



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 géotechnologie



MEMOIRE

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

Filière : Génie minier

Option : Valorisation des ressources minérales

Caractérisation et valorisation des clinkers incuits

Présenté et soutenu par

Takoua MOUSSA

Devant le jury:

		Grade	Etablissement
Président :	Mohamed LARABA	MAA	Université Larbi Tebessi - Tébessa
Encadrant :	Zied BENGHAZI	MCB	Université Larbi Tebessi - Tébessa
Co-encadrant :	Mansour KRIM	MAA	Université Larbi Tebessi - Tébessa
Examineur :	Hamza BENZIAT	MAA	Université Larbi Tebessi - Tébessa
Examineur :	Mourad Salim AOUATI	MAA	Université Larbi Tebessi - Tébessa

Promotion 2021-2022



Dédicace



Je dédie ce modeste travail à mes plus chers êtres au monde :

A mes chers parents : ma mère **Salma BAIZIDE ; et mon père **Elmizouni** pour leur amour, leur tendresse, et pour leur soutien durant toutes les étapes de ma vie. J'espère qu'un jour, je pourrai leur rendre un peu de ce qu'ils ont fait pour moi, que**

Dieu leur prête tout le bonheur.

A ma sœur d'amour **Safia HARRACHE ; mes chères frères **Taki Eddine et Dhia Eddine** et mes belles sœurs **Hanine et Dina**, pour leurs encouragements et pour leur soutien moral et physique.**

A quelqu'un qui a une place spéciale dans mon cœur

M.M

A tous ceux qui ont enseigné moi au long de ma vie scolaire. Pour tout leur amour leur soutien, leur encouragement, leur assistance et leur présence dans ma vie.

A toutes mes chères ami (e)s

Merci de votre présence, soutien et de m'avoir encouragée à aller plus loin.

A tous les autres que je n'ai pas cités mais à qui je pense aussi.

A toute ma famille.





Remerciement

*Tous d'abord je tiens à remercier le bon **Dieu** tout puissant et miséricordieux de m'avoir donné la force et le courage de mener à bien ce modeste travail.*

*J'exprime mes profondes gratitude et respectueuses reconnaissances à mon encadrant Dr. **Zied BENGHAZI** pour son encadrement, conseils et sacrifices afin de donner le meilleur et pour son suivi durant la période de préparation de mon mémoire de fin d'étude.*

*Je suis fière et reconnaissante au professeur **Mansour KRIM** qui est le père spirituel de l'institut des mines.*

*Mes remerciements vont aux membres du jury, Messieurs **Mohamed LARABA, Hamza BENZIAT** et **Mourad Salim AOUATI** qui m'ont fait l'honneur d'accepter de juger mon travail.*

J'adresse mes sincères remerciements à tous les professeurs qui par leurs conseils et leurs efforts durant tous les années passées je suis là.

Vraiment un grand remerciement pour leur qualité d'enseignement qui nous a été dispensé.

*Je n'oublie pas tous ceux qui m'ont aidé pendant les jours de traque avec leurs rires et m'ont soulagé des épreuves, les ingénieurs et chimistes de la société des cimenteries d'El-Ma Labiod Tébessa et du laboratoire de **CETIM Boumerdes**.*



Résumé

Le ciment est une ressource de construction essentielle, souvent utilisée dans la plupart des régions du monde, et pour un processus de production efficace, des normes nationales et internationales strictes doivent être respectées.

Là où de nombreuses études se sont préoccupées d'améliorer et d'augmenter la rentabilité de la production en termes de qualité et de quantité, comme indiqué dans cette recherche. L'utilisation des résidus et déchets de ciment fait aujourd'hui partie des développements récents dans le monde de la production de ciment qui travaillent à éliminer les problèmes environnementaux avec un profit économique souhaité, en plus d'une diminution de la consommation de clinker.

La distinction opérée par les propriétés physiques et chimiques du ciment préparé avec des additifs (composition chimique, masse volumique, insoluble, la chaux libre, ...etc.) ainsi que les propriétés mécaniques (flexion et compression) qui ont été sillonnées dans cette étude.

A travers les résultats expérimentaux obtenus, nous avons pu valoriser les clinkers incuits et mal cuits et en faire une source rentable pour l'industrie des ciments et de préservation de l'environnement, car ce dernier est une ressource dans laquelle toutes les conditions et caractéristiques sont réunies pour son exploitation dans des proportions significatives.

Mots clés

Ciment, Sous-produits industriels, Clinker incuit, Clinker mal cuit, Caractérisation, Valorisation.

Abstract

Cement is an essential construction resource worldwide. Therefore, strict national and international standards must be met for an efficient manufacturing process.

Several studies have concerned themselves with improving and increasing the profitability of production in terms of quality and quantity, as shown in this research.

The use of cement residues and waste is nowadays among the recent advances in cement manufacturing that work to eliminate environmental problems with a desired economic profit, in addition to a decrease in clinker consumption.

The distinction was made by the physical and chemical properties of cement prepared with in fired and underfired clinker as additives: chemical composition, density, insoluble, free lime, etc. As well as the mechanical properties: (bending and compressive strength) have been explored in this study.

Through the experimental results obtained, we were able to valorise unfired and underfired clinkers and make them a good source for the cement industry and the preservation of the environment, because the latter is a resource in which all the conditions and characteristics are gathered for its exploitation in significant proportions.

Keywords

Cement, Industrial by-products, Unfired clinker, Underfired clinker, Characterization, Valorisation.

الملخص

يعتبر الاسمنت موردا اساسيا للبناء عبر العالم. ولتحقيق عملية انتاج ناجعة يجب ان تلبى المعايير الوطنية والدولية الصارمة.

حيث اهتمت العديد من الدراسات بتحسين ورفع مردودية الانتاج من حيث النوعية والكمية كما جاء في بحثنا هذا.

إن استعمال بقايا ومخلفات الاسمنت حاليا هي جزء من التطورات الأخيرة في عالم انتاج الاسمنت التي تعمل على التخلص من المشاكل البيئية بربح اقتصادي منشود، اضافة إلى خفض استهلاك مادة الكلنكر.

إن التميز الذي أحرزناه تم عن طريق دراسة الخصائص الفيزيائية والكيميائية للإسمنت المحضر بالمواد المضافة (التركيب الكيميائي، الكتلة الحجمية، التحلل في الماء، الكلس الحر، ...إلخ) وكذلك المميزات الميكانيكية (مقاومة الانحناء والضغط) التي تم تحديدها في هذا البحث

من خلال النتائج التجريبية المتحصل عليها تمكننا من تثمين الكلنكر النقي وغير مكتمل الطهي وجعلهما موردا جيدا لصناعة الإسمنت والمحافظة على البيئة لكون هذا الاخير موردا يحقق كل الشروط والخصائص الملائمة لاستغلاله بنسب معتبرة.

كلمات مفتاحية

الاسمنت، الكلنكر النقي، الكلنكر غير مكتمل الطهي، تحديد الخصائص، التثمين.

Table des matières

Liste des abréviations

Liste des symboles

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale

Partie 1 Synthèse bibliographique

Chapitre I Processus de fabrication des ciments

I.1. Introduction.....	4
I.2. Historique du ciment.....	4
I.3. Définition d'un ciment.....	4
I.4. Constituants de base du ciment.....	5
I.4.1. Matières premières.....	5
I.4.1.1. Calcaires.....	6
I.4.1.2. Argiles.....	6
I.4.1.3. Eléments argileux calcaires.....	6
I.4.2. Matériaux de correction.....	7
I.4.2.1. Minerai de fer (Fe_2O_3).....	7
I.4.2.2. Le gypse.....	7
I.4.2.3. La bauxite.....	7
I.4.3. Les matières secondaires (Ajouts).....	7
I.4.3.1. La pouzzolane naturelle.....	7
I.4.3.2. Le laitier de haut fourneau (L).....	8
I.4.3.3. Les cendres volantes siliceuses (V) ou calciques (W).....	8
I.4.3.4. Les Calcaires.....	8
I.4.3.5. Les schistes calcinés (T).....	9
I.4.3.6. Les sulfates de calcium.....	9
I.4.3.7. Les fumées de silice (D).....	9
I.4.4. Produit semi-fini: Le clinker.....	9
I.4.4.1. Composition chimique du clinker.....	10
I.4.4.2. Composition minéralogique du clinker.....	12
I.4.4.3. Les additifs.....	14
I.5. Processus de fabrication du ciment.....	15

I.5.1. Extraction.....	16
I.5.2. Concassage.....	17
I.5.3. Préparation du cru.....	17
I.5.3.1. Procédé par voie sèche.....	17
I.5.3.2. La voie humide.....	17
I.5.3.3. La voie semi- sèche.....	17
I.5.3.4. La voie semi- humide.....	18
I.5.4. La pré-homogénéisation.....	19
I.5.5. Broyage-séchage.....	20
I.5.6. -L'homogénéisation.....	21
I.5.7. Cuisson.....	21
I.5.8. Refroidissement.....	22
I.5.9. Le broyage du clinker.....	23
I.5.10. Stockages et expédition.....	23
I.6. Classification des ciments.....	24
I.6.1. Classification des ciments en fonction de leur composition.....	24
I.6.2. Classification des ciments en fonction de leur résistance normale.....	24
I.6.3. Différent type de ciments courants.....	26
I.6.4. Production du ciment dans le monde.....	27
I.7. Propriétés physiques.....	27
I.7.1. Délais de prise.....	27
I.7.2. Durcissement.....	28
I.7.3. Fausse prise.....	28
I.7.4. Hydratation.....	28
I.7.5. Finesse de mouture.....	28
I.7.6. Retrait.....	29
I.7.7. Expansion.....	29
I.7.8. Gonflement.....	29
I.7.9. Le besoin d'eau.....	29
I.7.10 La durée de conservation.....	30
I.8. Les propriétés mécaniques.....	30
I.9. Conclusion.....	30

Chapitre II Présentation Du cas d'études

II.1. Introduction.....	32
II.2. Présentation de l'entreprise.....	32

II.2.1. Généralités	32
II.2.2. La présentation de la région d'étude.....	32
II.2.2.1. La Plaine D'el Ma El Abiod.....	32
II.2.3. Normalisation de l'entreprise.....	35
II.2.4. Matières Premières utilisées pour la fabrication du ciment.....	35
II.2.5. Extraction des matières premières.....	37
II.2.5.1. Extraction du calcaire.....	37
II.2.5.2. Extraction de l'argile.....	38
II.2.5.3. Extraction du sable.....	39
II.2.5.4. Matières achetées.....	40
II.2.6. Concassage.....	42
II.2.6.1. Types de concasseurs utilisés.....	42
II.2.7. Préparation du cru.....	48
II.2.8. Broyage du cru.....	49
II.2.9. Homogénéisation.....	50
II.2.10. Zone de cuisson.....	52
II.2.10.1. Préchauffer ou cyclones.....	52
II.2.10.2. Alimentation du four.....	53
II.2.10.3. Four rotatif.....	54
II.2.10.4. Refroidisseur.....	55
II.2.10.5. Transport et Stockage du clinker.....	55
II.2.10.6. Alimentation du broyage du clinker.....	56
II.2.10.7. Broyage du clinker.....	57
II.2.10.8. Stockage du ciment.....	57
II.2.10.9. Expédition du ciment.....	58
II.3. Problème du clinker incuit.....	60
II.4. Conclusion.....	60

Partie 2 : Etude expérimentale

Chapitre III Matériaux et méthodes

III.1. Introduction.....	62
III.2. Matériaux utilisés.....	62
III.2.1. Le clinker.....	62
III.2.2. Gypse.....	63
III.2.3. Sable normalisé.....	64
III.2.4. Eau de gâchage.....	66
III.3. Méthodes expérimentales.....	67
III.3.1. Programme du travail expérimental.....	67

III.3.2. Préparation des échantillons (Concassage Et Broyage).....	68
III.3.3. Analyse physique.....	69
III.3.3.1. Masses volumiques du clinker.....	69
III.3.3.1.1. Masse volumique apparente.....	69
III.3.3.1.2. Masse volumique absolue.....	71
III.3.3.2. Mesure de la surface spécifique de Blain (SSB).....	73
III.3.4. Analyse chimique.....	76
III.3.4.1. Contrôle de la pouzzolanité (Essai d'activité minérale).....	76
III.3.4.2. Analyse par diffraction des rayons X (DRX).....	79
III.3.4.3. Observation du ciment au microscope optique polarisant.....	81
III.3.4.4. Analyse chimique par fluorescence X.....	85
III.3.4.5. Détermination de la perte au feu « EN 196-2 ».....	87
III.3.4.5. La chaux libre des échantillons de clinker.....	89
III.3.4.6. Détermination de Le résidu insoluble du clinker.....	90
III.3.5. Préparation des échantillons du ciment.....	91
III.4. Essais physiques et mécaniques.....	92
III.4.1. Essai sur pâtes cimentaires « EN 196-3»	92
III.4.1.1. Préparation de la pâte normale.....	92
III.4.1.2. Expansion à chaud (stabilité de la pate).....	93
III.4.1.3. La consistance normale.....	96
III.4.1.4. Temps de prises.....	97
III.4.2. Essais sur mortiers (Norme EN 196-1).....	98
III.4.2.1. Préparation des éprouvettes.....	98
III.4.2.2. Essai de résistance mécanique.....	103
III.4.2.2.1. Résistance à traction par flexion.....	104
III.4.2.2.2. Résistance à la compression	106
Conclusion.....	109

Chapitre IV Résultats et discussions

IV.1. Introduction.....	111
IV.2. Analyse physique.....	111
IV.2.1. Masse volumique apparente du clinker.....	111
IV.2.2. Masse volumique absolue du clinker.....	111
IV.2.3. La surface spécifique de Blain (SSB) du clinker broyé.....	112
IV.3. Analyse chimique.....	113
IV.3.1. Activité minérale du KK incuit et mal cuit.....	113
IV.3.2. Analyse minéralogique par diffraction des rayons X (DRX).....	114
IV.3.4. Observation du ciment au microscope optique.....	117

IV.3.5. La composition chimique du clinker (XRF) et la perte au feu (PAF) du clinker..	118
IV.3.6. La chaux libre des échantillons de clinker.....	120
IV.3.7. Résidu insoluble du clinker.....	121
IV.4. Analyse des propriétés physiques des mélanges préparés.....	121
IV.4.1. Masse volumique absolue du clinker du ciment préparé.....	121
IV.4.2. Mesure de la surface spécifique de Blain (SSB) des ciments préparés.....	122
IV.5. Analyse chimique des mélanges préparés.....	124
IV.5.1. Résultats des analyses minéralogiques par diffraction des rayons X (DRX).....	124
IV.5.2. Composition chimique du clinker (XRF) et La perte au feu (PAF) du clinker....	127
IV.5.3. La chaux libre des échantillons de clinker.....	127
IV.5.4. Résidu insoluble des échantillons du ciment préparé.....	129
IV.6. Essais sur pâtes cimentaires.....	130
IV.7. Essai de résistance mécanique.....	132
IV.7.1. Résultats des résistances à la traction par flexion.....	132
IV.7.2. Résistances à la compression.....	133
IV.8. Conclusion.....	134
Conclusion et perspectives	
Références Bibliographique	

Liste des Abréviations

A : Alumine.

Al₂O₃ : l'alumine

B : Le côté de la section carrée du prisme.

C : CaO

C₂S : Silicate bi-calcique ou (bélite), sa formule chimique est 2CaO, SiO₂.

C₃A : Aluminates tricalciques ou (célite), sa formule chimique est 3CaO, Al₂O₃.

C₃S : Silicate tricalcique dénommé (alite), sa formule chimique est 3CaO, SiO₂

C₄A_F : (Aluminoferritetétracalcique) Ferro-aluminates tétra-calcique, de formule chimique 4CaO, Al₂O₃, Fe₂O₃

CaCO₃ : Carbonate de calcium

CaO : Chaux

CEM : Normes de compatibilité électromagnétique

CEM II : Dénomination normalisé d'un ciment portland avec ajout.

CHF : Ciments de haut fourneau

Cl : Chlorure

CO₂ : Dioxyde de Carbone

CPJ : Ciment portland avec ajouts

CPZ : Ciment pouzzolanique

CRS : Ciment résistant aux sulfates

E1 : Echantillon-01

E2 : Echantillon-02

E3 : Echantillon-03

E/C : Le rapport (eau/ ciment).

ETM : Échantillon témoin

EDTA : L'acide éthylène diamine tétra acétique.

EN : Européenne norme.

F : Fer.

F.C: Farine crue

F_c : La charge maximale à la rupture.

Fe₂O₃ : Oxyde ferrique

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

GICA : Groupe Industriel du Ciment en Algérie

Hcl : Acide chlorhydrique.

HT : Calcaire haut titre.

ISO : Organisation internationale de normalisation

K2O : Oxyde de potassium

KK : Clinker

L : La distance entre les appuis.

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

M.A.F: Module aluminoferrique.

MV app : massa volumique apparente

Mf : Masse finale (produit calciné).

MgO : L'oxyde de magnésium

Mi : Masse initiale (prise d'essai).

Mn2O3 : L'oxyde de manganèse (III)

M.S: Module silicique de Köhl.

Na2O : L'oxyde de sodium

NaOH : L'hydroxyde de sodium.

NEDTA : 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 conçu 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.

SSB : Surface spécifique Blaine.

SCT : Société du ciment de Tébessa

SD : Calcaire sous-dosé.

SiO₂ : Silice

SOMIFER : Société des Mines de Fer d'Algérie

SO₃ : Le trioxyde de soufre

T.E.A: Tri éthanolamine.

TiO₂ : Le dioxyde de titane

Liste des Symboles

an : année

cm : centimètre

cm³ : centimètre cube

cst : constant

g: gramme

h : heure

J: joule

Kg: kilogramme

Km:kilomètre

Kv: kilovolt

KW : kilowatt

L : litre

m : mètre

m² : mètre carré

m³ : mètre cube

min: minute.

ml : millilitre

mm : millimètre

MPa : micropascal

N : newton

N : quantité de la matière.

S : seconde

t : tonne

V : volt

°C : degré Celsius

% : pourcentage

μ : micro-mètre

Liste des figures

Figure I.1. Constituants du clinker.....	10
Figure I.2. Composition chimique du clinker.....	10
Figure I.3. Les minéraux observables au microscope optique d'un grain de clinker.....	12
Figure I.4. Fabrication du ciment.....	15
Figure I.5. Extraction des matières premières.....	16
Figure I.6. Le concassage.....	16
Figure I.7. Procédés de fabrication du ciment.....	19
Figure I.8. La pré-homogénéisation.....	19
Figure I.9. Broyage – séchage.....	20
Figure I.10. Silo de stockage et homogénéisation.....	20
Figure I.11. Four rotatif.....	21
Figure I.12. Refroidissement.....	22
Figure I.13. Broyeur.....	22
Figure I.14. Stockage et expédition du ciment.....	23
Figure II.1. Situation géographique de la plaine de El Ma Labiod.....	33
Figure II.2. Inventaires des puits dans la plaine.....	34
Figure II.3. Schéma de fabrication du ciment.....	36
Figure II.4. Carrière du calcaire – cimenterie d'El Ma Labiod - Tébessa.....	37
Figure II.5. Carrière d'argile, cimenterie d'El Ma Labiod – Tébessa.....	39
Figure II.6. Carrière de sable, cimenterie d'El Ma Labiod – Tébessa.....	40
Figure II.7. Stock de minerai de fer, cimenterie d'El Ma Labiod – Tébessa.....	41
Figure II.8. Stock de laitier + Pouzzolane, cimenterie d'El Ma Labiod – Tébessa.....	41
Figure II.9. Concasseur EV.....	43
Figure II.10. Processus de concassage et transport du calcaire vers le hall associé.....	44
Figure II.11. Concasseur à cylindre E.....	45
Figure II.12. Processus de concassage et transports d'argile vers le hall associé.....	46
Figure II.13. Concasseur à marteau à double rotor.....	47
Figure II.14. Le processus de concassage et transports des ajouts vers le hall associé.....	47
Figure II.15. Les trémies de dosage, cimenterie d'Elma Labiod – Tébessa.....	48
Figure II.16. Le processus d'alimentation broyeur cru.....	49
Figure II.17. Broyeur Tirax Unidan, cimenterie d'El Ma Labiod – Tébessa.....	50

Figure II.18. Processus de broyeur cru.....	50
Figure II.19. Les silos d'homogénéisation, cimenterie d'El Ma Labiod – Tébessa.....	51
Figure II.20. Processus d'homogénéisation.....	51
Figure II.21. Le préchauffage.....	52
Figure II.22. Alimentation four.....	53
Figure II.23. Four moderne à quatre étages de cyclones.....	53
Figure II.24. Four rotatif, cimenterie d'El Ma Labiod – Tébessa.....	54
Figure II.25. Clinkérisation (le four).....	54
Figure II.26. Silos de stockage du clinker.....	55
Figure II.27. Trémie de dosage (clinker, gypse et ajouts).....	56
Figure II.28. L'alimentation du broyeur ciment.....	56
Figure II.29. Silos de stockage ciment, cimenterie d'El Ma Labiod – Tébessa.....	58
Figure II.30. L'ensacheuse.....	58
Figure II.31. Stockage du clinker incuit et mal cuit à l'air libre, cimenterie d'El Ma Labiod – Tébessa.....	59
Figure III.1. Echantillon prélevé du bon Clinker.....	62
Figure III.2. Echantillon prélevé de Clinker incuit et mal cuit.....	63
Figure III.3. Echantillon prélevé de gypse.....	64
Figure III.4. Sable normalisé conformément à la norme EN 196-1.....	65
Figure III.5. Concasseur retsch BB 100 mangan.....	68
Figure III.6. Broyeur spécial pour échantillons d'analyse.....	69
Figure III.7. Dispositif pour mesure de la masse volumique apparente : (a) Entonnoir monté sur trépied ; (b) Récipient calibré.....	70
Figure III.8. Étapes de mesure de la masse volumique apparente.....	70
Figure III.9. Mesurer de la masse volumique apparente.....	71
Figure III.10. Étapes de travail pour la mesure de la masse volumique absolue.....	72
Figure III.11. Appareil Blaine.....	73
Figure III.11. Principe de fonctionnement de l'appareil Blaine.....	74
Figure III.12. Étapes de travail pour la détermination de la surface spécifique de Blain (SSB).....	75
Figure III.13. Étapes du Préparation de la pastille des échantillons.....	80
Figure III.14. Diffractométrie des rayons X.....	81
Figure III.14. Microscope ZEISS AXIOSKOP.40.....	82
Figure III.15. Étape opératoire pour vérification de Refus sur tamis.....	83

Figure III.16. Étape opératoire pour ajout d'un liquide pour solidifier l'échantillon.....	84
Figure III.17. Vue au microscope.....	84
Figure III.18. Etuve de laboratoire.....	85
Figure III.19. Dispositif de préparation de la perle.....	86
Figure III.20. Appareille à fluorescence X.....	86
Figure III.21. Étape de préparation de la perle.....	86
Figure III.22. Étape Analyse par fluorescence X.....	87
Figure III.23. Étape opératoire Détermination de la perte au feu.....	88
Figure III.24. Étape La chaux libre des échantillons utilise.....	90
Figure III.25. Étape La Détermination de Le résidu insoluble du clinker.....	91
Figure III.26. Essai de stabilité avec l'appareil Le Chatelier.....	94
Figure III.27. Les aiguillé de le chatelier.....	95
Figure III.28. Appareil de Vicatmuni de la sonde de consistance.....	97
Figure III.29. Appareil de Vicat automatique.....	98
Figure III.30. Malaxeur normalisé.....	100
Figure III.31. Moule à 3 compartiments pourmortier 4 x 4 x 16 cm.....	101
Figure III.32. Table à chocs pour Prisme de Moule.....	101
Figure III.33. Une enceinte humide à la température de 20 °C.....	102
Figure III.34. Démoulage des éprouvettes.....	102
Figure III.35. Conservation des éprouvettes dans l'eau.....	103
Figure III.36. Préparation des éprouvettes pour les essais.....	104
Figure III.37. Principe de la flexion sur prisme de mortier.....	105
Figure III.38. Essai de flexion.....	106
Figure III.39. Essai de compression.....	108
Figure IV.2. La Masse volumique absolue des échantillons.....	112
Figure IV.3. Résultats des analyses minéralogiques par DRX : échantillon N°1 (KK cuit).114	
Figure IV.4. Résultats des analyses minéralogiques par DRX : échantillon N°2 (KK cuit).114	
Figure IV.5. Résultats des analyses minéralogiques par DRX : échantillon N°3 (KK cuit).115	
Figure IV.6. Résultats des analyses minéralogiques par DRX : échantillon (KK mal cuit).115	
Figure IV.7. Résultats des analyses minéralogiques par DRX : échantillon (KK incuit)....116	
Figure IV.8. Résultats des analyses minéralogiques par DRX : échantillon (gypse).....116	
Figure IV. 9. Observation des différents constituants du KK mal cuit par microscope optique.....117	
Figure IV.10. Cercles relativistes de la composition chimique des matériaux utilisés et de la	

perte au feu (PAF).....	120
Figure IV.11. La Masse volumique absolue des échantillons du ciment préparé.....	122
Figure IV.11. La surface spécifique de Blain (SSB) des échantillons du ciment préparé....	123
Figure IV.12. Résultats des analyses minéralogiques par DRX : échantillon (KK témoin)..	124
Figure IV.13. Résultats des analyses minéralogiques par DRX : échantillon (KK 5% INCUIT).....	124
Figure IV.14. Résultats des analyses minéralogiques par DRX : échantillon (KK 10% INCUIT).....	125
Figure IV.15. Résultats des analyses minéralogiques par DRX : c) Diffractogramme échantillon (KK 20% INCUIT).....	125
Figure IV.16. Résultats des analyses minéralogiques par DRX : échantillon (KK 5% MAL CUIT).....	126
Figure IV.17. Résultats des analyses minéralogiques par DRX : échantillon (KK 10% MAL CUIT).....	126
Figure IV.18. Résultats des analyses minéralogiques par DRX : échantillon (KK 20% MAL CUIT).....	127
Figure IV.19. La chaux libre des échantillons de ciment préparés.....	129
Figure IV.20. Le résidu insoluble des échantillons de ciment préparés.....	129
Figure IV.21. La consistance normale.....	130
Figure IV.22. Temps de début de prise et de fin déprise.....	131
Figure IV.23. L'expansion à Chaud des pâtes cimentaires.....	131
Figure IV.24. Résistance à la flexion des ciments préparés.....	132
Figure IV.25. Résistance à la compression des ciments préparés.....	133

Liste des tableaux

Tableau I.1. Les minéraux observables au microscope optique d'un grain de clinker.....	14
Tableau I.2. Composition minéralogique du clinker.....	14
Tableau I.3. Procédés de fabrication du ciment.....	18
Tableau I.4. Désignation des différents types de ciment en fonction de leur composition...25	
Tableau I.5. Spécification et valeurs garanties en fonction de la classe.....	26
Tableau I.6. Principaux pays producteurs de ciment dans le monde du 2014 au 2021(en millions de tonnes) [19].....	27
Tableau II.1. Les concasseurs de matières premières.....	42
Tableau III.1. Composition chimique du sable normalisé.....	65
Tableau III.2. Compositions granulométrique du sable normalisé.....	66
Tableau III.3. Propriétés physiques et chimiques du sable utilisé.....	66
Tableau III.4. Classification des additifs selon l'activité pouzzolaniques.....	79
Tableau III.5. Composition des différents mélanges étudiés.....	92
Tableau IV.1. Résultats de la Masse volumique apparente des échantillons.....	111
Tableau IV.2. Résultats de la Masse volumique absolue des échantillons.....	111
Tableau IV.3. Résultats de La surface spécifique de Blain (SSB).....	112
Tableau IV.4. Résultats Essai d'activité minérale.....	113
Tableau IV.5. Granulomètre du clinker mal cuit utilisé.....	118
Tableau IV.6. Teneur du clinker mal cuit utilisé.....	118
Tableau IV.7. Résultats de la composition chimique des matériaux utilisés et la perte au feu (PAF).....	119
Tableau IV.8. Valeurs de la chaux libre.....	121
Tableau IV.9. Valeurs du résidu insoluble (RI).....	121
Tableau IV.10. Masse volumique absolue des échantillons du ciment préparé.....	122
Tableau IV.11. Surface spécifique de Blain (SSB) des échantillons du ciment préparé.....	123
Tableau IV.12. Résultats de la composition chimique des échantillons du ciment préparé et la perte au feu (PAF).....	128
Tableau IV.12. Résultats de La chaux libre des échantillons du ciment préparé.....	128
Tableau IV.14. Résultats des essais sur pates cimentaires à l'état frais.....	130
Tableau IV.15. Résistance à la traction par flexion des ciments préparés.....	132
Tableau IV.16. Résistance à la compression du ciment préparé.....	133

Introduction générale



Introduction générale

L'industrie du ciment en Algérie est considérée comme l'une des industries modernes les plus importantes et les plus développées et avancées, car elle a toutes les exigences de succès en termes de disponibilité des matières premières, d'expertise technique et technique et de marchés fixes localement et internationalement. Elle était censée développer cette industrie, et la planification de cette industrie est particulièrement nécessaire et le ciment est l'un des principaux matériaux les plus importants dont la disponibilité affecte grandement la réalisation des projets urbains et économiques.

L'application de la politique de contrôle de qualité pour obtenir un produit certifié, exige le rejet des produits non conforme aux exigences techniques. Ce rejet a des conséquences négatives sur la production de cimenteries et sur le côté environnemental.

Le rejet principal de l'industrie cimentaire lors du contrôle de qualité est le clinker lorsqu'il est incuit ou mal cuit.

La question qui se pose est : peut-on bénéficier du mauvais clinker pour le réintégrer dans la chaîne de production du ciment ?

Pour répondre à cette question, il faut d'abord caractériser le mauvais clinker (incuit et mal cuit), notamment du point de vue de son activité minérale. Puis étudier la possibilité de l'utiliser en tant qu'une addition minérale.

Pour réaliser ce travail, on a structuré ce mémoire en quatre chapitres :

Le premier chapitre, est une recherche bibliographique (aperçu général) qui comporte une synthèse bibliographique sur le ciment et ses principaux constituants aussi leur caractérisation, les procédés de fabrication du ciment et sa classification.

Le deuxième chapitre, présente un aperçu général sur la cimenterie de El Ma Labiod – Tébessa, prise comme cas d'étude.

Le troisième chapitre, consacré à l'étude expérimentale, présente les caractéristiques des matériaux utilisés dans cette étude, la préparation des échantillons, les procédures à suivre, la composition des mélanges, ainsi que les essais réalisés sur les échantillons de ciments préparés.

Le quatrième chapitre, est une présentons des résultats obtenus, ainsi que l'interprétation et les commentaires.

Finalement, une conclusion qui propose une synthèse des résultats obtenus, et les recommandations.

Chapitre I
PROCESSUS DE
FABRICATION DES
CIMENTS



I.1. Introduction

Le ciment est le constituant de base des bétons et mortiers. Le ciment forme avec l'eau une pâte qui se solidifie en agglomérant les autres éléments d'un mortier ou d'un béton. Cette pâte a la propriété de faire prise, de durcir à la température ambiante, par simple gâchage à l'eau, même en milieu humide privé d'air.

I.2. Historique du ciment

Les ciments hydrauliques furent d'abord inventés par les Égyptiens puis améliorés par d'autres civilisations en utilisant de la chaux. Plus tard les Grecs, le renforcèrent avec des cendres pouzzolaniques ; usage repris par les Romains. Le ciment dit " ciment Portland " c'est le matériau de 20^{ème} siècle.

En 1818, le français Louis Vicat montra qu'on pouvait artificiellement fabriquer une chaux hydraulique par un mélange convenable de calcaire et d'argile. Ce procédé avait l'avantage de permettre la fabrication du ciment à partir de matières plus communes. L'écossais Joseph Aspidine est le premier qui prit un brevet d'invention en 1824, sur la fabrication d'un liant à partir d'un mélange de chaux et d'argile qu'il appela 'ciment Portland'. Le terme « Portland » vient du nom de la carrière d'où venaient les composants utilisés par Aspidine et est apparenté à la chaux hydraulique dont il constitue un perfectionnement considérable. En 1845, Johnson fixa les proportions et les températures convenables et marqua le début de l'industrie du ciment Portland que nous connaissons de nos jours.

I.3. Définition d'un 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 [2].

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.

Le ciment est un liant hydraulique c'est-à-dire : il est capable de faire prise, de durcir et de développer des résistances à l'air comme dans l'eau.

Le béton est un géomatériau composite, composé essentiellement de ciment, eau et granulats.

Une Pâte = Ciment + Eau.

Un mortier = Ciment + Eau + Sable.

Un Béton = Ciment + Eau + Sable + Gravier.

I.4. Constituants de base du ciment

On peut théoriquement fabriquer du ciment Portland à partir de matériaux quelconques enfermant chaux, silice, alumine et fer. En pratique, les possibilités sont beaucoup plus limitées car on est obligé de choisir, pour des raisons évidentes, des matières premières faciles à extraire, traiter, et combiner. On peut utiliser aussi comme appoint des sous-produits d'autres industries tels les laitiers de hauts fourneaux ou les cendres des centrales thermiques [3].

I.4.1. Matières premières

On classe habituellement les matières premières naturelles en [3]:

- Calcaire: plus de 80% de CaCO₃.
- Argile: moins de 40% de CaCO₃.
- Éléments argilo-calcaires : de 40% à 80% de CaCO₃.

1.4.1. 1. Calcaires

Les calcaires peuvent être de pureté et de duretés variables, ils proviennent du dépôt de CaCO_3 contenu dans les eaux de mer ou des lacs, dépôts provoqués par précipitation chimique ou réalisés par l'intermédiaire d'organismes vivants (mollusques, algues). Certains de ces dépôts soumis à une pression et à une température suffisante, ont donné des calcaires cristallins [3].

1.4.1. 2. Argiles

Les argiles sont constituées essentiellement de silice, d'alumine et de fer et constituent par là même le complément indispensable du calcaire. Elles peuvent être classées de plusieurs manières.

On distingue ainsi:

- Les argiles résiduelles provenant de la décomposition sur place de roches existantes, du fait d'agents physico-chimiques.
- Les argiles transportées et déposées sous l'effet des mers, des cours d'eau, des glaciers du vent.

Les argiles utilisées en cimenterie sont des argiles communes qui peuvent être constituées par des mélanges des groupes énumérés. De plus les argiles résiduelles contiennent souvent des fragments des roches qui leur ont donné naissance et qui risquent de les rendre impropres à la fabrication du ciment (silex, quartz, sous forme de nodules, de sable, ...etc.). Là encore les impuretés telles que magnésie, soufre, soude, potasse, doivent être en quantité très limitée. D'une manière générale, le coût de la préparation des matières premières croît avec le nombre de constituants à mélange [3].

1.4.1.3. Eléments argileux calcaires

Ils contiennent les éléments principaux nécessaires à la fabrication du ciment mais doivent être corrigés par des apports de calcaire ou d'argile afin de faire leur dosage. Certains calcaires argileux renferment naturellement les divers constituants du ciment Portland en proportion voulu. Ces « pierres à ciments » sont évidemment très rares [3].

