemment (Lamouri et Hamel). [18]

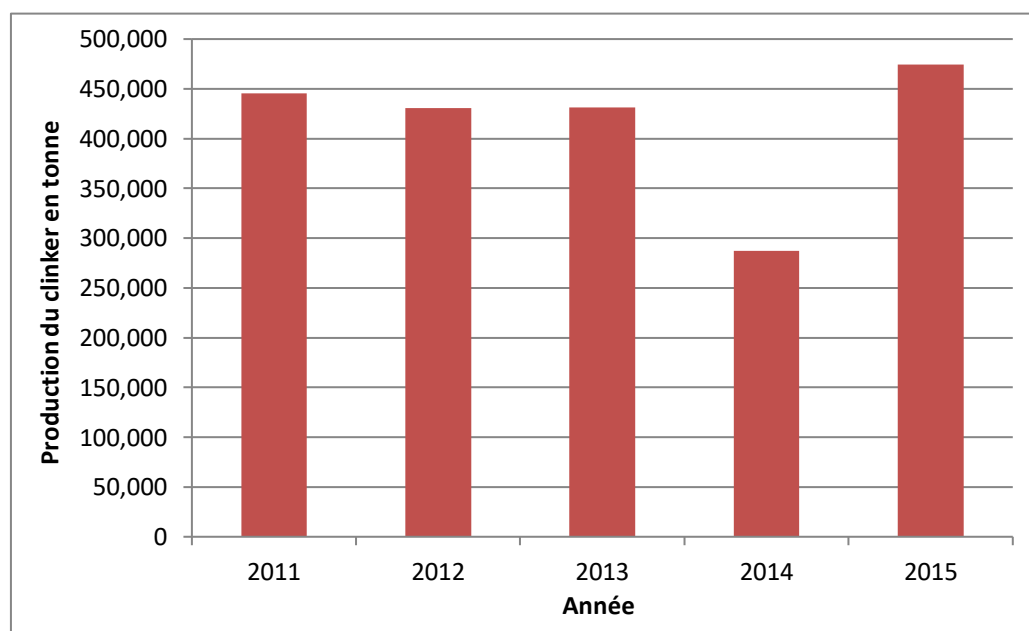
Tableau I-09: Production annuelle du groupe GICA.

Année.	2014.	2015.	2016.	2017.
Production groupe GICA.	11 555,280.	12 143,557.	12 604,045.	13 950,660.

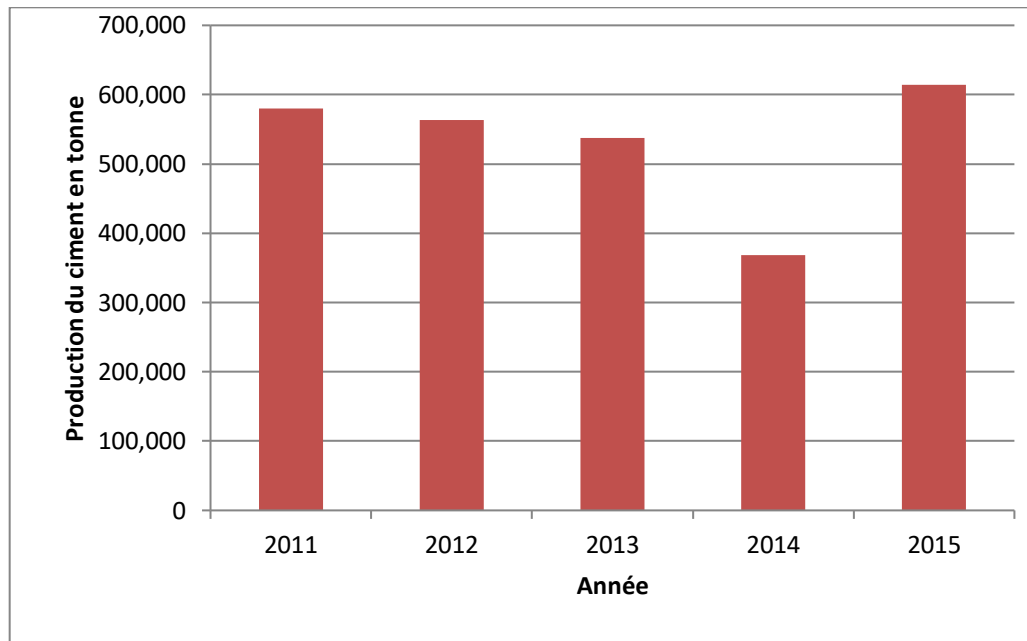
Sa production a grimpé à 13.950.660 tonnes en 2017 contre 12.604.045 tonnes en 2016, en hausse de plus de 1,34 million de tonnes (11%). [19]

I-12-Production au niveau de la cimenterie d'Elma Labiod:**Production du clinker:****Tableau I-10:** Production du clinker au niveau de la cimenterie d'Elma Labiod.

Année.	2011.	2012.	2013.	2014.	2015.
Clinker.	445 375.	430 881.	431 367.	287 169.	474 564.

Graphe I-02: Production du clinker au niveau de la cimenterie d'Elma Labiod.**Production du ciment:****Tableau I-11:** Production du ciment au niveau de la cimenterie d'Elma Labiod.

Année.	2011.	2012.	2013.	2014.	2015.	2018.
Ciment.	580 013.	563 516.	537 500.	368 815.	614 047.	595 000.

Graphe I-03: Production du ciment au niveau de la cimenterie d'Elma Labiod.

La capacité productive annuelle de la Société des Ciments de Tébessa (SCT) dépasse les 500 000 tonnes de ciment semi-fini. [18]

I-13-Conclusion:

Le ciment est un produit important et indispensable pour la construction et le développement des pays et le développement du marché. Il ya trois étapes importantes pour sa fabrication: préparation de la matière première et du cru, la production du clinker et l'obtention du ciment.

D'après les statistique présentées, il y une augmentation significative dans la production du ciment soit en Algérie ou au niveau international.

The page features a decorative border consisting of several black graduation caps (mortarboards) with gold tassels, interspersed with gold streamers and confetti-like elements. The background is a light cream color.

Chapitre II

II-1-Introduction:

Dans ce chapitre, on s'intéresse à expliquer les différents procédés de la fabrication du ciment portland dans la cimenterie d'Elma Labiod en voie sèche depuis la préparation des matières premières jusqu'à l'expédition du produit fini «ciment».

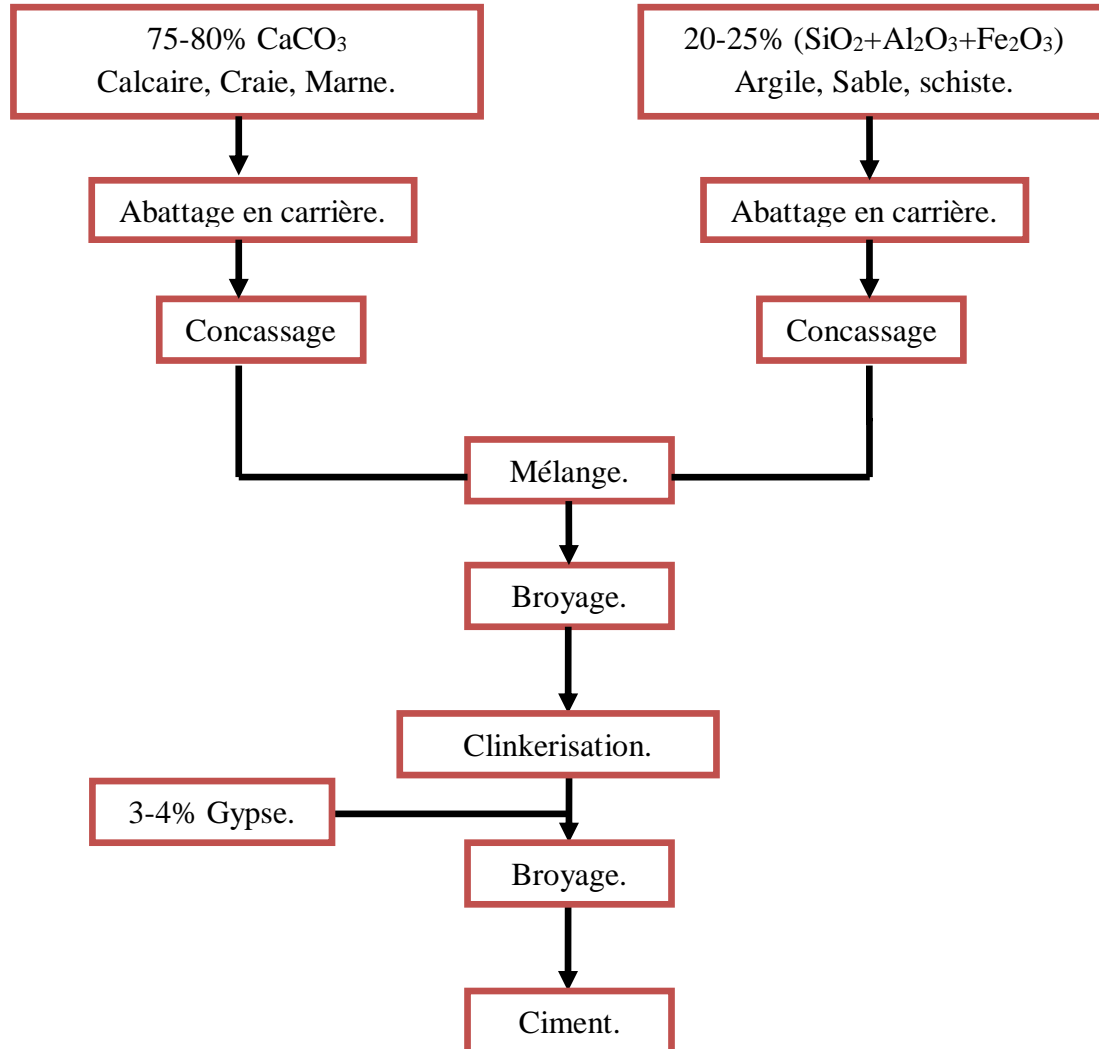


Schéma II-01: Fabrication du ciment. [20]

II-2-Extraction des matières premières:**II-2-1-Carrière du calcaire:**

Fig II-01: Carrière du calcaire – cimenterie d'Elma Labiod – TEBESSA -.

II-2-1-1-Travaux d'abattage:

La foration 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.

II-2-1-2-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.

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

II-2-1-3-Enlèvement et alimentation du concasseur:

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. [21]

II-2-2-Carrière d'argile:**II-2-2-1-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).



Fig II-02: Carrière d'argile – cimenterie d'Elma Labioud – TEBESSA -.

II-2-2-2-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.

II-2-2-3-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 de 18 km en moyenne (aller-retour). [22]

II-2-3-Carrière de sable:

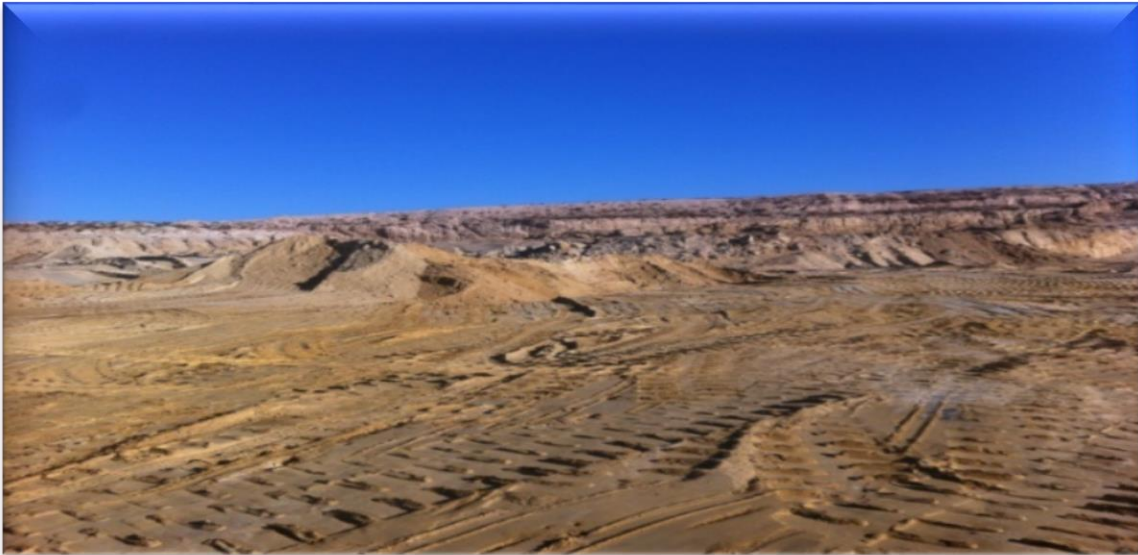


Fig II-03: Carrière du sable – cimenterie d'Elma Labiod – TEBESSA-.

II-2-3-1-Travaux d'extraction:

Etant ses propriétés physico-mécaniques, le sable constituant le gisement d'Elma Labiod est exploité avec bulldozer et chargeur sur pneus. Cette méthode d'abattage est dite «émottage mécanique».

Cette opération est réalisée au moyen d'un bulldozer de marque Komatsu, qui présente un rendement journalier pratique suffisant.

II-2-3-2-Chargement:

Le chargement de sable s'effectue par une chargeuse sur pneus de marque de volume godet de 5 m³ de capacité. Une seule chargeuse sera suffisante pour assurer un rendement journalier de 795 t/jour.

II-2-3-3-Transport:

Conformément à la tâche technique, il est nécessaire de transporter 795 tonnes de sable par jour à partir du front de taille jusqu'à l'aire de stockage se trouvant près de l'unité de production des ciments par camions de 15 tonnes de charge utile. La distance de transport de la carrière de sable à la cimenterie est de 10 km en moyenne (aller retour).

II-2-3-4-Stockage du sable:

La matière première est stockée dans un endroit à proximité de l'unité de production et à une distance de 05 km de la carrière, dont l'unité dispose d'un stock permanent de 20 000 tonnes pour répondre en permanence à la demande de la cimenterie et éviter toute rupture inattendue d'approvisionnement en matière de sable. [23]




II-2-4-Stockage du minerai de fer:

A partir du gisement de SOMIFER de BOUKADRA (TEBESSA).

