



Département de Technologie chimique industrielle

Rapport de soutenance

En vue de l'obtention du diplôme
de Licence professionnelle en :

Génie de la formulation

Thème :

Etude du control qualité et l'évaluation chimique du
ciment lors de sa cuisson

Réalisé par :

Salmi Nadjia

Encadrée par :

- Moulahcene Lamia
- Roukbi Asma

MCB / Institut de la Technologie, Université de
BOUIRA

Assistante PDG / EPE SOCIETE SAOURA DES
CIMENTS GICA

Soutenu devant le jury :

- Examineur : M.Benhamada
- Président de jury : K.Iggui

MCB / Institut de la Technologie, Université de
BOUIRA

MCA / Institut de la Technologie, Université de
BOUIRA

Remerciement

Je remercie tout d'abord Dieu tout puissant de m'avoir donné le courage et la volonté pour accomplir ce modeste travail.

J'adresse ma profonde reconnaissance à mon père qui est mon maître et mon guide pour toujours et ma chère mère qui m'ont entouré pendant cette période. Un grand merci pour eux de m'avoir amené à ce niveau et de m'avoir soutenu.

Ma sœur et mon frère que j'ai de plus beaux dans ce monde.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mon encadrant madame Moulahcene Lamia, qui a été mon principal interlocuteur tout au long de la réalisation de ce mémoire et je la remercie surtout pour sa disponibilité, ses orientations et pour son écoute.

Je tiens à remercier infiniment madame Roukbi Asma de m'avoir fait l'honneur d'encadrer ce travail avec qui je me suis sentie encouragée et très à l'aise et qui m'a chaleureusement accueilli au sein de la société Saoura des ciments ainsi pour la confiance qu'elle m'a accordé en me confiant ce stage.

Je remercie également l'équipe du laboratoire SSC de m'avoir fourni toute les possibilités pour réaliser mes expériences et d'avoir épaulé dans l'aboutissement de mes travaux ainsi de m'avoir aidé à m'adapter et de m'avoir donné toutes les informations nécessaires, ils ont toujours su m'aiguiller et aiguïser ma curiosité par leurs conseils et leurs suivis.

Mes vifs remerciements vont également aux membres du jury en acceptant d'examiner mon travail et de l'enrichir par leurs propositions.

Merci

Salmi Nadjia

Résumé

Tout ciment diffère par sa qualité, par ses propriétés et par ses performances. La qualité de ce matériau commence de la carrière jusqu'à la dernière étape du processus de fabrication.

Le cru obtenu doit avoir une composition chimique et physique la plus régulière possible pour avoir une bonne stabilité du four lors de la cuisson et l'obtention d'un clinker de qualité. Le ciment est prélevé, analysé chimiquement et physiquement, ensuite subit des essais de performances, de composition, de régularité et d'aptitude à la cuisson par des technologies d'analyses comme la fluorescence des rayons X et l'analyse au laboratoire afin de garantir son niveau de qualité.

Les résultats expérimentaux ont permis de mettre en évidence l'importance du contrôle qualité de la composition chimique et minéralogique du ciment pour avoir la meilleure cuisson qui permet une formulation aux normes.

Mots clés : Analyses chimiques, contrôle qualité, cru, cuisson, phases, minéralogique, clinker

ملخص

يختلف لكل أسمنت في جودته وخصائصه وأدائه، تبدأ جودة هذه المادة من المحجر إلى المرحلة النهائية من عملية التصنيع.

يجب أن يكون للمادة الخام التي يتم الحصول عليها تكوين كيميائي وفيزيائي منتظم يُدر الإمكان الحصول على استقرار جيد للفرد أثناء الطهو (الحرق) والحصول على كالكليز عالي الجودة. تتم إزالة الأسمنت ونحوه للتقييمات الفيزيائية ثم إخضاعه للختبارات الأداء والتكوين والتنظيم وإمكانية الطهي من خلال تقنيات نظرية متعددة مثل فلورية الأشعة السينية والتقدير المخبري لضمان مستوى جودته.

أتاح إنتاج التجريبية تسليط لضوء على أهمية مراقبة جودة التركيب الكيميائي ولعديدي للأسمنت للحصول على أفضل طهو (حرق) يسمح بصياغة حسب المعايير.