I.4.2. Matériaux de correction

I.4.2.1. Minerai de fer (Fe_2O_3)

Le minerai de fer est une roche contenant du fer, généralement sous la forme d'oxydes, comme la bauxite [4].

Les minerais de fer ont une teneur en fer variable selon le minéral ferrifère, sachant également que l'isomorphisme, presque toujours présent dans les minéraux naturels, réduit la teneur théorique [5].

I.4.2.2. Le gypse

Est une espèce minérale composée de sulfate di hydraté de calcium de formule $CaSO_4 \cdot 2H_2O$. Le mot gypse désigne ainsi à la fois une espèce chimique et une roche. Le gypse est le minerai qui permet de fabriquer le plâtre. Il entre aussi dans la composition des ciments. La mine de Naira permet de voir des cristaux géants de ce minéral dépassant 11 mètres de long [6].

I.4.2.3. La bauxite

Est une roche latéritique blanche, rouge ou grise, caractérisée par sa forte teneur en alumine Al_2O_3 et en oxydes de fer. Cette roche constitue le principal minerai permettant la production d'aluminium. Elle se forme par altération continentale en climat chaud et humide. De structure variée, elle contient dans des proportions variables des hydrates d'alumine, de la kaolinite, de la silice et des oxydes de fer qui lui confèrent souvent une coloration rouge [7].

I.4.3. Les matières secondaires (Ajouts)

I.4.3.1. La pouzzolane naturelle

La pouzzolane naturelle utilisée est d'origine volcanique. Elle est extraite en Algérie du gisement de Bou Hamidi situé au sud de Béni-Saf. Le gisement est représenté par une montagne de forme conique appelée El- Kalcoul situé à la cote absolue de 236 m. Cette pouzzolane est essentiellement formée de scories et de pierres de ponce bien stratifiées, de couleur variant du rouge au noir [8].

1.4.3.2. Le laitier de haut fourneau (L)

Le laitier est un sous-produit de fabrication de la fonte et l'industrie métallurgique. Ils sont formés de constituants non ferreux, de fondants et de cendres de coke. Ils peuvent être utilisés comme granulats dans le béton. Leur composition en oxydes et leur structure vitreuse obtenue par trempe à l'eau leur confèrent des propriétés hydrauliques latentes, ce qui permet d'envisager leur utilisation en tant qu'addition cimentaires [9].

1.4.3.3. Les cendres volantes siliceuses (V) ou calciques (W)

Elles sont recueillies dans les centrales thermiques fonctionnant au charbon et sont généralement utilisées pour la finesse de leurs particules, ce qui accroît leur réactivité. Pour qu'une variété de cendres volantes à faible teneur en calcium puisse avoir des propriétés liantes optimales, elle doit avoir un pourcentage de matière non liante inférieure à 5%, une teneur en Fe_2O_3 inférieure ou égale à 10 % et celle en CaO qui doit être très faible [10].

La teneur en aluminosilicate doit être comprise entre 40 et 90 % de particules d'un diamètre équivalent inférieur à $45\mu\text{m}$. Il existe trois types de classe de cendres volantes [10]:

- Les cendres volantes de classe C (proviennent du lignite et sont riches en CaO).
- Les cendres volantes de classes F (pauvres en CaO, proviennent de la combustion de la houille et sont les plus utilisées pour l'élaboration des géopolymères à cause de leur faible teneur en CaO).
- Les cendres volantes de classe N qui sont des aluminosilicates naturels ou synthétiques dont la somme des oxydes de silicium, aluminium et de fer est supérieure à 70 % et le taux de SO_3 est inférieur à 4 %.

1.4.3.4. Les Calcaires

Sont obtenus après un broyage fin de roches naturelles présentant une teneur en carbonate de calcium (CaCO_3) supérieure à 75 %. Ces additions ne participent pas à la création de résistances mécaniques du ciment durci [10].

1.4.3.5. Les schistes calcinés (T)

Acquièrent des propriétés hydrauliques et pouzzolaniques lorsqu'ils sont activés Thermiquement C'est notamment le cas des schistes houillers brûlés dans les chaudières à une température d'environ 800°C. Les schistes calcinés contiennent principalement du silicate bi calcique (C2S) et de l'aluminate mono calcique (CA) ainsi que des petites quantités de chaux libre (CaOL), de sulfate de calcium et de silice. Ces ajouts finement broyés ont de fortes propriétés hydrauliques couplées à des propriétés pouzzolaniques [10].

1.4.3.6. Les sulfates de calcium

Sont incorporés au ciment principalement sous forme de gypse. Ils doivent être ajoutés en Faibles quantités aux constituants du ciment en vue de réguler la prise lors de son hydratation. Ils sont introduits à hauteur de 5% sous forme de gypse ($\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$), de l'Hem hydrate ($\text{CaSO}_4, \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$) ou de l'anhydrite (sulfate de calcium anhydre CaSO_4) ou tout mélange de ceux-ci [10].

1.4.3.7. Les fumées de silice (D)

Les fumées de silices sont un sous-produit de l'industrie du silicium et de ses alliages et la fabrication du silicium récupéré dans le système de dépoussiérage des fumées. Les particules de la fumée de silice se présentent sous forme sphérique de très faible diamètre allant de 0,1µm à 1ou 2 µm. Pour entrer dans la composition d'un ciment en tant que constituant principal, elles doivent être présentées pour au moins 85 % (en masse). D'un point de vue chimique, la fumée de silice est composée essentiellement de silice, de telle sorte qu'une particule de fumée de silice est 100 fois plus petite qu'un grain de ciment [11].

1.4.4. Produit semi-fini: Le clinker

Résultant de la cuisson d'un mélange composé d'environ 80 % de calcaire et de 20 % d'argile (clinkérisation), le clinker prend la forme de granules durs avant d'être finement broyé pour entrer dans la composition d'un ciment (figure I.1). Le clinker possède des propriétés hydrauliques : il réagit avec l'eau pour former des hydrates stables et insolubles [12].

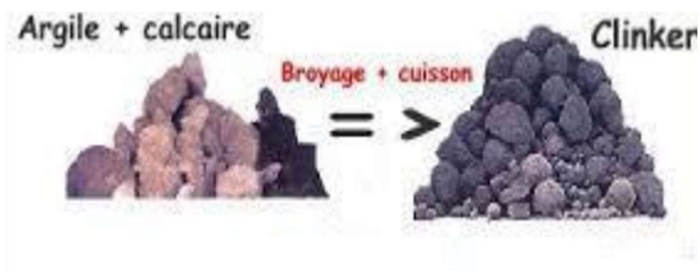


Figure I.1. Constituants du clinker [13].

I.4.4.1. Composition chimique du clinker

De la composition chimique des matières premières et de leurs proportions dans le mélange, on déduit la nature des éléments chimiques présents dans le ciment Portland et leurs concentrations [3].

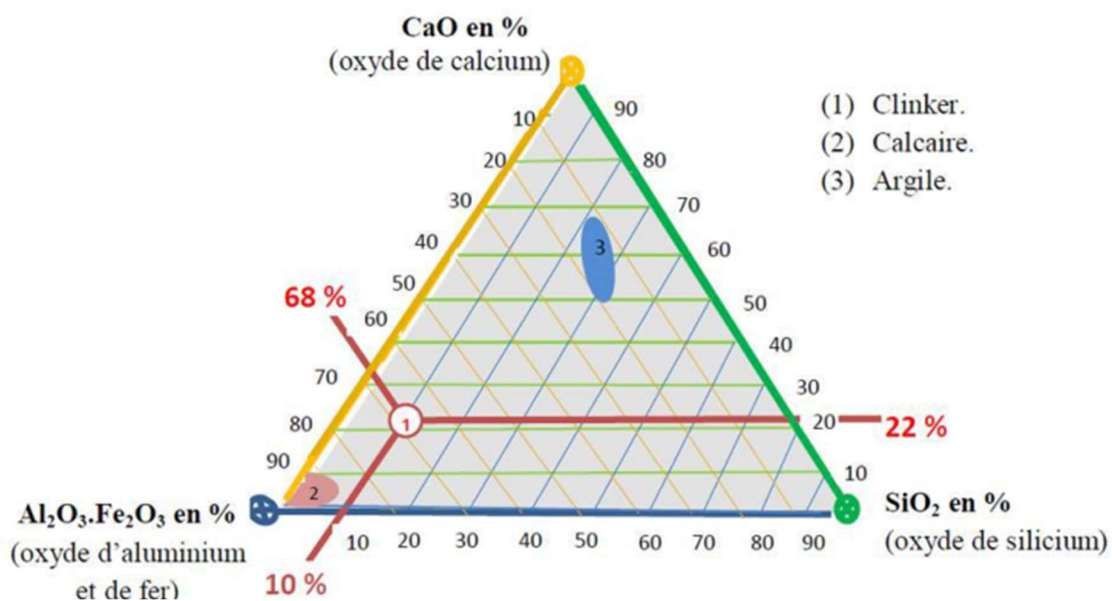


Figure I.2. Composition chimique du clinker [14].

Le clinker Portland comprend les quatre oxydes principaux suivants: CaO, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ (figure I.2), en plus d'autres oxydes de teneur inférieure: MgO, TiO₂, Na₂O, K₂O, MnO₂ [14].

- **CaO** : Il est lié avec SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 . A l'état libre, il provoque une inégalité de Changement de volume du ciment lors de l'hydratation (expansion). $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} = \text{Ca}(\text{OH})_2$. La résistance du ciment augmente en cas d'augmentation du pourcentage de CaO lié, cependant, la stabilité chimique diminue en milieu agressif. La teneur de CaO est de 63 % à 67 % dans le clinker.

- **SiO₂** : Il réagit avec CaO en donnant les silicates de calcium ; un pourcentage élevé donne beaucoup de C2S parce qu'il réagit avec tout le CaO, dans ce cas le ciment durcit lentement, sa résistance augmente à long terme. L'augmentation de C2S donne une grande durabilité au ciment et surtout au milieu agressif, sa teneur est de 21 % à 24 %.

- **Al₂O₃** : Il contribue à la prise et au durcissement rapide du ciment, cependant, une haute teneur en Al_2O_3 donne un ciment très sensible à la corrosion sulfatée, sa teneur est de 4 à 7 %.

- **Fe₂O₃** : Il joue le rôle de fondant, il diminue considérablement la température de cuisson du clinker, il contribue à l'augmentation de la stabilité chimique dans les eaux sulfatées, sa teneur est de 2,5 à 4 %.

- **MgO** : Une quantité élevée en MgO à l'état libre se trouve sous forme de péridote, provoque l'augmentation de volume lors de l'hydratation, sa teneur est inférieure 5 %.

- **TiO₂** : Sa teneur est inférieure à 0,5 %, il provient des argiles.

- **MnO₂** : Il fait partie du clinker au cas où le laitier de haut fourneau est utilisé comme matières secondaires, sa teneur est 1,5 %.

- **P₂O₅** : Se trouve sous forme d'impureté dans la composition du clinker, à une teneur de 1 à 2 %, il ralentit le processus de durcissement du ciment, sa teneur est de 0,2 à 0,3 %.

- Na_2O et K_2O : Une partie des alcalis se volatilise lors de la cuisson, sa composition est de 0,5 à 1 %. Les alcalis provoquent la diminution de la résistance du ciment, parce qu'ils ralentissent l'hydratation des principaux minéraux.

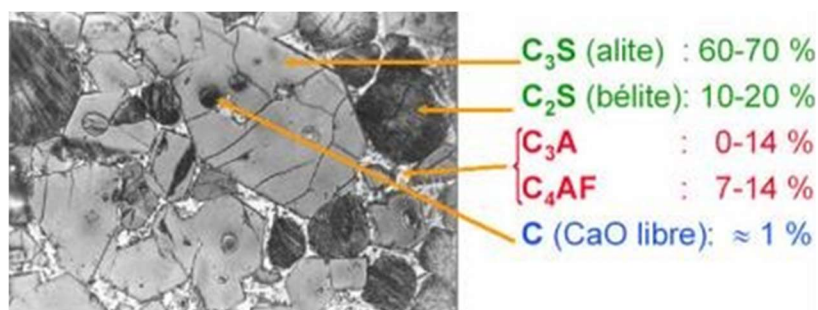


Figure I.3. Les minéraux observables au microscope optique d'un grain de clinker [15].

La silice, l'alumine et le fer donnent à la cuisson un caractère acide, contrairement à la chaux qui est plutôt basique. Ces proportions permettent de prévoir les qualités ultérieures du ciment. Les oxydes dans le clinker doivent être liés en composés définis appelés minéraux.

1.4.4.2. Composition minéralogique du clinker [16]

a. Silicate tricalcique : Alite « C3S » : 40 à 65 %

- Comprend toutes les caractéristiques essentielles du ciment Portland.
- Prise initiale et finale en l'espace de quelques heures après le gâchage.
- Développement de la plupart de sa résistance en sept jours.
- Les mélanges de silicate tricalcique et d'eau sont moins plastiques que le ciment Portland (demandent plus d'eau pour obtenir une pâte plastique).
- Le mélange peut être amélioré par une addition de gypse.

b. Silicate bi calcique : Bélite « C2S » : 8 à 35 %

- Aucun temps de prise définitif, la pâte gâchée prend lentement pendant une période de quelques jours.
- L'addition de gypse ne donne que peu de changement.

- Peu de résistance en début de prise, mais gagne sûrement en résistance en fin de prise jusqu'à ce qu'il y ait égalité avec le C3S.

c. Aluminate tricalcique : Célite : « C3A » : 1 à 13 %

- Prise Flash (pratiquement instantanée) après gâchage à l'eau, accompagnée d'un tel dégagement de chaleur qu'une évaporation violente est visible.
- Après malaxage ultérieur: Pâte plastique et facile à travailler.
- Dans de l'air humide : durcissement et résistance convenables.
- Dans l'eau : désintégration et émiettement.
- Un temps de prise normal s'obtient par l'addition de 5 % de gypse.
- Produit une certaine résistance en une journée, mais aucun développement subséquent n'est visible.
- Influencée de ce composé dans les mélanges semble être irrégulière.

d. L'alumine-ferrite tétracalcique C4AF

- Hydratation rapide.
- Contribution incertaine à la résistance.
- Prise en quelques minutes mais sans prise Flash comme pour le C3A.
- Dégagement de chaleur marque accompagne la prise, cependant moins vigoureux que pour le C3A.

Les compositions chimique et minéralogique du clinker sont comprises dans les limites données par les tableaux I.1 et I.2.

Tableau I.1. Les minéraux observables au microscope optique d'un grain de clinker [15].

Oxydes constitutifs	Teneur limites (%)	Sources (matière première)
CaO	60 à 69	Calcaire
SiO ₂	18 à 2	Argile
Al ₂ O ₂	4 à 8	--
Fe ₂ O ₂	1 à 8	--
MgO	0 à 5	Calcaire et Argile
Alcali (K ₂ O et Na ₂ O)	0 à 2	--
SO ₃	0 à 3	--

Tableau I.2. Composition minéralogique du clinker.

Notation Symbolique	Nom	Formule chimique	% en poids
C3S	Silicate tricalcique (Alite)	3CaO. SiO ₂	50 à 70
C2S	Silicate bi calcique (Bélite)	2CaO. SiO ₂	10 à 30
C3A	Aluminate tricalcique (Célite)	3CaO. Al ₂ O ₃	2 à 15
C4AF	Alumino-ferrite tétra calcique (Célite II)	4CaO. Al ₂ O ₃ . Fe ₂ O ₃	5 à 15

1.4.4.3. Les additifs

On les ajoute éventuellement afin d'améliorer certaines propriétés. Les additifs ne doivent pas présenter des actions nocives sur les propriétés des ciments mais ils peuvent, suivant les cas, modifier certaines de leurs caractéristiques. Il peut s'agir d'agents de

mouture, fréquemment employés, qui sont des sels organiques solubles utilisés à des doses extrêmement faibles. Il peut s'agir également de sels solubles, tels certains adjuvants pour mortier, béton ou coulis. La proportion d'additifs doit toujours rester très faible, le pourcentage admis ne doit pas dépasser 0,5 % de la masse totale, valeur dans laquelle se trouve comprise la proportion d'agent de mouture, et ceci pour tous les ciments à l'exception des CEM III/A ou B et des CEM III/C, pour lesquelles la proportion de sels chlorés (NaCl) est autorisée jusqu'à 1 % [15].

I.5. Processus de fabrication du ciment

Sans vouloir entrer dans les détails de la fabrication du ciment, il est cependant nécessaire de connaître les principes généraux les différentes phases.

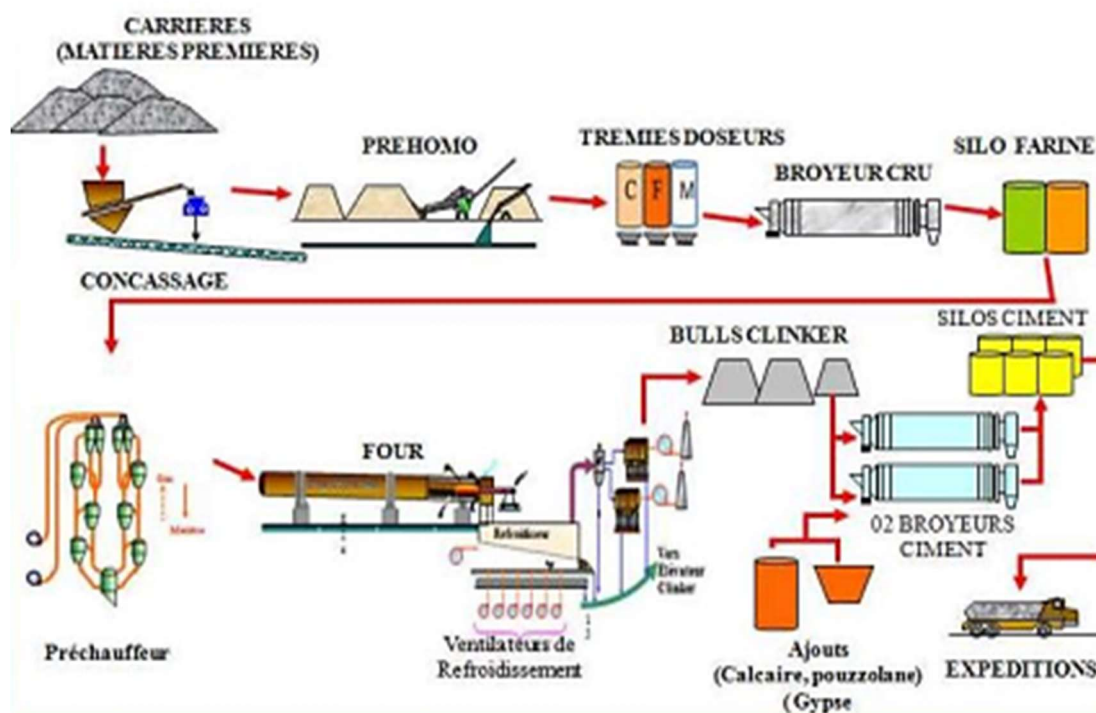


Figure I.4. Fabrication du ciment [16].

Les matières premières entrant dans la fabrication du clinker sont le calcaire et l'argile dans les proportions respectivement proches de 80 et 20 %. Le calcaire porte le calcium, l'argile porte la silice SiO_2 , l'alumine Al_2O_3 et l'oxyde de fer Fe_2O_3 , nécessaire au processus de formation de clinker. Ces matières premières contiennent par ailleurs

d'autres éléments que ces oxydes fondamentaux, tel de la magnésie MgO , des sulfates, des sulfures des alcalis K_2O et Na_2O . Dont les pourcentages doivent être contenus en deçà de limites précises.

La fabrication du ciment comporte les suivantes (figure I.4):

I.5.1. Extraction

L'extraction consiste en général pour le calcaire, à abattre la roche à l'explosif, dans des Carrières généralement à ciel ouvert, de façon à la fragmenter. En blocs chargés ensuite dans des dumpers pour alimenter les concasseurs, alors que l'argile, beaucoup plus meuble est exploitée au moyen d'excavateurs ou de roue-pelle avant d'être transportée par camion (figure I.5) [17].



Figure I.5. Extraction des matières premières.

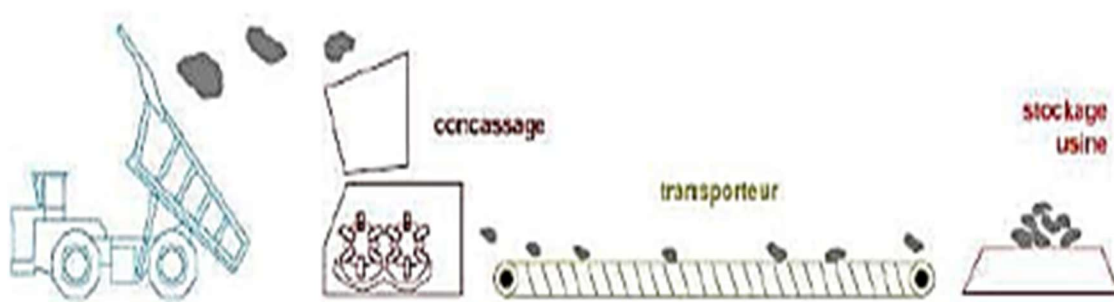


Figure I.6. Le concassage [18].

I.5.2. Concassage

Les matériaux extraits de carrière présentant des granulométries grossières allant jusqu' au 1mm, le concassage effectué plus souvent sur le lieu même de l'extraction a pour but d'en limiter la granulométrie a 50 vers 100 mm au maximum. Les matériels utilisés à cette fin peuvent être mobiles ou fixes [17].

I.5.3. Préparation du cru

La préparation du cru au cours de laquelle on réalise le mélange homogène du calcaire et de l'argile dans des proportions définies en fonction de leurs compositions chimiques particulières mais toujours proche du rapport 80% de calcaire pour 20% d'argile, peut se faire suivant différents procédés, le résultat final devant permettre l'obtention d'un clinker, Ces proportions permettent de prévoir certaines qualités ultérieures du ciment [17].

La préparation du cru peut être réalisée par quatre procédés différents (tableau I.3 et figure I.7):

I.5.3.1. Procédé par voie sèche

La matière première broyée et séchées formant le cru ou la farine qui a l'aspect d'un produit fluide, et ensuite le cru est introduit dans le préchauffage de four.

I.5.3.2. La voie humide

Les matières premières(dont la teneur en humidité est souvent élevée)sont broyées dans l'eau pour former une pâte qui peut être pompée, qu'est ensuite introduite directement dans le four. On peut passer au paravent dans un sécheur.

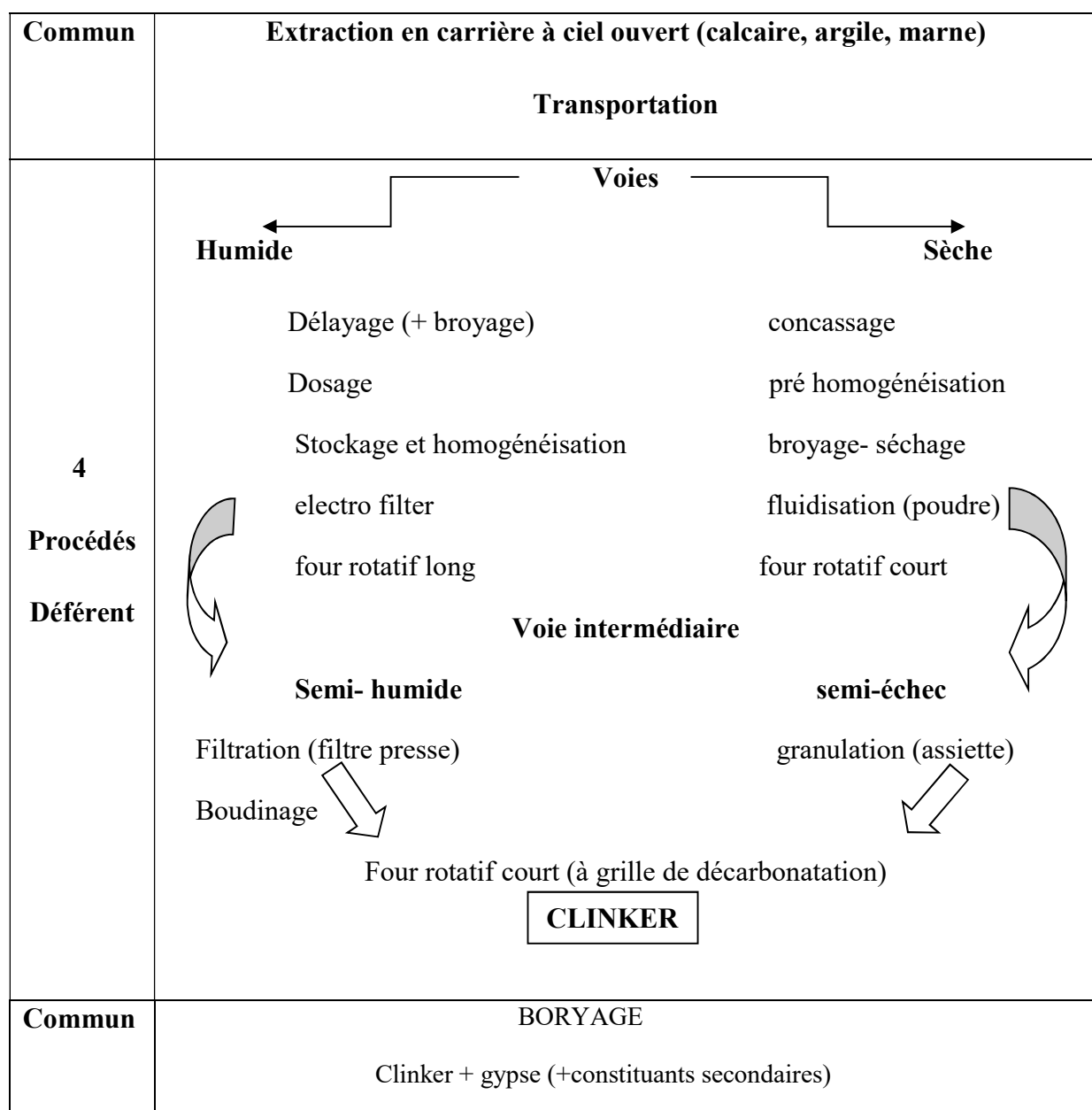
I.5.3.3. La voie semi- sèche

La farine est mélangée avec un peu d'eau pour former des granulats, qui sont introduits dans un préchauffeur à grilles situé en amont du four.

1.5.3.4. La voie semi- humide

La pâte et d’abord débarrassée de son eau dans des filtre presse, le gâteau de filtre presse et ensuite extrudé sous sa forme de granulés, est introduit dans préchauffeur à grilles.

Tableau I.3. Procédés de fabrication du ciment [2].



LA FABRICATION DU CIMENT

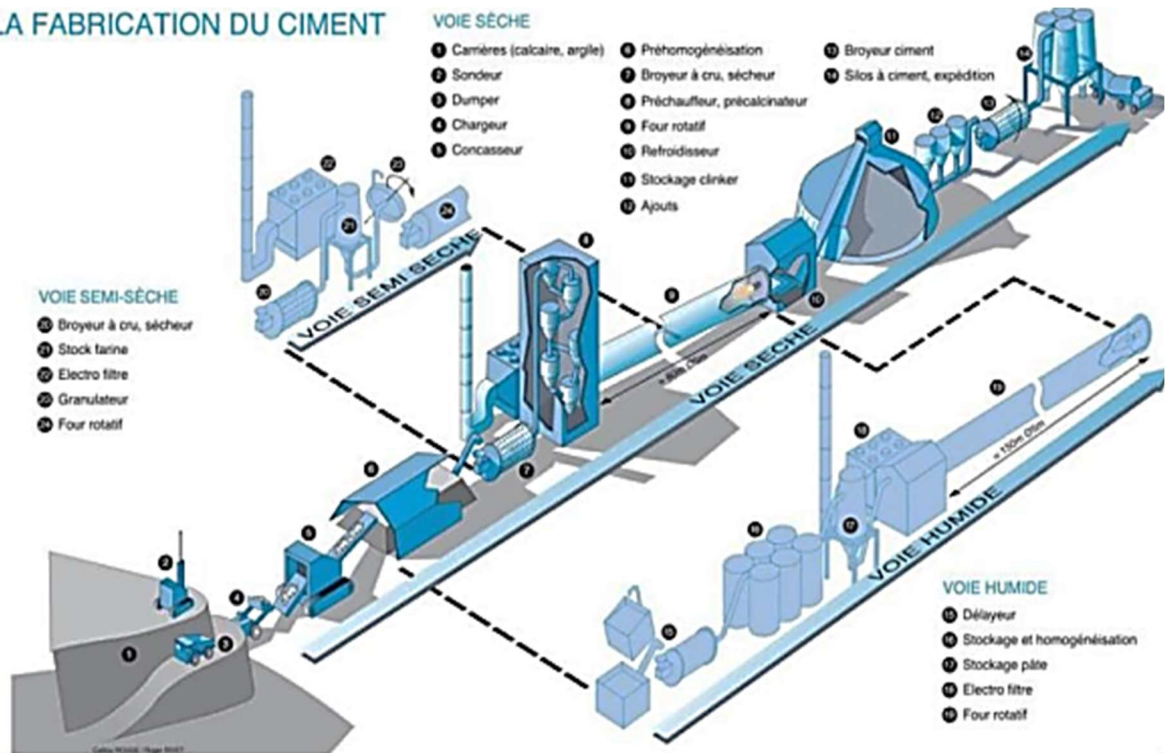


Figure I.7. Procédés de fabrication du ciment.

I.5.4. La pré-homégenisation

Cette phase qui a pour but de réaliser un mélange préliminaire, consiste à disposer les matériaux constitutifs du cru en couches successive, de faible épaisseur formant le tas de pré homogénéisation.



Figure I.8. La pré-homégenisation

I.5.5. Broyage-séchage

Pour favoriser les réactions chimiques qui suivent, les matières premières sont séchées et broyées très finement (quelque microns) dans des broyeurs à boulet ou dans des broyeurs à meules verticales. Ces derniers plus récents plus économique en énergie et permettent un séchage plus efficace.

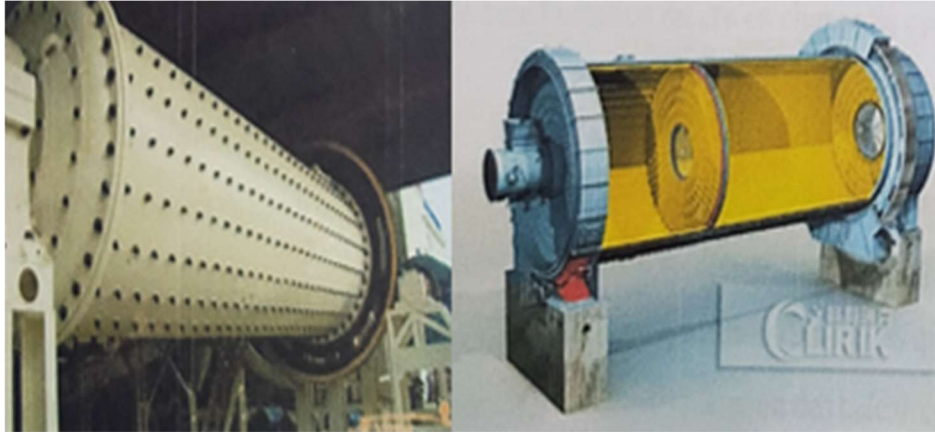


Figure I.9. Broyage – séchage.



Figure I.10. Silo de stockage et homogénéisation.

I.5.6. L'homogénéisation

C'est au cours de cette phase que grâce à un brassage pneumatique et mécanique vigoureux peut être obtenue un produit parfaitement homogène, de caractéristiques chimiques Uniforme, apte à être cuit.

I.5.7. Cuisson

Elle est réalisée dans des fours rotatifs dont les dimensions les plus courantes sont de l'ordre de diamètre et de 80 à 100 m de longueur dans les procédés à voie sèche (150 m dans le procédé à voie humide), a une température comprise entre 1400 et 1500 °C.

La cuisson permet la transformation du cru en clinker, le cycle de traitement comprend les phases suivantes:

- Le préchauffage qui s'effectue dans un échangeur de chaleur qui se trouve à l'amont du four (tour de préchauffeur à cyclone), les gaz récupérés du four y brassant la farine à contre-courant, la décomposition des argiles qui se situe au-dessus de 500 °C.
- La décarbonatation des calcaires qui s'effectuent à 950 C dans la partie médiane du four dont les températures sont comprises entre 550 et 1100 °C.
- La formation du clinker ou clinkérisation 1450 °C qui s'effectue en parti aval du four près du brûleur.



Figure I.11. Four rotatif.

I.5.8. Refroidissement

Cette opération a pour but d'abaisser la température du clinker qui est de l'ordre de 1200 à 1450 °C à la sortie du four à environ 50 -250 °C. Un type de refroidissement trop lent peut amener la libération de chaux libre et la transformation de C3S qui entraîne une baisse de résistance [17].



Figure I.12. Refroidissement.



Figure I.13. Broyeur.

I.5.9. Le broyage du clinker

L'est réalisé en contenu dans des broyeurs alimentés à pour des stocks de clinker et des différents constituants et ajouts. Le broyage a pour objectif, d'une part de réduire les granulats de clinker en poudre, d'autre part de procéder à l'ajout de gypse ainsi que celui d'éventuels autres constituants (laitier, cendre), ce qui fait obtenir les différents types de ciments normalisés, cette opération est effectuée dans des broyeurs à boulets.

I.5.10. Stockages et expédition

Après le broyage, le ciment est sous sa forme définitive, tel que nous le connaissons sur les chantiers. Il est alors stocké dans des silos verticaux qu'il faut entretenir régulièrement. En effet au bout d'un certain temps, le ciment sèche dans les silos et s'entasse. il faut donc qu'il se renouvelle régulièrement dans les silos afin qu'il n'y stagne pas, Pour se faire, on installe, des injections d'air dont la pression est plus forte vers l'extérieur et moins forte vers le centre du silo. En tête du silo un aspirateur d'air est également mis en place pour dégonfler le silo.



Stockage



en sac



Ensachage



En vrac

Figure I.14. Stockage et expédition du ciment.

Par ce procédé, le ciment acquière les propriétés d'un fluide et ne se bloque plus, économisant des pertes qui peuvent être conséquentes. Le ciment est ensuite extrait de ces silos par un bec verseur. Ensuite, les ciments quittent l'usine en sacs ou en vrac [17].

I.6. Classification des ciments

Les ciments peuvent être classés en fonction de leur composition et de leur résistance normale.

I.6.1. Classification des ciments en fonction de leur composition

Les ciments constitués de clinker et des constituants secondaires sont classés en fonction de leur composition, en cinq types principaux par la norme NF P15-301. Ils sont numérotés de 1 à 5 en chiffres romains dans leur notation européenne (la notation française est indiquée entre parenthèse).

-CEM I : Ciment Portland (CPA- dans la notation française)

CEM II : Ciment Portland composé (CPJ).