II-2-5–Stockage du gypse:

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

II-3-Concassage:**II-3-1-Types de concasseurs utilisés:****Tableau II-01:** Les concasseurs de matières premières.

Désignations.	Types et capacités.	Photos.
Concasseur calcaire N°02.	A marteaux EV 200×200 500t/h.	
Concasseur argile N°03.	A cylindre E 120×150 300 t/h.	
Concasseur ajouts N°06.	A marteaux double rotor DMI 160×150 100 t/h.	

II-3-1-1- Concasseur EV:

Ce concasseur à marteau est le plus grand de la gamme de concasseurs de FLS. Il est livré comme concasseur à un étage; il réduit les morceaux de pierre de 0,1mm à 25 mm. La grille d'entrée n'est pas nécessaire puisque ce type de concasseur est équipé d'un cylindre absorbant les chocs, immédiatement après l'entrée et un épais tapis de lourdes chaînes qui empêchent les morceaux de pierre de rebondir de l'entrée.

Comme tous les autres types, le concasseur EV est indiqué pour le concassage des matières dures non abrasives et non collantes, surtout le calcaire. Mais il n'est pas aussi sensible à l'humidité et au collage de matière à l'alimentation.

Le concasseur EV travaille avec un seul ensemble de rotors. La grille de sortie de ce concasseur est construite d'une seule pièce amovible, constituée de barres de grille montées entre deux longerons. La grille peut être serrée contre le rotor pour compenser l'usure.

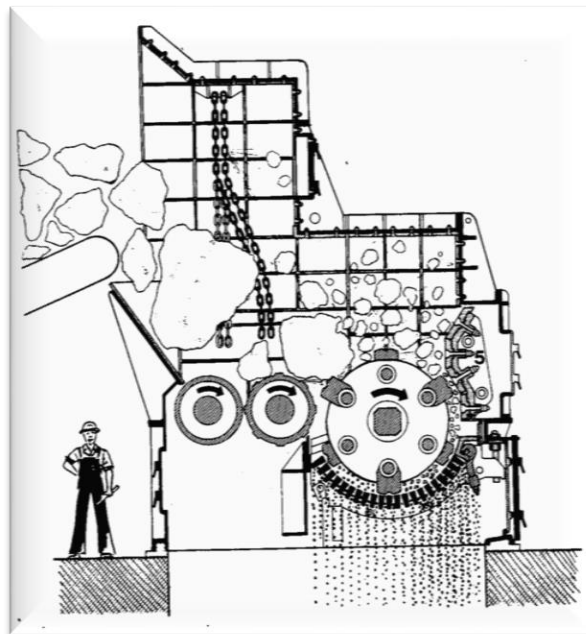


Fig II-04: Concasseur EV.

II-3-1-2- Concasseur à cylindre:

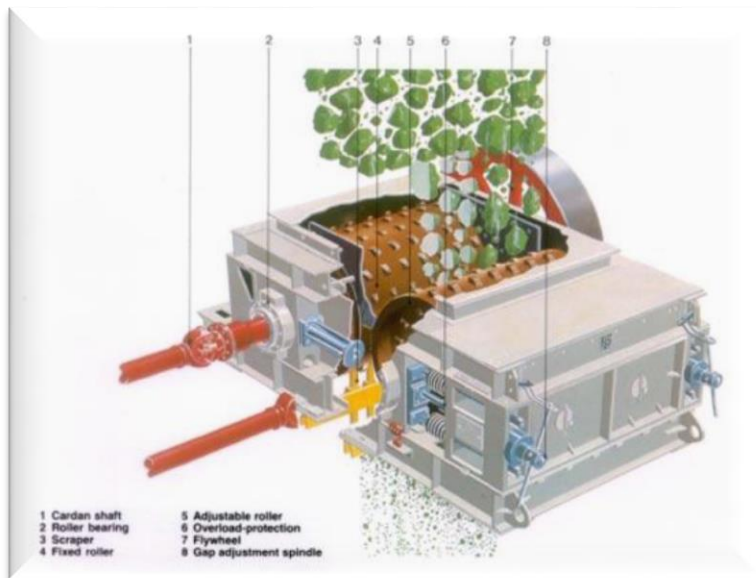
Les concasseurs à cylindres sont utilisés pour la réduction des matériaux tendres, collants et humides de carrière, tel que l'argile. [20]

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 raclours 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.



1. Arbre de transmission.
2. Roulement à rouleaux.
3. Racloir.
4. Cylindre fixe.
5. Cylindre réglable.
6. Système de protection contre les surcharges.
7. Volant.
8. Réglage de l'écartement.

Fig II-05: Concasseur à cylindre E.

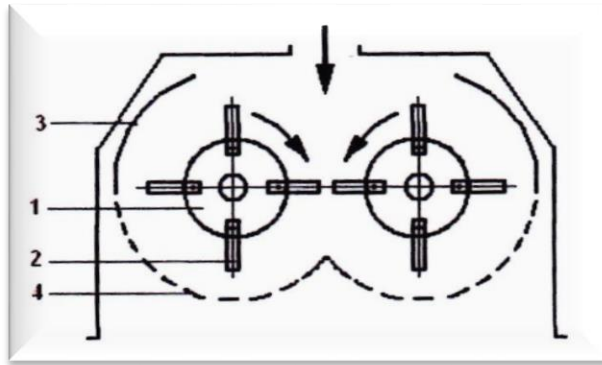
II-3-1-3- Concasseur à marteau double rotor:

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.

Le concasseur à marteaux doubles est doté d'une lourde enclume avec des plaques de recouvrement remplaçables et une grille de sortie: ces deux parties peuvent être réglées pour compenser l'usure.



1. Rotor
2. Marteaux
3. Plaque d'usure
4. Grille.

Schéma II-02: Concasseur à marteau à double rotor.

II-3-2-Calcaire:

La matière première extraite est d'abord concassée grossièrement à l'aide de concasseur N 02. Une fois concassée, la matière concassée est acheminée par une bande transporteuse jusqu'à les halls de stockage.

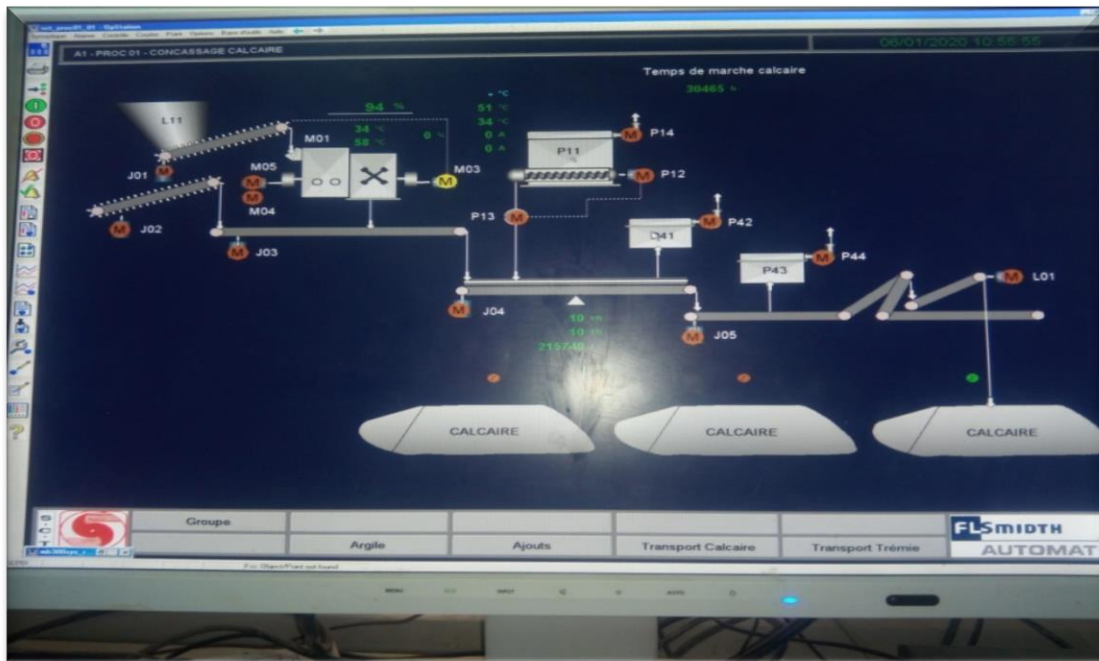


Schéma II-03: Le processus de concassage et transport du calcaire vers le hall associé.

II-3-3-Argile:

La matière première est concassée par un concasseur N°03, puis elle est acheminée vers le hall de stockage par une bande transporteuse.

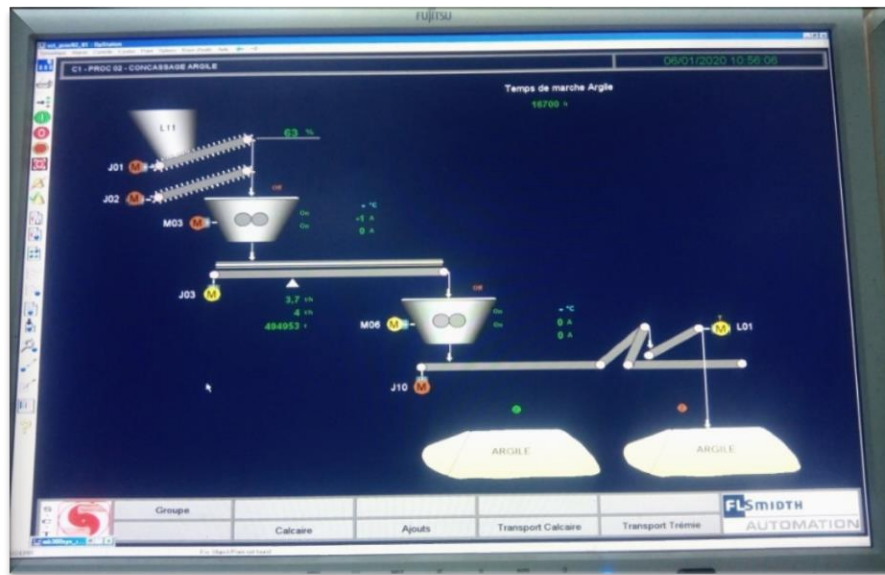


Schéma II-04: Le processus de concassage et transports d'argile vers le hall associé.

II-3-4-Ajouts:

Les ajouts sont concassés dans un concasseur N°06, puis, avec une bande transporteuse souterraine, ils sont acheminés vers le hall de stockage

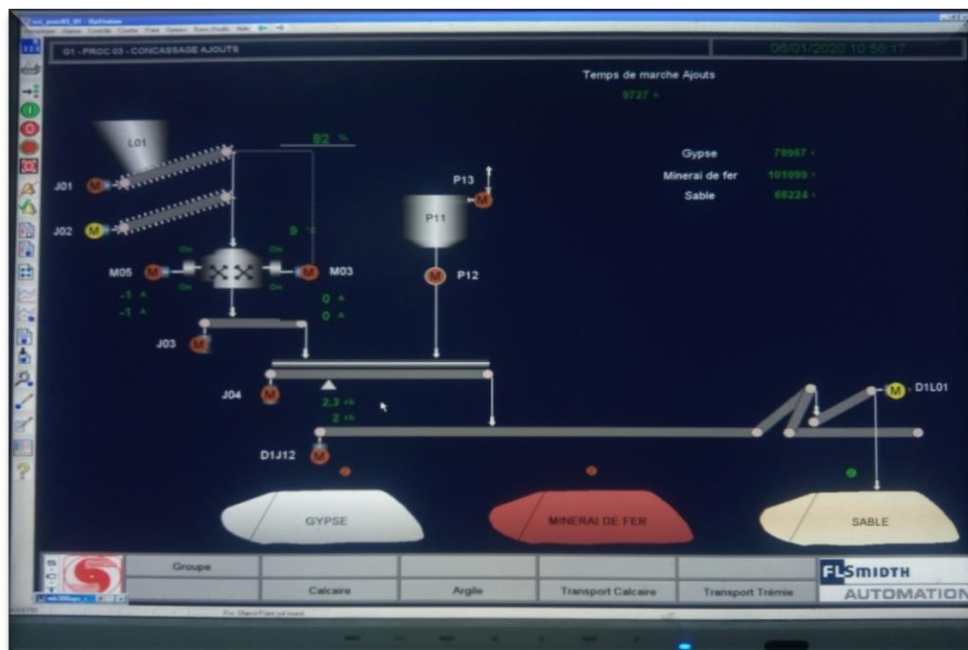





Schéma II-05: Le processus de concassage et transports des ajouts vers le hall associé.

II-4-La pré-homogénéisation:

Tableau II-02: Hall de stockage

Désignation	Types et capacités	Photos
Calcaire p/cru	2tas × 14 000 t	
Calcaire ajouts	1tas × 5 000 t	
Argile	1tas × 3 000 t	

Minerai de fer	1tas × 3 000 t	
Gypse	1tas × 3 000 t	

Le mélange concassé est déversé en couche parallèle par un Stackeur ou un gratter.

L'homogénéité des matières est évaluée sur la base de son paramètre le plus important, dans le cas du calcaire, sa teneur en CaCO_3 . A l'homogénéisation, les variations autour de la moyenne entre de la matière avant homogénéisation (courbe A), et celles après homogénéisation (courbe B) sont réduites. Cette réduction, appelée efficacité d'homogénéisation.

Graphes II-01: Courbe avant et après homogénéisation A et B. [24]



Les matières stockées dans les halls appropriés et qui rentrent dans la fabrication de la farine crue (l'argile, le calcaire, le minerai de fer, le sable) sont transportées à l'aide des bandes transporteuses vers les trémies de dosage de la farine crue. Le dosage se fait d'une manière automatique selon les analyses chimiques de ces matières.

II-5-Alimentation du broyeur cru:

Quatre trémies pour l'alimentation des broyeurs crus, le premier est pour le calcaire, le deuxième est pour le sable, le troisième est pour le minerai de fer et le dernier est pour l'argile.



Fig II-06: Les trémies de dosage – cimenterie d'Elma Labioud – TEBESSA -.