الكلمات الرئيسية: التحليل الكيميائي، مراقبة الجودة، الخام، الحرق، المراحل، المعادن، الكليز، المعالجة

Abstract

Every cement differs in its quality, properties and performance. The quality of this material begins from the quarry to the final stage of the manufacturing process.

The raw obtained must have a chemical and physical composition as regular as possible to have a good stability of the oven during cooking and obtain a good quality of clinker. The cement is removed, analyzed chemically and physically and then subjected to performance tests, composition, regularity and cooking ability through analytical technologies such as X-ray fluorescence and laboratory analysis to ensure its level of quality.

The experimental results have made it possible to highlight the importance of quality control of the chemical and mineralogical composition of the cement to have the best cooking that allows a formulation to the standards.

Keywords: Chemical analysis, quality control, raw, cooking, phases, mineralogical, clinker.

Sommaire

	Page
Remerciement	
Résumé	I
Sommaire	II
Liste des figures	II
Liste des tableaux	VI
Liste des symboles et abréviations	VII
Introduction générale	1
Chapitre I. Présentation de l'entreprise SSC	
I.1. Entreprise d'accueil	3
I.2. Localisation	3
I.3. Statut juridique	3
I.4. Activités	3
I.5. Constructeur	4
I.6. Organisme du suivi	4
I.7. Création d'emploi	4
I.8. Aspect financière	4
I.9. Les directions générales de l'EPE	4
Chapitre II. Partie théorique	
Partie I. Notions générales	5
I.1. Normalisation Algérienne des ciments	5
I.1.1. Références aux normes algériennes	5
I.2. Pour l'analyse chimique	5
I.3. Pour les essais	6
I.4. Désignations normalisées	6
I.5. Symbolisation de l'industrie cimentière	7
I.6. Critères de conformité	7
I.6.1. Exigences générales	7
I.6.2. Exigences mécaniques et physiques	7
I.6.3. Exigences chimiques	8
I.7. Hygiène et sécurité	8
I.7.1. Définition et objectif	8
I.7.2. Sécurité au laboratoire	9
Partie II. Généralités sur le ciment	9
II.1. Historique	9
II.2. Définition	9
II.3. Compositions des ciments	10
II.3.1. Matières premières	10
II.3.1.1. Calcaire	10
II.3.1.2. Eléments argileux calcaires	11
II.3.1.3. Argiles	11
II.3.2. Matériaux de correction	11
II.3.2.1. Minerai de fer	11
II.3.2.2. La bauxite	11
II.3.2.3. Sable	12
II.3.3. Ajouts	12
II.3.3.1. Gypse	12
II.3.3.2. Le laitier	12
II.3.3.3. Les pouzzolanes	13
II.3.4. Additifs	13
II.3.5. Produit semi-fini (clinker)	13
II.3.5.1. Composition en oxydes limites de ciment portland	14
II.4. Types des ciments courants	14

Sommaire

II.4.1. Classifications des ciments courants selon leurs résistances aux sulfates SR	15
II.4.2. Autres ciments	15
II.5. Utilisation des ciments	15
II.6. Procédé de fabrication du ciment	16
II.6.1. Extraction des matières premières	17
II.6.2. Concassage	17
II.6.3. Préparation du cru	17
II.6.4. Préhomogénéisation	17
II.6.5. Broyage séchage	18
II.6.6. Echantillonnage	18
II.6.7. Séparation	18
II.6.8. Homogénéisation	18
II.6.9. Cuisson	19
II.6.9.1. Installation de l'atelier cuisson	19
II.6.9.2. Le préchauffage	19
II.6.9.3. Précalcinateur	19
II.6.9.4. Four rotatif	19
II.6.10 Refroidissement	20
II.6.11. Broyage clinker	20
II.6.12. Stockage	20
II.6.13. Ensachage et expédition	20
II.7. Aptitude à la cuisson	21
II.7.1. Le cru	21
II.7.1.1. Généralités	21
II.7.1.2. Objectif de la préparation du cru	21
II.7.1.3. Composition du cru	22
II.7.2.1.a. Eléments porteurs de calcium	22
II.7.2.2.b. Eléments porteurs d'oxydes acides	23
II.7.2.3.c. Eléments mineurs	23
1. Magnésium (MgO)	23
2. Alcalins	23
3. Soufre (S)	23
4. Chlore (Cl)	23
II.7.2. La phase cuisson	24
II.7.2.1. Composition clinker	24
Partie expérimentale : Méthodes et matériels	
Chapitre III. Synthèse du cru	
III.1. La chimie en atelier cuisson	26
III.1.1. Le réchauffement	26
III.1.2. Décarbonatation	26
III.1.3. Clinkérisation	26
III.1.4. Refroidissement	27
III.2. Réactions chimiques	27
III.3. Critères pour l'évaluation chimique des crus	27
III.3.1. Calcul de la farine cru	27
III.3.2. Modules	28
III.3.2.1. Facteur de saturation en chaux (LSF)	28
III.3.2.2. Module silicique	28
III.3.2.3. Module alumino-ferrique	29
III.3.2.4. Formule de Bogue	29
Chapitre IV. Contrôle qualité	
IV.1. Qualité produit	30