-CEM II : Ciment de haut fourneau (CHF),

-CEM IV Ciment pouzzolanique (CPZ),

-CEM V Ciment au laitier et aux cendres (CLC)

La proportion (en masse) des différents constituants est indiquée dans le tableau I.4. Les Constituants marqués d'une étoile (*) sont considérés comme constituants secondaires pour le Type de ciment concerne, leur total ne doit pas dépasser 5 %. (Les fillers sont considérés Comme des constituants secondaires).

I.6.2. Classification des ciments en fonction de leur résistance normale

Trois classes sont définies en fonction de la résistance normale à 28 jours, des sous classes « R » sont associées à ces trois classes principales pour désigner des ciments dont les résistances au jeune âge sont élevées. Ces classes sont notées: classe 32,5, classe 42,5 et classe 52,5. Elles doivent respecter les spécifications et les valeurs garanties selon le tableau I.5. Les valeurs entre parenthèse es sont les valeurs garanties lorsqu'elles pleuvent être inférieures aux valeurs spécifiées [17].

Tableau I.4. Désignation des différents types de ciment en fonction de leur composition.

	Ciment Portland	Ciment Portland composé		Ciment de haut fourneau			Ciment pouzzolaniques		Ciment au laitier et aux cendres	
	CPA-CEM I	CPJ-CEM II/A	CPJ-CEM II/B	CHF-CEM III/A	CHF-CEM III/B	CLK-CEM III/C	CPZ-CEM IV/A	CPZ-CEM IV/B	CLC CEM V/A	CLC CEM V/B
Clinker(k)	/95%	/80% ≤ 94%	/65% ≤ 79%	/35% ≤ 64%	/20% ≤ 34%	/5% ≤ 19%	/65% ≤ 90%	/45% ≤ 64%	/40% ≤ 64%	/20% ≤ 39%
Laitier (s)		6% total 20%	21% total 35%	/36% ≤ 65%	/66% ≤ 80%	/81% ≤ 95%	*	*	/18% ≤ 30%	/31% ≤ 50%
Pouzzolanes (z)	*	(fumée de silice 10%)	(fumée de silice 10%)	*	*	*	10% total ≤ 35% (fumée ≤ 10%)	36% total ≤ 55% (fumée ≤ 10%)	18% total ≤ 30%	31% total ≤ 50%
Cendre siliceuses (v)	*			*	*	*			*	*
Fumée de silice (D)	*			*	*	*				
Cendres calciques (w)	*			*	*	*	*	*	*	*
Schistes	*			*	*	*	*	*	*	*
Calcaires (L)	*			*	*	*	*	*	*	*
Fillers(F)	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*

Tableau I.5. Spécification et valeurs garanties en fonction de la classe.

Classe	Résistance à la compression (MPa) EN 196-1				Retrait à 28 jours	Début de prise	stabilité
	Au jeune âge		à 28 jours		P 15- 433	EN 196 -3	EN 196 - 3
	2 jours	7 jours	Mini.	Maxi.	(m/ m)	(min)	(min)
32,5		(17.5)	/32.5 (30)	≤52.5	≤800	/90	≤10
32,5 R	≥/13.5(12)		/32.5(30)	≤52.5	≤1000	/90	≤10
42,5	≥/12.5(10)		/42.5(40)	≤62.5	≤1000	/60	≤10
42,5 R	≥/20(18)		/42.5(40)	≤62.5	≤1000	/60	≤10
52,5	≥/20(18)		/52.5(50)			/60	≤10
52,5 R	≥/30(38)		/52.5(50)			/60	≤10

I.6.3. Différents types de ciments courants

Selon que des constituants, autre que le gypse, sont ou non ajoutés au clinker lors des opérations de fabrication, on obtient les différents types de ciments définis par la norme.

Le tableau I.4 donne la liste des différents types de ciments courants normalisés avec indication, pour chacun d’eux, de leur désignation propre et du pourcentage respectif de constituants qu’ils comportent [17].

I.6.4. Production du ciment dans le monde

Tableau I.9. Principaux pays producteurs de ciment dans le monde du 2014 au 2021(en millions de tonnes) [19].

	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Chine	2,480	2,350	2,410	2,000	2,200	2,200	2,400	2,500
Inde	260	300	290	290	300	320	295	330
USA	83,2	84,3	85,9	107	87	89	89	92
Vietnam	60,5	67,4	70	78,8	90,2	95	98	100
Egypte	50	55	55	53	81,2	76	42	40
Indonésie	65	58	63	65	75,2	74	65	66
Turquie	75	71,4	77	80,6	72,5	51	72	76
Iran	65	58,6	53	54	58	60	68	62
Japon	53,8	54,8	56	55,2	55,3	54	51	52
Russie	68,4	62,1	56	54,7	53,7	57	56	56
Brésil	72	65,3	60	53	53	55	61	65
Arabie saoudite	55	61,9	61	47,1	45	-	53	55

I.7. Propriétés physiques

I.7.1. Délais de prise

Le phénomène de prise, qui s'accompagne d'un dégagement de chaleur plus ou moins important, est lié aux nombreux paramètres:

- Le type du ciment ;
- La finesse de mouture, le début de prise étant d'autant plus rapide que la finesse de mouture est grande :

- La température ambiante, la prise étant stoppée à 0, alors qu'elle est très accélérée lorsque la température dépasse 30 °C ;
- La présence de la matière organique dans l'eau ;
- L'excès d'eau de gâchage qui agit comme retardateur.

D'une façon générale les temps de prise sont supérieurs à ces valeurs minimales. L'ordre de grandeur étant de 2h30 à 3h30 pour la grande majorité des ciments ces valeurs s'étendent pour une température ambiante de 20 °C [3].

I.7.2. Durcissement

Une fois la prise amorcée le phénomène d'hydratation se poursuit ; c'est la période de durcissement qui se poursuit pendant des mois voire des années au cours desquelles les résistances mécaniques continuent à croître

I.7.3. Fausse prise

Dans la composition des ciments rentre en général un peu de gypse (sulfate de calcium) hydraté à deux molécules d'eau ($\text{SO} \cdot \text{Ca} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Si le clinker est trop chaud ou s'échauffe trop au cours du broyage, il se forme alors un peu de plâtre [$\text{SO} \cdot \text{CaO} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$]

Dont la prise très rapide donne l'impression d'un de but de prise, c'est « la fausse prise » dans ce cas il ne faut surtout pas ajouter d'eau mais augmenter la durée de malaxage, Les ciments les plus sensibles sont ceux à très fine mouture ou à assez fort pourcentage de gypse

I.7.4. Hydratation

La dissolution des différents constituants est exothermique, selon leurs pourcentages relatifs, le dégagement de chaleur est donc plus ou moins important, est le cas par exemple des ciments riches en C3A que l'on cherchera à utiliser par temps froid ou en préfabrication, alors qu'on aura intérêt à les éviter par temps chaud. Suivant les ciments, cette chaleur à 12 heures, est approximativement de 300 j/g.

I.7.5. Finesse de mouture

La finesse de mouture. Également appelée finesse Blaine, exprimée en m^2/kg . Représente la surface spécifique ou surface développée d'une masse de 1 kg de ciment.

Elle est, d'une façon générale, comprise entre 300 et 350 (pour mémoire rappelons que la finesse s'exprimait auparavant en cm/g et que de nombreux utilisateurs continuent à l'exprimer ainsi ; il ressort qu'une finesse de 300 m/kg coresponsable à 3000 cm/g). Plus la finesse est grande plus les résistances sont précoces et élevées, mais par contre, plus les risques de retrait et par conséquent de fissuration ainsi que d'événement du ciment sont accrus.

I.7.6. Retrait

C'est la diminution du volume apparent de la matière. On le mesure sur des éprouvettes prismatiques de mortier de 16cm de longueur et d'une section droite (4 x 4) cm², conservées dans l'air à une température de 20 °C et une hygrométrie de 50 %. La norme impose la valeur limitée de retrait pour le CPA - CEM I de 800 um /m.

I.7.7. Expansion

Les causes possibles de l'expansion proviennent de l'hydratation des oxydes de calcium ou de magnésium que peuvent contenir certains ciments sous forme de chaux ou de magnésie. Les ciments doivent être stables, car les risques d'expansion dans le temps peuvent provoquer des désordres importants par dislocation des maçonneries.

La stabilité se détermine par l'essai le Chatelier, qui consiste à mesurer l'écartement de deux aiguilles solidaires d'un moule rempli de la pâte de ciment à tester, et conserve dans l'eau bouillante la valeur de l'expansion mesurer doit être inférieure à 10 mm pour tous les types de ciments courant

I.7.8. Gonflement

Bien que non normalise, il est utile de rappeler qu'alors qu'il se rétracte dans l'air, le Ciment augmente de volume lorsqu'il est immergé dans l'eau, ses variations dimensionnelles étant environ le 1/10 de celles constatées dans l'air.

I.7.9. Le besoin d'eau

Le besoin d'eau du ciment est une quantité minimale d'eau qui assure l'obtention d'une pâte du ciment ayant une viscosité donnée, cette quantité d'eau varie de 24 à 28 % de la masse de ciment, le besoin d'eau dépend de plusieurs facteurs:

- La composition minéralogique ;
- La finesse de mouture ;
- La présence d'addition.

I.7.10. La durée de conservation

La conservation des ciments pendant un court temps, même dans les conditions les plus favorables, entraîne une perte d'activité qui est liée à la carbonatation et hydratation partielle des minéraux de clinker en trois mois la perte d'activité de ciment peut atteindre de 15 à 20 % et en une année de 40 % :

- La stabilité de ciment ayant une grande finesse de mouture est plus mauvaise.
- La stabilité de ciment pendant la conservation peut être augmenté avec l'introduction dans le ciment lors du broyage de certaines substances hydrophobes en quantité de 0,06 à 0,30 % de la masse totale de ciment rapporté d la substance sèche de l'adjuvant en quantité hydrophobes on utilise le savon naphénique- acide naphénique.

I.8. Les propriétés mécaniques

C'est la propriété la plus importante elle est évaluée par les limites à la rupture par compression flexion, traction. D'après les normes AFNOR, la classe de résistance d'un Ciment s'étale d'après la limite de résistance à la rupture par flexion et par compression d'éprouvette de $(4 \times 4 \times 16) \text{ cm}^3$ d'un mortier plastique de composition (1/3) et soumise aux essais après 28 jours de conservation dans des conditions d'humidité 90 % et de température $t = 20 \text{ °C}$ [17].

I.9. Conclusion

Dans ce premier chapitre, on a fait une introduction théorique sur les ciments et les principaux constituants, les classes des ciments, ainsi que les techniques de fabrication.

La phase de cuisson (c'est-à-dire la fabrication du clinker) est la plus coûteuse, et la moindre erreur peut conduire au rejet de la production horaire.

Chapitre II
Présentation Du cas
d'étude



II.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter notre cas d'étude, qui est la cimenterie d'El Ma Labiod – Tébessa. Cette société est basée sur un nouveau style dans le département de production, intégrant la donne environnementale pour se conformer aux impératifs d'un développement durable. Et maintenir la continuité et la stabilité.

Pour cela, l'entreprise es à la recherche de solution techniques fiables pour réintégrer les clinker incuits et mal cuit (rejetés par le système de contrôle de qualité) dans le processus de fabrication du ciment. Ce qui est bénéfique de point de vue économique et environnementale.

II.2. Présentation de l'entreprise

II.2.1. Généralités

La société de la cimenterie d'EL Ma Labiod de Tébessa (SCT) est une filiale du groupe (E.R.C.E), de Constantine et sa capacité de production annuelle est de l'ordre de 525 000 tonnes. Alors que les objective de production étaient de 600 000 tonnes, le complexe a produit 651 500 tonnes [20].

Ce dépassement des objective retenus en début d'exercice permet au SCT de réunir une des conditions de sa pérennité économique sur un marché national de plus en plus concurrentiel [21]. Selon la même source, les pouvoirs publics ont choisi la région d'El Ma Labiod à 26 km au sud de Tébessa et à 35 km de la frontière algérienne et tunisienne pour l'installation de ce complexe à cause de ses richesses géologique offrant des strates argileuse et sablonneuse servant de matière première pour ce produit stratégique pour l'essor du secteur du bâtiment et des travaux publics [20, 21].

II.2.2. La présentation de la région d'étude

II.2.2.1. La Plaine D'el Ma El Abiod

a. Cadre géographique et climatologique

La plaine d'El Ma El Abiod est une plaine de 420 km², située au sud-est de la Ville de Tébessa, au nord-est de l'Algérie. Elle fait partie du bassin versant du chott Melhrir. La topographie est presque régulière, la région est soumise à un climat semi-aride.

La limite Nord de la plaine est formée par Djebel Doukane, Djebel Anoual et Djebel Bouroumane. La limite Est de la plaine s'approche du territoire tunisien dans la région d'El Houdjbatte. A l'Ouest se trouve la plaine de Cheria. La limite du Sud constituée par Bir El Ater (figure II.1).

La moyenne annuelle des précipitations est de l'ordre de 220mm, tandis que l'évapotranspiration réelle et l'infiltration sont respectivement de 210 et 10 mm/an.

La plaine a vocation essentiellement agricole, a connu un développement industriel très important et consommatrice d'eau, présente principalement par l'industrie du ciment ERCE, celle du verre SOVEST, celle des tubes roulés ANABIB.

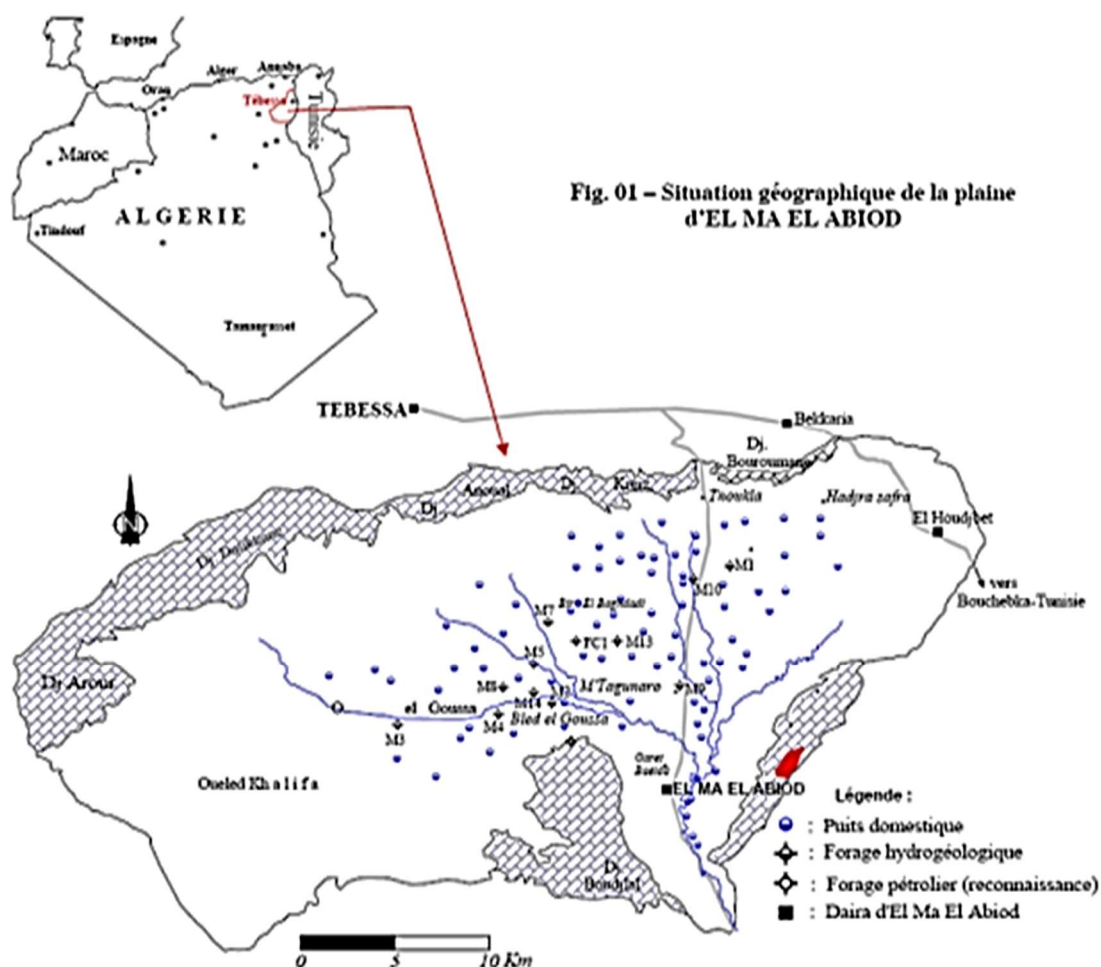


Fig. 01 – Situation géographique de la plaine d'EL MA EL ABIOD

Figure II.1. Situation géographique de la plaine de El Ma Labiod [22].

b- La nature du sol

La nature du sol de la région est un sable argileux [22].

c- Le niveau piézométrique

L'objectif principal de l'étude de la piézométrie est de visualiser la direction de l'écoulement. Horizontal et éventuellement vertical, ainsi que la profondeur du niveau d'eau dans le sol.

En effet, les eaux souterraines sont le moyen de transport de toute substance minérale ou organique.

Le niveau piézométrique du mois d'octobre 2002 montre que le sens de l'écoulement se fait vers le sud pour les zones Est, Ouest, Nord, la profondeur du plan d'eau est faible au sud et au centre, caractérisée par une surexploitation [22].

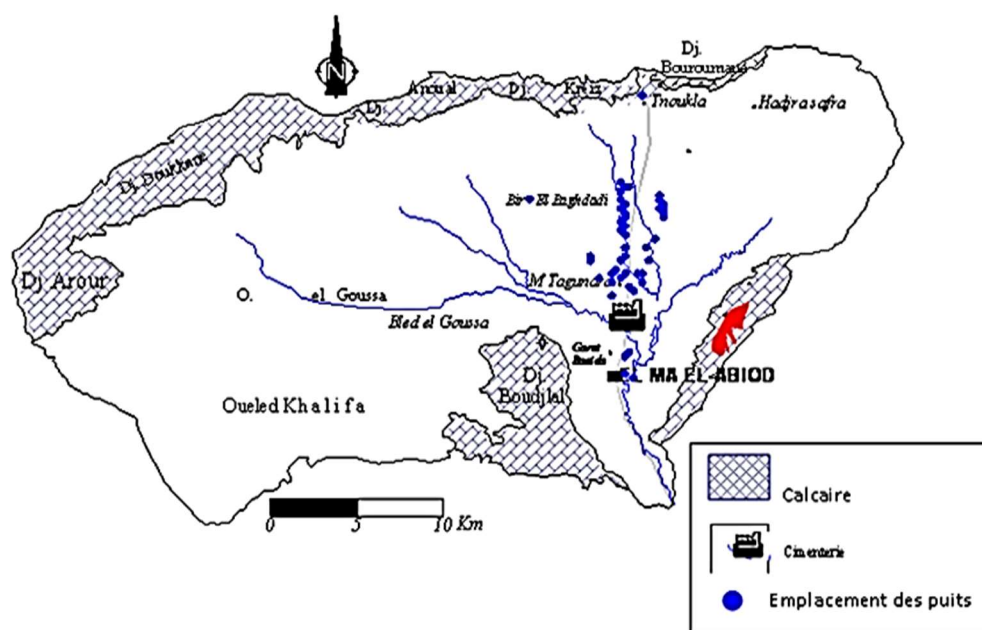


Figure II.2. Inventaires des puits dans la plaine. [22].

d- L'infiltration

L'infiltration qualifie le transfert de l'eau à travers les couches superficielles du sol. Il apparaît que la capacité d'infiltration finale varie entre 0,4 et 6 cm/h sur l'ensemble du bassin, les zones Est, Ouest, Sud a une capacité d'infiltration moyenne et très élevée au Nord.

II.2.3. Normalisation de l'entreprise

La société des ciments de Tébessa (SCT) vient d'être certifiée ISO 9001/95 par l'Agence Française d'Assurance de Qualité (AFAQ). La SCT est la deuxième cimenterie Algérienne du groupe ERCE à être certifiée après celle d'Ain-Touta (Scimat). Ces deux cimenteries produisent à elles seules plus de 20% de la production national. [24].

La cimenterie d'El-Ma-Labiod à été créé en vue de la supervision des activités de production et de commercialisation et de l'exercice de toutes les activités concernant le ciment et les matériaux de construction au niveau national et à l'étranger, et dont les fonctions sont:

- La supervision administrative de l'usine.
- Programmation pour la vente de 20 % de la production national.

II.2.4. Matières Premières utilisées pour la fabrication du ciment

La presque totalité des matières premières utilisées pour la fabrication du ciment proviennent de la carrière calcaire, de la carrière argile, de la carrière du sable, du gypse et du minerai de fer. Les opérations technologiques nécessaires à la préparation de la roche, comportant : le forage, l'abattage à l'explosif, le chargement et le transport de la matière au concassage.

Les principales matières premières (calcaire, argile et le sables) sont extraites dans des carrières proches de l'usine de fabrication. Après le concassage primaire, les matières premières sont transportées vers l'usine où elles sont stockées et préparées.

D'autres matériaux tels que la bauxite, le minerai de fer, le laitier de haut fourneau ou le sable de fonderie sont approvisionnés par d'autres sources [20, 22]:

- Calcaire : Carrière 230 ha (à 2 km).

- Argile : Carrière 70 ha (à 10 km).
- Sable : Carrière 21 ha (à 6 km).
- Gypse : Ain M'Lila (à 100 km).
- Fer : Mine de Boukhara (à 70 km).

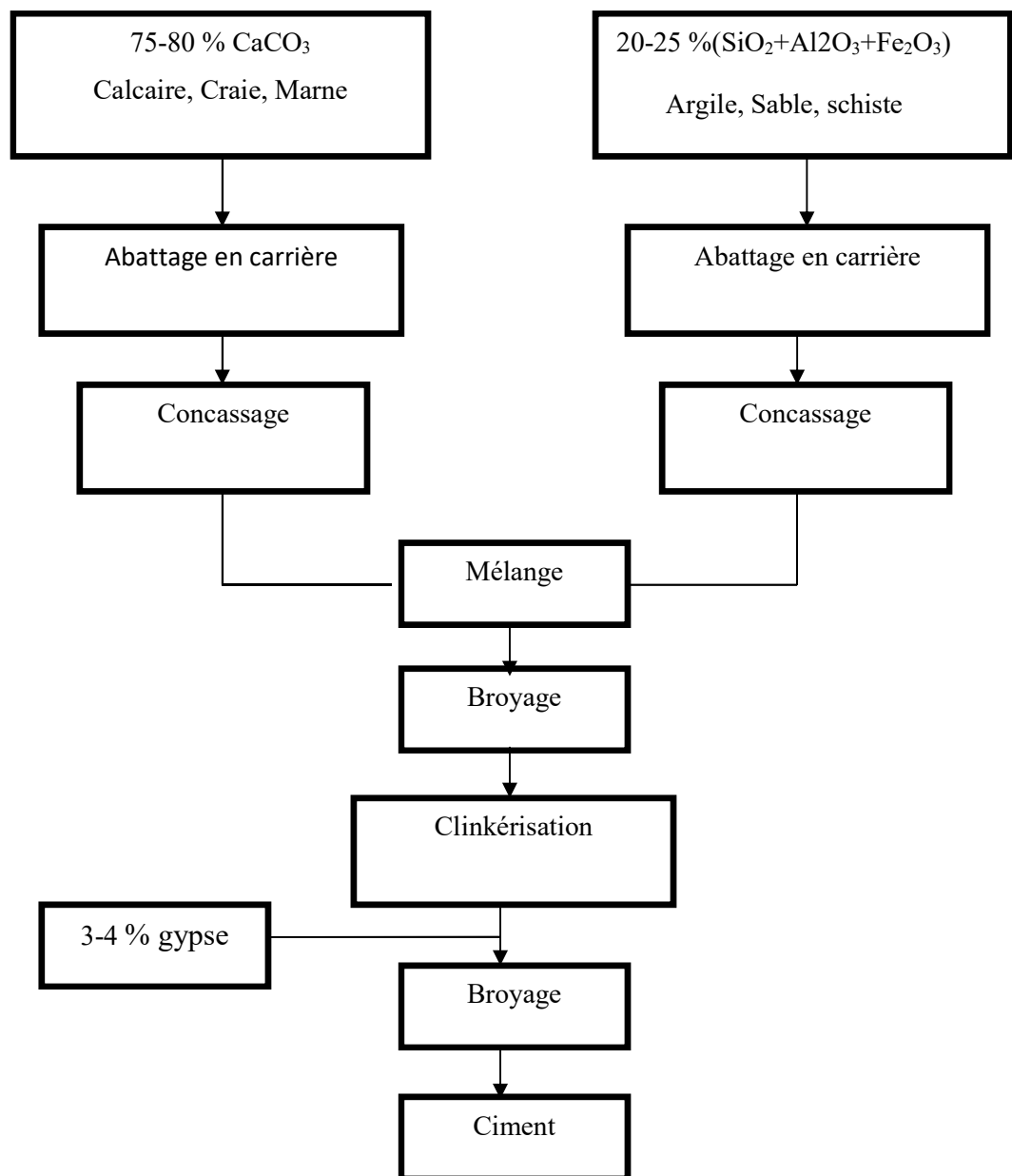


Figure II.3. Schéma de fabrication du ciment [23].

II.2.5. Extraction des matières premières

II.2.5.1. Extraction du calcaire

a. 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.



Figure II.4. Carrière du calcaire – cimenterie d'El Ma Labiod - Tébessa.

b. 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 déchargement, 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.

c. 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 [24].

II.2.5.2. Extraction de l'argile

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).



Figure II.5. Carrière d'argile, cimenterie d'El Ma Labiod – Tébessa.

a. Chargement

Le chargement de l'argile s'effectue par une chargeuse sur pneus de volume godet de $3,5 \text{ m}^3$ de capacité. Une seule chargeuse sera suffisante pour assurer un rendement journalier de 1023 t/jour.

b. 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) [25].

II.2.5.3. Extraction du sable

Etant ses propriétés physico-mécaniques, le sable constituant le gisement d'El Ma 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.



Figure II.6. Carrière de sable, cimenterie d'El Ma Labiod – Tébessa.

a. 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.

b. 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).

c. 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 [26].

II.2.5.4. Matières achetées

- Minerais de fer
- Gypse

- Ajouts (pouzzolane ; tuf ; laitier).

a. Stockage du minerai de fer

A partir du gisement de la société des mines de fer de l'est de Boukhara (Tébessa).



Figure II.7. Stock de minerai de fer, cimenterie d'El Ma Labiod – Tébessa.

b. Stockage du gypse

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

c. Stockage du laitier et Pouzzolane



Figure II.8. Stock de laitier + Pouzzolane, cimenterie d'El Ma Labiod – Tébessa.

II.2.6. Concassage

II.2.6.1. Types de concasseurs utilisés

Tableau II.1. Les concasseurs de matières premières.

Désignations	Types et capacités.
Concasseur calcaire N°02.	A marteaux EV200×200 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.

a. 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.

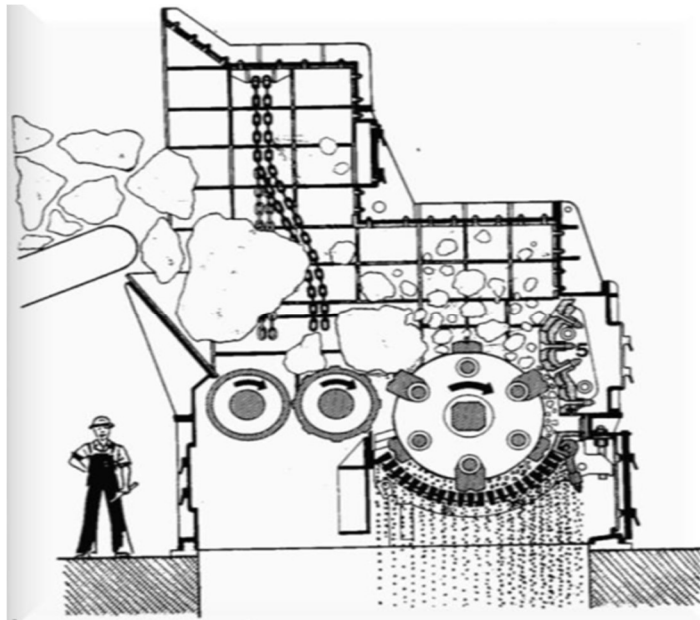


Figure II.9. Concasseur EV.

La matière première extraite (calcaire 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.

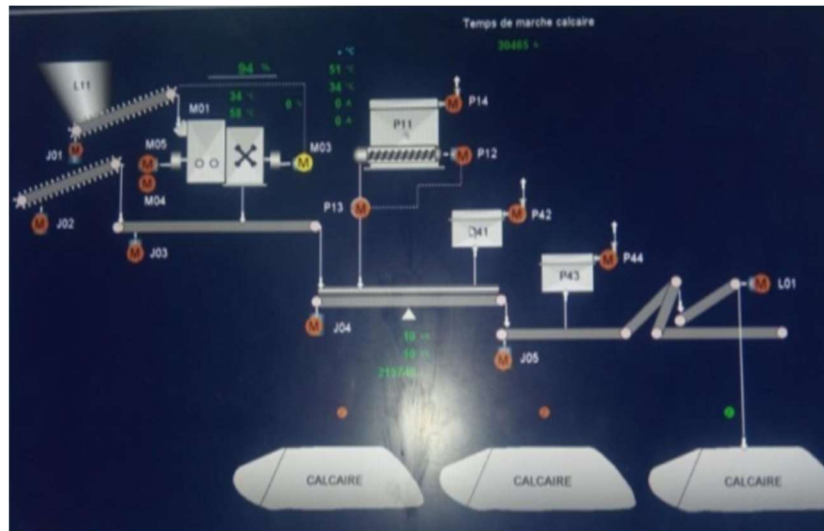
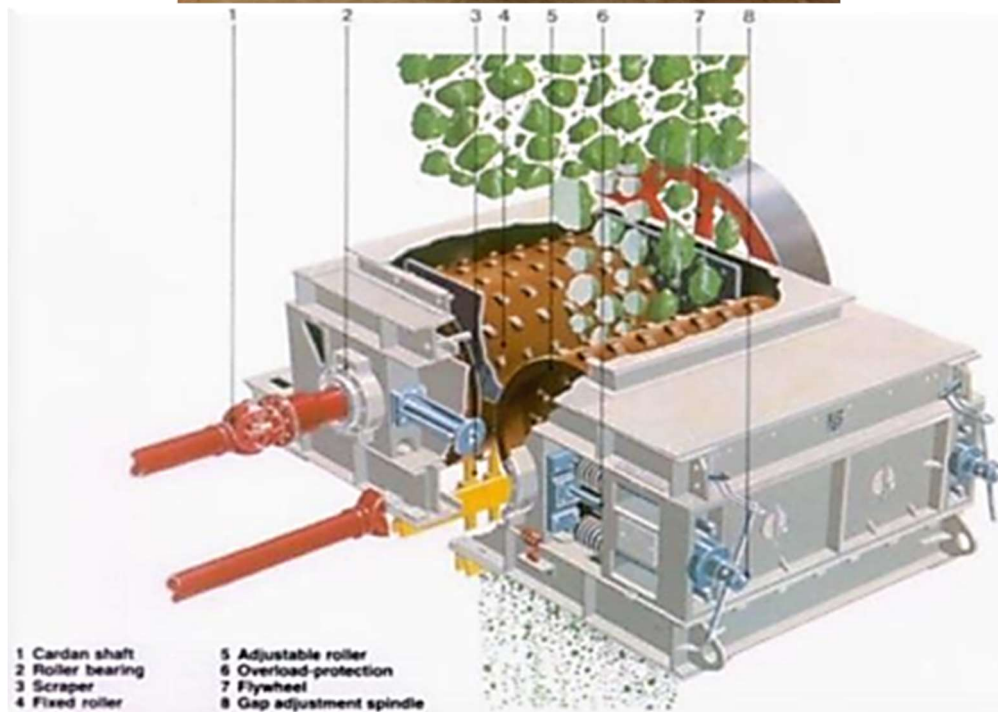


Figure II.10. Processus de concassage et transport du calcaire vers le hall associé.

b. Concasseur à cylindre

Les concasseurs à cylindres sont utilisés pour la réduction des matériaux tendres, collants et humides de carrière, tel que l'argile. Le concasseur à cylindre FLS de type E est composé de deux cylindres à bossages moulés. L'un des arbres de cylindres est réglable alors que l'autre est fixe et doté d'un volant. La fente entre les deux cylindres varie en fonction du degré de concassage désiré. Les deux cylindres sont pourvus de racloirs pour gratter la matière collante à la surface. L'équipement est prévu contre les risques de surcharge : un dispositif porte-poinçon est relié au palier du cylindre réglable conjugué à un interrupteur de sécurité du moteur. Au cas où un objet extrêmement dur serait coincé entre les cylindres, le dispositif de poinçonnage se mettra en marche et arrêtera le fonctionnement du concasseur et de l'alimentation. La puissance du moteur se transmet grâce à une double commande par engrenage et à deux arbres de transmission pour permettre le réglage de l'écartement entre les cylindres. La double commande par engrenage assure une vitesse synchronisée des deux cylindres. Ainsi, le rendement du concassage augmente et l'usure se réduit [23].



1-Arber de transmission 3-Racloir 5-Cylindre réglable 8-reglage de l'écartement
 2-Roulement à rouleaux 4-Cylinder fixe 6-Cistem de protection contre les surcharges
 7-volant.

Figure II.11. Concasseur à cylindre E.

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

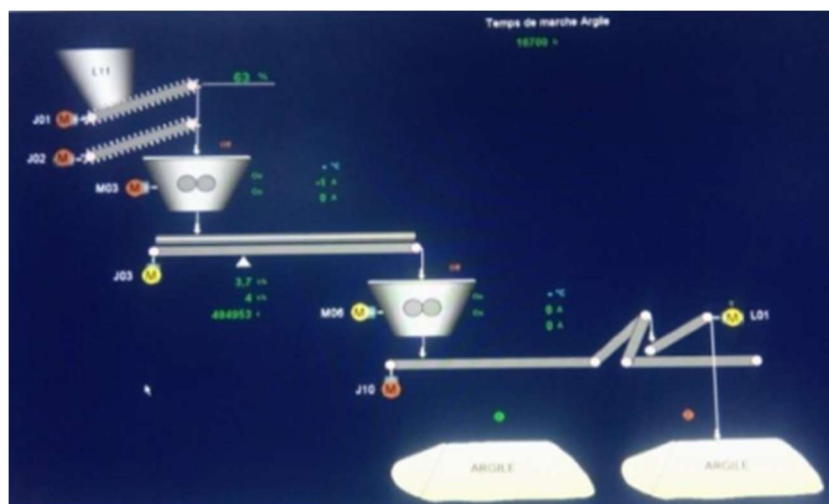
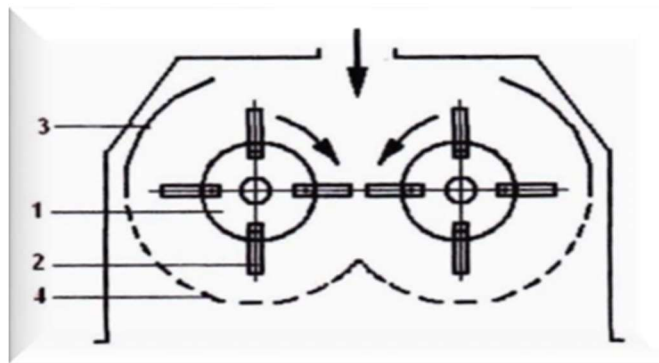


Figure II.12. Processus de concassage et transports d'argile vers le hall associé.

c. 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 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-Martaux 3-Plaque d'usure 4-Grille

Figure II.13. Concasseur à marteau à double rotor.