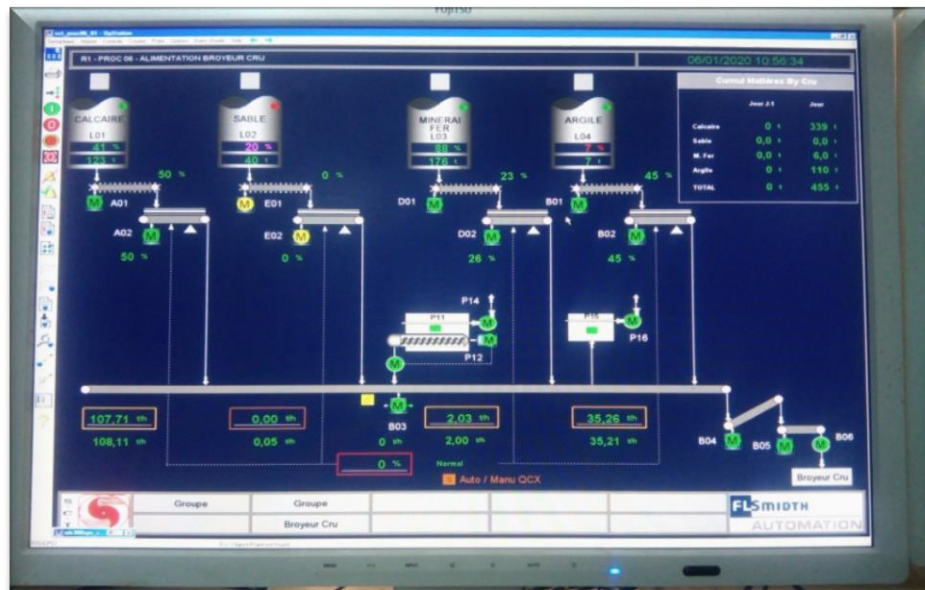


Schéma II-06: Le processus d'alimentation broyeur cru.

II-6-Broyage du cru:

Le broyage du cru est réalisé à la cimenterie d'Elma Labiod à un débit de 150 t/h dans un broyeur Tirax Unidan. C'est un cylindre fermé tournant autour d'un axe horizontal.

L'intérieur du broyeur est protégé par des plaques de blindage épaisses. Ces plaques ne sont pas neutres, mais ont une forme destinées à favoriser le classement dans le compartiment finisseur et la percussion dans le compartiment préparateur.

- Le premier compartiment comprend une charge de boulets de gros diamètre.
- Le deuxième compartiment comprend une charge de boulets de faible diamètre. [25]

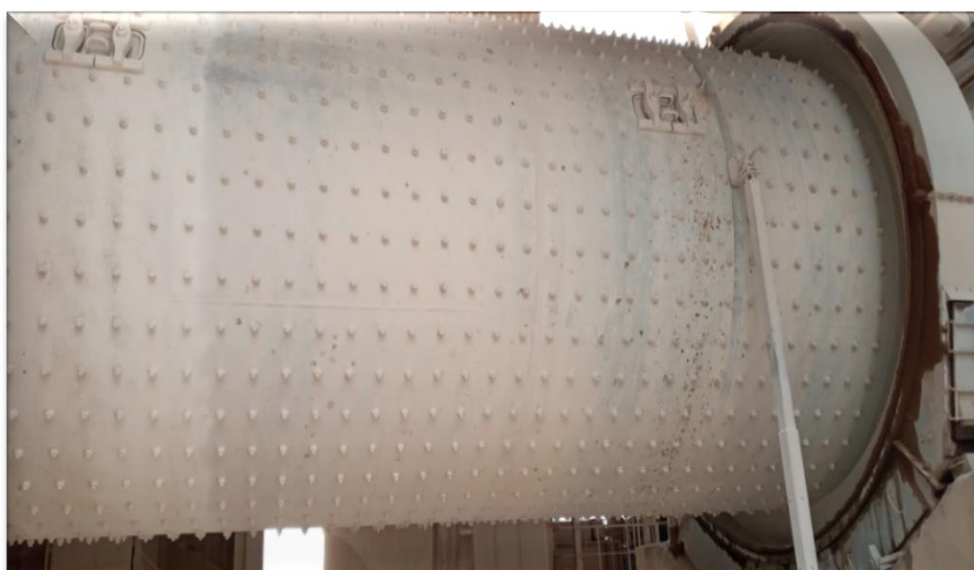


Fig II-07: Broyeur Tirax Unidan - cimenterie d'Elma Labiod - TEBESSA.

Les matières premières pré-homogénéisées doivent être finement broyées pour être chimiquement plus réactive au cours de leur cuisson dans le four.

Le calcaire, l'argile, le minerai de fer et le sable si on a besoin, sont mélangés pour avoir de la farine crue dans la phase du broyage cru qui reprend aux exigences qualité à savoir le LSF, MS et MAF.

- Concernant la préparation de la farine type CPJ, le broyage du calcaire et de l'Argile avec un ajout de 1 % à 2% de minerai de fer et 1% de sable.
- Concernant la préparation de la farine type CRS, le broyage du calcaire et de l'Argile avec un ajout de 1 % à 4% de minerai de fer et 5% de sable. [18]

Cette farine est destinée pour l'alimentation du four. Selon le schéma, la farine crue sortie du broyeur est envoyée dans un élévateur vers un séparateur qui sépare les fines du grosses, les fines passent pneumatiquement aux silos de stockage et homogénéisation et les grosses retournent vers broyeur.



Schéma II-07: Le processus de broyeur cru.

II-7-L'homogénéisation:

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.



Fig II-08: Les silos d'homogénéisation – cimenterie d'Elma Labioud – TEBESSA -.

Le schéma montre les deux silos d'homogénéisation, si l'un des deux est hors service, l'autre le remplace pour ne pas arrêter la chaîne de production.

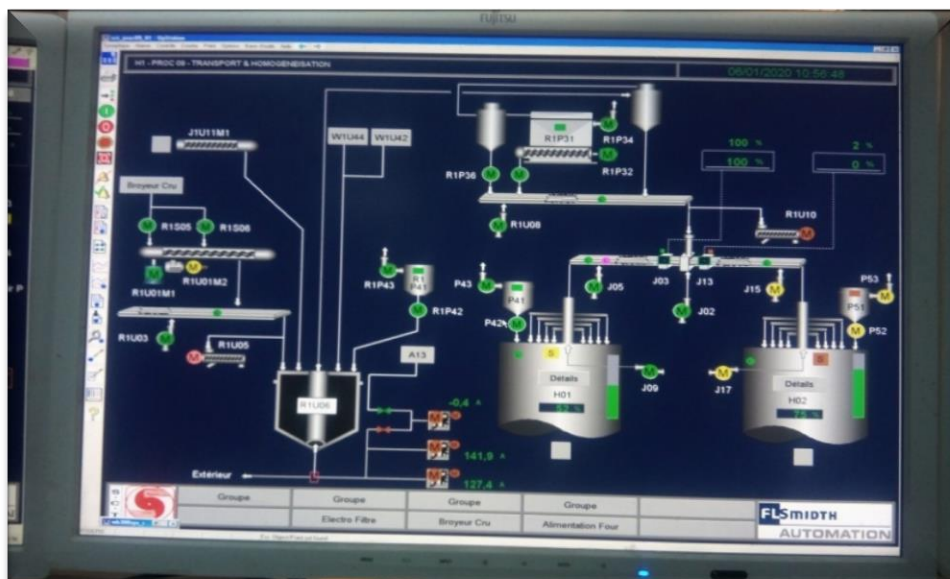


Schéma II-08: Le processus d'homogénéisation.

II-8-Le dépoussiérage:

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 à éliminer les émissions des poussières par l'utilisation des filtres à manches. [26]

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

II-9-Préchauffage:

Le tour de préchauffage est un échangeur simple à 4 étages qui alimentent le four, assurant de manière optimale le préchauffage de la farine crue avant que celle-ci passe dans le four. Les gaz réchauffent la poudre crue qui circule dans les cyclones en sens inverse par gravité; la poudre s'échauffe ainsi jusqu'à 800 °C environ et perd donc son gaz carbonique (décarbonatée): c'est-à-dire transformée en chaux calcinée. [27]

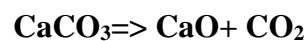


Fig II-09: Le préchauffage.

II-10-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.

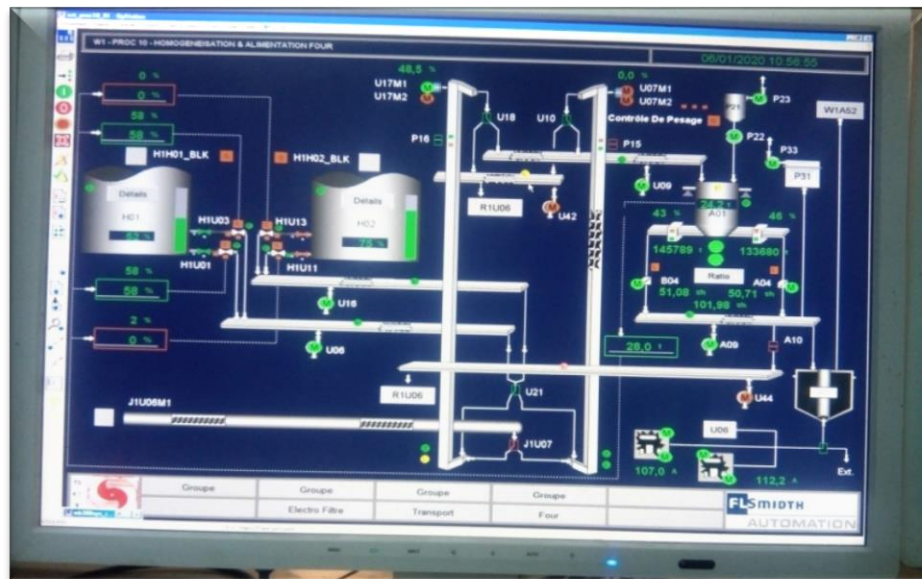


Schéma II-09: Alimentation four.

II-11-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 Labioud, 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 à l'intérieur sur toute sa longueur.

Le revêtement est sensible à la déformation élastique du four et les variations de température. Le four doit marcher en continu. Sa mise à feu après un arrêt doit être lente avec accroissement uniforme de température et virage régulier.

L'extrémité la plus en aval du four, la sortie, est fermée par un fond traversé par une tuyère. La température de cuisson est aux environs de 1450°C. La chauffe est faite soit au fuel, soit au gaz, soit au charbon pulvérisé ou une combinaison de ces trois. Les matières premières sont enfournées à l'entrée du four et se déplacent à contre-courant des gaz chauds, à travers le four jusqu'à ce qu'elles en ressortent par le refroidisseur sous forme de clinker cuit.

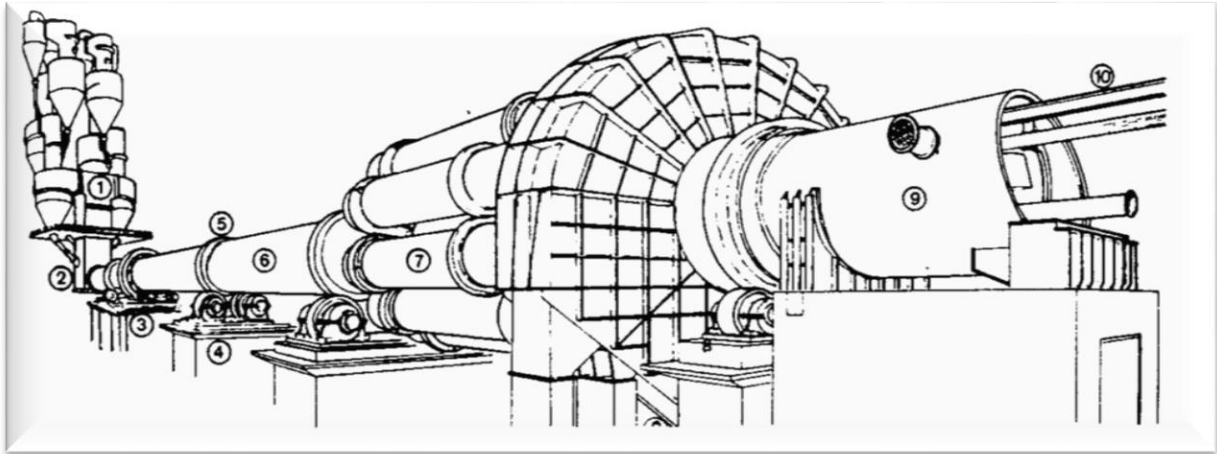


Schéma II-10: Four moderne à quatre étages de cyclones.

- | | |
|--------------------------------|-----------------------------------------------------|
| 1. Tour à 4 étages de cyclone. | 7. Refroidissement UNAX (refroidisseur planétaire). |
| 2. Entrée du four. | 8. Sortie refroidisseur. |
| 3. Station de commande. | 9. Tunnel. |
| 4. Train porteur à galets. | 10. Suspension de tuyère. [20] |
| 5. Bandages. | |
| 6. Tube de four. | |



Fig II-10: Le four rotatif – cimenterie d'Elma Labiod – TEBESSA -.

Pendant la cuisson du clinker, la température de la charge du four doit impérativement être maintenue entre 1400 et 1500°C et celle des gaz à 2000°C environ. L'énergie consommée se situe entre 3200 et 4200 kJ par tonne du clinker. Le clinker doit également être cuit en

milieu oxydant; c'est pourquoi un excès d'air est requis dans la zone de clinkérisation d'un four à ciment.

Le clinker se présente sous forme des grains gris foncé arrondis dont les dimensions sont irrégulières.



Schéma II-11: La clinkérisation (le four).

II-12-Refroidisseur:

Le refroidisseur Planétaire UNAX à 09 ballonnets (21mx19 8m) a pour rôle d'abaisser la température du clinker tombant du four à une température d'environ 1135 °C jusqu'à 80-100 °C.

II-13-Le transport du clinker:

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



Fig II-11: Silos de stockage du clinker.

II-14-L'alimentation du broyage 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).



Fig II-12: Trémie de dosage (clinker, gypse et ajouts).

La précision et la fiabilité du pesage et du dosage des matériaux introduits dans le broyeur sont déterminantes pour le maintien d'un bon rendement énergétique de l'atelier de broyage. [26]



Schéma II-12: L'alimentation du broyeur ciment.