Sommaire

IV.1.1. Plan de contrôle	30
IV.1.1.1. Préparation d'un échantillon de ciment pour essais	31
IV.1.1.2. Analyseurs en ligne	31
IV.2. Techniques d'analyse	31
IV.2.1. Fluorescence X (XRF)	31
IV.2.1.1. Pratique de l'analyse par fluorescence X	32
IV.3. Analyse chimiques	32
IV.3.1. Perte au feu	33
IV.3.1.1. Principe	33
IV.3.1.2. Matériels utilisés	33
IV.3.1.3. Mode opératoire	34
IV.3.1.4. Expression des résultats	34
IV.3.2. Sulfates et sulfures	34
IV.3.2.1. Principe	34
IV.3.2.2. Matériels utilisés	34
IV.3.2.3. Mode opératoire	34
IV.3.2.4. Expression des résultats	35
IV.3.3. Résidus insolubles	35
IV.3.3.1. Principe	35
IV.3.3.2. Matériels utilisés	35
IV.3.3.3. Mode opératoire	36
IV.3.3.4. Expression des résultats	36
IV.3.4. Dosage des éléments majeurs	36
IV.3.4.1. Principe	36
IV.3.4.2. Matériels et produits utilisés	36
IV.3.4.3. Mode opératoire	37
IV.3.4.3.a. Détermination de la silice SiO_2	37
IV.3.4.3.b. Détermination d'oxyde de calcium CaO	38
IV.3.4.3.c. Détermination d'oxyde de magnésium MgO	39
IV.3.4.3.d. Détermination d'oxyde de fer Fe_2O_3	39
IV.3.4.3.e. Détermination d'oxyde d'aluminium Al_2O_3	40
Chapitre V. Résultats et discussions	
V.1. Identifications des échantillons	42
V.1.1. Optimisation du cru	42
V.1.2. Résultats contrôle qualité	46
Conclusion générale	48
Références	49

Liste des figures

	Page
Figure I.1. Groupe industriel des ciments d'Algérie SSC	3
Figure II.2. Marquage CE	3
Figure II.1. Carrière calcaire SSC	11
Figure II.2. Carrière argile	11
Figure II.3. La source en SABLE	12
Figure II.4. Gypse	12
Figure II.5. Clinker	14
Figure II.6. Fonctionnement de la cimenterie SSC	16
Figure II.7. Extraction d'une carrière	17
Figure II.8. Différentes méthodes utilisées pour l'homogénéisation	18
Figure II.9. Différentes méthodes utilisées d'échantillonnage	18
Figure II.10. Four rotatif SSC	20
Figure II.11. Broyeur ciment SSC	20
Figure II.12. Silos clinker SSC	21
Figure II.13. Ensachage SSC	21
Figure II.14. Les cinq opérations principales réalisées dans l'atelier de caisson	24
Figure II.15. Schéma de clinkérisation	25
Figure IV.1. Exemple d'échantillonneur automatique de farine crue	31
Figure IV.2. Appareil spectromètre fluorescence XRF du SSC	32
Figure IV.3. Différentes perles fabriquées dans un dessiccateur	33
Figure IV.4. Creuset	34
Figure IV.5. Balance électrique	34
Figure IV.6. Plaques chauffantes ciments	35
Figure IV.7. Filtration SO ₃	35
Figure IV.8. Echantillons ciments	35
Figure IV.9. Filtration RI	36
Figure IV.10. Etuve	37
Figure IV.11. Agitateur magnétique	37
Figure IV.12. Matériels de la pesée	37
Figure IV.13. Filtration de la matière	37
Figure IV.14. Évaporation à sec	37
Figure V.1. Analyse de la composition par XRF	42
Figure V.2. Gaz chassés en fonction de la température	44
Figure V.3. Température de clinkérisation	45
Figure V.4. Analyse composition ciment	46
Figure V.5. Analyse de l'SO ₃ et les RI	48