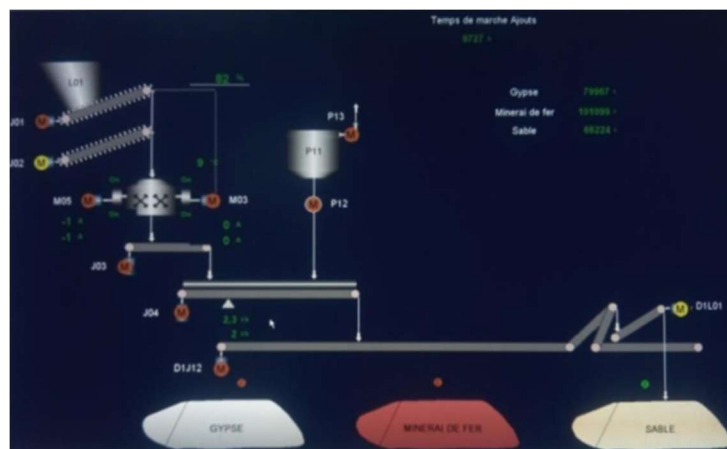


Figure II.14. Le processus de concassage et transports des ajouts vers le hall associé.

Les ajouts sont concassés dans un concasseur N°06, puis, avec une bande transporteuses ou terraine, ils sont acheminés vers le hall de stockage.

II.2.7. Préparation du cru

Pour la préparation du cru, on utilise trois constituants en générale qui sont le calcaire, l'argile brune, l'argile rouge pour la fabrication du CPA32,5, CPA40 CPJ42,5.

Après le concassage de ces trois constituants de base on obtient une granulométrie de 0 à 25 mm une prise d'échantillon pour effectuer les analyses afin de déterminer la composition, les constituant sont acheminés vers l'usine par des transporteurs couvert puis ce mélange est stocké dans un hall de Pré-homogénéisation le stockeur forme deux tas l'un en constitution, l'autre en reprise.

Une seconde correction est prévue juste avant le broyage cru, cette correction se fait pour ajouter de calcaire et minerai de fer, après correction du cru, le mélange est acheminé à l'aide de transporteurs à barbes vers un concasseur sécheur qui réduira la granulométrie de 0 à 7 mm.



Figure II.15. Les trémies de dosage, cimenterie d'Elma Labiod – Tébessa.

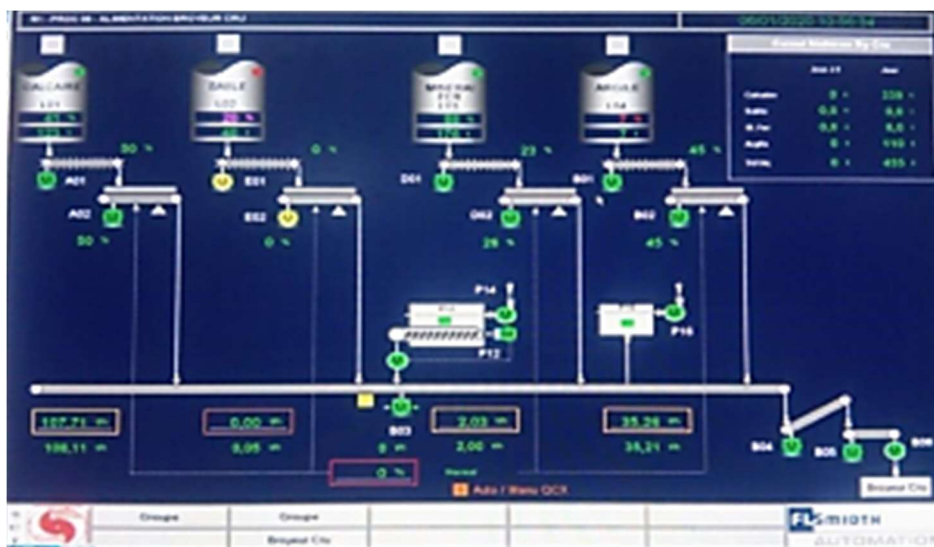


Figure II.16. Le processus d'alimentation broyeur cru.

II.2.8. 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 [27, 28]:

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

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 repend aux exigences qualité a 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.

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 des grosses, les fines passent pneumatiquement aux silos de stockage et homogénéisation et les grosses retournent vers broyeur.



Figure II.17. Broyeur Tirax Unidan, cimenterie d'El Ma Labiod – Tébessa.

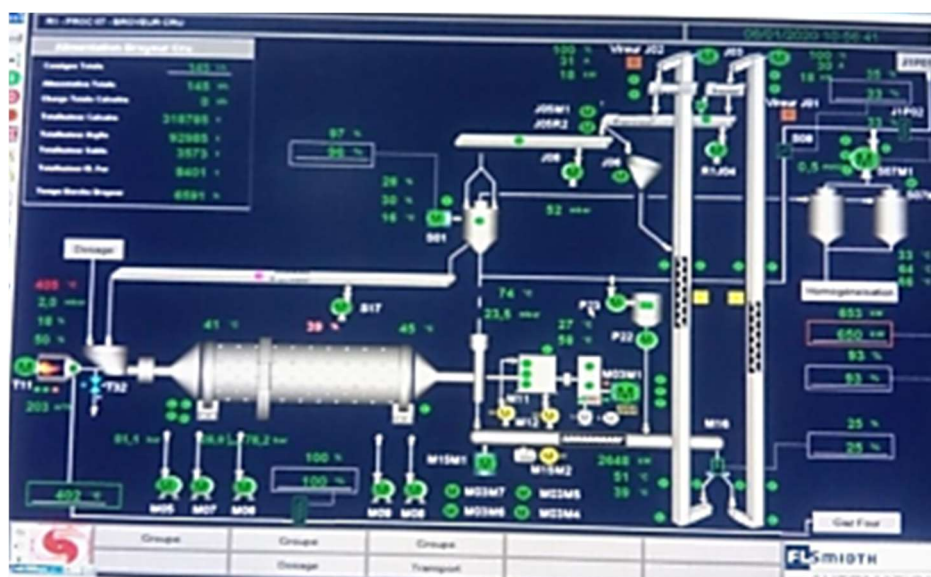


Figure II.18. Processus de broyeur cru.

II.2.9. Homogénéisation

Les deux silos servants de stockage et fonctionnement en continu, l'alimentation, le mélange et la vidange sont simultanées, la farine crue expédiée par l'air lift est dégagée dans la boîte de récupération.

La capacité de stockage de chaque silos est de 10 000 tonnes, chaque silos est équipé de deux sorties latérales pouvant assurer la totalité du débit farines vers le four, il est donc possible de fonctionner avec un ou deux silos.

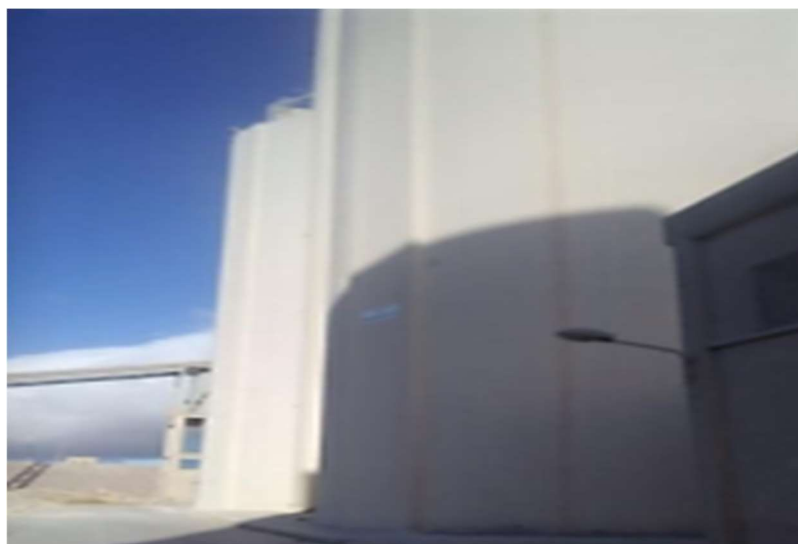


Figure II.19. Les silos d'homogénéisation, cimenterie d'El Ma Labiod – Tébessa.

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.

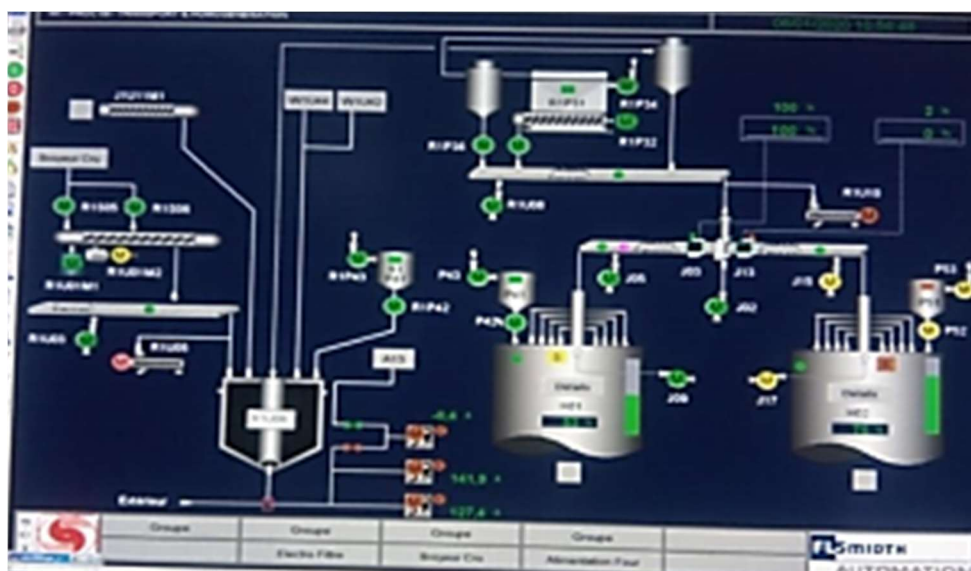


Figure II.20. Processus d'homogénéisation.

II.2.10. Zone de cuisson

La ligne de cuisson est constituée de:

II.2.10.1. Préchauffer ou cyclones

Les gazes 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 (CO₂) et son eau.

C'est un échangeur à contre courant destiné à préchauffer la farine avant son entrée dans le four, en récupérant la chaleur de gaz sortant du four « environ égale à 100 °C ».

Par le fait que l'argile et le calcaire ont la même densité (2,70 g/cm³), un exhausteur monté sur les cyclones aspire les gazes de combustions et le mélange carrière, faisant une tornade garantie que tous les grains de la crue subissent la chaleur des gazes.



Figure II.21. Le préchauffage.

II.2.10.2. 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 schnick, aéro-glissières et air lift. Le schéma montre le circuit d'alimentation du four

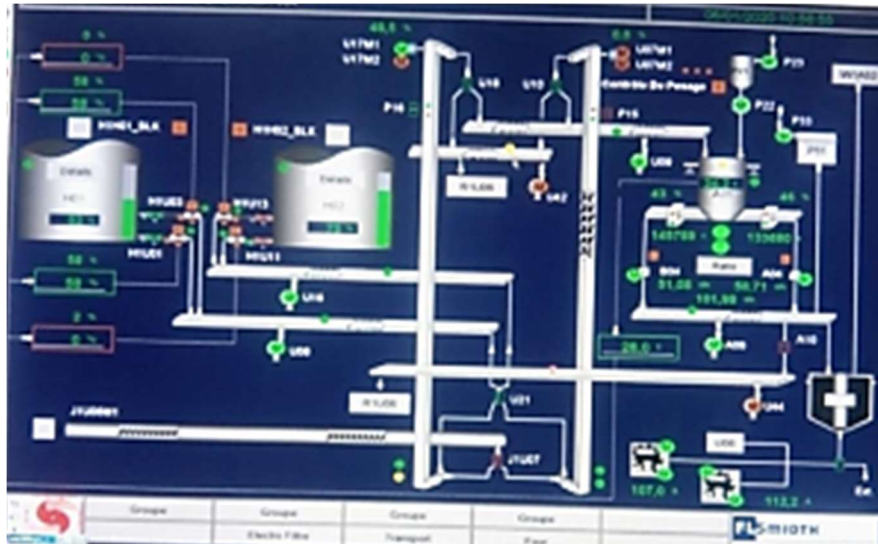
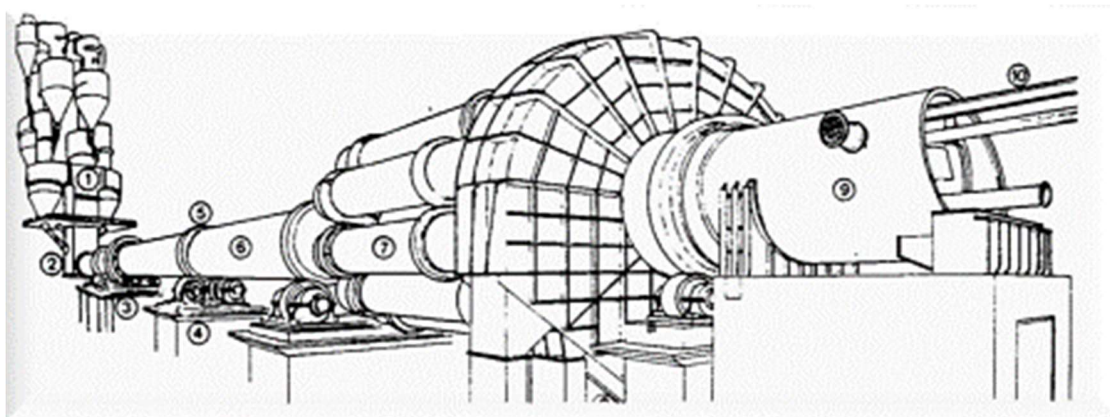


Figure II.22. Alimentation four.



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

Figure II.23. Four moderne à quatre étages de cyclones [23].

II.2.10.3. Four rotatif

Le four constitue par une virole cylindrique de 90m de long et de 5,6 m de diamètre protégé par de la brique réfractaire), incliné selon un angle de 1 à 4 degrés par rapport à l'horizontale. Le calcaire est chargé à l'extrémité supérieure, le combustible et l'air comburant étant brûlé à l'extrémité inférieure.



Figure II.24. Four rotatif, cimenterie d'El Ma Labiod – Tébessa.



Figure II.25. Clinkérisation (le four).

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

II.2.10.4. Refroidisseur

Le refroidisseur a pour rôle d'abaisser la température du clinker tombant du four à une température d'environ 1450 °C jusqu'à 80-100 °C. Il est équipé d'une batterie de ventilateurs fournissant l'air de refroidissement.

II.2.10.5. Transport et Stockage 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.

Le clinker est stocké dans des silos à clinker qui d'une part, confèrent à l'atelier de broyage du clinker (étape suivante) une auto nomade fonctionnement en cas d'arrêt imprévu du four rotatif et d'autre part, protègent le clinker d'une dégradation physico-chimique que causerait le stockage prolongé à l'air libre.



Figure II.26. Silos de stockage du clinker.

II.2.10.5. Alimentation du broyeur du clinker

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).



Figure II.27. 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 [29].



Figure II.28. L'alimentation du broyeur ciment.

II.2.10.6. Broyage du clinker

Le broyage du clinker s'effectue à l'aide d'un broyeur a deux compartiments à commande centrale travaillant en circuit fermé avec un séparateur dynamique a cyclone extérieur:

- L'air de ventilation du broyeur assure des conditions d'opération favorables.
- L'évacuation du ciment sur les silos de stockages est assurée par une pompe pneumatique.

Le clinker peut être complété par toute une gamme de constituants ajoutés sous forme pulvérulente. Cette opération est déterminante dans la phase finale de la fabrication du ciment [30].

Les propriétés de résistance d'un ciment ne sont pas déterminées seulement par sa teneur en divers minéraux de clinker mais surtout par sa finesse de broyage il faut que les particules du ciment soient inférieures à 100 microns et que la surface de ces particules avec le milieu extérieur est maximum pour faciliter l'hydratation au moment de la prise.

Dans la cimenterie d'Elma Labiod, le broyage du ciment est assuré par broyeur à boulet UNIDAN (débits : 100 t/h) en circuit fermé, de 40 x 12 m équipé d'un séparateur à vitesse réglable qui sépare les fines des grosses ; les fines passent aux silos pour stockage et les grosses retournent vers le broyeur.

Le clinker est normalement sec et ce broyeur est doté à son entrée d'une roue à pales au lieu d'un compartiment de séchage et il n'y a pas de tirage d'air chaud [23].

II.2.10.7. Stockage du ciment

Le stockage du ciment est fait dans des 3 silos de capacité unit aire qui peut atteindre 10.000 t.

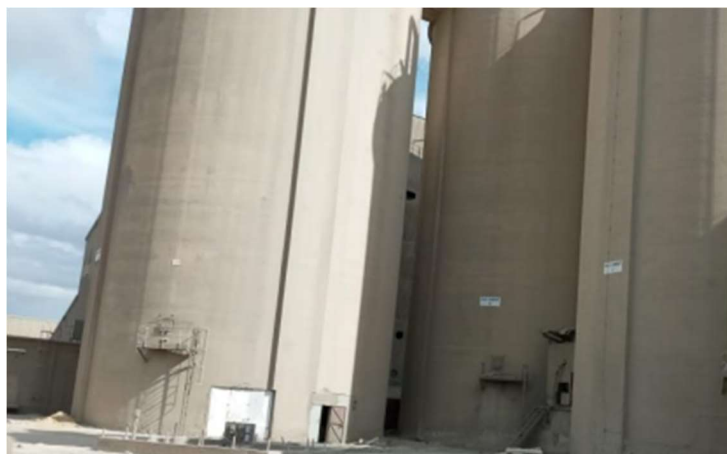


Figure II.29. Silos de stockage ciment, cimenterie d'El Ma Labiod – Tébessa.

II.2.10.8. Expédition du ciment

C'est une comprennent le stockage du ciment dans des silos de ciment pour alimenter par la suite les ateliers d'ensachage pour l'expédition du ciment.

L'extraction est réalisée au moyen d'un système d'élévation du ciment se trouvant au fond du silo et un ensemble d'élevateurs assurant son acheminement vers les ensacheuses ou vers les portes de chargement en vrac et en sac.



Figure II.30. L'ensacheuse.

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 désaéragé, 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 [23].

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.

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.



Figure II.31. Stockage du clinker incuit et mal cuit à l'air libre, cimenterie d'El Ma Labiod – Tébessa.

II.3. Problème du clinker incuit

La politique d'assurance de qualité adoptée par la SCT conduit au rejet des produits non conformes, tout au long de la chaîne de production, tel que le rejet du clinker incuit et mal cuit.

Ce clinker rejeté est dû aux erreurs de pilotage de la phase de cuisson, ainsi qu'aux arrêts et redémarrage du four à cause des coupures d'électricité, de panes ou des arrêts planifiés.

Cela engendre des problèmes environnementaux et influe sur la production planifiée.

II.4. Conclusion

D'après cette analyse de la cimenterie d'El Ma Labiod – Tébessa, tout cet enchaînement d'ateliers entraînant le processus de fabrication du ciment au sein de l'entreprise, ne serait entièrement effectif que si ce dernier est maîtrisé et géré dans un cadre garantissant la disponibilité et la performance des équipements tout en assurant la qualité de ciment fabriqué selon les normes et la demande des clients.

Chapitre III
Matériaux et méthodes



III.1. Introduction

La caractérisation et la valorisation d'un matériau nécessite un nombre d'essais pour vérifier les conditions et les exigences technique pour l'emploi de ce matériau.

Dans ce chapitre on vas présenter les différents matériaux utilisés, les méthodes expérimentales appliquées et les paramètres étudiés pour exploiter des matériaux qui ne conviennent pas comme clinker, ou nous disons dans un langage plus correct clinker incuit et clinker mal cuit et les utiliser comme ajout cimentaire.

III.2. Matériaux utilisés

III.2.1. Le clinker

Le clinker (KK) utillisé est celui de la cimenterie d'El Ma Labiod. Il represente le constituant principal d'un ciment Portland.

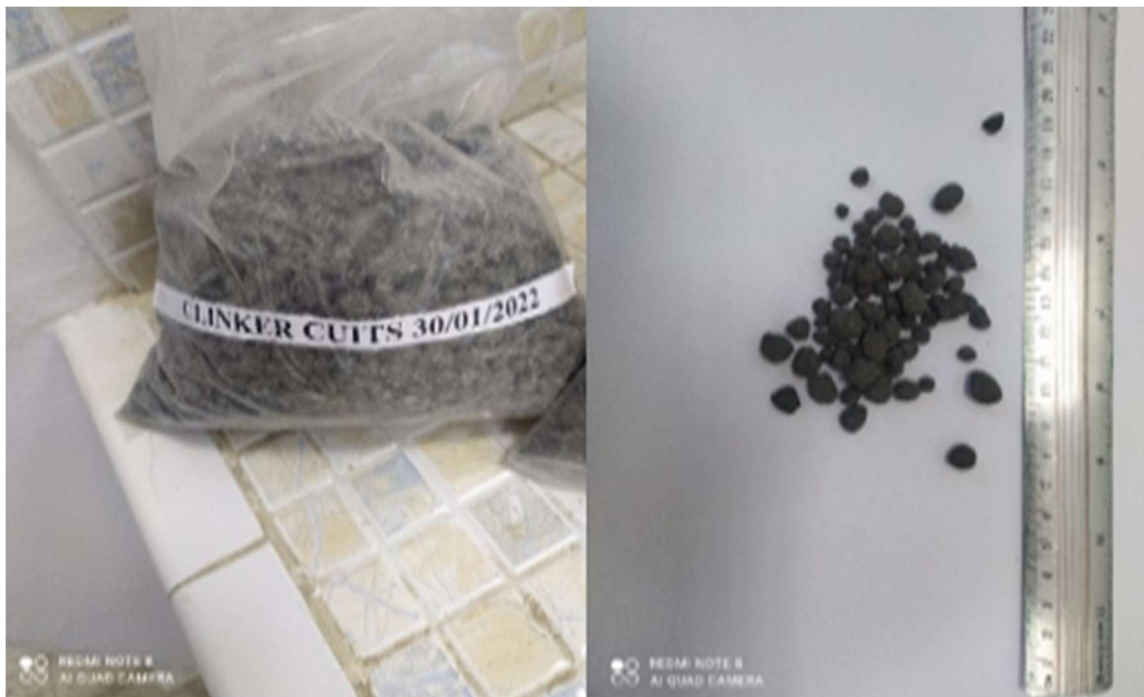


Figure III.1. Echantillon prélevé du bon Clinker.



Figure III.2. Echantillon prélevé de Clinker incuit et mal cuit.

Son degré de cuisson (clinkérisation) est contrôlé en premier lieu par la mesure de sa masse volumique apparente après refroidissement, appelée aussi poids au litre (PL) par le service de contrôle de qualité de la cimenterie:

- 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.

III.2.2. Gypse

Le gypse utilisé provient de Ain Mlila. C'est une espèce minérale composée de sulfate di hydraté de calcium de formule $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Le mot gypse désigne ainsi à la fois un corps chimique composé minéral naturel et une roche évaporite majeure.

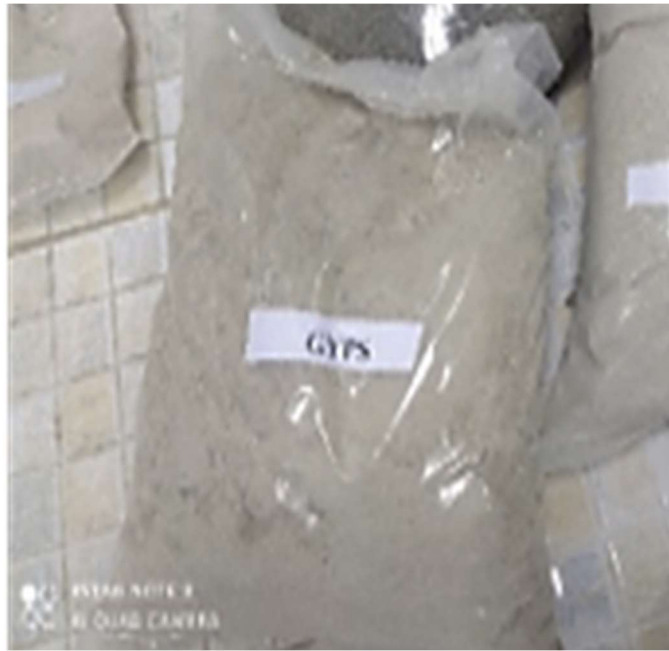


Figure III.3. Echantillon prélevé de gypse.

III.2.3. Sable normalisé

Le sable est le constituant du squelette granulaire qui a le plus d'impact sur les qualités du béton et du mortier. Il doit être propre et ne pas contenir d'éléments nocifs [15].

Dans cette étude expérimentale, on a utilisé un sable normalisé (sable normalisé ISO). C'est un sable naturel, siliceux notamment dans ses fractions les plus fines. Il est propre, dont les grains sont de forme généralement isométrique et arrondie.

Le sable est conditionné en sachets de polyéthylène contenant chacun $1\,350 \pm 5$ g comme le montre la figure III.4.



Figure III.4. Sable normalisé conformément à la norme EN 196-1.

- **Analyse chimique du sable normalisé**

La composition chimique du sable normalisé est donnée dans le tableau suivant.

Tableau III.1. Composition chimique du sable normalisé.

Composant	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	P ₂ O ₅	P.A.F
Teneur %	98,05	0,54	0,07	0,00	0,16

- **Granulométrie du sable normalisé**

La norme EN 196-1 exige que granulométrie d'un sable normalisé doit être comprise dans un fuseau granulométrique (limite inférieure et supérieure du pourcentage de chaque dimension).

Tableau III.2. Compositions granulométrique du sable normalisé [31].

Tamis ouverture de mailles (mm)	Refus cumulés en %
0,08	99±1
0,16	87±5
0,50	67±5
1,00	33±5
1,60	7±5
2,00	0±

Les propriétés physiques et chimiques du sable normalisé utilisé sont présentées dans le tableau suivant.

Tableau III.3. Propriétés physiques et chimiques du sable utilisé.

Forme	Solide cristallin en grain angulaire
Couleur	Gris ocre
Teneur en silice	> 95 %
Masse volumique apparente (g/cm ³)	1,70
Masse volumique absolue (g/cm ³)	2,63
Module de finesse (MF)	2,72
Valeur du bleu méthylène (VB)	0,59

III.2.4. Eau de gâchage

L'eau joue un rôle important, elle sert à hydrater le ciment, elle facilite aussi la mise en œuvre du béton ou du mortier, ainsi elle contribue à son ouvrabilité. L'eau de gâchage utilisée pour la confection des mortiers doit être pure le plus possible.

Toutes les eaux peuvent être utilisées pour gâcher les bétons et les mortiers, l'eau potable est toujours utilisable, mais dans certains cas l'eau contient des impuretés, ce qui nécessite une analyse chimique pour déterminer les impuretés qui s'y trouvent. Ces impuretés sont, soit des composés chimiques qui peuvent être actifs vis-à-vis du ciment, des granulats ou des armatures, soit des particules en suspension qui sont indésirables. L'excès d'impuretés détériore les propriétés physiques et mécaniques du béton (prise et résistance), les propriétés esthétiques (tâches, efflorescences), la durabilité (corrosion des armatures, ... etc.)

L'eau utilisé ici est de l'eau potable du laboratoire de CETIM, qui est alimenté par le réseau publique.

III.3. Méthodes expérimentales

III.3.1. Programme du travail expérimental

L'étude expérimentale est menée selon le programme suivant :

- Prélèvement prélevé des échantillons de la cimenterie de Tébessa, et ces expérimentations ont été conduites dans le laboratoire d'analyse de CETIM situé dans la wilaya de Boumerdès,
- Partie « 01 » : Préparation des échantillons pour la détermination de la composition chimique et minéralogique du Matériaux utilisés :
 - ✓ Concassage et broyage
 - ✓ Analyse physique :
 - Masse volumique apparente et absolue du clinker.
 - Mesure de la surface spécifique de Blain (SSB) du clinker broyé.
 - Essai d'activité minérale du clinker incuit.
 - Analyse par diffraction des rayons X (DRX)
 - Observation du ciment au microscope optique
 - ✓ Analyse chimique
 - La composition chimique du clinker (XRF).
 - La chaux libre des échantillons de clinker.
 - La perte au feu (PAF) du clinker.
 - Le résidu insoluble du clinker.

➤ Partie « 02 » : Préparation des échantillons du ciment « Répété tout l'analyse pour les matériaux utilisé »

✓ Essai physique mécanique

• Essai sur pâtes cimentaires:

- La consistance normale.
- Temps de prises.
- Détermination de l'expansion

• Essais sur mortiers :

Préparation des éprouvettes (Norme EN 196-1)

• Essai de résistance mécanique :

- La résistance à la traction par flexion ;
- Résistance à la compression.

III.3.2. Préparation des échantillons (Concassage Et Broyage)

Après avoir prélevé les échantillons que je vais utiliser pour préparer le ciment, et mis ces échantillons dans le concasseur à mâchoires pour réduire la granulométrie des matériaux utilisés comme indiqué sur les figures. Ensuite, nous mettons les échantillons dans un broyeur spécial afin de faire les premières analyses pour connaître les propriétés en obtenant les poudres des matériaux utilisés, finement broyées pendant 50 minute.



Figure III.5. Concasseur retsch BB 100 mangan.



Figure III.6. Broyeur spécial pour échantillons d'analyse.

III.3.3. Analyse physique

III.3.3.1. Masses volumiques du clinker.

III.3.3.1.1. Masse volumique apparente

• Définition

La masse volumique apparente d'un matériau est la masse volumique d'un mètre cube du matériau. Pris en tas, comprenant à la fois des vides perméables et imperméables de la particule ainsi que les vides entre particule.

La masse volumique apparente (ρ_{app}) d'un matériau pourra avoir une valeur différents suivant qu'elle sera déterminée à partir d'un matériau compacté [32].

• Matériel Nécessaire

- ✓ Un entonnoir monté sur trépied ;
- ✓ Un récipient calibré ;
- ✓ Une règle à araser ;
- ✓ Une balance.

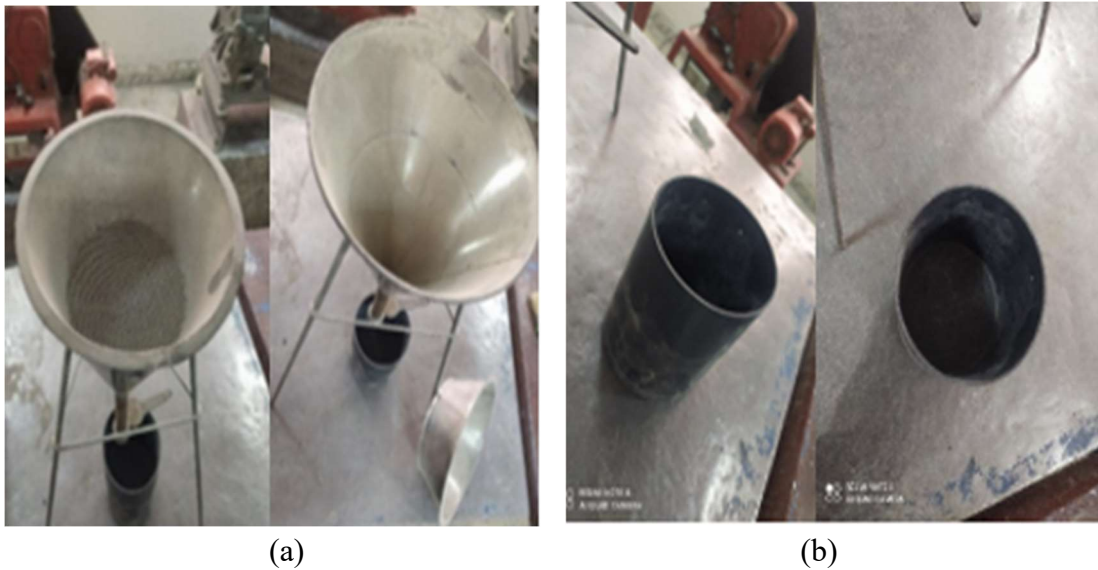


Figure III.7. Dispositif pour mesure de la masse volumique apparente : (a) Entonnoir monté sur trépied ; (b) Récipient calibré.

- **Mode expérimental**

On pose l'entonnoir sur le trépied, puis on pèse un récipient d'étalonnage Vide (m_0) d'un volume 1 litre et on le place sous l'entonnoir.



Figure III.8. Étapes de mesure de la masse volumique apparente.



Figure III.9. Mesurer de la masse volumique apparente.

On commence à verser le ciment à travers l'entonnoir jusqu'à ce qu'il rejette. Puis, on prend le bord droit et on retire l'excédent de l'échantillon en arasant avec une règle métallique. Ensuite, on pèse le récipient quand il est plein.

L'essai est répété 3 fois pour un volume de 1 litre est la moyenne de ces essais donne la valeur de la masse volumique apparente.

III.3.3.1.2. Masse volumique absolue

• Définition

La masse volumique absolue (ρ_{abs}) est la masse par unité de volume de la matière que constitue le granulat, sans tenir compte des vides pouvant exister dans ou entre des grains.

• Matériel Nécessaire

- ✓ Densimètre ;
- ✓ Une masse M du matériau ;
- ✓ Le liquide non réactif avec le matériau (benzène ou kérosène pour le ciment et l'eau) ;
- ✓ Une balance ;
- ✓ Un entonnoir a long col ;
- ✓ Une tige métallique ;
- ✓ Une spatule ;
- ✓ Un bain thermostatique ;
- ✓ Dessiccateur ;
- ✓ Etuve.



Figure III.10. Étapes de travail pour la mesure de la masse volumique absolue.

- **Méthode expérimentale**

Pour la détermination de la masse volumique des matériaux, il faut suivre les étapes suivantes :

- ✓ Mettre environ 100 gr de matériaux dans l'étuve à 105°C pendant deux heures ;
- ✓ Mettre le matériau dans un dessiccateur (20 minutes) ;
- ✓ Peser une masse $m = 64$ gr du matériau (KK cuit ; KK incuit ; KK mal cuit) ;
- ✓ Introduire le liquide non réactif avec le matériau (benzène ou kérosène pour le ciment et l'eau) dans le densimètre. La graduation inférieure est notée V_0 ;
- ✓ Placer le densimètre dans un bain thermostatique à température constante ($20 \pm 1^\circ\text{C}$) ;
- Attendre 20 minutes et corriger le niveau si nécessaire après stabilisation de la température ;
- Introduire la poudre de matériaux dans le Densimètre, et éviter toute perte de matériaux ;

- Agiter doucement en faisant tourner le densimètre pour chasser l'air entraîné par la poudre ;
- Remettre le densimètre dans le bain thermostatique ;
- Après stabilisation du niveau lire le volume après introduction de la poudre dans le densimètre soit V_1 .
- Calcul de la masse volumique absolue par la relation:

$$P = \frac{M}{V_1 - V_0} \quad (\text{g/cm}^3)$$

III.3.3.2. Mesure de la surface spécifique de Blain (SSB)

- **Définitions et terminologie**

Les ciments se présentent sous forme de poudre finement divisée. Cette finesse est une caractéristique importante exprimée en (cm^2/g). Lors du gâchage, plus la surface de ciment en contact avec l'eau est grande et plus l'hydratation est rapide et complète.