II-15-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. [20]

Dans la cimenterie d'Elma Labioud, 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. [20]

II-16-Les silos stockage du ciment:

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. [26]



Fig II-13: Silos de stockage ciment – cimenterie d'Elma Labiod – TEBESSA -.

II-17-L'expédition du ciment par vrac et par sac:

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 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 désaéragage, après quoi 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.

[20]



Fig II-14: L'ensacheuse.

Le schéma ci-dessous représente l'expédition du ciment.

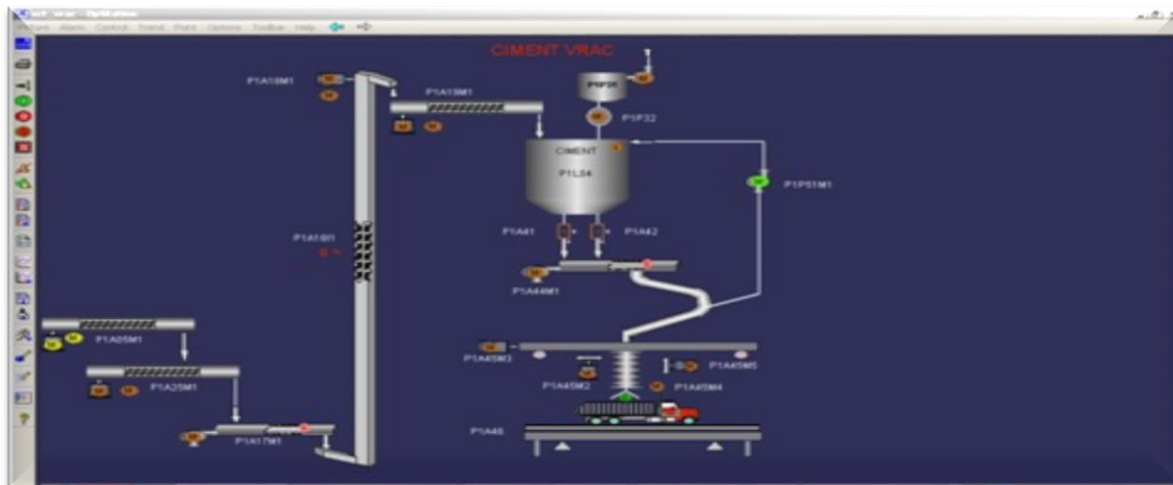


Schéma II-13: L'expédition du ciment par vrac.



Fig II-15: L'expédition du ciment par sac



Fig II-16: Un sac de ciment.

II-18-Conclusion:

Le ciment est devenu aujourd'hui très convoité; il passe par des étapes nécessaires pour avoir une bonne qualité du produit. La fabrication du ciment est un procédé qui exige une maîtrise et des techniques de production. La cimenterie d'Elma Labioud utilise la voie sèche dont les sources principales d'alimentation sont calcaire, argile, minerai de fer et sable; et les matières secondaires sont des ajouts: pouzzolane, tuf, laitier et gypse.

The page features a decorative border composed of several black graduation caps (mortarboards) with gold tassels, interspersed with gold streamers and confetti-like elements. The background is a plain, light cream color.

Chapitre III

III-1-Introduction:

La cimenterie de Tébessa fabrique deux types de ciment CRS et CPJ. Le service de contrôle de qualité joue un rôle important pour avoir une bonne qualité du ciment sous les normes algériennes, avec la vérification des produits dans les différentes étapes de production depuis les matières premières au produits semi-fini jusqu'au produit fini.

Le but essentiel de notre travail est de maîtriser les analyses et les essais appliqués au niveau de laboratoire qui sont répartis en quatre unités qui travaillent en collaboration, et ensuite en déduire des résultats sur les différents laboratoires:

- Laboratoire de la matière première.
- Laboratoire analytique.
- Laboratoire de production.
- Laboratoire d'essais physiques.

III-2-Laboratoire de la matière première:**Mode opératoire:**

Pour le mode d'analyse de la matière première, on doit suivre les étapes suivantes :

- Ouvrir la porte de visite au niveau du doseur.
- Prélever un échantillon (10kg) deux fois.
- Faire un quartage à l'aide d'un diviseur, jusqu'à l'obtention de 2kg.
- Analyser chaque matière selon instruction XRF.

Résultats:**Tableau III-01:** Analyses sur le calcaire.

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃
5.74	0.98	0.39	52.92	0.4	0.09	0.1	0.09

CL	PAF	Humidité	LSF	MS	MAF
0.014	42.07	3.3	297.8	4.16	2.49

Commentaire:

- Le pourcentage du CaO est élevé (CaO>45%), c'est le constituant principal du calcaire.
- Le pourcentage d'humidité ne dépasse pas la norme (<5).

Tableau III-02:Analyse chimique d'argile.

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CAO	MgO	K ₂ O
53.60	14.60	6.38	7.41	1.75	1.70
Na ₂ O	CL	PAF	Humidité	MS	MAF
0.26	0.012	7.71	11.71	2.51	2.34

Commentaire:

- Le pourcentage du SiO₂ et Al₂O₃ est approprié à la norme (SiO₂>45% et Al₂O₃>12), ce sont les éléments importants parmi les constituants d'argile.
- Le pourcentage d'humidité ne dépasse pas la norme (<15).

Tableau III-03:Analyse du minerai de fer.

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	PAF	Humidité	MS	MAF
28.65	8.74	48.86	12.86	1.54	1.20	11.78	4.78	0.52	0.19

Commentaire:

- Le pourcentage du Fe₂O₃ est approprié à la norme (Fe₂O₃>45%), c'est le constituant principal du minerai de fer.
- Le pourcentage d'humidité ne dépasse pas la norme (<6).

Tableau III-04:Analyse du gypse.

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	SO ₃	CL	Humidité
2.71	0.50	0.33	30.81	2.310	0.190	30.130	0.00	3.110

Commentaire:

- Le pourcentage du SO₃ est approprié à la norme (SO₃>28%), c'est le constituant principal du gypse.
- Le pourcentage d'humidité ne dépasse pas la norme (≤4).

III-3-Laboratoire analytique:**III-3-1-Attaque par acide perchlorique:**

En ce qui concerne cette partie d'analyses les méthodes suivantes qui sont décrites ci-dessous :

Matériels utilisés:

Echantillon, cristalliseur, plaque chauffante, papier filtre, balance électronique, acide perchlorique, Hcl, verre de montre, baguette, eau distillée, triangle, acide chlorhydrique, fiole jaugé 500 ml.

Mode opératoire:

- Peser 1g d'échantillon (kk ou ciment).
- Ajouter 2ml d'eau distillée et 5ml d'acide perchlorique dans un cristalliseur.
- Avec une baguette remuer jusqu'à ce que le produit soit bien solubilisé dans l'acide.
- Couvrir le cristalliseur avec un verre de montre.
- Mettre la solution sur une plaque chauffante sur un triangle jusqu'à l'obtention d'une patte gélatineuse et lui ajouter 10 ml d'acide Chlorhydrique (Hcl) et d'eau distillé.
- Réchauffer le mélange pendant 15 min.



Fig III-01:Mode opératoire d'attaque par acide perchlorique.

- Filtrer le contenu dans une fiole jaugé de 500 ml sur un filtre rapide à l'aide de l'eau distillée en rinçant parfaitement le cristalliseur. Compléter jusqu'au trait de jauge avec l'eau distillée.

III-3-2-Dosage pour la détermination des oxydes:

Après la filtration de la solution :

- Le filtre est utilisé pour l'analyse de la silice.
- Le filtrat est utilisé pour l'analyse de la silice, l'oxyde ferrique, l'alumine, la chaux, et la magnésie.

Matériels utilisés:

EDTA, Becher, NH_3 (1+1), Acétate d'ammonium, PH mètre, NaOH, Agitateur, Plaque chauffante, Four, Balance électronique, Dessiccateur, Papier filtre, Les indicateurs, Complexonate de cuivre, PAN, Pipette.

III-3-2-1-Dosage de la silice (SiO_2):

- Récupérer le filtre et le mettre dans un creuset en platine bien taré (soit P_1).
- Calciner le contenu de creuset en platine dans un four à 1000°C pendant une heure.
- Refroidir le creuset dans un dessiccateur pendant 10 minutes.



Fig III-02:Creuset taré. **Fig III-03:**Creuset dans le four. **Fig III-04:**Dessiccateur.

- Peser le contenu de creuset (soit P_2).

La silice est déterminée selon la formule suivante:

$$\text{SiO}_2 (\%) = \frac{P_2 - P_1}{G} \times 100$$

P1: le poids du creuset avant la calcination.

P2: le poids du creuset après calcination.

III-3-2-2-Dosage de l'oxyde ferrique (Fe_2O_3):**Mode opératoire:**

- Au moyen d'une pipette, prélever 100 ml de la solution préparée (le filtrat) dans une fiole jaugé de 500 ml et la mettre sur l'agitateur.
- Ajouter 0.5g d'acide amino-acétique et 0.3g d'indicateur sulfosilicilque; la couleur de la solution sera violet.
- A l'aide d'un PH mètre, ajuster le PH de cette solution à 1.5 avec l'hydroxyde d'ammonium pour que le Fe_2O_3 soit le seul à être complexé.
- A l'aide d'un thermomètre, chauffer ensuite de 40 à 50°C sur une plaque chauffante pour préciser le dosage de Fe_2O_3 .

- Titrer avec l'E.D.T.A jusqu'à l'apparition de la couleur jaune pale clair.



Fig III-05:Mode opératoire du dosage de l'oxyde ferrique.

Le pourcentage d'oxyde de fer est déterminé selon la formule suivante:

$$\mathbf{Fe_2O_3 = 1.977 \times N_{EDTA} \times V_{EDTA}}$$

N_{EDTA} : Normalité d'E.D.T.A (1,2).

V_{EDTA} : Volume d'E.D.T.A en ml.

III-3-2-3-Dosage d'alumine (Al_2O_3):

Mode opératoire:

- Au moyen d'une pipette, prélever 100 ml de la solution préparée (le filtrat) dans une fiole jaugé de 500 ml et la mettre sur l'agitateur.
- Ajouter ensuite 5 ml d'acide acétique.
- Ajouter goutte à goutte de l'acétate d'ammonium jusqu'à le PH ne doit pas passer 3.1.
- Ajouter 3gouttes de la solution de complexonate de cuivre et 2ml d'indicateur PAN qui donne la couleur rose violacée.
- Porter à ébullition pour accélérer la vitesse de complexation de l'alumine.
- Titrer avec l'E.D.T.A a environ 0.03ml/l jusqu'au virage du rose violet à la jaune pale.

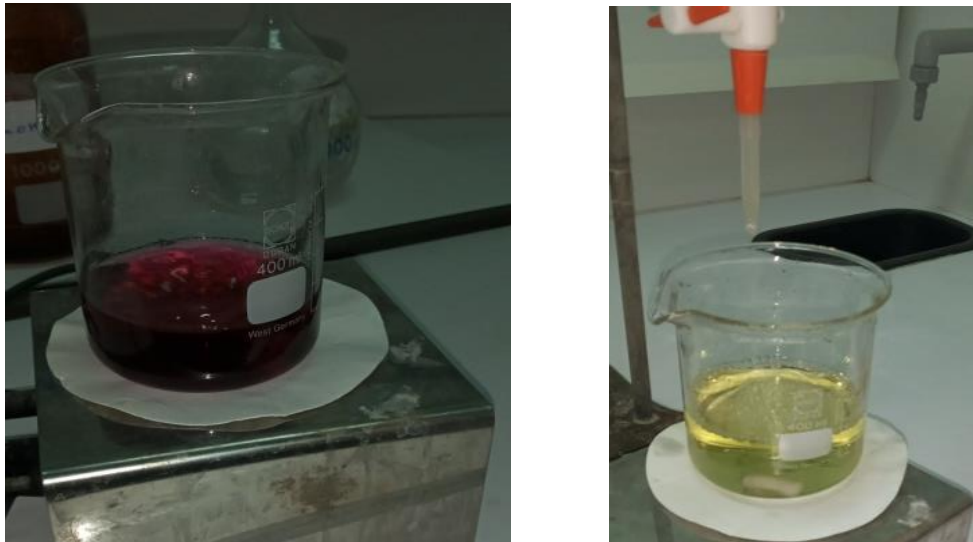


Fig III-06:Dosage d'alumine.

- Prendre le volume de titrage.

Le pourcentage de l'alumine est déterminé selon la formule suivante:

$$\text{Al}_2\text{O}_3 = 0.7647 * N_{\text{EDTA}} * V_{\text{EDTA}}$$

III-3-2-4-Dosage de la chaux (CaO):

- Au moyen d'une pipette, prélever 100 ml de la solution préparée (le filtrat) dans une fiole jaugé de 500 ml et la mettre sur l'agitateur.
- Prendre 50 ml de la solution filtrée dans la fiole Verser ensuite 50 ml de triéthanolamine (TEA) pour masquer le Fe_2O_3 et Al_2O_3 .
- Ajuster le PH de cette solution à 12.5 avec la solution d'hydroxyde de sodium (NaOH 2mol/L).
- Ajouter 0.1 g d'indicateur murexide (indicateurCaO).
- Titrer avec E.D.T.A jusqu'à l'apparition d'une couleur violacé.

Le pourcentage du CaO est déterminé selon la formule suivante:

$$\text{CaO} = 1.6824 * N_{\text{EDTA}} * V_1$$

III-3-2-5-Dosage de magnésie (MgO):

- Au moyen d'une pipette, prélever 100 ml de la solution préparée (le filtrat) dans une fiole jaugé de 500 ml et la mettre sur l'agitateur.