Liste des tableaux

	Page
Tableau II.1. Références normatives	5
Tableau II.2. Exigences mécaniques et physiques définies en termes de valeurs caractéristiques	7
Tableau II.3. Exigences chimiques définies en termes de valeurs caractéristiques	8
Tableau II.4. Composition en oxydes limites de ciment Portland	14
Tableau II.5. Composition des principaux types des ciments Portland	15
Tableau II.6. Mélange du cru SSC	17
Tableau II.7. Limites approximatives de la composition en oxyde du ciment "cru"	21
Tableau II.8. Teneur des porteurs de calcium en CaCO_3	22
Tableau III.1. Composition de Bogue du ciment	29
Tableau IV.1. Programme de contrôle	30
Tableau IV.2. Identification d'analyses chimiques	33
Tableau V.1. Analyses Composition minéralogique	42
Tableau V.2. Evaporation et décarbonatation aperçu dans l'atelier caisson	43
Tableau V.3. Contrôle des indices chimiques	44
Tableau V.4. Résultats d'analyses perte au feu PAF	46
Tableau V.5. Résultats analyses de la teneur du ciment en sulfate et des résidus insolubles	46

Liste des symboles et abréviations

- AM** : Module aluminosilicique
- B.I.T** : Bureau International de Travail
- BK1** : Broyeur clinker (sil1)
- CE** : Certificat de conformité
- CTN** : Comité Technique Nationale
- EN** : European norm
- FX** : Fluorescence des rayons X
- GICA** : Groupe Industriel du Ciment en Algérie
- KK** : clinker
- LSF** : Facteur de saturation en chaux
- MS** : Module silicique
- NA** : Norme algérienne
- SSC** : société Saoura des ciments
- XRF** : La spectrométrie de fluorescence des rayons X

Notations cimentières

	Notation	Formule Chimique	Nom
Constituants Chimiques	C	CaO	Oxyde de Calcium (Chaux)
	S	SiO ₂	dioxyde de silicium (Silice)
	A	Al ₂ O ₃	Oxyde d'Aluminium
	-S	SO ₃	Soufre
	F	Fe ₂ O ₃	Oxyde de Fer
	T	TiO ₂	Oxyde de Titane
	M	MgO	Oxyde de magnésium
Constituants hydrauliques	C2S	Ca ₂ SiO ₄	Silicate bicalcique (Belite)
	C3S	Ca ₃ SiO ₅	Silicate tricalcique (Alite)
	C4AF	Ca ₄ FeO ₁₀	Alumino-ferrite tétracalcique
	C2F	Ca ₂ Fe ₂ O ₅	Ferrite
	C3A	Ca ₃ Al ₂ O ₆	Aluminate tricalcique
Constituants hydraté	CS.2H	CaSO ₄ .2H ₂ O	Sulfate de Calcium dihydraté (Gypse)
	CA	CaAl ₂ O ₄	Aluminate de Calcium
	CO	CO	monoxyde de carbone
	AH ₃	Al ₂ O ₃ .3H ₂ O	Hydroxyde d'aluminium
	C ₄ AS H ₁₂	Ca ₄ A ₁₂ SO ₁₀ .12H ₂ O	Mono sulfoaluminate de Calcium
	C ₃ A.H ₆	3CaO. Al ₂ O ₃ .6H ₂ O	Aluminate tricalcique hydrate
	3CaO.Al ₂ O ₃ .3CaSO ₄ .31H ₂ O	C ₃ AC ₃ S ₃ H ₃₁	Sulfoaluminate de calcium hydraté (ettringite)
	CH	Ca(OH) ₂	Chaux hydratée

Introduction générale

Mise en contexte :

Dans ce dernier siècle le ciment est devenu le matériau le plus utilisé dans le domaine de la construction ce qui justifie une forte demande pour accompagner le développement des pays.

Le ciment est une poudre appelée liant hydraulique constituée de sels minéraux anhydres. En présence d'eau ils forment une pâte qui fait prise et durcit progressivement par suite de réactions d'hydratation [1].