Figure III.11. Appareil Blaine.

Dans les cas courants, elle est de l'ordre de 3000 à 3500 cm^2/g . Plus la finesse de mouture est grande, plus la vitesse des réactions d'hydratation est élevée et plus ses

résistances mécaniques à un âge jeune (à 2 jours de durcissement) sont grandes. En revanche, plus le ciment est fin plus le retrait est important.

- **Matériel Nécessaire**

C'est le perméabilimètre de Blaine (figure III.12).

- **Principe**

La surface spécifique a été déterminée par l'appareil Blaine ou (Le densimètre de le Chatelier) selon la norme NF EN 196-6 [33]. Les étapes suivies lors de cette détermination sont les suivantes :

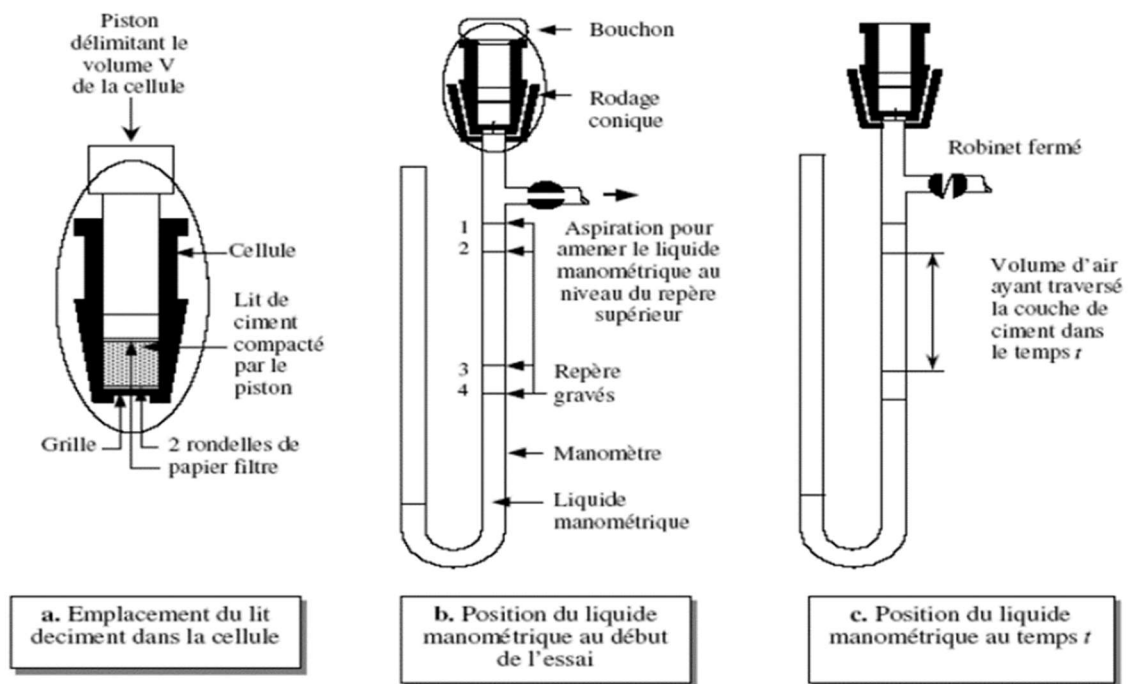


Figure III.11. Principe de fonctionnement de l'appareil Blaine.

Faire passer, dans des conditions bien définies, une certaine quantité de ciment (par exemple) ; mesurer le temps de passage, et en déduire la surface spécifique par application d'une formule empirique.

La masse du ciment est déterminée par :

$$m = \rho_{\text{abs}} \times V_{\text{abs}}$$

$$m = \rho_{\text{abs}} \times (V_{\text{app}} - V_{\text{vides}})$$

• **Méthode expérimentale**

1. Placer grille + papier filtre + ciment (quantité calculée) + papier-filtre,
2. Tasser et ôter le piston,
3. Vérifier le niveau du liquide : il doit arriver au trait inférieur (4) ; si nécessaire, parfaire ce niveau,
4. Placer la cellule sur l'ajutage. La jonction doit être étanche (très mince couche de vaseline). S'assurer de l'étanchéité de l'ensemble (boucher la cellule avec le pouce, aspirer avec la poire pour faire monter le liquide aux environs du trait supérieur (1), si on ferme le robinet, le niveau doit rester constant).
5. L'étanchéité étant réalisée, aspirer le liquide jusqu'à ce qu'il atteigne le trait supérieur (1), et fermer le robinet.
6. L'air traverse le ciment, et le niveau du liquide baisse : chronométrer le temps que met le liquide à passer du 2^e trait au 3^e trait ; soit t (en secondes) la moyenne des temps résultant de 3 mesures consécutives.
7. Noter la température.
8. En déduire la surface spécifique [32]:

$$SSB = K. \sqrt{e^3} \cdot \sqrt{t} / \rho_{\text{abs}} \cdot (1-n) \cdot \sqrt{\eta}$$

avec :

S : Surface spécifique (cm²/g)

K : constante de l'appareil, (k=2,852)

e: Porosité du ciment dans la cellule.(e=0.500)

t : Temps mesuré en secondes

ρ_{abs} : masse volumique absolue du matériau (g/cm³)

n : porosité (en général : 0,50)

η : viscosité dynamique de l'air, à la température de l'essai.

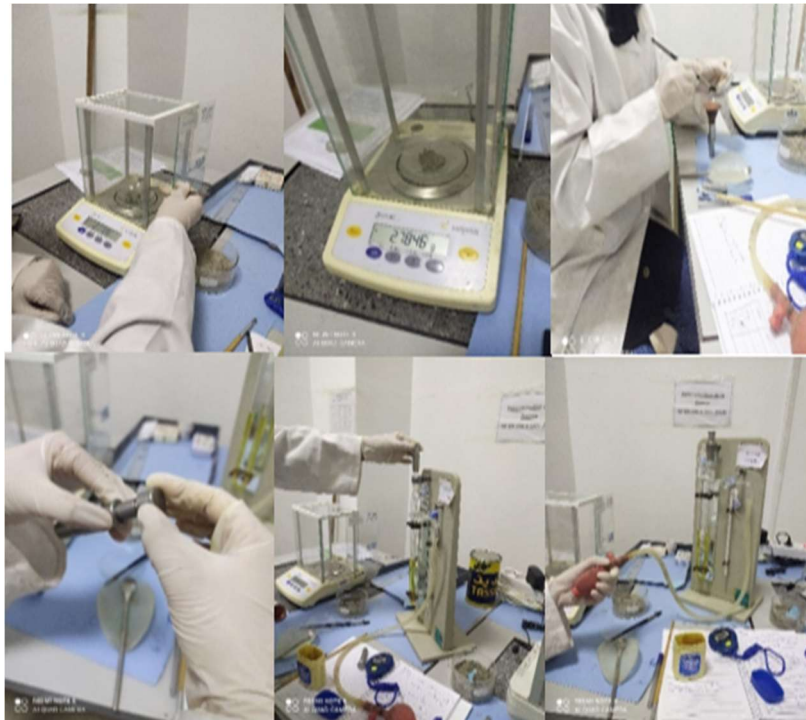


Figure III.12. Étapes de travail pour la détermination de la surface spécifique de Blain (SSB).

III.3.4. Analyse chimique

III.3.4.1. Contrôle de la pouzzolanité (*Essai d'activité minérale*)

- **Définition**

L'essai consiste à mesurer la quantité de chaux absorbé par 1g de pouzzolane durant 30 jours à la température ordinaire.

La pouzzolanité est l'aptitude de certains matériaux, dépourvus de propriétés hydrauliques propres, à fixer l'hydroxyde de calcium en présence d'eau pour donner des hydrates analogues à ceux du ciment Portland. Cette propriété se constate à des degrés variables dans les matériaux riches en silice libre non quartzreuse, quelle que soit leur origine : matériaux naturels (gaize, diatomites, cendres volcaniques) matériaux artificiels (cendres volantes, fumées de silice, argiles calcinées, cendres de balles de riz).

L'action pouzzolaniques se caractérise par deux aspects distincts:

- La quantité totale d'hydroxyde de calcium qu'une pouzzolane est capable de fixer.
- La rapidité de fixation d'hydroxyde de calcium par la pouzzolane.

Le principe d'essai consiste à déterminer la quantité de chaux fixée par 1g du matériau testé dans des conditions très précises, en déterminant la quantité d'hydroxyde de calcium après un contact de jours du matériau avec une solution de la chaux.

- **Matériel et matériaux Nécessaire**

- ✓ Solution de la chaux (1.1g/l) ;
- ✓ L'eau distillé ;
- ✓ Dessiccateur ;
- ✓ Bicher ;
- ✓ Phénophtaléine ;
- ✓ NHCl (0,05) ;
- ✓ Appareil de titrage ;
- ✓ Agitateur magnétique ;
- ✓ Burette ;
- ✓ Pipette.

- **Méthode expérimentale**

1- Préparation de la solution pour l'expérience (la chaux): On met 4 g de CaO au four pour la cuisson, Puis on le sort et on le met dans le dessiccateur pendant 24h. Ensuite, on prend une quantité de 1,1 g ; on ajoute un peu d'eau distillée et on mélange avec un agitateur magnétique.

2- Enfin, on verse la solution du béccher dans le ballon étalon d'un volume de 1 litre et on continue à verser l'eau distillée à 0, et on répète le processus tous les deux jours jusqu'à ce qu'un mois se soit écoulé. Cette solution est utilisée comme témoin.

3- Etape de l'expérience :

- ✓ Etalon pour l'expérience :

On prend 50 ml de la solution deux gouttes de solution Phénophtaléine, on agite en la plaçant sur l'agitateur magnétique jusqu'à ce que la couleur devienne violette.

Ensuite, nous commençons le processus de titrage en plaçant avec une solution NHCl (0.05) à titrer dans la burette au volume 0 (il faut confirmer le volume en regardant horizontalement). Enfin, on titre la solution préparée jusqu'à ce que la couleur passe du violet au blanc, et on prend la valeur lorsque la couleur change.

- ✓ Essais sur les échantillons étudiés (KK incuit et KK mal cuit) :

- On pèse 1g de l'échantillon.
- On Prélève l'échantillon et on le met dans un tube à essai de 100 ml.

- On ajoute 50 ml de la solution avec l'échantillon, on ferme le tube à essai et on agite bien.
- Ensuite, on ajoute la solution jusqu'à ce qu'on atteigne 100 ml de volume et la on laisse pendant 24 h sans la déplacer.
- Le lendemain, on prend l'éprouvette, on verse 50 ml dans un bécher pour calibrer de la même façon que la solution (référence).
- On prend 50 ml de la solution et on la remet dans le tube à essai pour répéter l'opération du titrage chaque 2 jours pendant 30 jours.

Un essai à blanc sans matériau est conduit parallèlement pour servir de référence. Le pouvoir pouzzolanique du matériau sera prouvé si de la chaux disparaît du milieu réactionnel. La quantité de chaux dosée pour l'essai avec le matériau étudié doit être alors inférieure à la quantité de chaux dosée pour l'essai à blanc. La quantité fixée pendant 30 jours par 1g de pouzzolane est:

$$Q_{CaO} = \frac{16 V_0 - (\sum_{i=1} V_i - 2V_{15}) \times N_{HCl} \times m_{eq.g} CaO \times 100}{2}$$

V0 : volume de HCl nécessaire pour neutraliser 50ml de la solution de chaux.

Vi : volume de l'ajout minéral.

V15 : Volume de l'ajout minéral au 15ème jour.

NHCl : normalité de la solution de HCl : NHCl = 0,05N.

meq. g. CaO : masse de l'équivalent de gramme de CaO = 0,028.

La classification des additifs selon l'activité pouzzolaniques est regroupée dans le tableau suivant.

Tableau III.4. Classification des additifs selon l'activité pouzzolaniques.

Additifs	Activité pouzzolanique
Additif actif faible	30 à 50 mg / g
Additif actif moyen	50 à 70 mg / g
Additif actif fort moyen	70 à 100 mg / g
Additif actif fort	100 à 150 mg/ g
Additif actif très fort	Plus de 150 mg / g

III.3.4.2. Analyse par diffraction des rayons X (DRX)

- **Définition**

Le DRX est employé pour identifier les minéraux, estimer qualitativement leurs concentrations, et déterminer les dimensions du paramètre cristallographique. Chaque minéral a un type unique de DRX composé d'une série de pics. Les programmes informatiques mis au point réduisent considérablement les complexités liées à l'identification des espèces minérales dans des mélanges complexes.

- **Objectif**

Identifications des phases minérales.

Principe d'analyse

Les échantillons solides finement broyés, sont montés sur des porte échantillons adéquats, sont soumis à un faisceau des rayons X pour être diffractés par les plans réticulaires des phases cristallines, en effet il existe une relation entre l'angle du faisceau diffracté et la distance réticulaire séparant les plans d'atomes au sein d'un réseau cristallin; celle-ci est régie par la loi de Bragg:

$$n\lambda = 2d\sin\theta$$

Où :

λ : longueur d'onde en angströms, d : distance réticulaire en angströms et θ : angle de diffraction ou de réflexion en degrés.

Des diffractogrammes sont obtenus à l'aide d'un diffractomètre à rayon X. Les positions et les intensités de pics observés sont comparés aux fichiers de référence PDF-ICDD (Powder Diffraction File - International Center for Diffraction Data) pour l'identification des phases minéralogiques présentes. Et éventuellement l'utilisation de RIR (Reference Intensity Ratio) inclus dans le logiciel HighScore Plus du fichier PDF-ICDD pour l'estimation semi quantitative des phases correspondantes quand celle-ci est requise et possible.



Figure III.13. Étapes du Préparation de la pastille des échantillons.

- **Condition expérimentale**

- Diffractomètre X'Pert PRO, tube radiogène à anticathode de cuivre ;
- Logiciel pour traitement des données : HighScore Plus ;
- Longueur d'onde $\text{CuK}\alpha$ [\AA] : 1,5418 ;
- Angle de départ [$^{\circ}2\text{Th.}$] : 2,0000 ;
- Angle final [$^{\circ}2\text{Th.}$] : 70,0000 ;
- Taille du pas [$^{\circ}2\text{Th}^{\circ}$] : 0.0170 ;
- Temps du pas [s] : 45.8746 ;
- Puissance du générateur à RX : 30 mA, 40 kV.

- **Matériel et matériaux Nécessaire**

- Diffractomètre X'Pert PRO ;
- Logiciel pour traitement des données : HighScore Plus ;
- Echantillon.

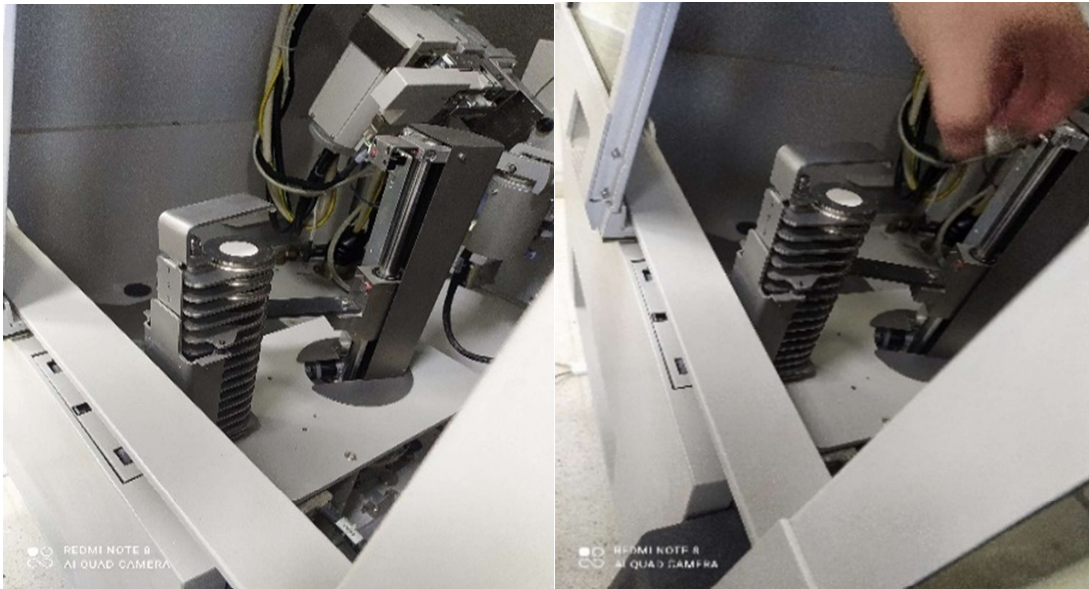


Figure III.14. Diffractométrie des rayons X.

- **Méthode expérimentale**

1. Préparation de la pastille clinker pour analyse par Diffractométrie des rayons X (DRX)
2. L'analyse par radiocristallographie (Diffractomètre X'Pert PRO) et démarré Logiciel.

III.3.4.3. Observation du ciment au microscope optique polarisant

- **Définition**

L'observation du ciment à l'aide d'un microscope optique de type ZEISS AXIOSKOP.40 (voir la figure ci-dessous) révèle ses différents constituants des échantillons étudiés.



Figure III.14. Microscope ZEISS AXIOSKOP.40.

- **Matériel et matériaux Nécessaire**

- ✓ Appareil Alpine ;
- ✓ Balance électronique ;
- ✓ Microscope ZEISS AXIOSKOP.40.

- **Méthode expérimentale**

- 1. Préparation du nodule**

- a. **la détermination Refus sur tamis de 45 μm**

Objet

Ce mode opératoire décrit comment déterminer le refus par tamisage Alpin selon la norme EN 196-6.

Principe

La finesse du ciment est mesurée par tamisage sur des tamis normalisés. Ainsi est déterminé le pourcentage du ciment dont les dimensions des grains sont supérieures à l'ouverture de maille spécifiée.

- **Matériel et matériaux Nécessaire**

- ✓ Tamis d'essai de diamètre nominal entre 150mm et 200 mm et de profondeur 40 mm à 100 mm garni d'une toile de mailles par ex (45 ; 90 ; 200) μm d'ouverture en acier inoxydable ;
- ✓ Alpin (Air jet) ;

- ✓ Une balance pouvant peser jusqu'à 25g, à 0,01g près ;
- ✓ Etuve (105 ± 5) °C ;
- ✓ Brosse douce pour nettoyer les mailles des tamis ;
- ✓ Maillet.
- **Étape opératoire pour vérification de Refus sur tamis**
- Peser ($25 \pm 0,5$) g de ciment (m) à 0.01g près. fixer le tamis d'essai d'ouverture sur l'appareillage et transfère la totalité de la prise d'essai sur le tamis.
- Remettre le couvercle et mettre l'appareillage en route. Si le matériau adhère au couvercle, taper doucement le centre du couvercle avec le maillet.
- Après ($5 \pm 0,2$) min, arrêter l'appareillage et enlever soigneusement le tamis.
- Transférer le matériau retenu sur le tamis dans un réceptacle. et nettoyer les mailles des tamis par bourse douce.
- Déterminer la masse du refus et enregistrer la masse à 0.01g près.
- Remettre tout le refus dans le tamis. Répéter les étapes de pesée et de tamisage jusqu'à attendre le point limite de tamisage et enregistrer la masse à 1mg près le Point limite de tamisage est défini comme étant le moment ou pas plus de 0.2% de la masse de prise d'essai d'origine passe à travers le tamis en 3min.
- Exprimer s'amasse comme étant un pourcentage R1 de la quantité initialement placée dans le tamis à 0.1% près.
- Répéter l'ensemble du mode opératoire en utilisant un échantillon frais de 25g pour obtenir R2.
- Le refus de ciment R étant la moyenne R1 et R2 en pourcentage



Figure III.15. Étape opératoire pour vérification de Refus sur tamis

- **Expression des résultats**

$$R = [(R1+R2) / 2] * 4$$

R : le refus en pourcentage (%)

R1 : le refus de l'essai 1 en pourcentage (%)

R2 : le refus de l'essai 2 en pourcentage (%)

b. Ajout d'un liquide pour solidifier l'échantillon



Figure III.16. Étape opératoire pour ajout d'un liquide pour solidifier l'échantillon.

2. Vue au microscope



Figure III.17. Vue au microscope.

III.3.4.4. Analyse chimique par fluorescence X

Elle a été réalisée par spectrométrie de fluorescence X au laboratoire de chimie à CETIM. Cette technique est basée sur l'analyse du spectre émis par un échantillon excité par une source primaire de rayons X. Ce spectre dit de fluorescence est caractérisé par des éléments atomiques qui composent l'échantillon. C'est une technique d'analyse élémentaire non destructive de l'échantillon. Cette méthode permet la détermination de la composition élémentaire de l'échantillon en oxydes de manière qualitative et quantitative. La technique d'analyse comprend deux parties:

- Une source d'excitation provoquant l'émission d'un spectre de rayon X caractéristique de la composition de l'objet.
- Un détecteur et un analyseur de rayonnement identifiants et quantifiant les intensités des raies composant le spectre.

- **Matériel et matériaux Nécessaire**

- ✓ Etuve ;
- ✓ Balance électronique de précision de 0,1 mg ;
- ✓ Creuset ;
- ✓ Dessiccateur ;
- ✓ Dispositif de préparation de la perle ;
- ✓ Logiciel pour traitement des données ;
- ✓ Appareil à fluorescence X.



Figure III.18. Etuve de laboratoire.



Figure III.19. Dispositif de préparation de la perle.



Figure III.20. Appareille à fluorescence X.



Figure III.21. Étape de préparation de la perle.



Figure III.22. Étape Analyse par fluorescence X.

- **Méthode expérimentale**

1. Préparation de la perle.
2. Analyse par fluorescence X.

III.3.4.5. Détermination de la perte au feu « EN 196-2 » [34]

Objet

Ce mode opératoire a pour objet de définir la procédure à suivre pour déterminer la perte au feu dans les différentes matières.

- **Matériel et matériaux Nécessaire**

- ✓ Balance de précision de 0.1 mg ;
- ✓ Creuset en platine ou en porcelaine préalablement calciné ;
- ✓ Dessiccateur ;
- ✓ Four à moufle (950 ± 25) °C ;
- ✓ Etuve.

Remarque : les matières à analyser doivent être séchées à 105°C (sauf le gypse et le ciment à 40 ± 5 °C)

- **Méthode expérimentale**

- ✓ Peser dans un creuset en platine ou en porcelaine préalablement calciné et taré à $\pm 0,0005$ g, une masse de $(1,00 \pm 0,05)$ g de ciment soit m1 Porter le creuset avec le couvercle et le contenu dans un four électrique à (950 ± 25) °C pendant 5 minutes.
- ✓ Retirer le couvercle et laisser le creuset dans le four pendant 10 min supplémentaire.

- ✓ Après écoulement des 15min ; sortir le creuset du four.
 - ✓ Mettre le creuset dans un dessiccateur jusqu'à stabilisation a la température ambiante, peser soit m2, remettre le creuset et son contenu dans le four pour une durée de 15 min et repeser.
 - ✓ La différence entre les deux pesées doit être < 0,0005 g sinon remettre de nouveau le creuset dans le four pendant 15 autres min jusqu'a à satisfaction de cette condition par les deux dernières pesées successives (EN 196-2 § 5.4.2).
- **Expression des résultats :**

Le pourcentage de la Pert au feu est exprimé par la formule suivante :

$$(PAF) = (m1 - m2) / m1 \times 100$$

Avec:

m1 : masse de la prise d'essai en grammes.

m2 : masse de la prise d'essai calcinée en grammes.



Figure III.23. Étape opératoire Détermination de la perte au feu.

III.3.4.5. La chaux libre des échantillons de clinker

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.

- **Matériel et matériaux Nécessaire**

- ✓ Pompe sous-vire ;
- ✓ Bucher ;
- ✓ Entonnoir ;
- ✓ Indicateur CaO ;
- ✓ Solution d'éthylène-glycol ;
- ✓ Plaque chauffante.

- **Méthode expérimentale**

- ✓ 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 la formule:
- ✓

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

Avec :

V_t : volume HCl consommé au titrage.

CST : 0,2422.



Figure III.24. Étape La chaux libre des échantillons utilise.

III.3.4.6. Détermination de Le résidu insoluble du clinker

- **Matériel et matériaux Nécessaire**

- ✓ Bêcher
- ✓ Eau distillée
- ✓ Acide chlorhydrique
- ✓ Un agitateur
- ✓ Filtrer (filtre moyen)
- ✓ Verre
- ✓ Une solution d'HCL
- ✓ Four 975°C
- ✓ Place chauffante
- ✓ Creuse platine
- ✓ Entonnoir

- **Méthode expérimentale**

- ✓ Introduire 1g de clinker dans un bêcher de 250 ml
- Ajouter 90 ml d'eau distillée
- Ajouter 10 ml d'acide chlorhydrique concentré tout en agitant
- Chauffer la solution tout en écrasant l'échantillon avec un agitateur en verre pendant 15 min (éviter l'ébullition)
- Filtrer le résidu sur filtre moyen

- Reprendre le filtre et son résidu dans le même béccher et y ajouter 10 ml de la solution Na_2CO_3 à 5% et chauffer à ébullition pendant 15 min
- Filtrer (filtre moyen) et laver le précipité avec l'eau distillée chaude de (proche du point d'ébullition)
- Laver le précipité 4 fois avec une solution d'HCL (1/9) jusqu'à $\text{PH} < 2$ puis avec l'eau distillé chaude jusqu'à disparition total des chlorures (test nitrate d'argent)
- Calciner le filtre et son contenu à 975 pendant 30 min (constance du poids)
 - **Résidu insoluble $\text{RI} = (\text{P1} - \text{P2}) * 100\%$**
- P1 : est la masse de la prise d'essai du ciment, en grammes
- P2 : est la masse du résidu insoluble calciné, en grammes



Figure III.25. Étape La Détermination de Le résidu insoluble du clinker.

III.3.3. Préparation des échantillons du ciment

Les mélanges de ciment préparés pour l'étude expérimentale sont confectionnés par substitution partielle du bon KK par le KK incuit et le KK mal cuit, comme il est indiqué dans le tableau III.5.

Tableau III.5. Composition des différents mélanges étudiés.

Constituant	Témoin	E1	E2	E3	E4	E5	E6
Bon KK (%)	95	90	85	75	90	85	75
KK incuit (%)	-	5	10	20	-	-	-
KK mal cuit (%)	-	-	-	-	5	10	20
Gypse (%)	5	5	5	5	5	5	5

III.4. Essais physiques et mécaniques

III.4.1. Essai sur pâtes cimentaires « EN 196-3 » [34]

III.4.1.1. Préparation de la pâte normale

Objet

Ce mode opératoire a pour objet de décrire comment préparer une pâte normale.

Domaine d'application

Ce mode opératoire s'applique à la préparation de la pâte normale pour réaliser les essais de l'expansion et de la mesure du temps de prise.

Matériel et matériaux Nécessaire

- Balance permettant de peser à ± 1 g.
- Cylindre gradué ou burette, permettant de mesurer à ± 1 ml.
- Malaxeur, conforme à la norme EN 196-1.
- Règle.
- Moule tronconique d'une profondeur de $(40,0 \pm 0,2)$ mm et d'un diamètre intérieur de (75 ± 10) mm.

Produits

- Mélanges de ciment préparés.
- Eau.

Méthode expérimentale

Malaxage

- Le malaxeur étant en position de fonctionnement :

- Verser dans le récipient la quantité d'eau préalablement déterminée par des tâtonnements successifs de manière à réaliser la consistance normale; lui ajouter (500 ± 1) g de liant pour remplir le moule tronconique.

- Cliquer sur démarrer.

- Le malaxeur tourne à la vitesse lente pendant 90s.

- Le mouvement s'arrête pendant 30s ; avec le batteur démonté de son axe, racler les parois et le fond du récipient de façon qu'aucune fraction de pâte n'échappe au malaxage.

-Après remontage du batteur, reprendre le malaxage pendant 90s à la vitesse lente.

-Une distance de (6 ± 2) mm entre la sonde et la plaque.

III.4.1.2.Expansion à chaud (stabilité de la pâte)

• Détermination de l'expansion

L'essai consiste à mesurer l'augmentation de volume provoquée lors de la réaction d'hydratation par la présence de l'oxyde de calcium ou de magnésium contenu dans les ciments étudiés.

Elle consiste à faire accélérer la réaction d'hydratation par un traitement thermique de la pâte pour pouvoir observer une expansion éventuelle des pâtes étudiées. La pâte de consistance normalisée est introduite dans deux moules en laiton. Les moules sont conservés pendant 24h dans l'armoire humide. Au bout de ce temps on mesure, à 0.5 mm près, l'écartement A des pointes des aiguilles. Le moule est entreposé dans la bouilloire pendant 3h ± 5mn à une température d'ébullition. Soit B l'écartement au bout de ce temps des pointes des aiguilles et soit C l'écartement après refroidissement à 20°C (voir la figure III. 17).

La stabilité est caractérisée par la différence entre les deux écartements C et A (C-A) :

- Stabilité = C-A
- Expansion = B-A

Objet :

Le mode opératoire décrit les modalités d'exécution de l'essai d'expansion à chaud au moyen de moules permettant la mesure de la déformation.

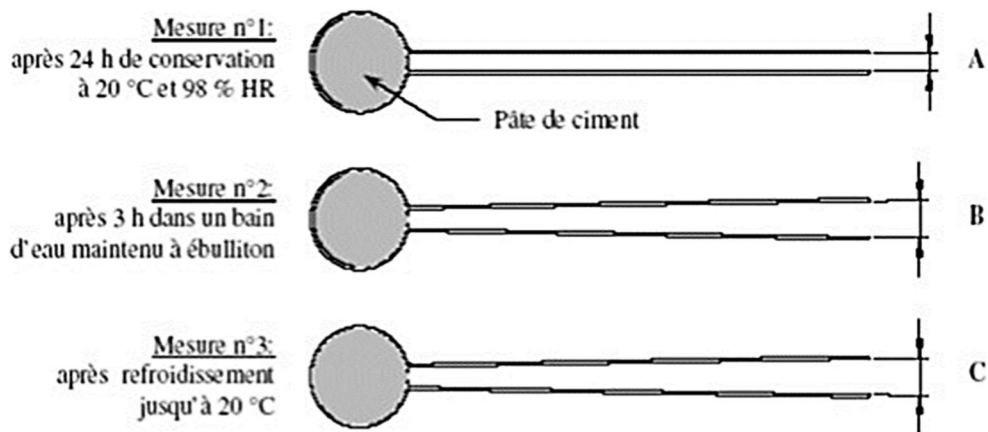


Figure III.26. Essai de stabilité avec l'appareil Le Chatelier.

- **Matériel et matériaux Nécessaire**

- Ciment
- Eau, de l'eau distillée ou désionisée doit être utilisée pour confectionner les éprouvettes. De l'eau potable peut être utilisée pour conserver et faire bouillir les éprouvettes.
- Balance permettant de peser à ± 1 g.
- Cylindre gradué ou burette, permettant de mesurer à ± 1 ml.
- Malaxeur, conforme à l'EN 196-1.
- Règle, capable de mesurer à $\pm 0,5$ mm.
- Aiguille le chatelier.
- Appareil le chatelier une masse de (300 ± 1) g et une aiguillée de 15.0 mm au moins.
- Bain d'eau avec un moyen de chauffage jusqu'à l'ébullition en (30 ± 5) min.
- Salle au armoire humide une température de $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$ et a une humidité minimale de 90%.

- **Méthode expérimentale**

- préparer un pate de ciment de consistance normalisée, placer un moule le chatelier légèrement huilé sur la plaque inférieure légèrement huilée et remplir le moule immédiatement, à la main uniquement, sans tassement ni vibration excessif, en utilisant si besoin un outil à bord droit pour agrafer la surface supérieure.
- couvrir le moule avec la plaque supérieure légèrement huilée et placer dans l'armoire humide, le laisser pendant $24\text{h} \pm 30$ min à une température de $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$ et une humidité de $\geq 90\%$



Figure III.27. Les aiguillé de le chatelier.

1-Vérification initiale des aiguilles le Chatelier

-Avant chaque essai, vérifier que les deux bords de la fente ou des points quelconques des deux aiguilles n'exercent aucune pression l'un sur l'autre.

2-d'expansion à chaud

-Les moules sont immergés dans l'eau que l'on porte progressivement à l'ébullition en un temps qui doit être compris entre un quart d'heure et une demiheure.

-Après ébullition, pendant $(3h \pm 5min)$ heures consécutives, on mesure de nouveau l'écartement final des pointes des aiguilles sans attendre le refroidissement.

-En cas de liants contenant de la magnésie plus de 3%, l'ébullition est prolongée jusqu'à ce qu'on ne constate plus en deux heures aucune augmentation de l'expansion.

3-Epreuves normales

-Chacune des épreuves normales d'expansion à chaud est exécutée sur 3 moulages de pâte normale, provenant d'une même gâchée.

4-Expression des résultats

- Le compte-rendu donne pour chaque épreuve tous les résultats. La valeur retenue est la médiane.

- Retirer du bain chaud et laisser refroidir le moule température ambiante.

Mesurer l'écartement : (expansion à Chaud) entre les pointes des aiguilles, à 0,5 mm près.

III.4.1.3. La consistance normale

Objet :

L'essai de consistance est effectué avec l'appareil de Vicat conformément à la norme EN 196-3 [35], la consistance de la pâte de ciment est une caractéristique qui évolue au cours du temps. Le but de cet essai est de déterminer la quantité optimale d'eau de gâchage pour l'obtention d'un bonmortier.

La consistance est évaluée en appliquant une charge constante (300 g). L'enfoncement est d'autant plus rapide et important que la consistance est plus fluide.

Le laboratoire dans lequel les éprouvettes sont préparées et essayées doit être maintenu à une température de (20 ± 2) °C et à une humidité relative minimale de 50 %.

Matériel et matériaux Nécessaire

- Prismètre Automatique.
- Appareil Vicat.
- Balance permettant de pesé à ± 1.0 g.
- Cylindre gradué ou burette à ± 1 ml
- Malaxeur.
- Eau, de l'eau distillée ou dés ionisé.
- Chronomètre à ± 1 s.