- Ajouter 50 ml de la solution de triéthanolamine (TEA) et l'introduire dans un Bucher et à l'aide d'un PH mètre, ajuster le PH de cette solution à (10 ± 0.5) avec la solution d'hydroxyde de sodium $(\text{NH}_3)(1+1)$.
 - Ajouter environ 0.1g d'indicateur (Indicateur de MgO).
 - Titrer avec la solution d'E.D.T.A jusqu'à l'apparition d'une couleur jaune normal.
- Le pourcentage d'oxyde de magnésium est déterminé selon la formule suivante:

$$\text{MgO} = 1.2093 * N_{\text{EDTA}} * V_{\text{EDTA}}$$

III-3-2-6-Détermination de la perte au feu:

- Peser 1g de matière sèche dans un creuset en platine propre.
 - Mettre le creuset et son contenu dans le four pendant 30 min, dont la température est stabilisée à 1000°C .
 - Retirer le creuset du four, refroidir le creuset dans un dessiccateur et peser.
- Le pourcentage de la perte au feu est déterminé selon la formule suivante:

$$\text{Perte au feu} = (\text{Mi} - \text{Mf}) * 100.$$

Mi: masse initiale (prise d'essai).

Mf: masse finale (produit calciné).

Les résultats obtenus par l'analyse chimique sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Tableau III-05: Résultats de la composition chimique du ciment.

Elément	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	Cl	PAF
1 ^{er} jour	21.03	4.20	4.13	64.87	1.12	0.51	0.029	2.26	0.002	2.60
2 ^{ème} jour	21.00	4.24	4.17	64.43	1.11	0.57	0.025	2.18	0.002	2.50
3 ^{ème} jour	20.67	5.27	3.41	61.15	1.21	0.60	0.195	2.42	0.002	5.20
4 ^{ème} jour	20.70	5.40	3.40	62.20	1.30	0.60	0.18	2.50	0.002	6.20
5 ^{ème} jour	20.69	5.35	3.72	61.13	1.21	0.61	0.19	2.41	0.002	5.1

Commentaire:

- Le pourcentage du CaO est élevé.
Pour le 1^{er} et le 2^{ème} jour;
- le pourcentage de Fe₂O₃ et Al₂O₃ est presque semblable.

- La PAF ne dépasse pas 3%
Pour les autres jours;
- Le pourcentage de Fe_2O_3 est supérieur au pourcentage d' Al_2O_3 .
- La PAF dépasse 5%.

Les résultats de la composition chimique est minéralogique du clinker sont représentées dans les tableaux (voir annexe A).

Facteur de saturation en chaux de Lea Parker (L.S.F):

Ce module exprime le rapport entre le pourcentage de la chaux présentée dans le mélange et la quantité de chaux qui peut être liée par les facteurs hydrauliques lors du processus normal de cuisson et de refroidissement du clinker.

Ce module est calculé par la méthode suivante:

$$\text{L.S.F (MgO} < 2\%) = 100(\text{C} + 0.75\text{M}) / (2.85 \text{ S} + 1.18 \text{ A} + 0.65 \text{ F}).$$

$$\text{L.S.F (MgO} > 2\%) = 100(\text{C} + 1.5\text{M}) / (2.85 \text{ S} + 1.18 \text{ A} + 0.65 \text{ F}).$$

- Si le L.S.F est élevé ($\gg 100$), on a :
 - Consommation calorifique élevée (cuisson difficile).
 - Consommation des briques.
 - Augmentation de la teneur en chaux libre.
 - Augmentation du C3S (par conséquent résistance du ciment).
 - Augmentation de la chaleur d'hydratation (Si C3A augmente).
- Si le L.S.F est faible ($\ll 100$), on obtient :
 - Cru facile à cuire.
 - Faible consommation calorifique.
 - Faible teneur en chaux libre (en raison de l'excès de la phase liquide dans la zone de cuisson).
 - Croutage lavé.
 - Baisse de C3S et augmentation de C2S. Il y'a tendance à formation des boulets du clinker dans le four.

MgO < 2.

1^{er} jour:

$$\text{L.S.F} = 100(\text{C} + 0.75\text{M}) / (2.85 \text{ S} + 1.18 \text{ A} + 0.65 \text{ F}).$$

$$\text{L.S.F} = 100(64.87 + 0.75 \times 1.12) / (2.85 \times 21.03 + 1.18 \times 4.20 + 0.65 \times 4.13).$$

$$\text{L.S.F} = 97.23\%.$$

2^{ème} jour :

$$\text{L.S.F} = 100(\text{C} + 0.75\text{M}) / (2.85 \text{ S} + 1.18 \text{ A} + 0.65 \text{ F}).$$

$$\text{L.S.F} = 100(64.43 + 0.75 \times 1.11) / (2.85 \times 21.00 + 1.18 \times 4.24 + 0.65 \times 4.17).$$

$$\text{L.S.F} = 96.59\%.$$

3^{ème} jour:

$$\text{L.S.F} = 100(C + 0.75M) / (2.85 S + 1.18 A + 0.65 F).$$

$$\text{L.S.F} = 100(61.15 + 0.75 \times 1.21) / (2.85 \times 20.67 + 1.18 \times 5.27 + 0.65 \times 3.41).$$

$$\text{L.S.F} = 92.14\%.$$

4^{ème} jour:

$$\text{L.S.F} = 100(C + 0.75M) / (2.85 S + 1.18 A + 0.65 F).$$

$$\text{L.S.F} = 100(62.20 + 0.75 \times 1.30) / (2.85 \times 20.70 + 1.18 \times 5.40 + 0.65 \times 3.40).$$

$$\text{L.S.F} = 93.48\%.$$

5^{ème} jour:

$$\text{L.S.F} = 100(C + 0.75M) / (2.85 S + 1.18 A + 0.65 F).$$

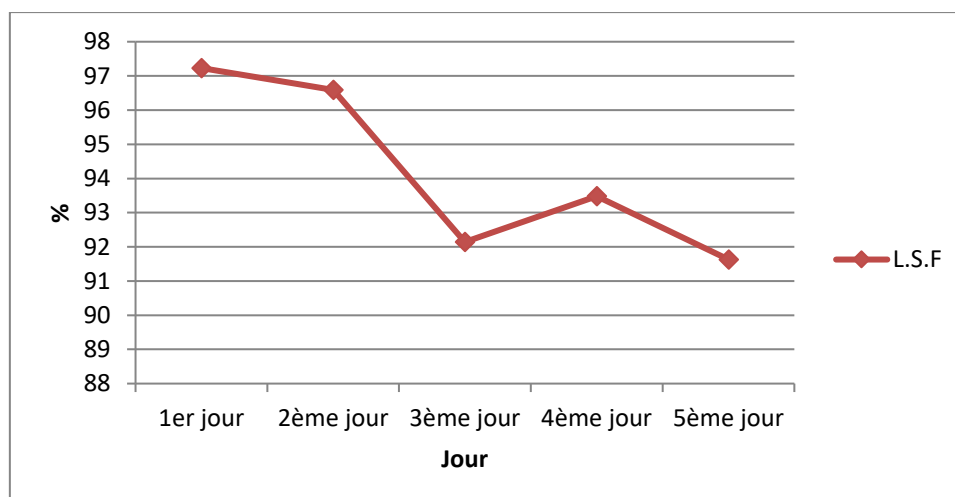
$$\text{L.S.F} = 100(61.13 + 0.75 \times 1.21) / (2.85 \times 20.69 + 1.18 \times 5.35 + 0.65 \times 3.72).$$

$$\text{L.S.F} = 91.63\%.$$

Tableau III-06: Résultats du calcul de L.S.F du ciment.

Jour	1 ^{er} jour	2 ^{ème} jour	3 ^{ème} jour	4 ^{ème} jour	5 ^{ème} jour
L.S.F	97.23	96.59	92.14	93.48	91.63

Graphe III-01: La courbe de L.S.F du ciment.



Commentaire:

Nous observons que les pourcentages de L.S.F obtenus sont presque stables sans dépasser la norme ($85 < \text{L.S.F} < 100$), ce qui explique une bonne qualité de ciment.

✚ Module silicique de Kühl (M.S):

Il est utilisé pour déterminer le pourcentage de la silice demandée pour obtenir une production d'une qualité bien déterminée.

Ce module est calculé par la méthode suivante :

$$\mathbf{M.S = S/(A+F)}.$$

Fe_2O_3 et Al_2O_3 sont des agents de fusion, c'est eux qui initient la formation de la phase liquide. Si leur taux est faible, le M.S est élevé et la cuisson est difficile. Il faut un dosage par les matières premières surtout les matières de correction avant le broyage.

- <2: Cuisson facile par phase liquide en excès, et favorisation du croûtage
- >3: Cuisson difficile par réduction des phases liquides et du croûtage dans le four.

1^{er} jour:

$$\text{M.S} = \text{S}/(\text{A}+\text{F}).$$

$$\text{M.S} = 21.03/(4.20+4.13).$$

$$\text{M.S} = 2.52\%.$$

2^{ème} jour

$$\text{M.S} = \text{S}/(\text{A}+\text{F}).$$

$$\text{M.S} = 21.00/(4.24+4.17).$$

$$\text{M.S} = 2.49\%.$$

3^{ème} jour

$$\text{M.S} = \text{S}/(\text{A}+\text{F}).$$

$$\text{M.S} = 20.67/(5.27+3.41).$$

$$\text{M.S} = 2.38\%.$$

4^{ème} jour:

$$\text{M.S} = \text{S}/(\text{A}+\text{F}).$$

$$\text{M.S} = 20.70/(5.40+3.40).$$

$$\text{M.S} = 2.35\%.$$

5^{ème} jour:

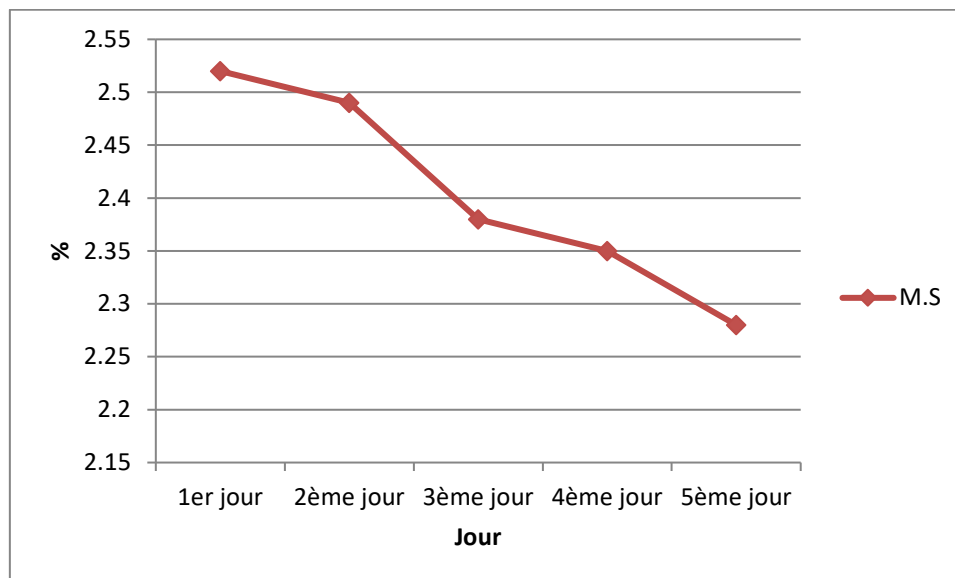
$$\text{M.S} = \text{S}/(\text{A}+\text{F}).$$

$$\text{M.S} = 20.69/(5.35+3.72).$$

$$\text{M.S} = 2.28\%.$$

Tableau III-07: Résultats du calcul de M.S du ciment.

Jour	1 ^{er} jour	2 ^{ème} jour	3 ^{ème} jour	4 ^{ème} jour	5 ^{ème} jour
M.S	2.52	2.49	2.38	2.35	2.28

Graphe III-02: La courbe de M.S du ciment.**Commentaire:**

D'après le graphe, nous observons que les pourcentages du module silicique M.S sont presque stables sans dépasser la norme ($2 < M.S < 3$).

🚩 Module aluminoferrique M.A.F :

C'est un module qui règle la proportion massique entre C3A et C4AF pour obtenir une production d'une qualité bien déterminée. La valeur de ce modèle caractérise la nature de la phase fondue.

Ce module est calculé par la méthode suivante :

$$\mathbf{M.A.F = A/F.}$$

- <1.3 : Chaleur d'hydratation faible, diminution de la viscosité de la phase fluide.
- >2.5 : phase liquide visqueuse, température de clinkérisation élevée.
- Quand $M.A.F < 0.638$, le ciment est sans C3A;

$$M.A.F = A/F.$$

1^{er} jour:

$$M.A.F = 4.20/4.13 = 1.01\%.$$

2^{ème} jour:

$$M.A.F = 4.24/4.17 = 1.01\%$$

3^{ème} jour:

$$M.A.F = 5.27/3.41 = 1.54\%$$

4^{ème} jour:

$$M.A.F = 5.40/3.40 = 1.58\%$$

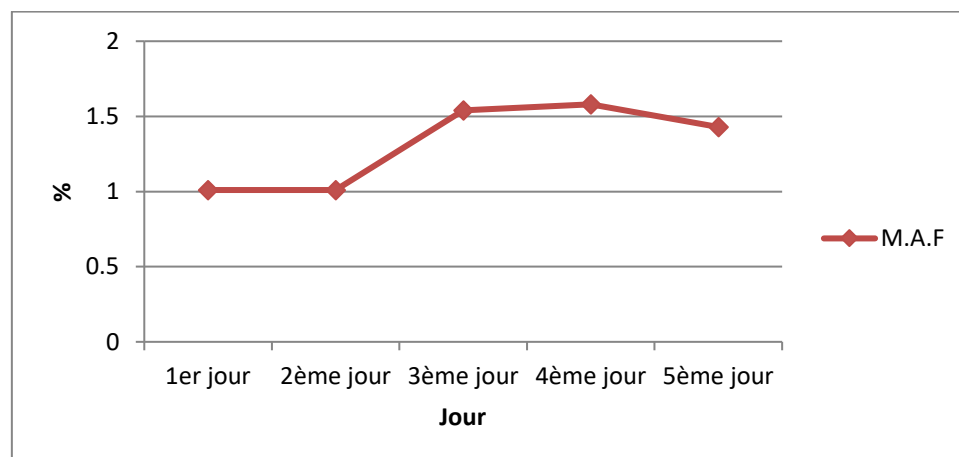
5^{ème} jour:

$$M.A.F = 5.35/3.72 = 1.43\%$$

Tableau III-08: Résultats du calcul de M.A.F du ciment.

Jour	1 ^{er} jour	2 ^{ème} jour	3 ^{ème} jour	4 ^{ème} jour	5 ^{ème} jour
M.A.F	1.01	1.01	1.54	1.58	1.43

Graphe III-03: La courbe de M.A.F du ciment.