La technologie de fabrication des ciments propose plusieurs procédés qui sont nécessaires au traitement des mélanges crus afin d'obtenir un produit fini appelé le clinker. Ces procédés sont utilisés d'une manière successive à savoir : Extraction, concassage, broyage, séchage ou préchauffage, cuisson, refroidissement et transport du matériau.

On appelle cru la matière première utilisée en cimenterie, il est composé de 80% de calcaire naturel et de 20% de minéraux argileux. Notre ciment voulu sera déterminé par les proportions des différents constituants de cru [2].

La transformation se réalise dans des fours rotatifs de grandes dimensions au sein desquels s'opère le traitement du cru vers 1450°C dont plusieurs réactions vont aboutir à la formation des minéraux du clinker avec une composition adéquate en phases minérales du ciment. Ces résultats s'expliquaient par la formation à la cuisson, des silicates de chaux qui sont principalement responsables de la qualité mécanique, physique et chimique du clinker [2].

Le contrôle des phases entre la chaux d'une part, la silice, l'alumine et l'oxyde de fer d'autre part a permis de fixer avec précision les compositions chimiques et les températures de cuisson permettant d'obtenir des ciments de caractéristiques bien définies dont il est admis que les ciments diffèrent entre eux par leurs propriétés et leurs performances [3].

Pour avoir une bonne composition chimique du cru dépendant de la composition de chaque matière première entrent dans la synthétisation de clinker et pour limiter les quantités des impuretés on fait une optimisation par un contrôle qualité donc ça va nous permettre de déduire la nature des éléments chimiques présents dans le ciment et leurs concentrations qui est le lien entre ces processus de production et de manutention et la conformité du ciment

Donc l'objectif de mon travail est ce contrôle qui a pour but de s'assurer si le produit est conforme aux exigences et spécifications ainsi d'avoir l'aptitude à la cuisson et de supporter l'effort d'amélioration continue du processus.

Introduction générale

Présentation de l'étude :

La réalisation de ces objectifs constitue la base de mon étude, elle est basée principalement sur l'utilisation des outils statistiques pour traiter les différents résultats trouvés à partir des analyses chimiques effectués qui commence par une introduction qui décrit succinctement mon travail et ensuite deux grandes parties qui comprennent :

- ❖ Une partie théorique sur une étude bibliographique et des généralités sur le ciment.
- ❖ Une partie expérimentale sur l'optimisation du cru, le contrôle qualité et la discussion de mes résultats.

En fin nous terminons par une conclusion générale

Chapitre I. Présentation de l'entreprise SSC

I.1 Entreprise d'accueil

La société des ciments de Béchar est une société par actions filiales du groupe industriel des ciments d'Algérie (GICA) ; la cimenterie de la Saoura est en activité depuis le 15 mars 2020 elle est active dans le domaine de la production et la commercialisation des ciments ordinaires, spéciaux et tout autre matériau de construction.

L'usine S.S.C est implantée dans la commune de Béchar, wilaya de BECHAR avec une capacité contractuelle (installée) de production de 3200 tonnes de ciments par jour correspondant à une production de 1.000.000 Tonnes/an ; la société fabrique actuellement :

- Le ciment Portland aux ajouts CPJ : CPJ-CEM II / A 42.5 NA 442 [5].



Figure I.1. Groupe industriel des ciments d'Algérie SSC

I.2 Localisation

La cimenterie est se située à 33 km au Nord - Est de la commune de Bechar, à 42 km (37 min) de l'Aéroport de Béchar et 48 km sud-ouest vers N6 du village Benzireg.

I.3 Statut juridique

EPE/SPA au capital social de 500.000.000 DA.

I.4 Activités

- Fabrication et commercialisation des ciments
- Matériaux de construction

I.5 Constructeur

CBMI Constructeur CO.LTD, SINOMA, Chine.

I.6 Organisme du suivi

- CIMENT ENGINEERING S.A, CESA- Suisse
- Centre d'étude et de services technologique de l'Industrie des C.E.T.I. M - Boumerdes

I.7 Création d'emploi

- Emploi directe et permanent: 500 emplois.
- Emploi indirecte : 800 emplois

I.8 Aspect financière

En application de la résolution du CPE N° 05/125 du 01/04/2012 susvisée, le groupe GICA bénéficié auprès de la Banque Extérieure d'Algérie, d'un crédit destiné aux investissements pour la réalisation de projet de cimenterie de Béchar, pour un montant de 28 milliards DA, aux conditions suivantes :

- Durée 15 ans dont 7 ans de différé.
- Taux d'intérêt 1%.