Méthode expérimentale

1-Préparation de la pâte normale

- Confection de l'éprouvette

- Peser 500g a ± 1 g de ciment et une certaine quantité d'eau par exemple 125 g.
- Malaxeur en position de marche .
- Introduire l'eau et ciment dans le bol
- Mettre le malaxeur en marche.
- Remplir immédiatement le moule tronconique avec la pâte ainsi préparer et raser la surface au moyen d'une truelle prenant appui sur le bord du moule,perpendiculaire à la surface et déplacée d'un mouvement de scie de faible amplitude.
- Immerger dans l'eau le moule rempli de pâte normale ou le placer dans l'armoire humide.

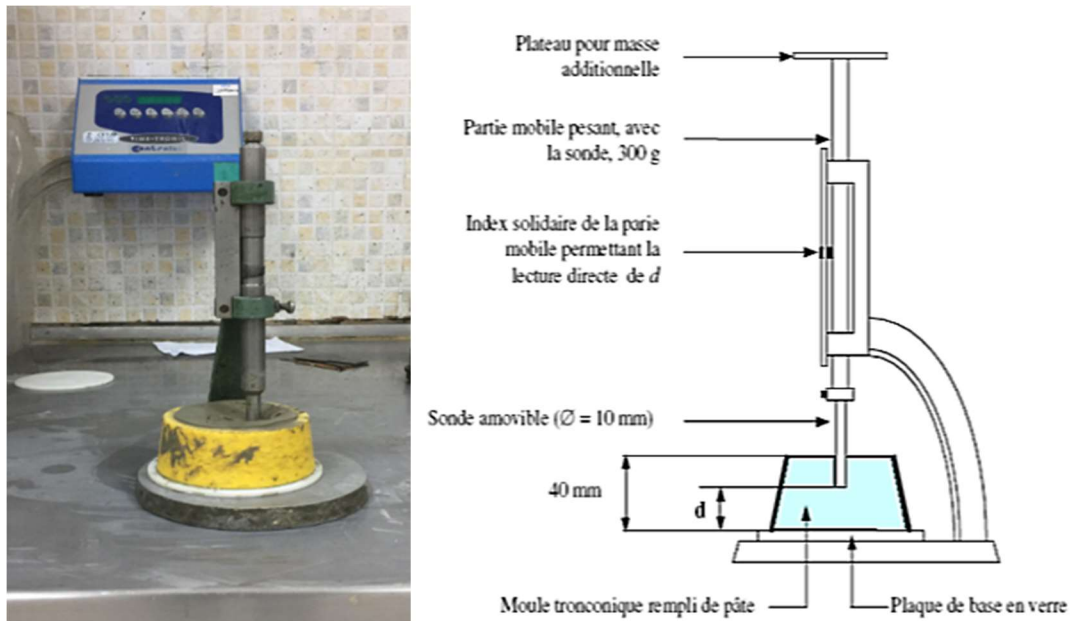


Figure III.28. Appareil de Vicatmuni de la sonde de consistance.

2- Vérification de la consistance normale

- Régler l'appareil de Vicat manuel équipé de la sonde fixer avant le début de l'essai, en abaissant la sonde jusqu'au contact avec la plaque de base et en calant l'indicateur ou l'échèle a zéro.- relever la sonde en position d'attente, placer le moule dans l'appareil de Vicat et laisser la sonde, pénétrer verticalement au centre de la pate.
- Refaire l'essai avec des pates contenant des quantités d'eau différente, jusqu'à ce que l'une d'elle produise une distance de (6 ± 2) mm entre la sonde et la plaque de base.

III.4.1.4. Temps de prises

Le temps de début et de fin de prise sont mesurés à l'aide de l'appareil de Vicat (manuel ou automatique) suivant la norme NF EN 196-3, afin d'étudier l'influence de l'ajout de la vase (à l'état brute et calcinée) sur le comportement des pâtes cimentaires.

L'appareil est composé d'une tige mobile verticale pesant 300 g et prolongée d'une aiguille de section 1 mm^2 . L'aiguille est enfoncée à intervalles de temps réguliers dans un moule tronconique de 4 cm de haut contenant 80 ml de pâte. On dit qu'il y a début de prise lorsque l'aiguille n'est plus capable de transpercer la totalité de la pâte, mais s'arrête à 4 ± 1 mm du fond du moule. Le temps de fin de prise est le temps au bout duquel l'aiguille ne s'enfonce que de 0,5 mm dans l'éprouvette.

Remarque : la détermination de début et fin de prise par le Prisomètre Automatique sera

enregistré par le logiciel (Prisolab).

Technique des essais

1. Détermination du début de prise

- L'aiguille de Vicat, descendue perpendiculairement à la surface de la pâte et immobilisée pendant un court arrêt quand elle entre en contact avec cette surface est abandonnée à elle-même sans vitesse initiale.
- Observer l'enfoncement de l'aiguille; les observations sont renouvelées jusqu'à constatation du début de prise.
- Ces différentes observations sont effectuées sur moule immergé ou extrait de l'ambiance de conservation pendant un temps ne dépassant pas 5 mn et en des points différents.
- Les points de mesurer doivent être écartés d'au moins 1.5 cm de la paroi du moule et de 2.0 cm entre eux.
- Le temps de début de prise du ciment est le temps écoulé entre le temps zéro et le temps auquel la distance entre l'aiguille et la plaque de base est de (6 ± 3) mm, arrondi à la minute la plus proche.

2. Détermination de fin de prise

- Elle correspond au moment où l'aiguille ne s'enfonce plus dans l'anneau.



Figure III.29. Appareil de Vicat automatique.

III.4.2. Essais sur mortiers (Norme EN 196-1) [31]

III.4.2.1. Préparation des éprouvettes

Matériel et matériaux Nécessaire

- Balance permettant de peser à ± 1 g.

- Cylindre gradué ou burette, permettant de mesurer à ± 1 ml.
- Malaxeur, conforme à l'EN 196-1.
- Règle, capable de mesurer à $\pm 0,5$ mm
- Moules (40x40x160) mm.
- Table à choc.
- Chambre climatique (Tem : 20 C°, H : 90 %).

Produits

- Ciment
- Eau, de l'eau distillée ou dés ionisée doit être utilisée pour confectionner les éprouvettes. De l'eau potable peut être utilisée pour conserver et faire bouillir les éprouvettes.
- Sable normalisé (Certifié CEN EN 196-1)

• Méthode expérimentale

Pesée des constituants

Le mortier normal se compose d'une partie du liant à essayer, de trois parties de sable normal et d'une demi - partie d'eau (règle E/C = 0.5). Les constituants sont pesés avec une précision de 0,5 %. Dans le cas de préparation de trois éprouvettes 4x4x16 cm les quantités sont respectivement les suivantes :

- Sable normal sec : (1350 ± 5) g
- Liant (ciment) : (450 ± 2) g
- Eau : (225 ± 1) g

✓ Malaxage

Le malaxeur étant en position de fonctionnement :

- Verser l'eau dans le récipient; Lui ajouter le liant.
- Mettre le malaxeur en marche à la vitesse lente pendant une minute ; Dans les 30 dernières secondes, introduire le sable. Mettre le malaxeur à la vitesse rapide pendant 2 minutes.
- Arrêter le mouvement pendant 90s ; Avec le batteur démonté de son axe, racler les parois et le fond du récipient de façon qu'aucune partie du mortier n'échappe au malaxage.
- Après remontage du batteur, reprendre le malaxage pendant 2 mn à vitesse rapide



Figure III.30. Malaxeur normalisé.

✓ Moulage

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

- Le malaxage du mélange (mortier) étant terminé, disposer celui-ci sur une plaque non réactive au liant et non absorbante; former une galette approximativement rectangulaire, la partager en 6 fractions sensiblement égales.

Le moule ayant été muni de sa hausse, le fixer sur la table à chocs; introduire dans chacune des 3 compartiments une fraction de la galette; Egaliser la surface du mortier au moyen de la raclette maintenue verticale, déplacée dans un double aller et retour en prenant appui sur le bord supérieur de la hausse. Mettre la machine en marche pour 60 chocs.

- Recommencer les mêmes opérations pour la deuxième couche. Après 60 nouveaux chocs, le moule et la hausse sur une faible hauteur sont remplis de mortier.

- Le moule étant retiré de la machine et débarrassé de sa hausse, raser le mortier avec l'arête d'une règle métallique plate maintenue verticale par un mouvement de scie de faible amplitude et perpendiculaire à la longueur des éprouvettes.

- Inscrire les marques d'identification des éprouvettes sur le moule.



Figure III.31. Moule à 3 compartiments pour mortier 4 x 4 x 16 cm.



Figure III.32. Table à chocs pour Prisme de Moule.

Conservation des éprouvettes avant démoulage

Le moule rempli de mortier marqué et recouvert d'un couvercle (qui doit laisser un vide de l'ordre de 2 mm au-dessus de la surface des éprouvettes) est placé jusqu'au moment du démoulage dans une enceinte humide à la température de 20 ± 1 °C dont l'humidité relative aussi voisine que possible de la saturation est d'au moins 90%.



Figure III.33. Une enceinte humide à la température de 20 °C.

✓ 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°C ±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.



Figure III.34. Démoulage des éprouvettes.

✓ Conservation des éprouvettes dans l'eau

Une fois démoulées (pour les essais à 24h effectuer le démoulage pas plus de 20 min avant l'essai, pour les essais a plus de 24h, effectuer le démoulage entre 20h et 24h après le moulage) et marquées et éventuellement pesées, les éprouvettes sont conservées entièrement immergées dans l'eau :

- La température de l'eau servant à la conservation des éprouvettes doit être $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$.
- Matières en suspension : 0.5%
- Sels dissous : 2.0 g/l
- Sulfates et sulfures exprimés en SO_3 : 1.0 g/l.



Figure III.35. Conservation des éprouvettes dans l'eau.

III.4.2.2. Essai de résistance mécanique

Il s'agit de définir la qualité de résistance; c'est-à-dire, de déterminer la contrainte de rupture à la traction par flexion et la contrainte de rupture à la compression des pâtes en fonction du pourcentage des ajouts.

Les essais de flexion et compression permettent de déterminer la contrainte de rupture à la traction par flexion et la contrainte de rupture à la compression des liants hydrauliques. L'éprouvette utilisée dans l'essai de flexion est une éprouvette prismatique (40 x 40 x 160) mm en mortier normal ou en pâte normale. La rupture est effectuée sous charge concentrée dans une machine munie d'un dispositif comportant trois appuis.



Figure III.36. Préparation des éprouvettes pour les essais.

L'essai de compression est exécuté, avec une presse pour matériaux durs, sur les demi-échantillons provenant de l'essai précédent (si l'essai de compression a lieu plus de 20 mn après celui de flexion, conserve entre temps les demi-échantillons dans l'armoire humide).

Les éprouvettes doivent être sorties de l'eau moins de 15 min avant les essais. Elles sont alors essuyées avec un chiffon propre.

Matériel et matériaux Nécessaires

- Le dispositif de flexion et la compression
- Machines d'essais
- Logiciel
- Echantillon

III.4.2.2.1. Résistance à traction par flexion

Pour la détermination de la résistance à la traction par flexion, on utilise la méthode de la charge concentrée à mi portée au moyen du dispositif de flexion normalisé. L'essai est dit l'essai de flexion 3 points, réalisé sur des prismes 4x4x16cm. Le protocole suivi est celui de la norme EN 196-1.

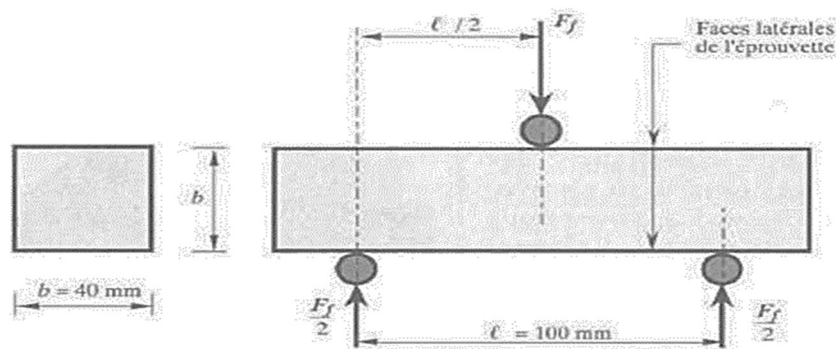


Figure III.37. Principe de la flexion sur prisme de mortier.

Le bâti et l'échantillon sont installés au centre de la presse. Au cours de l'essai, la presse est programmée et pilotée en force à une vitesse de 10 N/s. L'échantillon subit une force qui est répartie linéairement sur la face supérieure. La répartition des contraintes est linéaire dans l'échantillon, la contrainte de traction étant maximale en face inférieure et pour une certaine valeur de contrainte, il y a rupture de l'éprouvette.

Dispositif :

- ✓ Le dispositif de flexion comporte deux appuis à section semi – cylindrique de 10 mm de diamètre, distants de 100 ou de 106.7mm, sur lesquels repose l'éprouvette prismatique suivant une face latérale de moulage, et un troisième appui de même diamètre, équidistant des premiers, et transmettant la charge F.
- ✓ Pour permettre une répartition uniforme des efforts sur l'éprouvette, deux appuis doivent pouvoir osciller légèrement autour de leur centre, le plan vertical au grand axe de l'éprouvette.

Machine d'essai :

- ✓ Le dispositif à appuis est adapté dans une machine d'essai permettant d'exercer et de mesurer de faibles charges (inférieures à 1000 daN) avec une précision de 1% dans les 4/5 supérieurs de l'échelle de mesure.
- ✓ La charge F doit croître progressivement de 5(+/-) 1daN/s.

Contrainte de rupture à la traction par flexion

- ✓ La contrainte de rupture à la traction par flexion est 2340 F ou 2500 F suivant que la portée est de 100 ou de 106.7mm. (elle correspond à la formule de la résistance des matériaux :La contrainte R est exprimée en MPa si F exprimé en Meganewtons, M en Meganewtons.
- ✓ l et b en mètres.

Méthode expérimentale

- ✓ Placer le prisme entre le plateau supérieur et le plateau inférieur.
- ✓ Faire monter la charge verticalement avec vitesse de 50N/s ± 10 N/s jusqu' 'à rupture.
- ✓ Enregistrer le résultat affiché sur pupitre d'affichage.
- ✓ Calculer la résistance moyenne.



Figure III.38. Essai de flexion.

La résistance à la traction flexion sur la facette inférieure de l'éprouvette 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 traction par 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.4.2.2.1. Résistance à la compression

L'essai est effectué sur les demi-prismes obtenus dans l'essai de flexion, ils sont écrasés en compression sur les faces latérales de moulage sous une section de 4 x 4 cm.

Les prismes sont testés en compression simple à l'aide d'un dispositif spécifique à la compression suivant la norme EN 196-1.

Le prisme est soumis à une force de compression jusqu'à la rupture. Pour cela, la presse est pilotée en déplacement à une vitesse de 500 $\mu\text{m/s}$. Cette vitesse correspond à la vitesse imposée pour les mortiers normalisés. Le principe de l'essai de compression demi-prisme.

La machine d'essai pour la détermination de la résistance à la compression doit avoir une capacité adaptée à l'essai, elle doit avoir une précision de $\pm 1,0 \%$ de la charge enregistrée. Les essais de compression ont été effectués sur une presse d'une charge de 200 KN. Pour chaque essai, les 2 demi-éprouvettes obtenues après l'essai de flexion ont été testées. La valeur retenue présente la moyenne des deux.

Dispositif d'essai

- ✓ Chaque demi-épreuve est essayée en compression sur ses faces latérales de moulage, sous une section de 40 x 40 mm, entre deux plaques de métal dur 10mm d'épaisseur, de 40mm \pm 0,1 mm de largeur, de longueur supérieure à 40 mm et dont la tolérance de plénitude est de 0,01 mm Ces plaques sont en acier dur d'une dureté Vickers d'au moins 600, ou d'éréférence en carbure de tungstène.
- ✓ La demi-épreuve est placée entre elles de manière que son extrémité intacte dépasse d'au moins 1 cm et que les arêtes longitudinales de l'épreuve soient perpendiculaires à celles des plaques.
- ✓ Les plaques sont guidées sans frottement appréciable au cours de l'essai, de manière à avoir la même projection horizontale. L'une d'elles peut s'incliner légèrement pour permettre le contact parfait plaques — faces de l'épreuve.
- ✓ L'ensemble du dispositif et de l'épreuve est placé entre les plateaux d'une presse répondant aux spécifications des presses destinées à l'essai décompression des matériaux durs. Il y est placé de telle façon que l'axe des sections de compression soit centré sur la rotule du plateau supérieur.

Conduite de l'essai

- ✓ La charge doit croître jusqu'à la rupture à une vitesse telle que l'accroissement de contrainte soit compris entre 1 et 2 MPa/s. toutefois, jusqu'à la moitié de la charge de rupture présumée, la charge peut croître rapidement.

Epreuves normales

- ✓ Les contraintes de rupture à la traction par flexion et de rupture par compression sont mesurées sur 3 éprouvettes rompues par flexion et sur les 6 demi-éprouvettes résultants rompus par compression.
- ✓ Il est recommandé autant que possible d'éviter d'avoir à chaque âge, plus de 2 éprouvettes d'une même gâchée



Figure III.39. Essai de compression.

Méthode expérimentale

- ✓ 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.
 - ✓ 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 :

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

Fc : 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 (à 2, à 7 et à 28 jours).

Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté les différentes méthodes expérimentales réalisé au niveau de laboratoire de CETIM : « Centre d'Etudes et de services Technologiques de l'Industrie des Matériaux de construction ».

Plusieurs essais sur les différents échantillons du ciment préparés ont été effectués, Les analyses physiques, chimiques effectués dans le laboratoire donnent une idée générale sur les caractéristiques principales des ciments préparés. Les résultats et leurs interprétations sont représentés dans le chapitre IV.

Chapitre IV
Résultats et discussion



IV.1. Introduction

Ce chapitre présente les résultats des essais étudiant et analysant les propriétés physiques, chimiques et mécaniques des mélanges de ciment étudiés, en utilisant les mauvais clinkers (incuits et mal cuits) comme additifs de base, dans le but de prouver son utilité pour la cimenterie.

IV.2. Analyse physique

IV.2.1. Masse volumique apparente du clinker

Tableau IV.1. Résultats de la Masse volumique apparente des échantillons.

Echantillon	KK cuit	KK. mal cuit	KK incuit
Masse volumique apparente (g/l)	1371,15	1027,4	315,4

D'après le tableau IV.1, le PL du KK cuit est compris entre 1100 et 1350, ce qui montre la bonne qualité du clinker.

IV.2.2. Masse volumique absolue du clinker

Les résultats montrent que la masse volumique absolue du KK cuit et mal cuit est proche de celle du ciment, tandis que le KK incuit est plus léger et plus proche de la masse volumique absolue du calcaire (puisque'il n'a presque subi aucune transformation).

Tableau IV.2. Résultats de la Masse volumique absolue des échantillons.

L'échantillon	KK cuit	KK. mal cuit	KK incuit
Masse (g)	64	64	64
Volume (ml)	20.1	20.2	24.02
Masse volumique absolue(g/ml)	3.18	3.15	2.66

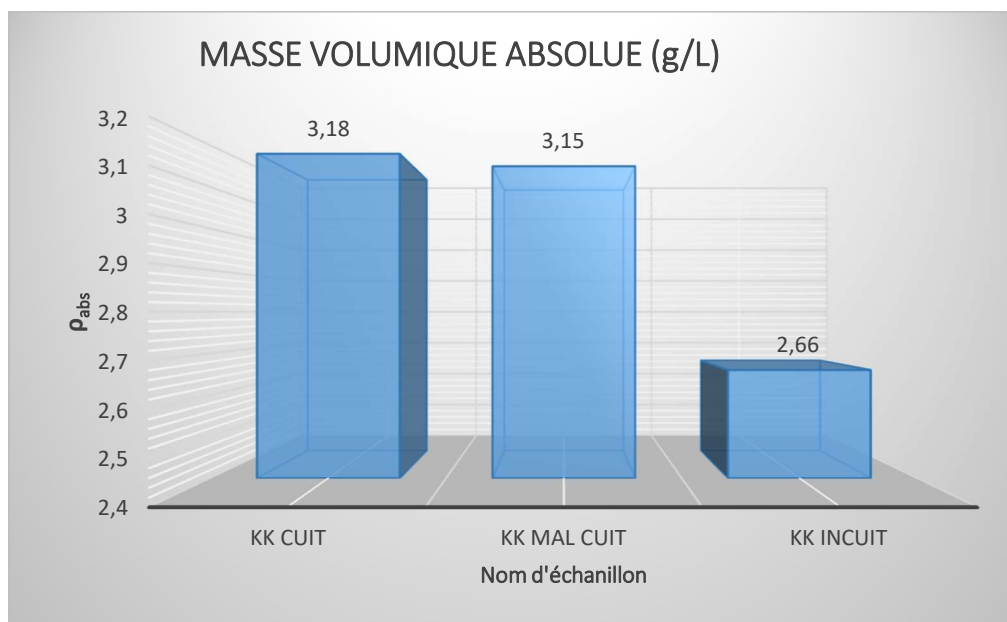


Figure IV.2. La Masse volumique absolue des échantillons.

IV.2.3. La surface spécifique de Blain (SSB) du clinker broyé

Tableau IV.3. Résultats de La surface spécifique de Blain (SSB).

L'échantillon	KK cuit	KK. mal cuit	KK incuit
Temps de broyage (min)	30	20	-
Masse prise disque (g)	2.7844	2.7706	2.3129
Temps de prise disque (s)	68.66	104.94	106.38
SSB (cm ² /g)	3855	4817	5799

D'après le tableau IV.3, on remarque que le KK mal cuit nécessite moins de temps de broyage pour atteindre une grande surface spécifique. Il est donc moins dur que le bon KK. ce qui est bénéfique pour l'économie de l'énergie de broyage.

Le KK incuit est déjà sous forme de poudre et ne nécessite pas de broyage.

IV.3. Analyse chimique

IV.3.1. Activité minérale du KK incuit et mal cuit

Les résultats montrent que le KK incuit et mal cuit possèdent une activité minérale très forte ($Q_{CaO} > 150$ mg/g).

Tableau IV.4. Résultats Essai d'activité minérale.

N°/V	V0(ml)	V. KK incuit (ml)	V. KK mal cuit (ml)
1	36.80	--	--
2	37.20	47.80	42.00
3	37.60	46.10	42.10
4	37.90	47.10	42.20
5	37.90	47.10	42.30
6	38.00	49.10	42.40
7	38.10	48.10	42.40
8	38.00	48.10	42.40
9	37.70	49.10	42.40
10	37.90	49.30	42.30
11	38.00	49.40	42..50
12	38.20	49.10	42.30
13	38.10	49.10	42.30
14	38.20	49.30	42.40
15	38.20	49.30	42.40
16	38.00	49.40	42.50
Q_{CaO} (mg/g)	/	232,50	246,07

IV.3.2. Analyse minéralogique par diffraction des rayons X (DRX)

L'analyse par radiocristallographie des échantillons mis en évidence les phases minéralogiques suivantes :

a) Diffractogramme de l'échantillon KK cuit

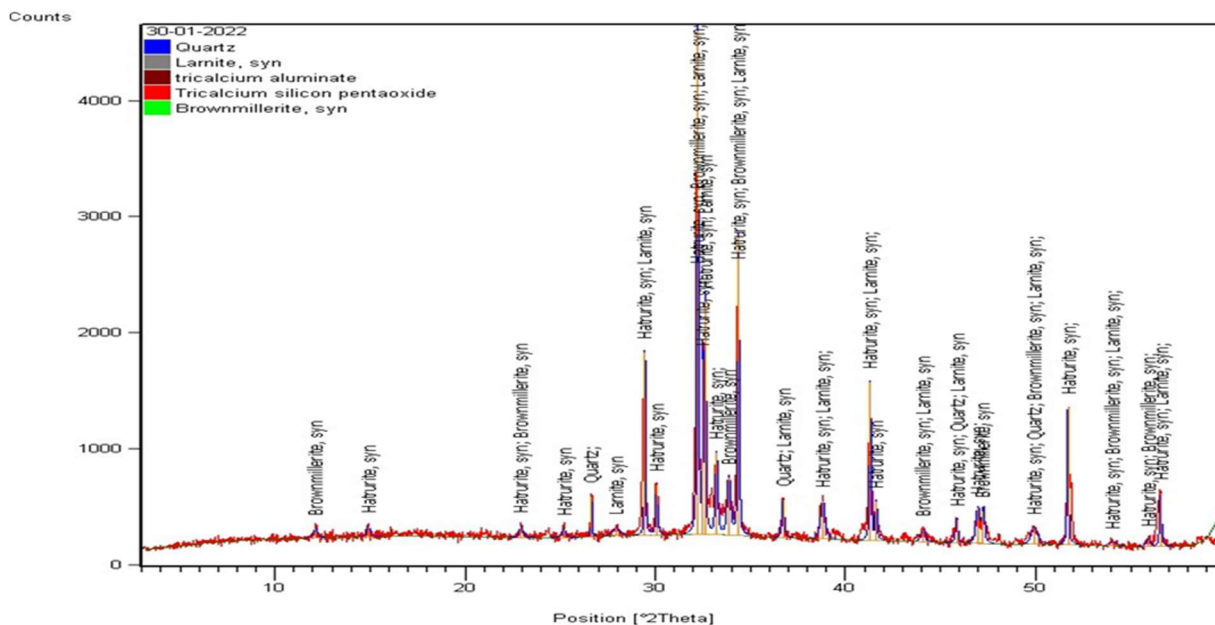


Figure IV.3. Résultats des analyses minéralogiques par DRX : échantillon N°1 (KK cuit).

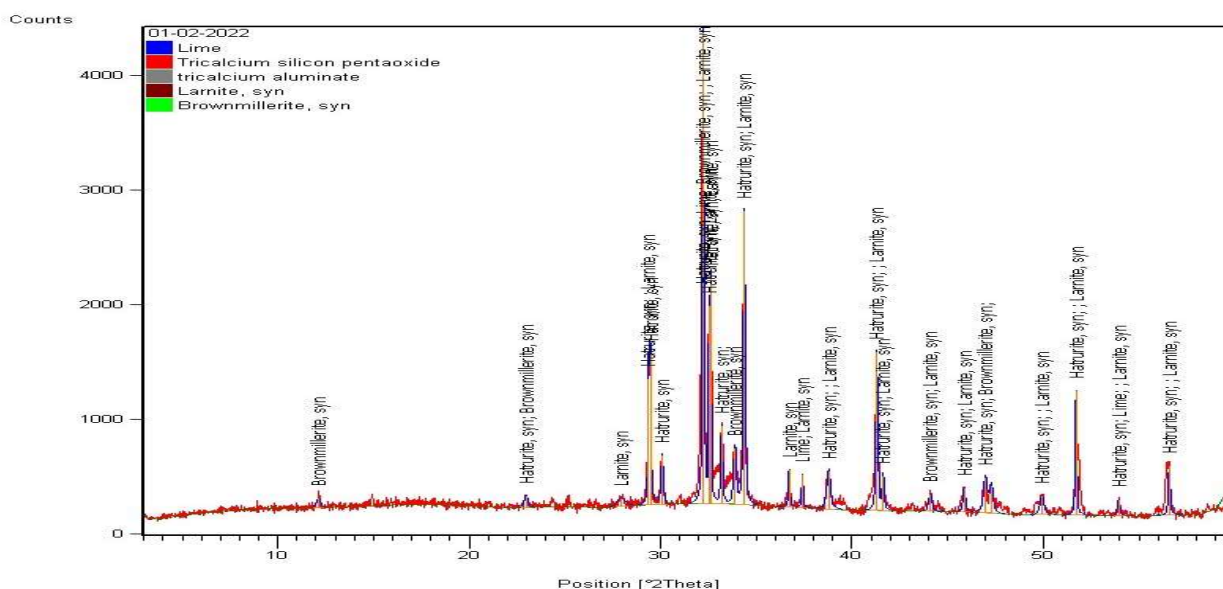


Figure IV.4. Résultats des analyses minéralogiques par DRX : échantillon N°2 (KK cuit).

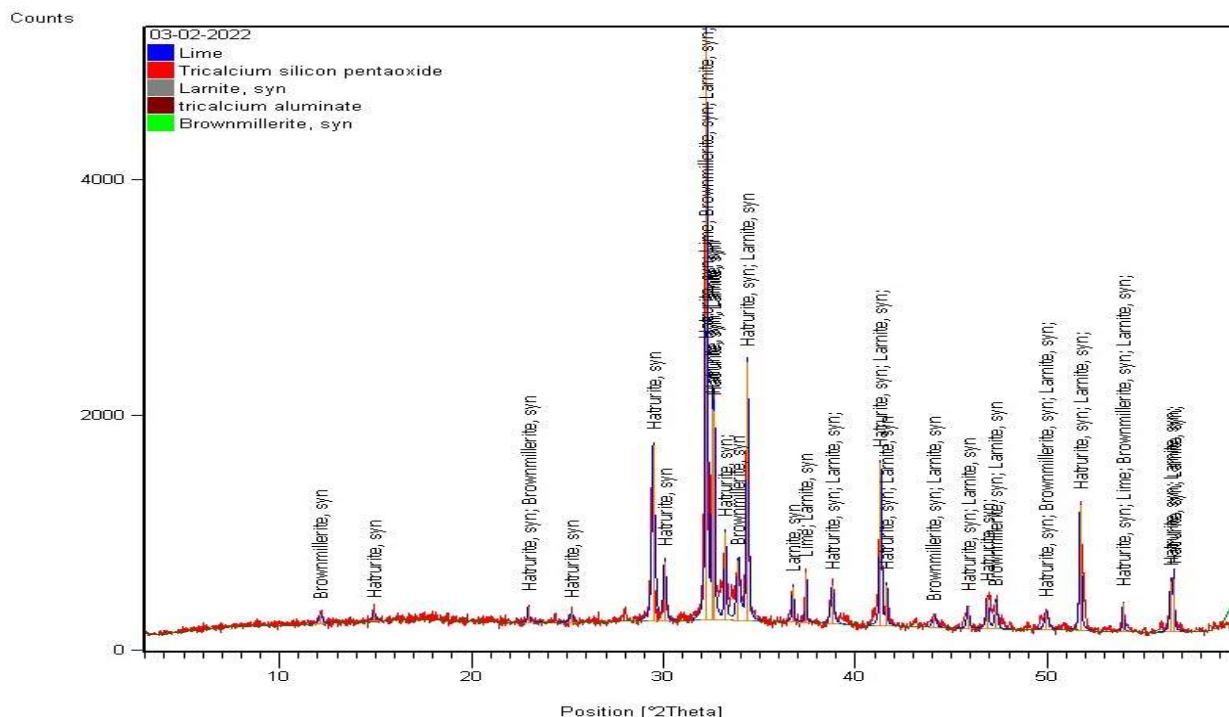


Figure IV.5. Résultats des analyses minéralogiques par DRX : échantillon N°3 (KK cuit).

b) Diffractogramme échantillon (KK mal cuit)

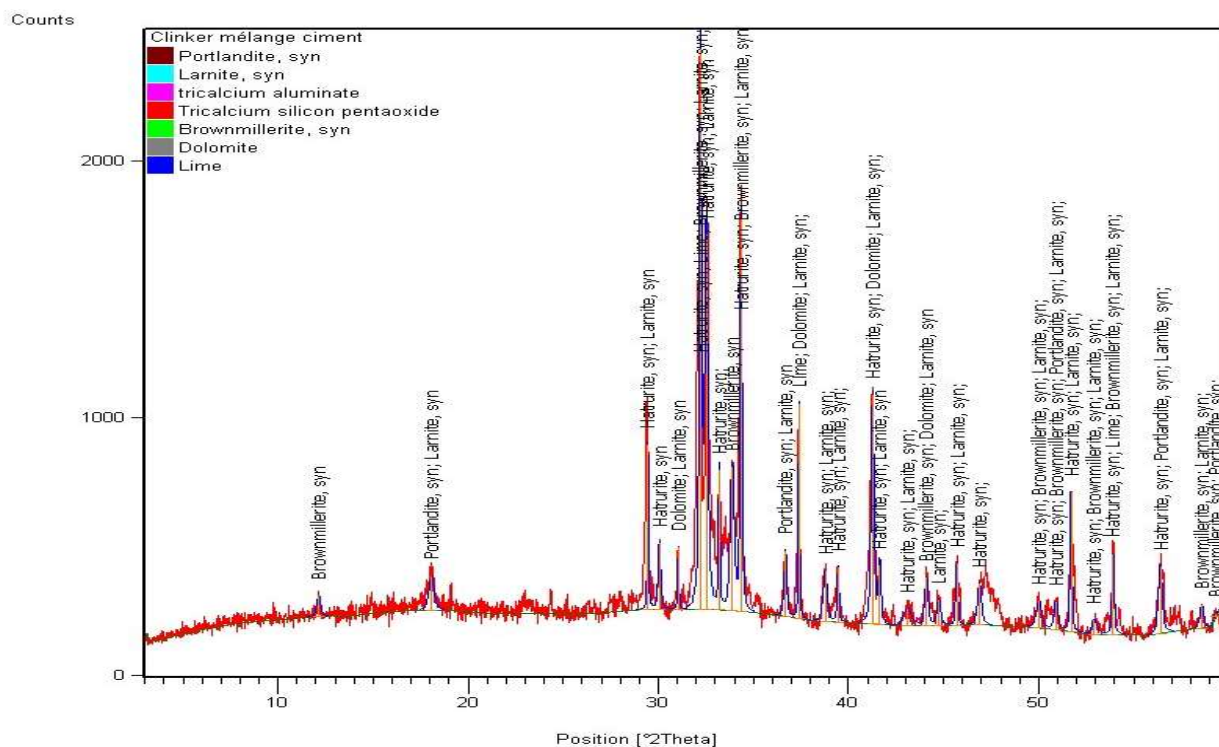


Figure IV.6. Résultats des analyses minéralogiques par DRX : échantillon (KK mal cuit).

c) Diffractogramme échantillon (KK incuit)

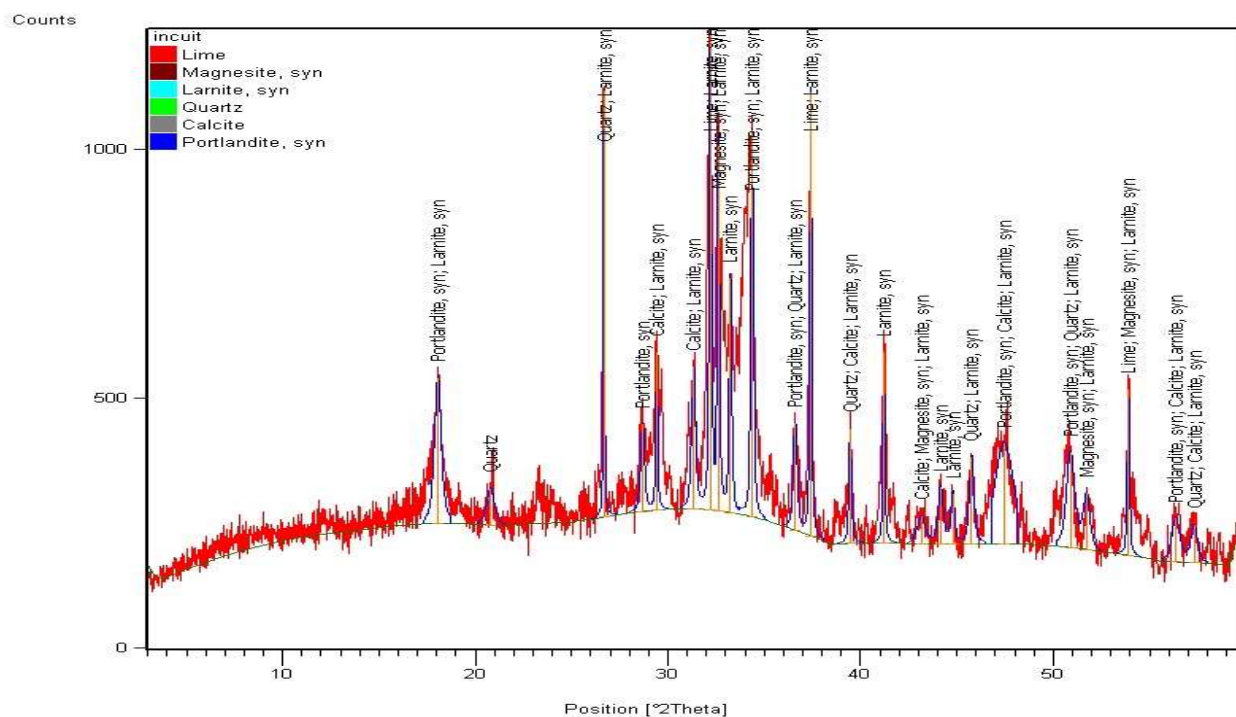


Figure IV.7. Résultats des analyses minéralogiques par DRX : échantillon (KK incuit).

d) Diffractogramme échantillon (Gypse)

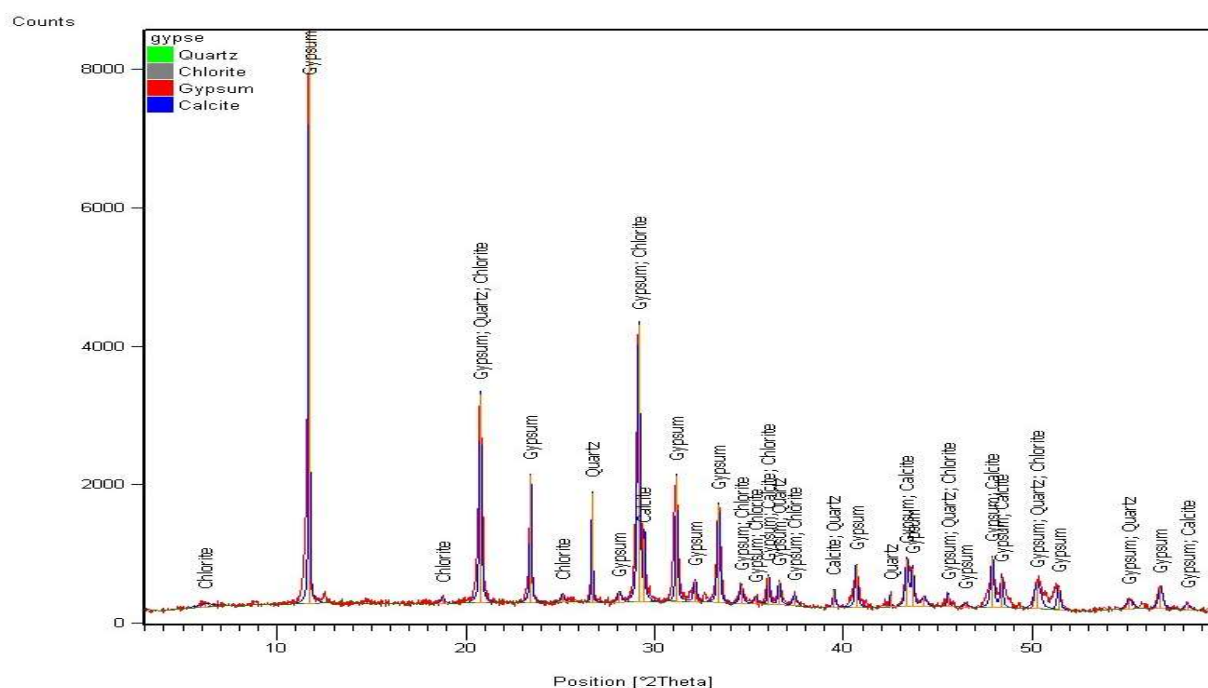


Figure IV.8. Résultats des analyses minéralogiques par DRX : échantillon (gypse).