Commentaire:

D'après le graphe, nous observons que les pourcentages de M.A.F obtenus sont presque stables sans dépasser la norme ($1.0 < M.A.F < 2.5\%$).

✚ Composition potentielle de BOGUE:

$$M.A.F > 0.64 \rightarrow C_3S = (4.071 \times C) - (7.6 \times S + 6.718 \times A + 1.43 \times F + 2.852 \times SO_3).$$

$$\rightarrow C_2S = (2.867 \times S) - (0.754 \times C_3S).$$

$$\rightarrow C_3A = (2.650 \times A) - (1.692 \times F).$$

$$\rightarrow C_4AF = 3.04 \times F.$$

Calcul C3S:

1^{er} jour:

$$C_3S = (4.071 \times C) - (7.6 \times S + 6.718 \times A + 1.43 \times F + 2.852 \times SO_3).$$

$$C_3S = (4.071 \times 64.87) - (7.6 \times 21.03 + 6.718 \times 4.20 + 1.43 \times 4.13 + 2.852 \times 2.26).$$

$$C_3S = 63.69\%.$$

2^{ème} jour

$$C_3S = (4.071 \times C) - (7.6 \times S + 6.718 \times A + 1.43 \times F + 2.852 \times SO_3).$$

$$C_3S = (4.071 \times 64.43) - (7.6 \times 21.00 + 6.718 \times 4.24 + 1.43 \times 4.17 + 2.852 \times 2.18).$$

$$C_3S = 62.02\%.$$

3^{ème} jour:

$$C_3S = (4.071 \times C) - (7.6 \times S + 6.718 \times A + 1.43 \times F + 2.852 \times SO_3).$$

$$C_3S = (4.071 \times 61.15) - (7.6 \times 20.67 + 6.718 \times 5.27 + 1.43 \times 3.41 + 2.852 \times 2.42).$$

$$C_3S = 44.66\%.$$

4^{ème} jour:

$$C_3S = (4.071 \times C) - (7.6 \times S + 6.718 \times A + 1.43 \times F + 2.852 \times SO_3).$$

$$C_3S = (4.071 \times 62.20) - (7.6 \times 20.70 + 6.718 \times 5.40 + 1.43 \times 3.40 + 2.852 \times 2.50).$$

$$C_3S = 47.62\%.$$

5^{ème} jour:

$$C_3S = (4.071 \times C) - (7.6 \times S + 6.718 \times A + 1.43 \times F + 2.852 \times SO_3).$$

$$C_3S = (4.071 \times 61.13) - (7.6 \times 20.69 + 6.718 \times 5.35 + 1.43 \times 3.72 + 2.852 \times 2.41).$$

$$C_3S = 43.48\%.$$

Calcul du C2S:

1^{er} jour:

$$C_2S = (2.867 \times S) - (0.754 \times C_3S)$$

$$C_2S = (2.867 \times 21.03) - (0.754 \times 63.69)$$

$$C_2S = 12.27\%.$$

2^{ème} jour:

$$C_2S = (2.867 \times S) - (0.754 \times C_3S).$$

$$C_2S = (2.867 \times 21.00) - (0.754 \times 62.02).$$

$$C_2S = 13.44\%.$$

3^{ème} jour:

$$C_2S = (2.867 \times S) - (0.754 \times C_3S).$$

$$C_2S = (2.867 \times 20.67) - (0.754 \times 44.66).$$

$$C_2S = 25.58\%.$$

4^{ème} jour:

$$C_2S = (2.867 \times S) - (0.754 \times C_3S).$$

$$C_2S = (2.867 \times 20.70) - (0.754 \times 47.62).$$

$$C_2S = 23.44\%.$$

5^{ème} jour:

$$C_2S = (2.867 \times S) - (0.754 \times C_3S).$$

$$C_2S = (2.867 \times 20.69) - (0.754 \times 43.48).$$

$$C_2S = 24.48\%.$$

Calcul du C3A:

1^{er} jour:

$$C_3A = (2.650 \times A) - (1.692 \times F).$$

$$C_3A = (2.650 \times 4.20) - (1.692 \times 4.13).$$

$$C_3A = 4.14\%.$$

2^{ème} jour:

$$C_3A = (2.650 \times A) - (1.692 \times F).$$

$$C_3A = (2.650 \times 4.24) - (1.692 \times 4.17).$$

$$C_3A = 4.18\%.$$

3^{ème} jour:

$$C_3A = (2.650 \times A) - (1.692 \times F).$$

$$C_3A = (2.650 \times 5.27) - (1.692 \times 3.41).$$

$$C_3A = 8.19\%.$$

4^{ème} jour:

$$C_3A = (2.650 \times A) - (1.692 \times F).$$

$$C_3A = (2.650 \times 5.40) - (1.692 \times 3.40).$$

$$C_3A = 8.55\%.$$

5^{ème} jour:

$$C_3A = (2.650 \times A) - (1.692 \times F).$$

$$C_3A = (2.650 \times 5.35) - (1.692 \times 3.72).$$

$$C_3A = 7.88\%.$$

Calcul du C4AF

1^{er} jour:

$$C_4AF = 3.04 \times F.$$

$$C_4AF = 3.04 \times 4.13.$$

$$C_4AF = 12.55\%.$$

2^{ème} jour:

$$C_4AF = 3.04 \times F.$$

$$C_4AF = 3.04 \times 4.17.$$

$$C_4AF = 12.67\%.$$

3^{ème} jour:

$$C_4AF = 3.04 \times F.$$

$$C_4AF = 3.04 \times 3.41.$$

$$C_4AF = 10.36\%.$$

4^{ème} jour:

$$C_4AF = 3.04 \times F.$$

$$C_4AF = 3.04 \times 3.40.$$

$$C_4AF = 10.33\%.$$

5^{ème} jour:

$$C_4AF = 3.04 \times F.$$

$$C_4AF = 3.04 \times 3.72.$$

$$C_4AF = 11.30\%.$$

Commentaire:

Pour le 1^{er} et le 2^{ème} jour;

- $C_3A < 5 \rightarrow$ Ciment CRS.
- $C_3A > 5 \rightarrow$ Ciment CPJ.

III-4-Laboratoire de production:

On utilise différentes méthodes d'analyses:

III-4-1-L'analyse par Rayons X:

C'est une méthode d'analyse ayant pour objet de déterminer la quantité des éléments constituant les échantillons donnés d'une manière très rapide et avec une précision très appréciable afin d'avoir leurs qualités.

Le QCX est un système de contrôle de qualité par rayon X qui permet de détecter les neuf éléments suivants : $CaCO_3$, SiO_2 , Al_2O_3 , MgO , K_2O , Fe_2O_3 , Na_2O , SO_3 et Cl , les résultats sont affichés sur un ordinateur piloté par un logiciel spécial.

Ces résultats sont utilisés pour la correction des consignes des doseurs qui sont rectifiées automatiquement par la salle de contrôle et pour suivre la conformité du produit dans tous le procédé.

III-4-1-1-Préparation de la pastille alimentation four pour l'analyse par Rayon X selon instruction QCX:

Le prélèvement se fait au niveau d'aérogisseur de la sortie du silo.

Matériels utilisés:

Alimentation four, Pastilleuse, Rayon X.

Mode opératoire:

Pour préparer une pastille d'alimentation four.

- Peser 7g de l'alimentation four dans la pastilleuse.
- Analyser la pastille par rayon X.
- Enregistrer les résultats affichés par le QCX dans un registre.

Le tableau III-09 présente les pourcentages des constituants d'alimentation four d'après l'analyse par Rayon X.

Tableau III-09:Résultats d'analyse de la pastille d'alimentation four.

Elément	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	Cl
1 ^{er} jour	13.39	3.52	2.16	42.87	0.65	0.65	0.48	0.21	0.230
2 ^{ème} jour	13.45	3.52	2.11	42.80	0.66	0.47	0.11	1.24	0.016
3 ^{ème} jour	13.41	3.39	2.06	42.71	0.63	0.46	0.10	0.21	0.016
4 ^{ème} jour	13.48	3.12	3.51	42.25	0.65	0.44	0.11	0.18	0.016
5 ^{ème} jour	13.00	3.23	2.13	42.99	0.63	0.37	0.14	0.22	0.016

III-4-1-2-Préparation de la pastille clinker pour analyse par Rayon X selon instruction QCX:

Matériels utilisés:

Bouteille en verre, Cire, Clinker Broyé, Broyeur, Balance électronique, Pastilleuse, Rayon X.



Fig III-07: Pastilleuse.



Fig III-08: Rayon X.

Mode opératoire:

Pour préparer une pastille du clinker:

- Broyer un échantillon de clinker.



Fig III-09: Broyage du clinker.

- Peser 7g de clinker broyé.
- Ajouter 1g de la cire et mettre le mélange dans une bouteille en verre.
- Mettre le mélange dans la pastilleuse pour préparer une pastille.
- Analyser avec le QCX et afficher les pourcentages de tous les constituants du clinker.



Fig III-10: Analyse de la pastille clinker.

- Enregistrer les résultats dans le registre.

Le tableau III-10 présente les pourcentages des constituants du clinker d'après l'analyse par Rayon X.

Tableau III-10:Résultats d'analyse de la pastille du clinker.

Elément	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	Cl	PAF
1 ^{er} jour	20.43	4.21	4.52	63.23	1.12	0.55	0.021	0.20	0.005	0.24
2 ^{ème} jour	20.34	5.48	3.62	62.33	1.11	0.56	0.021	0.20	0.005	0.50
3 ^{ème} jour	21.55	4.56	3.62	63.61	1.16	0.66	0.08	0.31	0.004	0.40
4 ^{ème} jour	20.45	5.71	3.67	64.16	1.12	0.61	0.04	0.25	0.004	0.45
5 ^{ème} jour	21.12	5.34	3.71	63.97	1.12	0.45	0.06	0.12	0.001	0.40

III-4-1-3-Préparation de la pastille du ciment pour analyse par Rayon X selon instruction QCX:

Pour préparer une pastille du ciment :

- Peser 7g du ciment.
- Ajouter 1g de la cire et mettre le mélange dans une bouteille en verre.
- Mettre le mélange dans la pastilleuse pour préparer une pastille.
- Analyser avec le QCX.
- Afficher les pourcentages de tous les constituants du ciment.
- Enregistrer les résultats dans le registre.
 - Si C3A (5:9) → le type du ciment est CPJ.

- Si $C3A < 5$ → le type du ciment CRS.
- Communiquer le résultat à la salle de contrôle.

Le tableau III-11 présente les pourcentages des constituants du ciment d'après l'analyse par Rayon X.

Tableau III-11: Résultats d'analyse de la pastille du ciment.

Elément	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	Cl	PAF
1 ^{er} jour	20.89	4.09	4.20	64.86	1.09	0.50	0.018	2.18	0.002	2.10
2 ^{ème} jour	20.33	3.48	4.50	60.20	0.90	0.46	0.025	1.88	0.002	1.80
3 ^{ème} jour	19.89	5.44	3.77	60.11	1.24	0.59	0.33	2.38	0.002	4.80
4 ^{ème} jour	20.10	5.13	3.60	59.10	1.19	0.67	0.33	2.47	0.002	5.80
5 ^{ème} jour	20.66	5.19	3.29	58.80	1.19	0.74	0.30	2.39	0.002	6.00

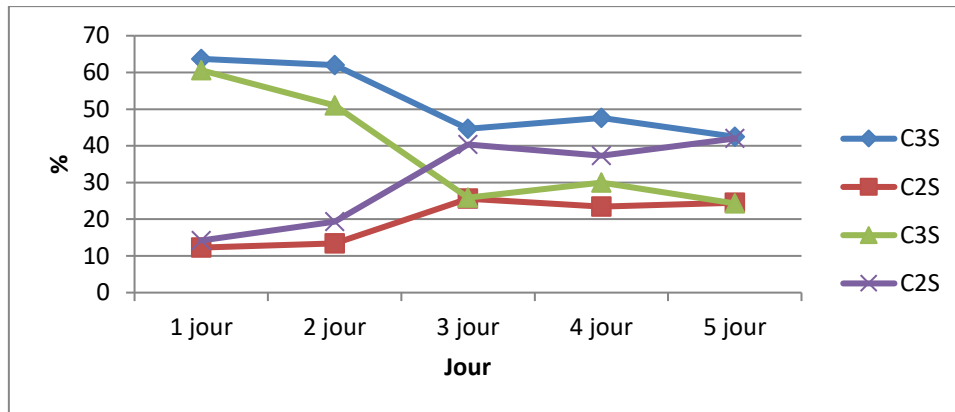
✚ **Comparaison entre les résultats obtenus par analyses chimiques (calcul de la composition minéralogique du ciment par la formule de BORGUE) et l'analyse par Rayon X:**

Le tableau III-12 montre les résultats de C3S, C2A, C2S et C4AF obtenus par les deux méthodes.

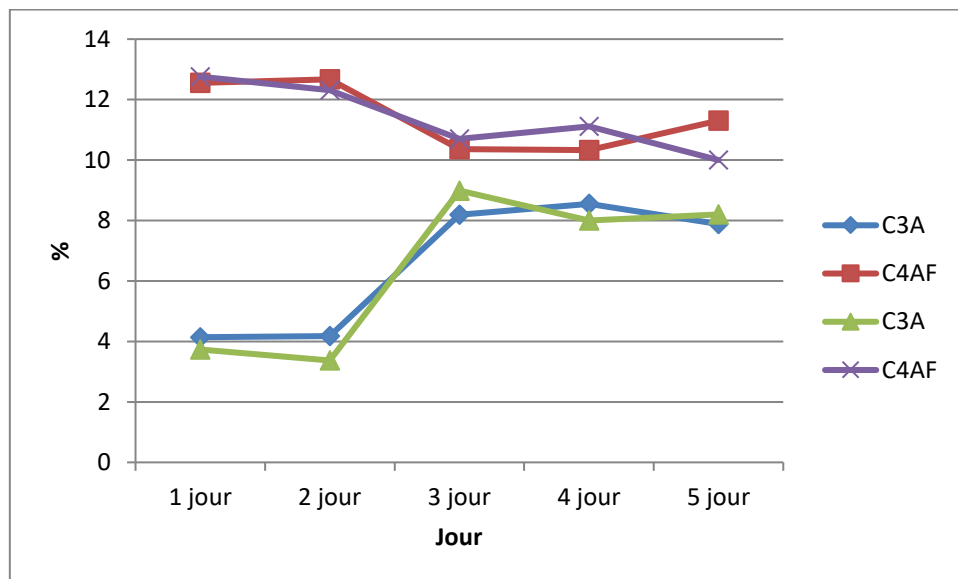
Tableau III-12: Comparaison entre les résultats obtenus par analyse chimique et l'analyse par Rayon X.