Financement du projet : 100% Banque Extérieur d'Algérie «BEA»

I.9 Les directions générales de l'EPE

➤ **DT :**

Production, fabrication, contrôle qualité (physico-chimique – laboratoire), carrière, cru, cuisson, ciment...

➤ **DRH :**

Gestion RH, paie, formation...

➤ **Commercial et approvisionnement :**

Dépôts (Béchar, Beni ounif, Louata, Tindouf), marketing, administration des ventes...

➤ **D.Développement :**

Travaux neufs.

➤ **DFC :**

Finance.

➤ **D.Audit :**

Contrôle de gestion.

Partie I. Notions générales

I.1 Normalisation Algérienne des ciments

Les normes traitantes du ciment sont élaborées par le Comité Technique Nationale CTN 37 « liants-bétons-granulats » qui réunit des représentants des utilisateurs, des producteurs, des administrations et des organismes de contrôle. Les types du ciment et les classes de résistances définis dans les normes permettent au prescripteur et à l'utilisateur d'atteindre les objectifs en matière du développement durable pour les constructions incorporant du ciment.

Ces normes sont réparties en :

- Normes de spécifications
- Normes des méthodes d'essais [3].

I.1.1 Références aux normes algériennes

Les normes algériennes correspondant au domaine de cimenterie ont été adoptées conformément à la résolution du procès-verbal de la réunion n°01 du 23/01/2013 dont le contenu technique est en général identiques aux normes européennes référence pour les ciments courants.

La correspondance entre les normes européennes et les normes algériennes identiques est la suivante [1] :

Tableau II.1. Références normatives [3]

EN 196-1	EN 196-2	EN 196-3	EN 196-5	EN 196-6	EN 196-7	EN 196-8	EN 196-9	EN 197-2	EN 933-9	ISO 9277
NA 234	NA 5042	NA 230	NA 1952	NA 231	NA 254	NA 5097	NA 5061	NA 5040	NA 1948	NA 4340

I.2 Pour l'analyse chimique

➤ Calcination

C'est une opération qui consiste à chauffer un matériau ou un matériel à une température très élevée afin de le préparer pour divers analyses (physique ou chimique).

➤ Contrôle de l'absence d'ions chlorure (essai au nitrate d'argent)

Cet essai consiste à ajouter quelques gouttes de la solution de nitrate d'argent pour vérifier l'absence de turbidité ou de précipité dans la solution. Dans le cas contraire (présence de

turbidité ou de précipité), poursuivre le lavage en vérifiant périodiquement, jusqu'à ce que l'essai au nitrate d'argent soit négatif [4].

I.3 Pour les essais

a. Nombre d'essais

L'analyse d'un ciment peut nécessiter la détermination d'un certain nombre de ses propriétés chimiques. Pour cela on doit réaliser un ou plusieurs essais, au cours desquels on doit effectuer un certain nombre de mesures [4].

b. Expression des masses, volumes, facteurs et résultats

- Les masses en grammes, à 0,000 1 g près,
- Les volumes à la burette en millilitres, à 0,05 ml près.

Lors d'un essai unique on exprimer les résultats en pourcentage, généralement avec deux décimales [2].

I.4 Désignation normalisée

Les ciments CEM doivent être identifiés au minimum par la notation du type de ciment spécifié, suivi des nombres 32,5 ; 42,5 ou 52,5 indiquant la classe de résistance. Pour indiquer la classe de résistance à court terme, on doit ajouter la lettre N, la lettre R ou la lettre L, selon le cas. Les ciments courants résistants aux sulfates doivent en plus être identifiés par la notation SR. Avec le marquage de certificat de conformité CE.

Exemple : Un ciment Portland, conforme à l'EN 197-1 (La norme de référence pour les ciments courants européenne), appartenant à la classe de résistance 42,5 et présentant une résistance à court terme élevée, est identifié par [3] :