IV.3.4. Observation du ciment au microscope optique

Résultats des essai (selon la norme ENV 196 4)

La vue au microscope optique d'une lame mince KK mal cuit (figure IV.9) met en évidence la présence de C3S qui est facilement reconnaissable à ses grands cristaux aux contours polygonaux. Le C2S, en bleu, est plutôt arrondi. La partie beige est constituée par la phase dite interstitielle d'aluminates (C3A+C4AF). La partie en marron est constituée de résine pour la confection de la lame mince.

La composition minéralogique du clinker est donnée dans les tableaux IV.5 et IV.6.

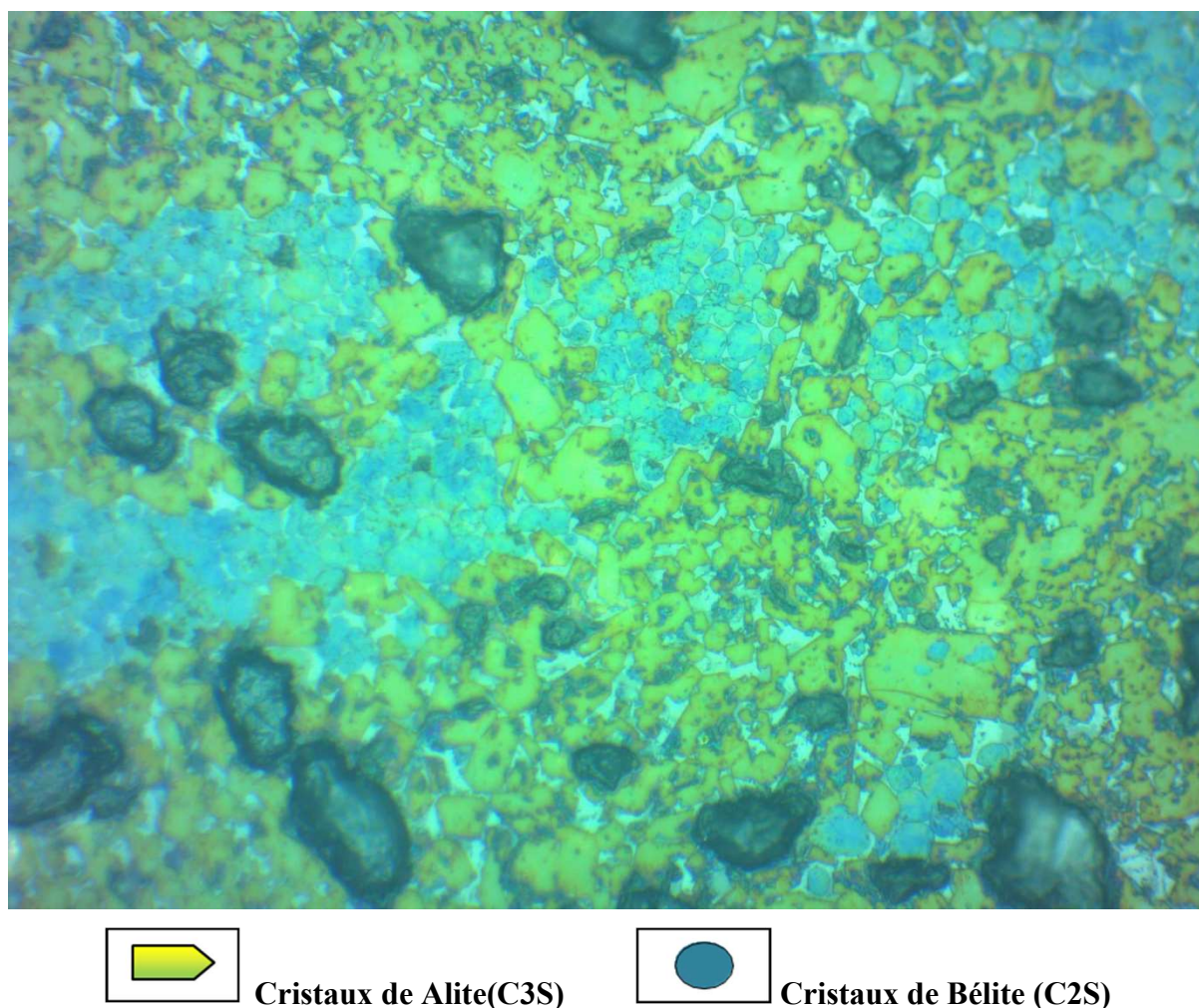


Figure IV. 9. Observation des différents constituants du KK mal cuit par microscope optique.

Tableau IV.5. Granulomètre du clinker mal cuit utilisé.

Minéraux	Minimum um	Maximum um	Moyenne um
C3S	10	100	25-50
C2S	10	100	15-25
CaOL	10	35	15-25
Nids de belite	100	1900	400-700

Tableau IV.6. Teneur du clinker mal cuit utilisé.

Constituants minéraux	Teneur en (%)
C3S	56
C2S	22
C3A	06
C4AF	12
CaOL	02

IV.3.5. La composition chimique du clinker (XRF) et la perte au feu (PAF) du clinker

La composition chimique des différents types de clinker considérés dans cette étude est présentée dans le tableau IV.7. Les valeurs de la PAF pour le KK mal cuit et incuit sont élevées (PAF > 5 %), puisque la calcination est incomplète.

Tableau IV.7. Résultats de la composition chimique des matériaux utilisés et la perte au feu (PAF).

Nom de l'échantillon	KK cuit	KK mal cuit	KK incuit	Gypse
SiO ₂ (%)	20.90	20.70	20.50	9.60
Al ₂ O ₃ (%)	5.84	5.80	5.02	2.86
Fe ₂ O ₃ (%)	3.58	3.55	2.60	1.13
CaO (%)	66.72	64.71	60.09	31.12
MgO (%)	1.10	1.07	1.05	2.62
SO ₃ (%)	0.19	0.12	0.38	30.58
K ₂ O (%)	0.64	0.68	1.02	0.60
Na ₂ O (%)	0.20	0.20	0.22	0.96
P ₂ O ₅ (%)	0.14	0.15	0.10	0.06
TiO ₂ (%)	0.30	0.29	0.28	0.15
Perte Au feu (%)	0.43	20,9	9.15	20.23
Somme (%)	100.00	100.00	100.00	100.00

La composition chimique des clinkers et du gypse est présentée sous forme de secteurs dans la figure IV.10.

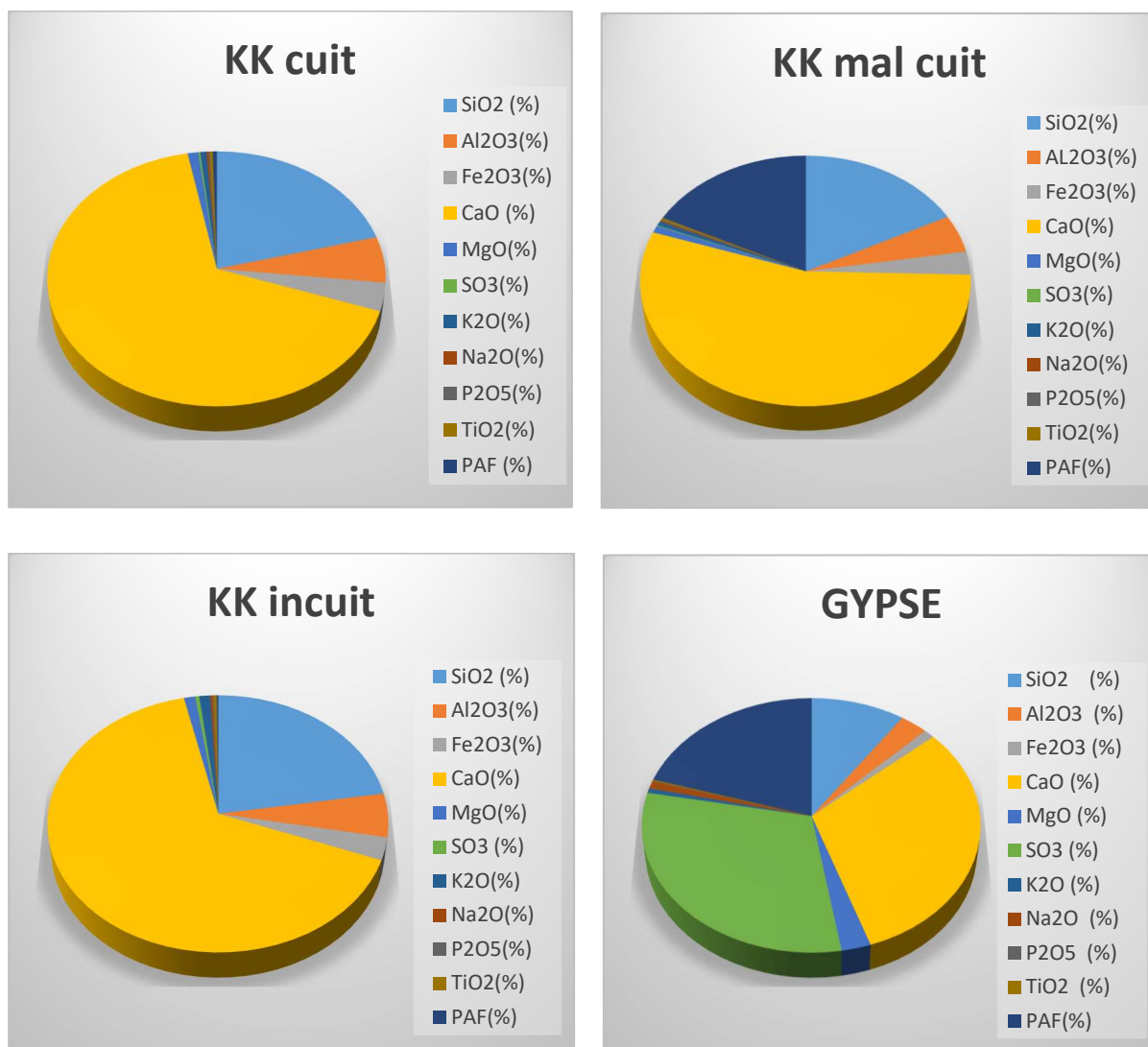


Figure IV.10. Cercles relativistes de la composition chimique des matériaux utilisés et de la perte au feu (PAF).

IV.3.6. La chaux libre des échantillons de clinker

Les valeurs de la chaux libre pour le KK mal cuit et incuit sont élevées (tableau IV.8), puisque la clinkérisation est incomplète. Lors de son hydratation, l'excès de chaux libre (non liée) peut causer le gonflement du ciment, des fissures et une perte de résistance.

Tableau IV.8. Valeurs de la chaux libre.

Nom d'échantillon	KK cuit	KK mal cuit	KK incuit
Volume (ml)	3.694	6.882	39.386
$V \cdot T / (T=0.2422)$	$3.694 \cdot 0.2422$	$6.882 \cdot 0.2422$	$39.386 \cdot 0.2422$
La chaux libre (%)	0.89	1.67	9.54

IV.3.7. Résidu insoluble du clinker

Le résidu insoluble est dans les normes pour le KK cuit et mal cuit ($\leq 5\%$). Mais, ce n'est pas le cas pour le KK incuit.

Tableau IV.9. Valeurs du résidu insoluble (RI).

Nom échantillon	KK cuit	KK mal cuit	KK incuit
P1(g)	23.3836	23.0054	23.2767
P2(g)	23.3799	22.9979	23.2132
(P1-P2) (g)	0.0037	0.0075	0.0635
RI(P1-P2) *100%	0.37	0.75	6.35

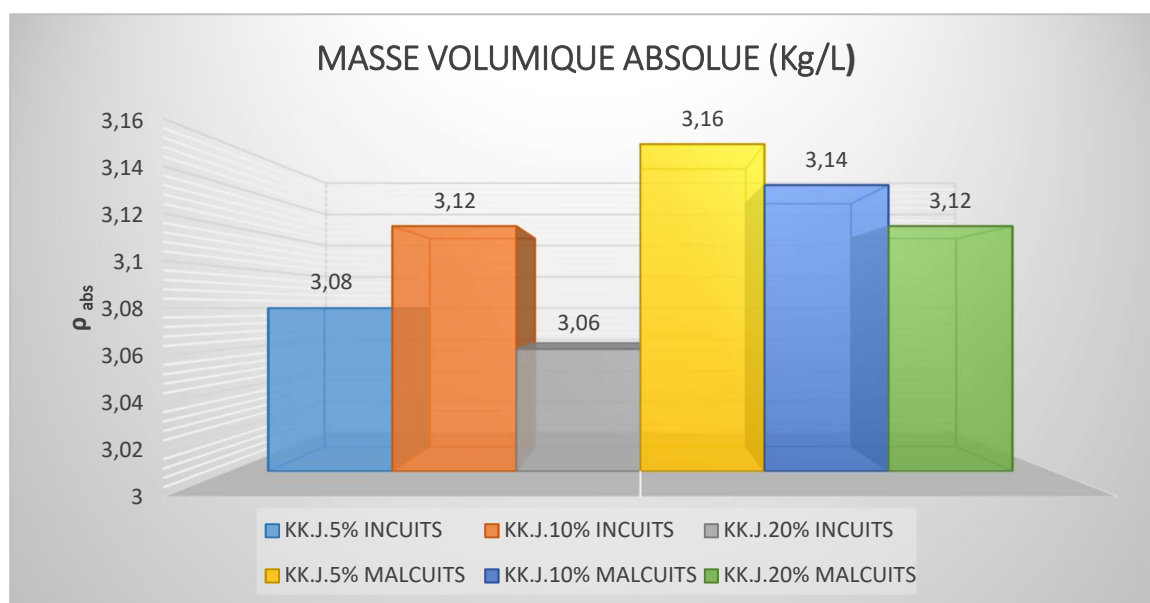
IV.4. Analyse des propriétés physiques des mélanges préparés

IV.4.1. Masse volumique absolue du clinker du ciment préparé

La calcination au four (phase de cuisson) engendre une densification du clinker, c'est pour ça qu'on trouve que les mélanges avec du KK incuit ont une masse volumique relativement faible par rapport aux autres mélanges.

Tableau IV.10. Masse volumique absolue des échantillons du ciment préparé.

L'échantillon	Masse (g)	Volume (ml)	Masse volumique absolue(g/ml)
KK témoin	64	20,8	3.08
KK 5% INCUIT	64	20,8	3.08
KK 10% INCUIT	64	20,5	3.12
KK 20% INCUITS	64	20,9	3.06
KK 5% MALCUITS	64	20,2	3.16
KK 10% MALCUITS	64	20,4	3.14
KK 20% MALCUITS	64	20,5	3.12

**Figure IV.11.** La Masse volumique absolue des échantillons du ciment préparé.

IV.4.2. Mesure de la surface spécifique de Blain (SSB) des ciments préparés

La moyenne du temps de broyage pour les différents mélanges est de 20 minutes. Cependant, le mélange avec 20 % de KK incuit (déjà sous forme de poudre) nécessite 15 minutes seulement

pour avoir un SSB ≥ 3500 cm²/g (tableau IV.11). donc, une réduction de 25 % du temps de broyage.

Tableau IV.11. Surface spécifique de Blain (SSB) des échantillons du ciment préparé

L'échantillon	T de broyage (min)	Masse prise disque (g)	T de prise disque (s)	SSB (cm ² /g)
KK témoin	20	2.6934	49.62	3422
KK 5% INCUIT	20	2.6907	59.34	3723
KK 10% INCUIT	20	2.7301	66.35	3880
KK 20% INCUITS	15	2.6778	52.45	3521
KK 5% MALCUITS	20	2.7706	40.81	3615
KK 10% MALCUITS	20	2.7435	43.66	3753
KK 20% MALCUITS	20	2.7301	55.24	3542

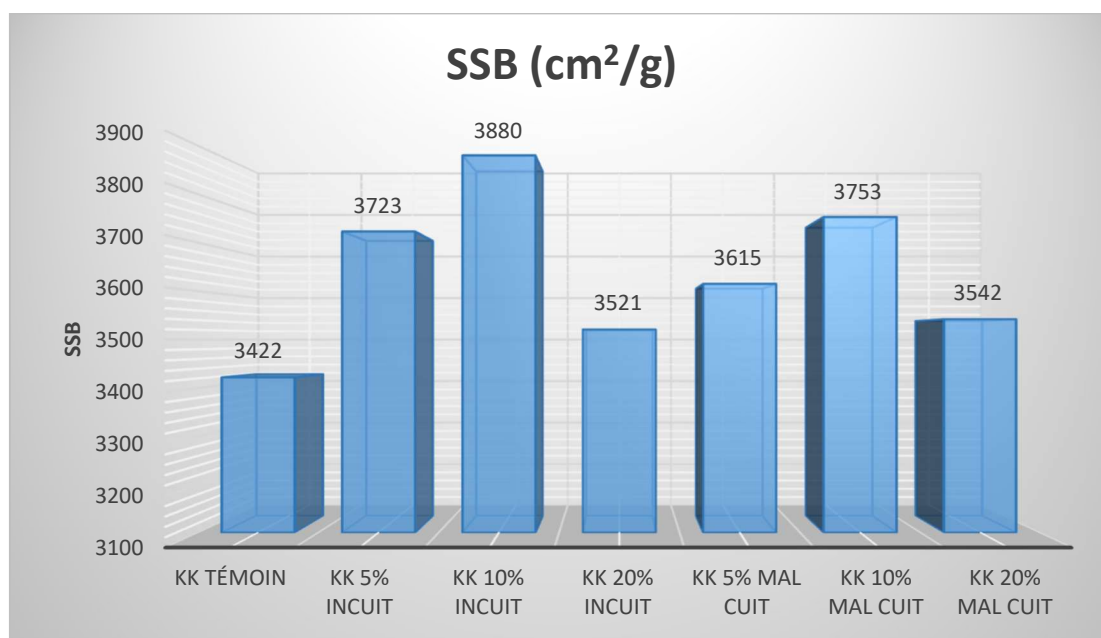


Figure IV.11. La surface spécifique de Blain (SSB) des échantillons du ciment préparé

IV.5. Analyse chimique des mélanges préparés

IV.5.1. Résultats des analyses minéralogiques par diffraction des rayons X (DRX)

L'analyse par radiocristallographie des échantillons du ciment préparé mis en évidence les phases minéralogiques suivantes:

a) Diffractogramme échantillon (KK témoin)

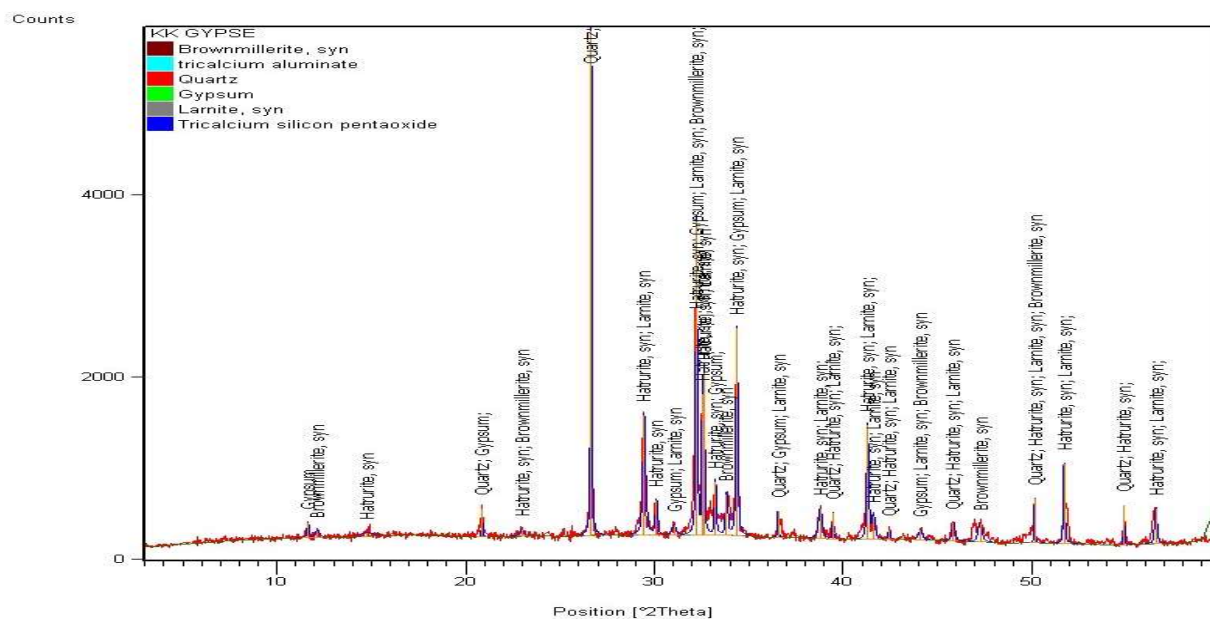


Figure IV.12. Résultats des analyses minéralogiques par DRX : échantillon (KK témoin).

b) Diffractogramme échantillon (KK 5% INCUIT)

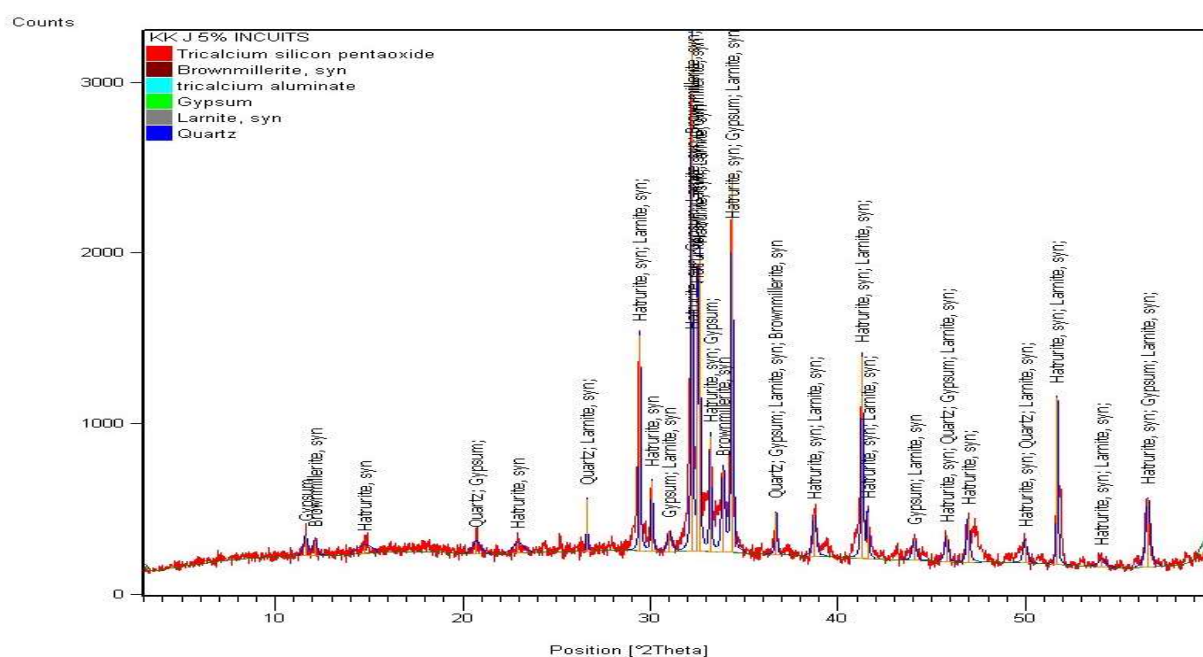


Figure IV.13. Résultats des analyses minéralogiques par DRX : échantillon (KK 5% INCUIT).

d) Diffractogramme échantillon (KK 10% INCUIT)

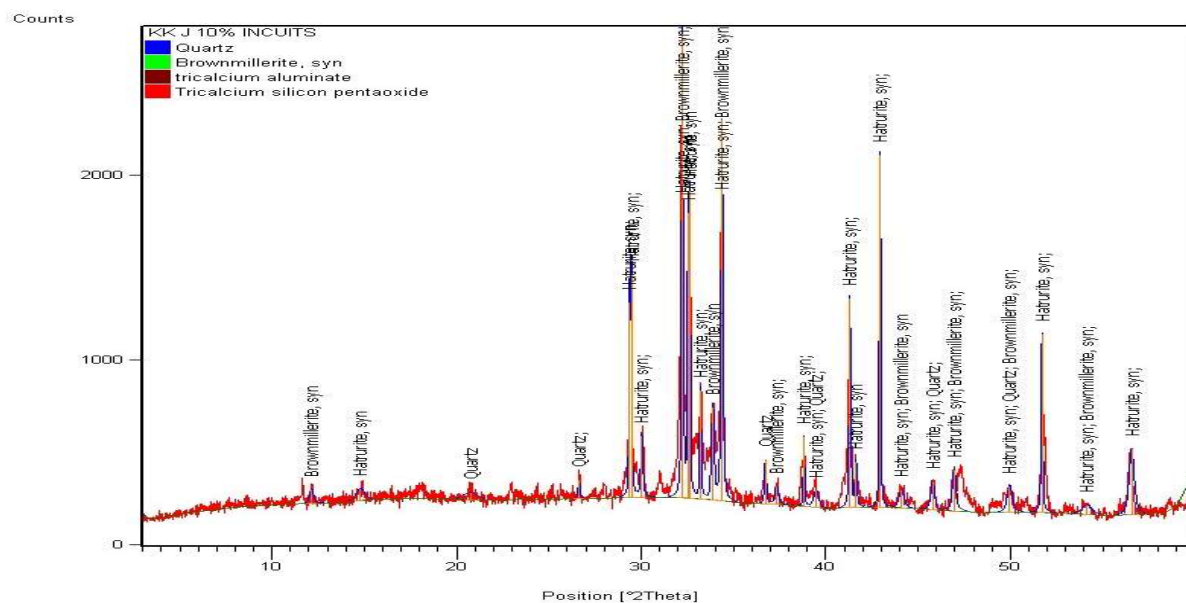


Figure IV.14. Résultats des analyses minéralogiques par DRX : échantillon (KK 10% INCUIT).

e) Diffractogramme échantillon (KK.J. 20% INCUITS)

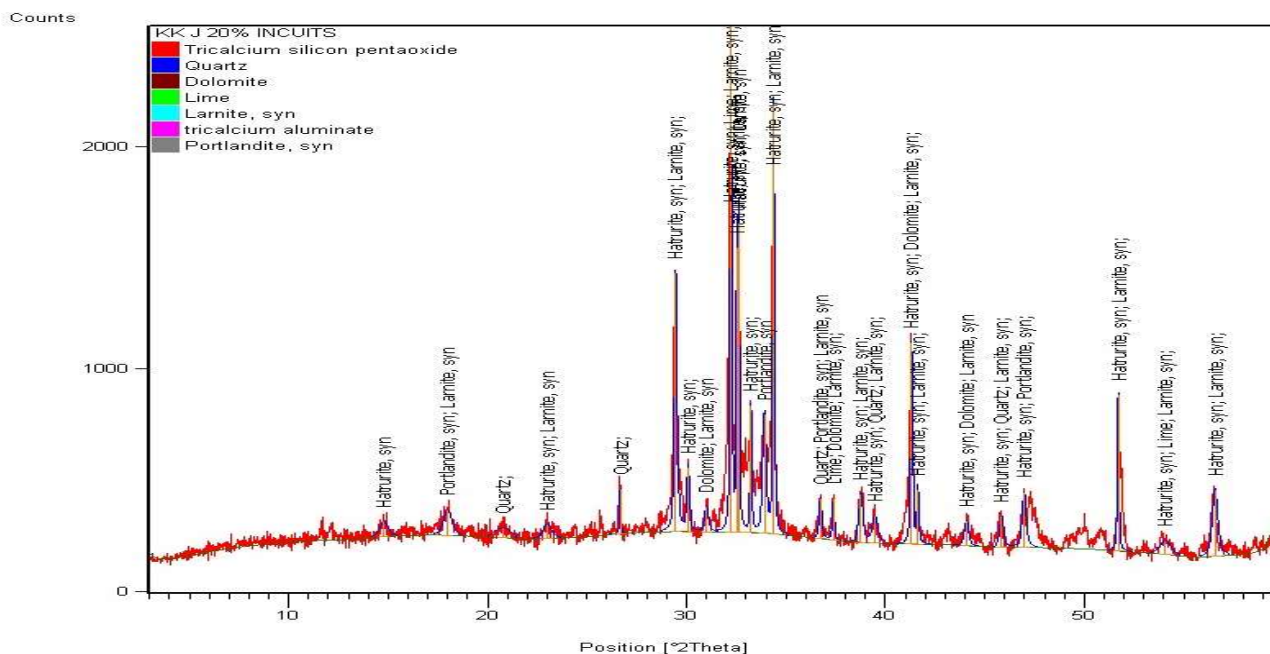


Figure IV.15. Résultats des analyses minéralogiques par DRX : c) Diffractogramme échantillon (KK 20% INCUIT).

e) Diffractogramme échantillon (KK 5% MAL CUIT)

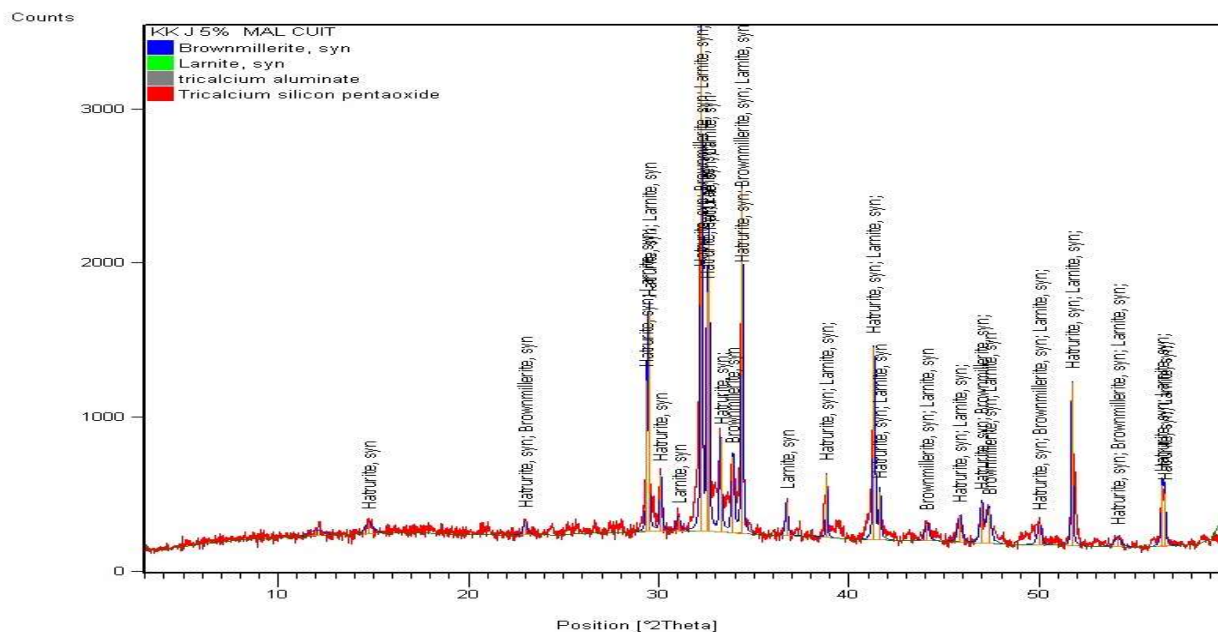


Figure IV.16. Résultats des analyses minéralogiques par DRX : échantillon (KK 5% MAL CUIT).