	Calcul par la formule de BORGUE				Analyse par Rayon X			
	C3S	C2S	C3A	C4AF	C3S	C2S	C3A	C4AF
1 ^{er} jour	63.69	12.27	4.14	12.55	60.59	14.20	3.73	12.76
2 ^{ème} jour	62.02	13.44	4.18	12.67	51.02	19.30	3.37	12.31
3 ^{ème} jour	44.66	25.58	8.19	10.36	25.88	40.40	8.99	10.70
4 ^{ème} jour	47.62	23.44	8.55	10.33	29.99	37.28	8.00	11.11
5 ^{ème} jour	42.48	24.48	7.88	11.30	24.30	42.00	8.20	10.00

Graphe III-04: Les courbes de comparaison entre les résultats obtenus par analyse chimique et l'analyse par Rayon X de C3S et C2S du ciment.



Graphe III-05: Les courbes de comparaison entre les résultats obtenus par analyse chimique et l'analyse par Rayon X de C3A et C4AF du ciment



Comparaison:

Les graphes 04 et 05 et le tableau 12 indiquent un certain écart entre les valeurs de C3S et C2S et C3A et C4AF obtenues par les deux méthodes.

III-4-2-Détermination du refus avec l'appareil ALPINE:

Cette appareil est utilisé pour effectuer des tamisages à secs très fins, sans manipulation de la matière. La reftuse ALPINE fonctionne sans aucun mouvement mécanique du tamis ou des autres parties en contact avec la matière, mais simplement par courant d'air.

III-4-2-1-Mode opératoire de la détermination du refus farine crue sur tamis 90 μ :**Matériels utilisés:**

Farine crue, Appareil Alpine, Balance électronique.



Fig III-11: Appareil Alpine.

Mode opératoire:

Faite l'analyse chaque heure.

- Peser 5 gr de la farine crue (P1).
- Tamiser dans un tamis de 90 μ pendant 03 minutes sur appareil alpine.
- Peser le reste de l'échantillon (P2).
- Calculer le refus en suivant la formule:

$$\text{Refus} = P_2 * 100/P_1.$$

Avec: **P1:** Poids de farine crue.

P2: refus sur tamis de 90 μ .

Les résultats de l'analyse de la farine crue par refus sont présentés par le tableau III-13.

Tableau III-13: Résultats d'analyse refus de la F.C.

Jour	P ₂	Refus
1 ^{er} jour	0.62	12.40
2 ^{ème} jour	0.61	12.20
3 ^{ème} jour	0.61	12.20
4 ^{ème} jour	0.62	12,40
5 ^{ème} jour	0.63	12,60

➤ Communiquer les résultats à la salle de contrôle.

III-4-2-2-Détermination de refus ciment sur Tamis 45µ: (même mode opératoire que la farine crue):

Les résultats de l'analyse du ciment par refus sont présentés par le tableau III-14.

Tableau III-14: Résultats d'analyse refus du ciment.

Jour	Refus	P ₂
1 ^{er} jour	0.61	12.20
2 ^{ème} jour	0.59	11.80
3 ^{ème} jour	0.57	11.40
4 ^{ème} jour	0.56	11.20
5 ^{ème} jour	0.62	12.40

8<Refus<15%, l'ingénieur chef de poste corrige et élimine la cause de la non-conformité.

Commentaire:

On remarque que le refus de la farine crue et le ciment est entre 11 et 13%, ce qui indique la bonne qualité des produits.

➤ Enregistrer les résultats sur le registre.

III-4-3-Analyse par titre:**III-4-3-1-Analyse de la farine crue par titre:****Matériels utilisés:**

Balance électronique, fiole 250 ml, Hcl, burette, l'eau distillé, plaque chauffante, phénolphtaleine, NaOH.

Mode opératoire:

Pour déterminer le titre de la farine crue :

- Peser 0.5g de la farine crue dans une fiole de 250 ml.
- Ajouter 25 ml de HCL 0.5 N avec une burette.
- Ajouter l'eau distillée jusqu'à 100 ml.
- Porter la solution avec un ciseau jusqu'à l'ébullition et refroidir la solution.
- Ajouter 04 gouttes de phénolphtaleine.
- Titrer avec la solution de NaOH 0.25 N jusqu'à la coloration rouge.



Fig III-12:Coloration de la solution en rouge.

- Entrer les résultats dans le système QCX.

Tableau III-15:Résultats d'analyse de la F.C par titre.

Jour	Titre
1 ^{er} jour	74.20
2 ^{ème} jour	74.70
3 ^{ème} jour	74.45
4 ^{ème} jour	74.45
5 ^{ème} jour	74.50

A partir de ces résultats, on détermine la quantité du calcaire et la quantité d'argile nécessaire.

- Enregistrer les résultats dans le registre.

III-4-4-La chaux libre:

La chaux libre est la chaux non combinée aux constituants minéralogiques du clinker. C'est un paramètre essentiel pour la qualité et le degré de cuisson du clinker. Elle provoque des gonflements et fissurations dans le béton lorsque son pourcentage dépasse 2.5 % dans un ciment.

III-4-4-1-Détermination de la chaux libre du clinker:

Matériels utilisés:

Pompe sous-vire, bucher, entonnoir, indicateur CaO, solution d'éthylène-glycol, bain marin.



Fig III-13:Bain marin.

Mode opératoire:

- Peser 1g de clinker bien broyé.
- Mettre l'échantillon dans une fiole et ajouter 50 ml Ethylène-glycol.
- Mettre la fiole dans un bain marie à 65-70°C pendant 30 minutes.
- Aspirer le liquide à travers un entonnoir Buchner de 5 cm³ avec un papier filtre dans une fiole pour filtration sous vide de 250 ml.
- Ajouter 5gouttes d'indicateur CaO.
- Titrer avec Hcl 0,1 N jusqu'à ce que la couleur de la solution vire de vert en rose.
- Calculer le % de la CaO libre à partir du volume de titrage selon formule:

$$\text{CaO libre} = V_t \times \text{CST.}$$

- V_t = volume Hcl consommé au titrage.

Le tableau de calcul de la chaux libre à partir du Volume de Hcl consommé(voir Annexe B).

- Calcul de la chaux libre:

$$3.1 \times 0.28 = 0.87 \%$$

$$2.5 \times 0.28 = 0.70 \%$$

$$2.8 \times 0.28 = 0.78 \%$$

$$4.5 \times 0.28 = 1.26 \%$$

$$4.6 \times 0.28 = 1.29 \%$$

Le tableau III-16 présente les pourcentages de la chaux non combinée dans le clinker.

Tableau III-16: Résultats des essais de la chaux libre.

Jour.	Pourcentage de la CaO libre.
1 ^{er} jour	0.87
2 ^{ème} jour	0.70
3 ^{ème} jour	0.78
4 ^{ème} jour	1.26
5 ^{ème} jour	1.29

- Enregistrer les résultats sur le registre.
- Communiquer les résultats à la salle de contrôle.
 - Si CaO libre > 2.5 % => évacuation vers trémie des incuits.

III-4-4-2-Détermination de la chaux libre du ciment:(même mode opératoire du clinker).

III-5-Laboratoire d'essais physiques mécaniques:

III-5-1-Poids litre du clinker:

Les granules de clinker sont sélectionnées dans une tranche granulaire comprise entre 5 et 10 mm.

- Mettre le clinker dans un récipient avec une capacité de 01 litre.
- le haut du récipient est arasé avec une règle.
- Peser le récipient avec son contenu sur une balance électronique tarée et on obtient le poids au litre exprimé en gramme de clinker sur litre.

Les résultats du poids litre du clinker sont présentés par le tableau III-17.

Tableau III-17: Les résultats des essais du poids litre du clinker:

Temps.	PL.
1 ^{er} jour	1410
2 ^{ème} jour	1360
3 ^{ème} jour	1380
4 ^{ème} jour	1480
5 ^{ème} jour	1350

- Communiquer les résultats à la salle de contrôle.
- Faire l'analyse chaque heure et enregistrer les résultats sur le registre.
 - si $PL \leq 1000$ kk incuit.
 - si $PL \geq 1350$ KK surcuit.
 - si PL entre 1000 et 1100 KK mal cuit.
 - si PL entre 1100 et 1350 BON KK.

D'après le tableau, le PL est compris entre 1100 et 1350, ce qui montre la bonne qualité du clinker.

III-5-2-Essai mécanique de ciment :

Les résistances mécaniques des ciments sont déterminées par les essais sur mortier dit "normal", en flexion et en compression dans des éprouvettes 4 x 4 x 16 cm. Les éprouvettes sont rompues en traction par flexion puis en compression; les demi-prismes de l'éprouvette obtenus après rupture en flexion seront rompus en compression

La résistance du mortier est alors considérée comme significative de la résistance du ciment. Elle dépend de la classe de ciment et est exprimée en MPa. Le mortier utilisé est réalisé conformément à la norme, qui décrit le mode opératoire de cet essai en détaille.

Le sable utilisé est un sable appelé: "sable normalisé". [29]

Matériaux utilisés:

Balance électronique, Etuve, Sachet de sable normalisé, Eprouvettes (40×40×160) mm, Ciment.

Mode opératoire:

Pour la préparation des (03) éprouvettes (40×40×160) mm³:

- Peser 450 g de ciment.
- Remplir 225 ml d'eau.



Fig III-17: Remplissage d'eau.

On utilise un sachet de sable sec. Le sable normalisé (sable normalisé ISO) est un sable naturel, siliceux notamment dans ses fractions les plus fines. Il est propre; les grains sont de forme généralement isométrique et arrondi. Le sable sec est séché, criblé et préparé dans un atelier moderne offrant toutes garanties de qualité et de régularité.

Le sable est conditionné en sachets de polyéthylène contenant chacun $1\,350 \pm 5$ g. Les livraisons se font en cartons de 20 sachets pesant 27.5 kg et en palettes de 36 à 45 cartons d'une masse brute de 1 005 kg à 1 253 kg protégés par une housse en polyéthylène (transport routier) ou en carton renforcé (transport maritime).[23]

Malaxage:

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



Fig III-18: Malaxeur.

- 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.
- Reprendre le malaxage pendant deux minutes à une vitesse rapide.

Moulage des éprouvettes :

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



Fig III-19: Appareil à choc.

- Disposer le mortier sur une plaque non réactive au ciment.
- Former une galette approximativement rectangulaire partagée en trois (03) fractions sensiblement égales.
- Fixer le moule sur la table à choc et introduire dans chacun des compartiments une fraction de la galette, et mettre la machine en mouvement pour 60 chocs.
- 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.



Fig III-20: Surplus du mortier arasé.

- Enfin, identifier les éprouvettes sur le moule (ex : Z1, S1, S2, S3).
- Le moule rempli 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.



Fig III-21: Chambre humide

Démoulage des éprouvettes :

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



Fig III-22: Préparation des éprouvettes pour les essais.

III-5-2-1-Résistance à la flexion:

- Placer le prisme entre le plateau supérieur et le plateau inférieur.

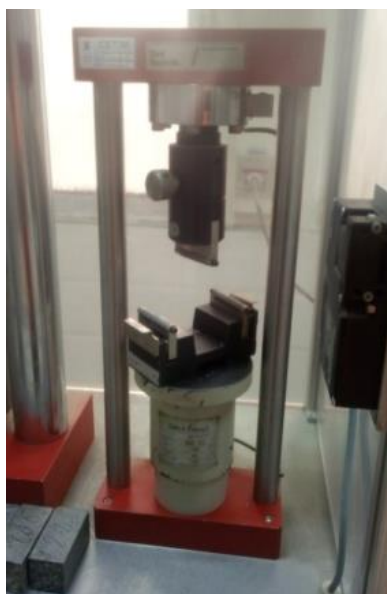


Fig III-23: Appareil d'essais de résistance à la flexion.

- 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.

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.

III-5-2-2-Résistance à la compression:

- 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 la rupture.



Fig III-24: Appareil d'essais de résistance à la compression.

- Enregistrer le résultat affiché sur pupitre d'affichage et 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'air des plateaux ou des plaques auxiliaires, en millimètre.

Les résultats des essais mécaniques réalisés sur les éprouvettes sont testés aux différents âges de durcissement (2, 7, 28 jours). Ils sont rapportés dans le tableau III-18 et présentés par le graphe 6.

Tableau III-18: Les résultats des essais mécaniques du ciment à l'âge de 2, 7 et 28 jours.

La résistance	Résistance à la flexion			Résistance à la compression		
	2j	7j	28j	2j	7j	28j
1 ^{er} jour	46.3	63.8	79.6	229	392	501
2 ^{ème} jour	44.7	59.6	73.6	212	357	483
3 ^{ème} jour	40.7	64.5	76.7	212	383	465
4 ^{ème} jour	39	60.6	74.8	200	365	461
5 ^{ème} jour	42.7	63.6	73.2	218	376	489

Graphe III-06: Les courbes des résultats des essais de résistance.

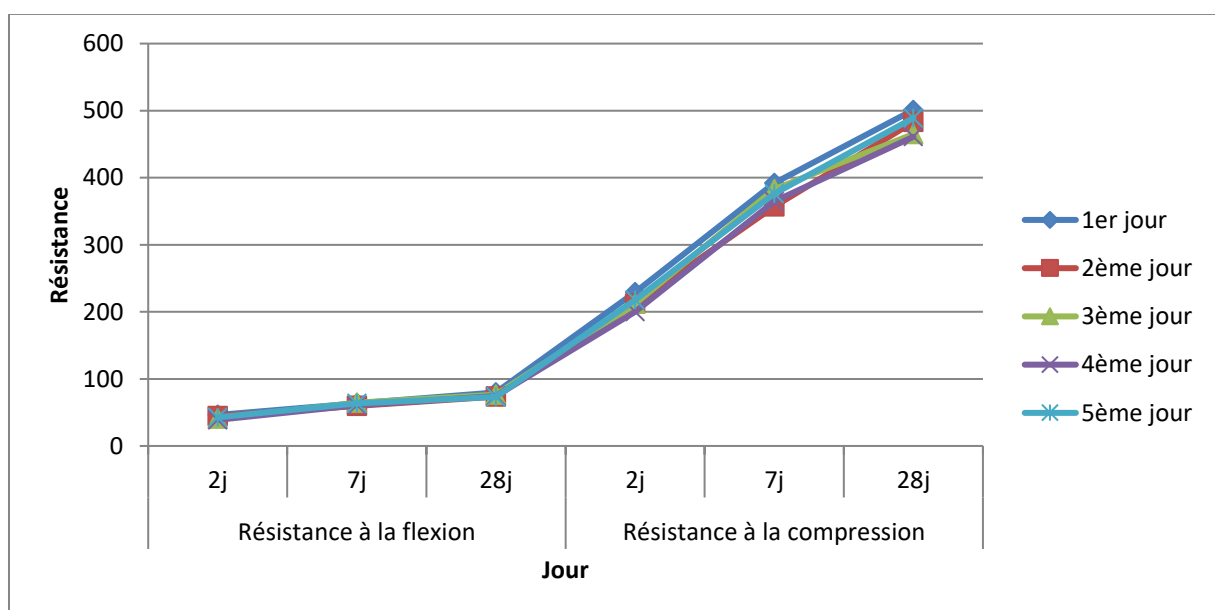


Tableau III-19:Exigences de la résistance à la compression

Classe de la résistance	Résistance à la compression MPa			
	Résistance à court terme		Résistance courante	
	2 jours	7jours	28 jours	
32,5 L	-	≥ 12.0	≥ 32.5	≥ 52.5
32,5 N	-	≥ 16.0		
32,5 R	≥ 10.0	-	≥ 42.5	≥ 62.5
42,5 L	-	≥ 16.0		
42,5 N	≥ 10.0	-		
42,5 R	≥ 20.0	-	≥ 52.5	-
52,5 L	≥ 10.0	-		
52,5 N	≥ 20.0	-		
52,5 R	≥ 30.0	-		

A partir des résultats de la résistance à la compression et à la flexion à 7jours et à 28jours du ciment CPJ et CRS, nous remarquons que la résistance mécanique augmente en fonction de l'âge du durcissement.

III-6-Conclusion

Ces analyses nous permettent de connaître les caractéristiques des constituants du ciment ainsi d'assurer une bonne qualité.

Le taux du CaO dans le ciment et le clinker est inférieur à celui du CaCO_3 de la farine, ceci est expliqué par la réaction de décarbonatation de la farine crue dans le four de cuisson.

L'augmentation du facteur de saturation en chaux indique une augmentation de chaux libre et ceci cause une difficulté de la cuisson du cru.

On signale qu'on ne peut pas tenir en compte la composition potentielle de BOGUE à l'état réel, c'est juste un calcul théorique et aujourd'hui avec la méthode de diffraction par RAYON X, on obtient des résultats plus précis.

On constate que les résistances augmentent sensiblement avec la finesse de mouture du liant.

The background is white and decorated with several black graduation caps (mortarboards) and gold streamers scattered across the page. The caps are positioned at various angles, and the streamers are in various shapes, some curled and some straight.

Conclusion

générale

Conclusion générale

Le procédé de fabrication du ciment est un processus industriel dans lequel de grandes quantités de matières premières sont transformées en produits commerciaux tels que le clinker qui est un produit semi-fini ou le ciment qui le produit fini.

Le processus de fabrication du ciment commence par l'excavation en carrière et se termine par l'obtention du produit fini.

La présence de la carrière du calcaire dans la cimenterie d'Elma Labiod est très importante, c'est le constituant principal du ciment.

La pré-homogénéisation des matières premières permet d'assurer une composition chimique régulière du mélange des matières premières.

Le broyage du cru consiste à préparer un cru homogène avec une bonne répartition granulométrique pour assurer les meilleures conditions de cuisson de la farine crue.

Le préchauffage est essentiellement pour but de préparer la farine du point de vue chimique et thermique.

Le broyeur du ciment a pour objectif de réduire la granulométrie du clinker en introduisant le gypse et les ajouts.

Le ciment est expédié soit en sac ou en vrac.

Des différentes analyses ont été effectuées dans le laboratoire de la cimenterie, pour la détermination des principaux constituants du ciment par , diffraction par rayon X, des analyses chimiques et des essais mécaniques en détaillant leurs mode opératoire, ainsi que l'application de la formule potentielle de BORGUE.

Les caractéristiques du ciment sont principalement :

- La composition chimique et minéralogique du ciment.
- La résistance mécanique.

Le ciment est suivi et contrôlé durant toutes les étapes de production à partir des résultats des analyses obtenus pour assurer la bonne qualité.

Références bibliographiques

Liste des références

- [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] Lycée Adolphe CHERIOUX. Matériaux: le ciment. Consulté le 12 Février, 2020, sur scenari: http://lycee-cherioux.fr/Mooc/materiau/liants/~gen/liants.publi/web/co/liants_6.html.
- [3] OUZID. S. (2017). Mesure des polluants atmosphériques générés par la société des ciments de Tébessa. Mémoire de master en chimie, Université de Tébessa.
- [4] MOUMENE. S. (2013). Ciment et cimenteries en Algérie: Production et normalisation. Mémoire master de 2 en génie civil, Université de Guelma.
- [5] GHOMARI. F. (2006). Science des matériaux de construction. Département de génie civil, Université Aboubaker Belkaid.
- [6] BENLARBIA. S, et LADJEL. Z. (2017). Essais de préparation des crus et clinkers par simulation à l'aide de l'ordinateur en utilisant le logiciel de gestion de la qualité du ciment dans le système carrière-usine. Mémoire de master 2 en Mines, Université de Béjaia.
- [7] BOUZENADA. S. et MEDFOUNI. K. (2016). Usine du ciment de SIGUS: Investigation géologique et géotechnique. Mémoire de master 2 en géologie, Université d'Oum El Bouaghi.
- [8] YAHIA. M. (2016). Contribution à la valorisation d'un déchet de cimenterie (ciment hydraté) pour l'élaboration d'un nouveau ciment. Mémoire de master 2 en génie civil, Université de M'Sila.
- [9] HADJ SADOK. A. (2011). Chapitre II: Le ciment Portland, Brochure.
- [10] Amprincipe Paris, Édition 2005, Collection technique CIMBETON, Brochure.
- [11] Mohamed. Y. (2016). Contribution à la valorisation d'un déchet de cimenterie (ciment hydraté) pour l'élaboration d'un nouveau ciment. Mémoire master 2 en génie civil.

Références bibliographiques

- [12] BAZZOUZI. M, et BENREGREG. M. (1998). Amélioration de la granulométrie au niveau du broyeur –Cimenterie d’Elma Labiod- Mémoire de fin d’étude, université de Tébessa.
- [13] Les ciments de Bizerte, Fabrication du ciment. Consulté le 17 février 2020.
- [14] ASSLAF. S, et ELMOUEDEN. S. (2015). La gestion des matières premières et technique de fabrication du ciment. Mémoire de licence en science technique, université Sidi Mohammed Ben Abdellah.
- [15] MANSOUTRE, S. (2019, Mai). Fabrication du ciment portland: le process. Consulté le 27 Février, 2020, sur infociments: <https://www.infociments.fr/ciments/fabrication-du-ciment-le-process>
- [16] CHRISTOPHE. C. (2008). L’industrie du ciment, école thématique «matériaux cimentaire»
- [17] Paul Manuel Godoy Hilario. 24 avril 2020. Production minière de ciment selon le pays dans le monde 2014-2019. Consulté la 13 Août 2020.
- [18] ZAÏT. M, et DJAMA. Y. (Décembre 2017). L’industrie du ciment, revue du ministère de l’industrie et des mines N°00.
- [19] ALGÉRIE PRESSE SERVICE. 08 janvier 2008. Ciment. Consulté le 13 août 2020.
- [20] SMIDTH. F. L. (1993). Parts & services division, brochure de la cimenterie d’Elma LABiod.
- [21] Société des ciments Tébessa (2020). Gisement de calcaire (El Ma Labiod), plan annuel d’exploitation.
- [22] Société des ciments Tébessa (2020). Gisement d’argile (El Ma Labiod), plan annuel d’exploitation.
- [23] Société des ciments Tébessa (2020). Gisement de sable (El Ma Labiod), plan annuel d’exploitation.
- [24] MBEGUE. S. (2006). Etude théorique des résultats comparatifs et in situ en vue de la maîtrise de la qualité. Projet de fin d’études en génie civil, université de CHEIKH ANTA DIOP DE DAKAR

Références bibliographiques

- [25] ABID. K. (2014). Etude AMDEC D'un Broyeur a Boulets Type Unidan. Mémoire de master 2 en science et technologie, université d'Annaba.
- [26] HELLAL W. et al. Fichier pris de laboratoire de la cimenterie d'Elma Labiod.
- [27] DJEBAILI. F, et ENNANY. M. (2017). Développement d'une méthodologie de la maintenance par la fiabilité d'un système électromécanique. Mémoire de master 2 en mines, université de Tébessa.
- [28] HAL HOUSSINE. C. (2016). Optimisation De l'énergie calorifique du four de la cuisson. Mémoire de fin d'étude en science et technique, université de Sidi Mohammed Ben Abdallah.

Les figures: Des prises personnelles.

Les modes opératoires: Des fichiers pris de laboratoire de la cimenterie d'Elma Labiod

Annexes A:**Tableau A-01:** Composition chimique du clinker

Elément	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	Cl	PAF	CaOL
1 ^{er} jour	20.93	5.47	3.54	65.37	1.05	0.63	0.052	0.24	0.001	0.50	0.95
2 ^{ème} jour	20.67	5.27	3.76	65.06	1.03	0.60	0.032	0.38	0.004	0.50	0.88
3 ^{ème} jour	20.63	5.42	3.55	63.59	1.01	0.64	0.19	0.39	0.004	0.6	1.32
4 ^{ème} jour	21.11	5.03	4.26	65.83	1.00	0.53	0.025	0.11	0.004	0.40	0.66
5 ^{ème} jour	20.64	5.42	3.55	63.59	1.01	0.64	0.19	0.39	0.004	0.6	1.32

Tableau A-02: Composition minéralogique du clinker

Elément	C3S	C2S	C3A	C4AF
1 ^{er} jour	59.63	15.04	8.51	10.76
2 ^{ème} jour	61.24	13.09	7.60	11.45
3 ^{ème} jour	52.62	19.48	8.35	10.82
4 ^{ème} jour	63.62	12.54	6.14	12.95
5 ^{ème} jour	52.62	19.48	8.35	10.82

Annexe B:**Tableau B-01: Volume de HCl.**

V Hcl	0.28	CaO libre	V Hcl	0.28	CaO libre	V Hcl	0.28	CaO libre
0.5	0.28	0.14	4.0	0.28	1.12	7.5	0.28	2.1
0.6	0.28	0.17	4.1	0.28	1.15	7.6	0.28	2.13
0.7	0.28	0.20	4.2	0.28	1.18	7.7	0.28	2.16
0.8	0.28	0.22	4.3	0.28	1.20	7.8	0.28	2.18
0.9	0.28	0.25	4.4	0.28	1.23	7.9	0.28	2.21
1.0	0.28	0.28	4.5	0.28	1.26	8.0	0.28	2.24
1.1	0.28	0.31	4.6	0.28	1.29	8.1	0.28	2.27
1.2	0.28	0.34	4.7	0.28	1.32	8.2	0.28	2.30
1.3	0.28	0.36	4.8	0.28	1.34	8.3	0.28	2.32
1.4	0.28	0.39	4.9	0.28	1.37	8.4	0.28	2.35
1.5	0.28	0.42	5.0	0.28	1.40	8.5	0.28	2.38
1.6	0.28	0.45	5.1	0.28	1.43	8.6	0.28	2.41
1.7	0.28	0.48	5.2	0.28	1.46	8.7	0.28	2.44
1.8	0.28	0.50	5.3	0.28	1.48	8.8	0.28	2.46
1.9	0.28	0.53	5.4	0.28	1.51	8.9	0.28	2.49
2.0	0.28	0.56	5.5	0.28	1.54	9.0	0.28	2.52
2.1	0.28	0.59	5.6	0.28	1.57	9.1	0.28	2.55
2.2	0.28	0.62	5.7	0.28	1.60	9.2	0.28	2.58
2.3	0.28	0.64	5.8	0.28	1.62	9.3	0.28	2.60
2.4	0.28	0.67	5.9	0.28	1.65	9.4	0.28	2.63
2.5	0.28	0.7	6.0	0.28	1.68	9.5	0.28	2.66
2.6	0.28	0.73	6.1	0.28	1.71	9.6	0.28	2.69
2.7	0.28	0.76	6.2	0.28	1.74	9.7	0.28	2.72
2.8	0.28	0.78	6.3	0.28	1.76	9.8	0.28	2.74
2.9	0.28	0.81	6.4	0.28	1.79	9.9	0.28	2.77
3.0	0.28	0.84	6.5	0.28	1.82	10.0	0.28	2.80
3.1	0.28	0.87	6.6	0.28	1.85	10.1	0.28	2.83
3.2	0.28	0.9	6.7	0.28	1.88	10.2	0.28	2.86

3.3	0.28	0.92	6.8	0.28	1.90	10.3	0.28	2.88
3.4	0.28	0.95	6.9	0.28	1.93	10.4	0.28	2.91
3.5	0.28	0.98	7.0	0.28	1.96	10.5	0.28	2.94
3.6	0.28	1.01	7.1	0.28	1.99	10.6	0.28	2.97
3.7	0.28	1.04	7.2	0.28	2.02	10.7	0.28	3.00
3.8	0.28	1.06	7.3	0.28	2.04	10.8	0.28	3.02
3.9	0.28	1.09	7.4	0.28	2.07	10.9	0.28	3.05