f) Diffractogramme échantillon (KK 10% MAL CUIT)

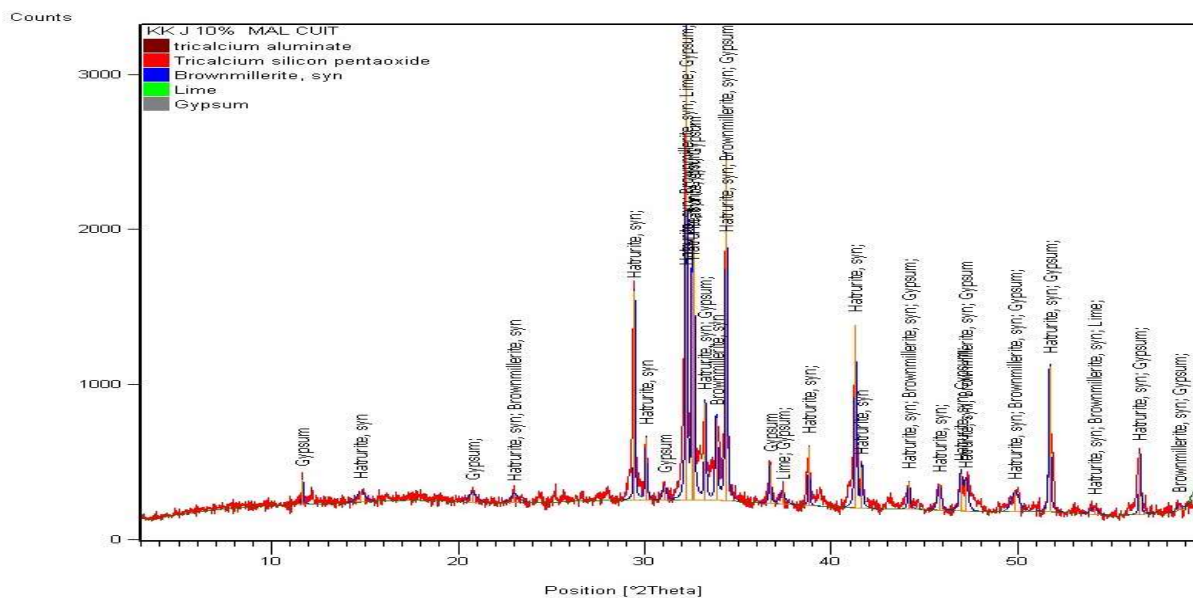


Figure IV.17. Résultats des analyses minéralogiques par DRX : échantillon (KK 10% MAL CUIT)

g) Diffractogramme échantillon (KK 20% MAL CUIT)

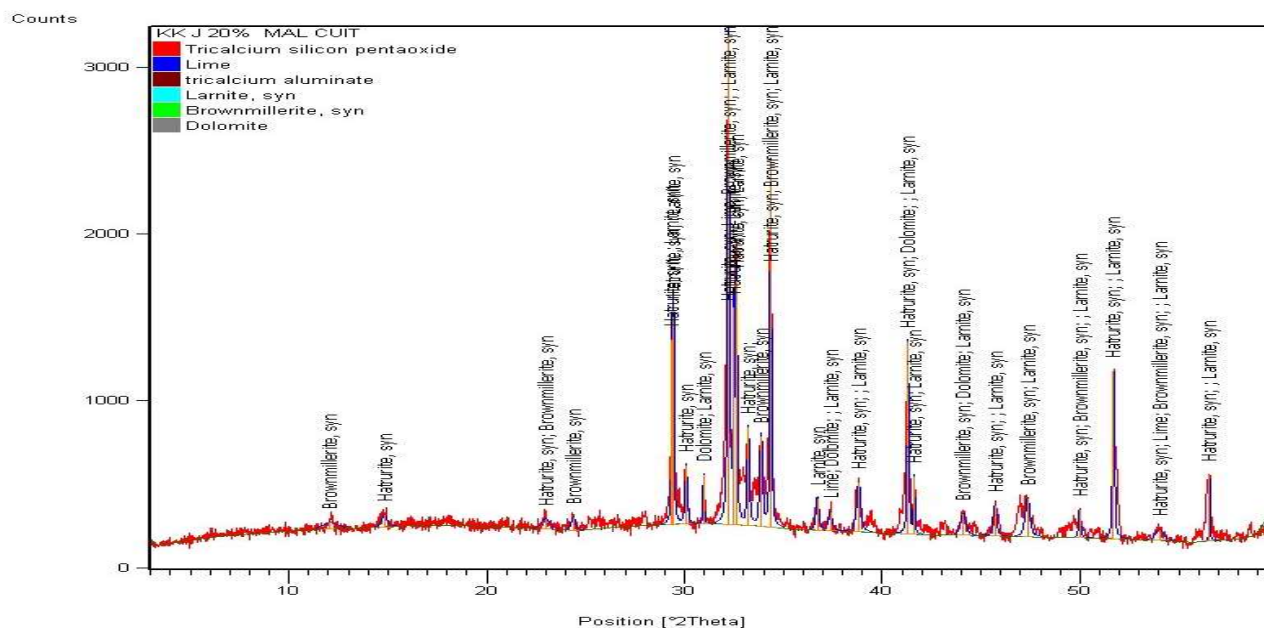


Figure IV.18. Résultats des analyses minéralogiques par DRX : échantillon (KK 20% MAL CUIT).

IV.5.2. Composition chimique du clinker (XRF) et La perte au feu (PAF) du clinker

La composition chimique des différents mélanges est donnée dans le tableau IV.12. Les différents mélanges ont une PAF acceptable.

IV.5.3. La chaux libre des échantillons de clinker

Les valeurs de la chaux libres sont convenables, sauf pour le mélange avec 20% du KK incuit (> 3%).

Tableau IV.12. Résultats de la composition chimique des échantillons du ciment préparé et la perte au feu (PAF).

Nom de l'échantillon	KK témoin	KK 5% INCUIT	KK 10% INCUIT	KK 20% INCUIT	KK 5 % MAL CUIT	KK 10 % MAL CUIT	KK 20 % MAL CUIT
SiO ₂ Si ₂ (%)	30,93	20,93	20,95	20,42	20,80	20,74	20,69
Al ₂ O ₃ Al ₂ (%)	4,94	5,57	5,68	5,57	5,52	5,53	5,48
Fe ₂ O ₃ Fe ₂ (%)	3,46	3,60	3,63	3,59	3,62	3,58	3,72
CaO Ca ₂ (%)	56,00	64,34	63,79	62,28	64,42	64,64	63,98
MgO Mg ₂ (%)	1,06	1,21	1,22	1,26	1,21	1,21	1,20
SO ₃ S ₂ (%)	1,58	1,68	1,71	2,37	2,17	1,83	1,84
K ₂ O K ₂ (%)	0,54	0,65	0,65	0,72	0,61	0,61	0,61
Na ₂ O Na ₂ (%)	0,13	0,22	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14
P ₂ O ₅ P ₂ (%)	0,10	0,12	0,12	0,11	0,12	0,12	0,11
TiO ₂ Ti ₂ (%)	0,28	0,28	0,28	0,29	0,28	0,27	0,27
P AF (%)	0,97	1,39	1,81	3,26	1,12	1,34	1,94
Somme (%)	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

Tableau IV.12. Résultats de La chaux libre des échantillons du ciment préparé

Nom de l'échantillon	KK témoin	KK 5% INCUIT	KK 10% INCUIT	KK 20% INCUIT	KK 5 % MAL CUIT	KK 10 % MAL CUIT	KK 20 % MAL CUIT
Volume (ml)	3,608	5,530	8,904	15,480	5,384	5,474	7,476
La chaux libre V*T/(T=0.2422)	0,87	1,34	2,16	3,74	1,30	1,32	1,81

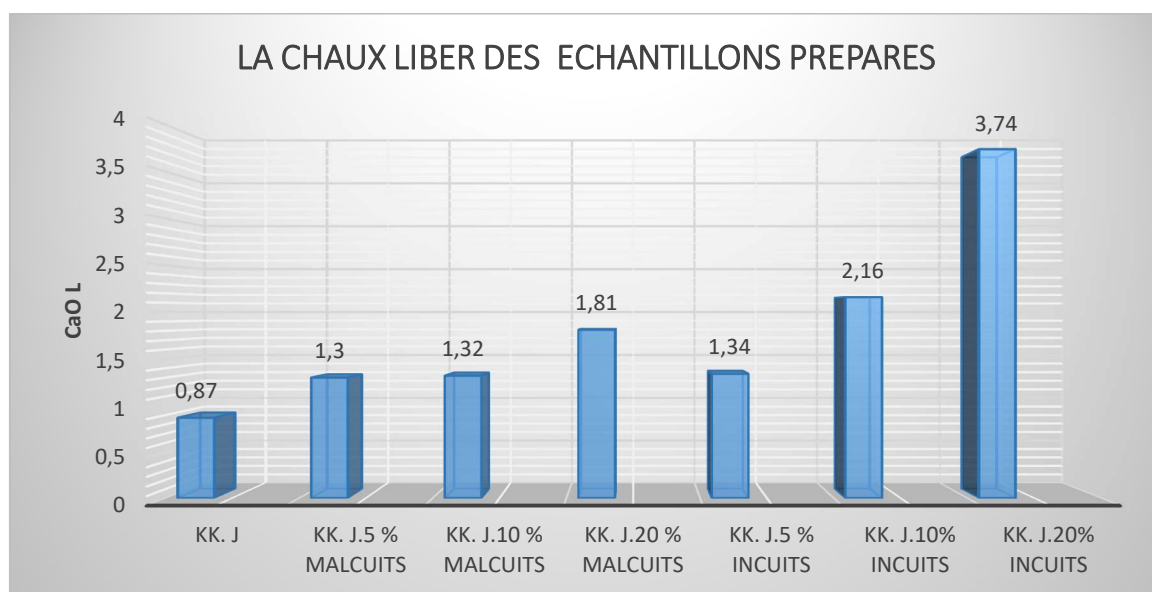


Figure IV.19. La chaux libre des échantillons de ciment préparés.

IV.5.4. Résidu insoluble des échantillons du ciment préparé

On remarque toujours que c'est le mélange KK 20% incuit qui donne de mauvaises résultats.

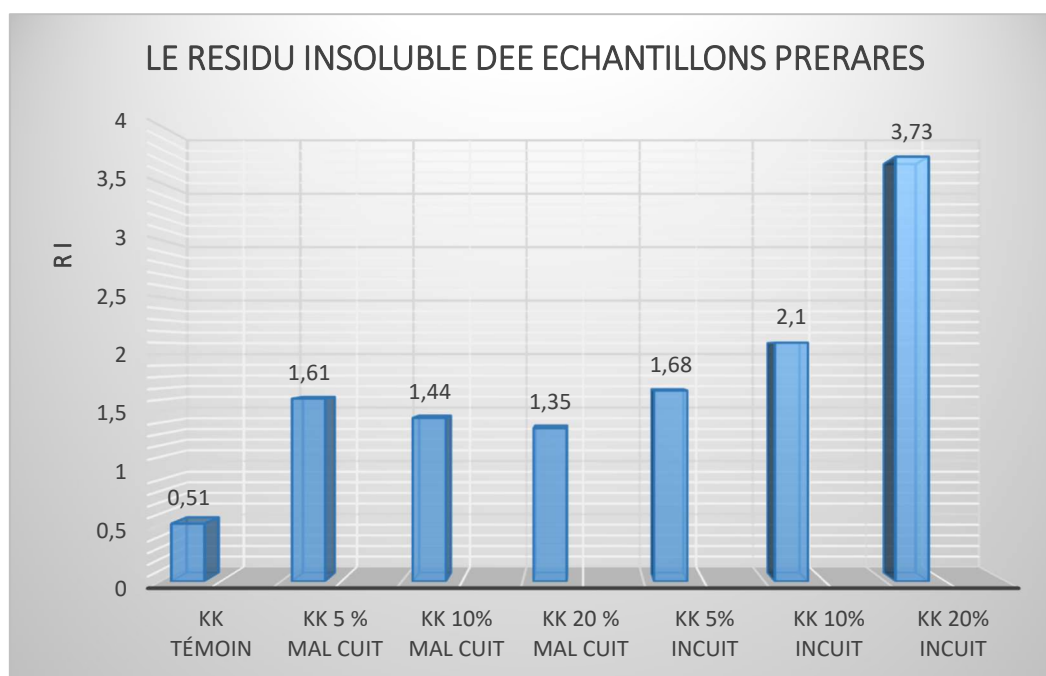


Figure IV.20. Le résidu insoluble des échantillons de ciment préparés.

IV.6. Essais sur pâtes cimentaires

Les résultats des essais de consistance normale, de temps de prise et le l'expansion à chaud des ciments préparés sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Tableau IV.14. Résultats des essais sur pates cimentaires à l'état frais.

Nom échantillon	Heure Zéro	Quantité d'eau(ml)	Consistance normale	TDP (min)	TFP (min)	TP	L'expansion à Chaud (mm)
KK témoin	15h39	130	26	155	265	110	1.5
KK 5% INCUIT	13h22	133	26,6	113	227	114	10
KK 10% INCUIT	14h3	134	26,8	157	282	125	8
KK 20% INCUIT	13h48	135	27	180	315	135	6
KK 5% MAL CUIT	14h25	133	26.6	231	391	160	11
KK 10% MAL CUIT	15h26	132	26,4	220	370	150	10
KK 20% MAL CUIT	14h42	131	26,2	211	332	121	9

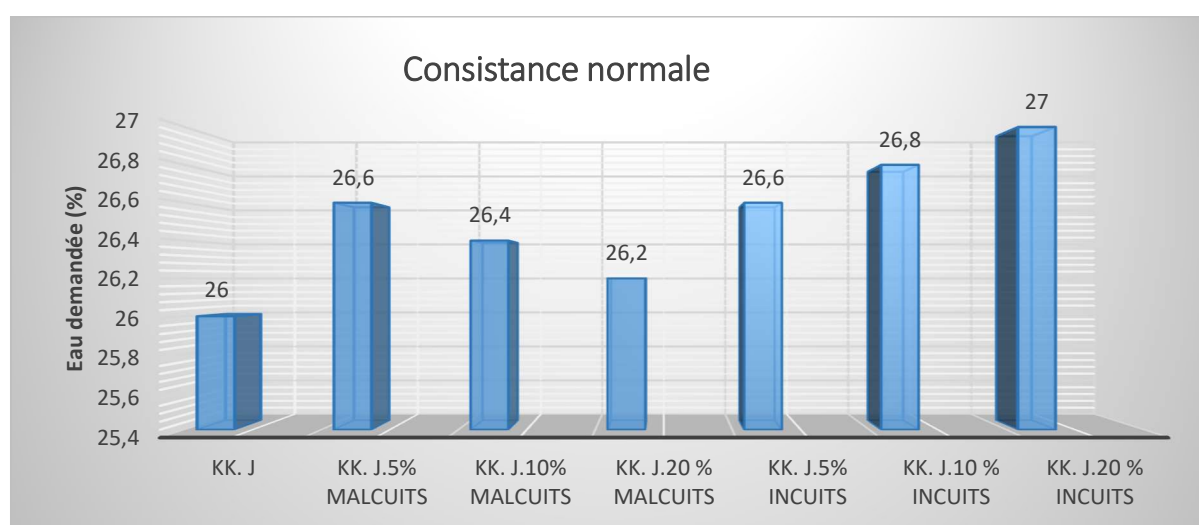


Figure IV.21. La consistance normale.

D'après la figure IV.22, le KK mal cuit a retardé le début de prise, mais avec une réduction du temps de fin de prise. D'autre part, le temps de début et fin de prise augmente réciproquement avec le pourcentage de KK incuit utilisé. Les résultats obtenus restent acceptables en comparaison avec le mélange témoin.

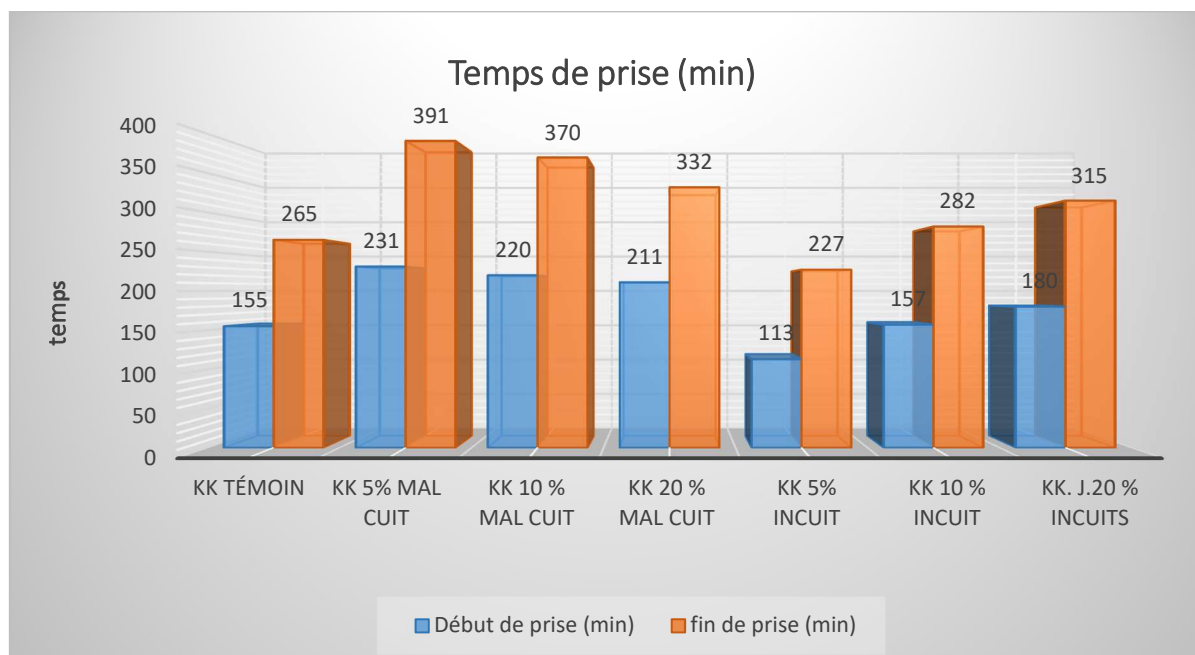


Figure IV.22. Temps de début de prise et de fin déprise.

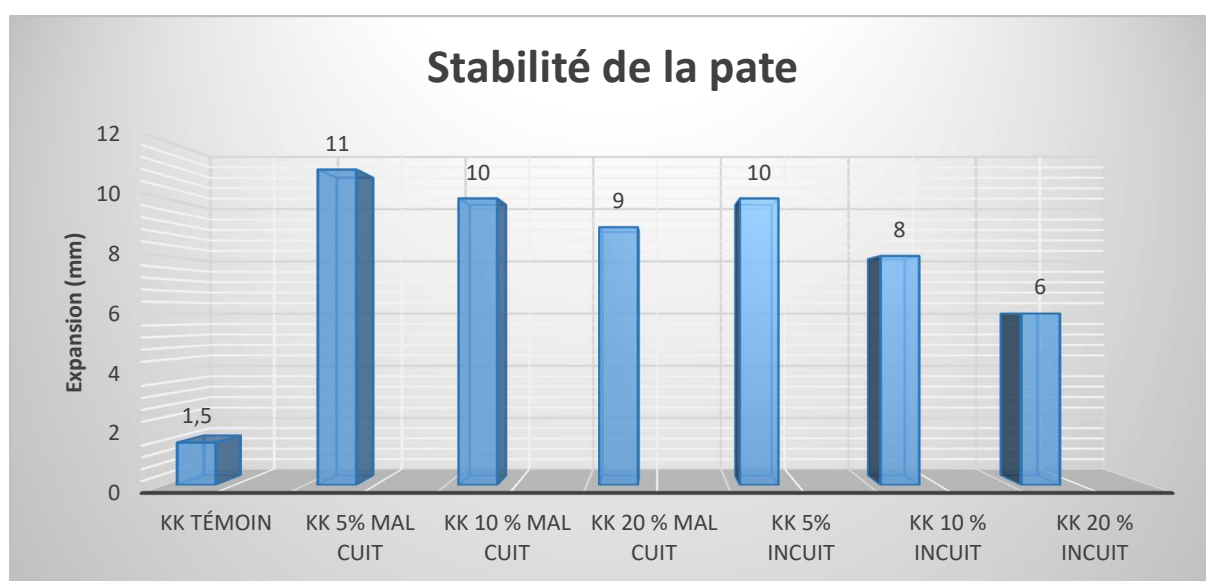


Figure IV.23. L'expansion à Chaud des pates cimentaires.

L'expansion à chaud est généralement tolérable pour tous les mélanges cimentaires étudiés (figure IV.23).

IV.7. Essai de résistance mécanique

IV.7.1. Résultats des résistances à la traction par flexion

Les résultats de la résistance à la traction des mélanges étudiés sont comparables au mélange témoin, à l'exception de celui avec 5% de KK mal cuit.

Tableau IV.15. Résistance à la traction par flexion des ciments préparés.

Nom échantillon	KK témoin	KK 5% INCUIT	KK 10% INCUIT	KK 20% INCUIT	KK 5 % MAL CUIT	KK 10 % MAL CUIT	KK 20 % MAL CUIT
Rf2 (MPa)	3,45	3,75	3,65	3,555	3,8	4,4	3,75
Rf7 (MPa)	5,9	6,1	6,1	5,5	6,25	5,85	6,35
Rf28 (MPa)	7,3	5,75	7,05	7,5	7,2	7,6	7,75

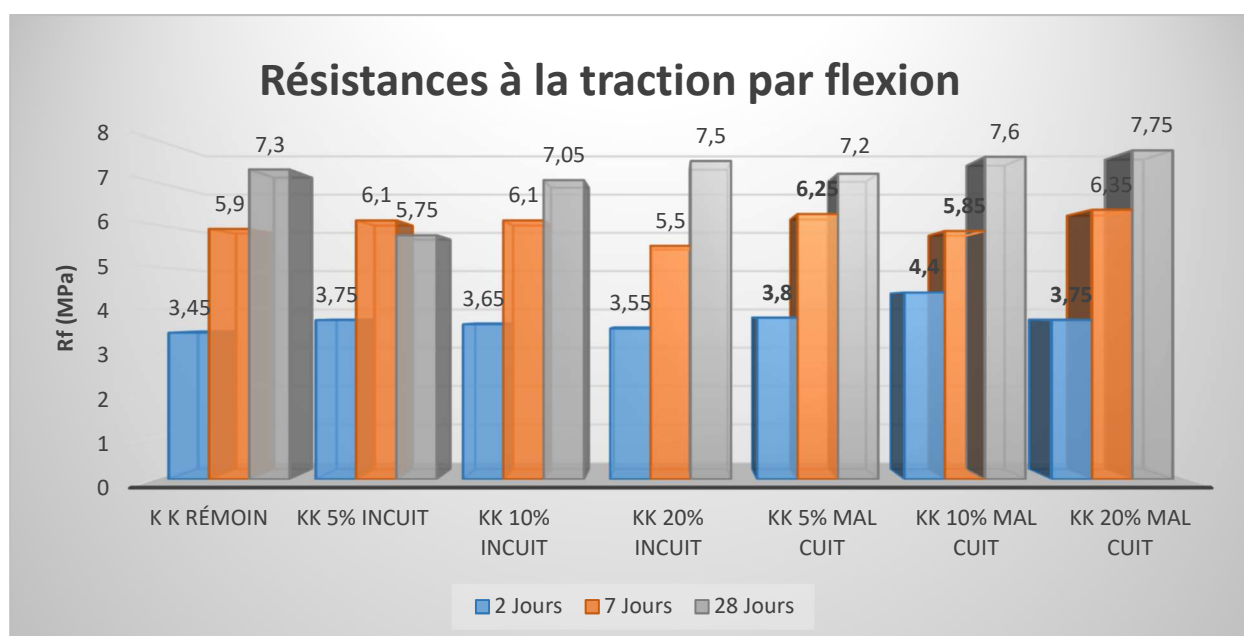


Figure IV.24. Résistance à la flexion des ciments préparés.

IV.7.2. Résistances à la compression

Les résistances à la compression obtenues sont supérieures à celle du mélange témoin. Les résistances développées par les mélange avec le KK mal cuit sont presque identique. Tandis que l'augmentation du pourcentage de KK incuit diminue la résistance (figure IV.25).

Tableau IV.16. Résistance à la compression du ciment préparé

Nom échantillon	KK témoin	KK 5% INCUIT	KK 10% INCUIT	KK 20% INCUIT	KK 5 % MAL CUIT	KK 10 % MAL CUIT	KK 20 % MAL CUIT
Rc2	15,13	16,1	16,65	15,48	16,23	17,88	15,7
Rc7	33,8	37,22	34,625	33,875	34,57	34,325	36,6
Rc28	46,33	52,42	47,225	46,6	50,10	49,075	52,45

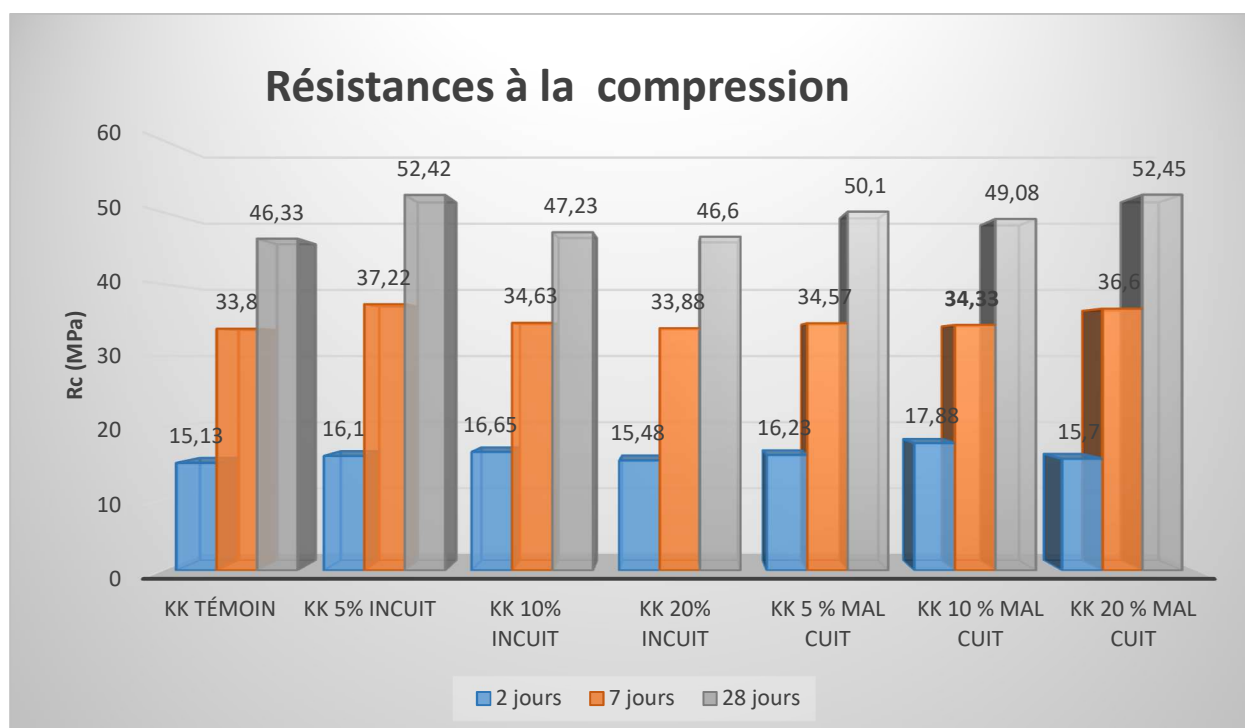


Figure IV.25. Résistance à la compression des ciments préparés.

IV.8. Conclusion

Dans ce chapitre, on a remarqué que l'addition du KK incuit et mal cuit avec différentes proportions à un effet sur les caractéristiques physiques, chimiques et mécaniques du ciment.

Les résultats des différents essais montrent que le « mauvais » clinker peut être utilisé comme addition minérale pour la fabrication des ciments Portland avec ajout d'une classe de résistance 42.5.

Conclusion générale et perspectives



Conclusion générale et perspective

Dans ce travail, on a valorisé les clinkers incuits et mal cuits comme étant une ressource minérale pouvant être bénéfique et rentable pour les cimenteries.

Les conclusions suivantes peuvent être tirées :

- Le clinker mal cuit nécessite moins de temps de broyage pour atteindre une grande surface spécifique, ce qui est bénéfique pour l'économie de l'énergie de broyage.

- Le KK incuit et mal cuit de la cimenterie de Tébessa possède une activité minérale très forte ($Q_{CaO} > 150$ mg/g).

- La PAF pour le clinker mal cuit et incuit est élevée (PAF > 5 %), puisque la calcination est incomplète. Cependant, les différents mélanges préparés dans cette étude ont une PAF acceptable.

- L'excès de chaux libre (non liée) dans le mauvais clinker peut causer le gonflement du ciment, des fissures et une perte de résistance.

- Le résidu insoluble est dans les normes pour le clinker cuit et mal cuit (≤ 5 %). Mais, ce n'est pas le cas pour l'incuit.

- Le mélange avec 20 % de clinker incuit réduit le temps de broyage de 25 %.

- Le clinker mal cuit retarde le début de prise et réduit le temps de fin de prise. D'autre part, le temps de début et fin de prise augmente réciproquement avec le pourcentage de clinker incuit utilisé.

- Les résistances à la compression obtenues sont supérieures à celle du mélange témoin. Les résistances développées par les mélanges avec le clinker mal cuit sont presque identiques. Tandis que l'augmentation du pourcentage du clinker incuit diminue la résistance.

Comme perspectives futures, il faut étudier la durabilité des mélanges avec 20 % de mauvais clinker, pour valider les résultats et éliminer tout risque de gonflement et d'instabilité du ciment.

Références bibliographique



Références bibliographiques

- [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] Ouzid. S. (2017). Mesure des polluants atmosphériques générés par la société des ciments de Tébessa. Mémoire de master en chimie, Université de Tébessa.
- [3] Benguedouar A. (2013). Synthèse et caractérisation de silicates de calcium hydrates (C.S.H) hybrides. Mémoire Magister en chimie, Université de Yaounde I.
- [4] Le Centre d'information sur l'eau. Paris France. Disponible sur <http://www.cieau.com/toutpubl/sommaire/texte/4/contenu/423.htm>
- [5] Beauchamp J. Mécanique des roches et des sols. Cours en ligne. Université de Picardie Jules Verne disponible sur <http://www.u-picardie.fr/~beaucham/eadaa/mecasol.htm>.
- [6] Gypse. Disponible sur <http://fr.wikipedia.org/wiki/Gypse>
- [7] Bauxite. Disponible sur <http://fr.wikipedia.org/wiki/Bauxite>
- [8] Kaid N. (2000). Contribution à l'étude des caractéristiques physico-chimiques des mortiers pouzzolaniques. Mémoire de Magistère en Génie civil, USTMB d'Oran.
- [9] Hamami A.E. (2009). Vers une prédiction de la perméabilité au gaz à partir de la composition des matériaux cimentaires. Thèse de doctorat de l'Université de La Rochelle, France.
- [10] Tchakoute K.H. (2013). Elaboration et caractérisation de ciments Géopolymères à base de scories volcaniques. Thèse de doctorat en Chimie Inorganique, Université de Yaounde I.
- [11] Bellifa S. (2012). Evolution de la porométrie des pates autoplaçantes. Mémoire de Magister en Génie civil, Université de Tlemcen.
- [12] Bur N. (2012). Etude des caractéristiques physico-chimiques de nouveaux bétons éco respectueux pour leur résistance à l'environnement dans le cadre du développement durable. Thèse du doctorat, Université de Strasbourg Discipline.

- [13] 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.
- [14] Yahia. M. (2016). Contribution à la valorisation d'un déchet de cimenterie (ciment hydraté) pour l'élaboration d'un nouveau ciment. Mémoire de master en génie civil, Université de M'Sila.
- [15] Sai O. et Zegaoui I. (2019). Elaboration d'un Eco-ciment pouzzolanique à base de vase de barrage activée thermiquement et chimiquement. Mémoire de master chimie des matériaux, Université de Boumerdès.
- [16] Guérandel C. (2009). Etude de la qualité du piégeage des matières organiques par la matrice cimentaire vis-à-vis de la lixiviation. Thèse de Doctorat en Chimie analytique, l'Université Paul Verlaine – Metz.
- [17] Cours théoriques de : mr. samar.
- [18] Benlarbi A.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 en Mines, Université de Bejaia.
- [19] Industrie cimentaire. Disponible sur
<http://www.infociments.fr/publications/industrie-cimentiere/statistiques/>.
- [20] Rapport de la cimenterie d'El-Ma-labiod Tébessa, (2018).
- [21] Documentation de la cimenterie d'El-Ma-labiod Tébessa, (2013).
- [22] Rapport de la cimenterie d'El-Ma-labiod Tébessa, (2019).
- [23] Smidth. F. L. (1993). Parts & services division, Brochure de la cimenterie d'Elma Labiod.
- [24] Société des ciments Tébessa (2020). Gisement de calcaire (El Ma Labiod), plan annuel d'exploitation.
- [25] Société des ciments Tébessa (2020). Gisement d'argile (El Ma Labiod), plan annuel d'exploitation.

- [26] Société des ciments Tébessa (2020). Gisement de sable (El Ma Labiod), plan annuel d'exploitation.
- [27] Abid. K. (2014). Etude AMDEC D'un Broyeur a Boulets Type Unidan. Mémoire de master en science et technologie, université d'Annaba.
- [28] Zait M. et Djama Y. (2017). L'industrie du ciment, revue du ministère de l'industrie et des mines.
- [29] Hellal W. et al. Fichier pris de laboratoire de la cimenterie d'Elma Labiod.
- [30] de Parisot R. l'industrie cimentière française, et la réduction des émissions de CO₂.
- [31] NF EN 196-1. (2016). Méthodes d'essais des ciments – Partie 1: Détermination des résistances.
- [32] Ghomari F. et Bendi-ouis A. (2008). Travaux pratiques: masse volumique granulat. Université de Tlemcen.
- [33] NF EN 196-6. (2018). Méthodes d'essais des ciments - Détermination de la finesse.
- [34] NF EN 196-2. (2013). Méthodes d'essais des ciments – Partie 2: Analyse chimique des ciments.
- [35] NF EN 196-3. (2017). Méthodes d'essais des ciments – Partie 3: Détermination du temps de prise et de la stabilité.