Ciment Portland EN 197-1 — CEM I 42,5 R

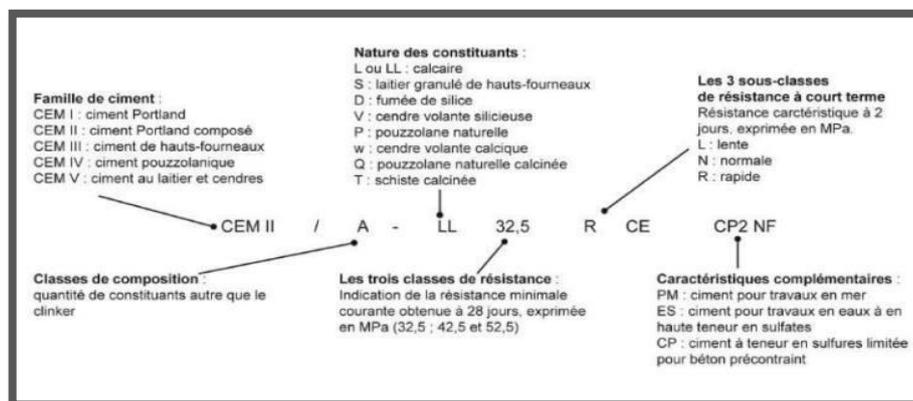


Figure II.1. Marquage CE

I.5 Symbolisation de l'industrie cimentière

Les molécules que l'on rencontre dans le clinker et le ciment sont beaucoup plus grandes et complexes, le cimentier a alors inventé un code supplémentaire pour faciliter l'écriture des réactions chimiques (voir tableau des notations cimentières I) qui sont à ne pas confondre avec les espèces chimiques désignant les éléments du tableau périodique ainsi [6] ;

- C3S en écriture cimentière représente 3(CaO) et SiO₂ en écriture chimique.
- C4AF en écriture cimentière représente 4(CaO) et Al₂O₃ et Fe₂O₃ en écriture chimique.

I.6 Critères de conformité

I.6.1 Exigences générales

La conformité des produits selon les normes doit être évaluée en continu sur la base d'essais effectués sur des échantillons ponctuels, leurs propriétés, les méthodes utilisées... [3].

I.6.2 Exigences mécaniques et physiques

Tableau III.2. Exigences mécaniques et physiques définies en termes de valeurs caractéristiques [3].

Classe de résistance	Résistance à la compression MPa			Temps de début de prise	Stabilité (expansion)
	Résistance à court terme		Résistance courante		
	2 jours	7 jours	28 jours	min	Mm
32,5 L ^{a)}	—	≥ 12,0	≥ 32,5	≤ 52,5	≤ 10
32,5 N	—	≥ 16,0			
32,5 R	≥ 10,0	—			
42,5 L ^{a)}	—	≥ 16,0	≥ 42,5	≤ 62,5	
42,5 N	≥ 10,0	—			
42,5 R	≥ 20,0	—			
52,5 L ^{a)}	≥ 10,0	—	≥ 52,5	—	
52,5 N	≥ 20,0	—			
52,5 R	≥ 30,0	—			

a) Classe de résistance uniquement définie pour les ciments CEM III.

I.6.3 Exigences chimiques

Tableau II.3. Exigences chimiques définies en termes de valeurs caractéristiques [3].

1	2	3	4	5
Propriété	Référence de l'essai	Type de ciment	Classe de résistance	Exigences
Perte au feu	EN 196-2	CEM I CEM III	toutes classes	5,0 %
Résidu insoluble	EN 196-2	CEM I CEM III	toutes classes	5,0 %
Teneur en sulfate (SO ₃)	EN 196-2	CEM I CEM II CEM IV CEM V	32,5 N 32,5 R 42,5 N	3,5 %
			42,5 R 52,5 N 52,5 R	4,0 %
		CEM III	toutes classes	
Teneur en chlorure	EN 196-2	tous types	toutes classes	0,10 %
Pouzzolanité	EN 196-5	CEM IV	toutes classes	satisfait à l'essai

I.7 Hygiène et sécurité

I.7.1 Définition et objectifs

Selon le Bureau International du Travail (B.I.T) : L'hygiène et la sécurité dans le travail est la science de l'anticipation, de l'identification, de l'évaluation et de la maîtrise des risques professionnels qui pourraient nuire à la santé et au bien-être des travailleurs dont il faut mettre en œuvre des mesures pour assurer la sécurité. Pour une meilleure sécurité il ne faut pas négliger les risques liés aux machines et aux équipements du travail dont il est nécessaire d'agir à toutes les étapes de la vie de cet équipement.

En conséquence, toutes préventions et sécurité respecté conduit à des conséquences économiques et sociales rassurantes pour l'usine sur la productivité, une réduction des coûts liés aux accidents et amélioration de la qualité et de l'efficacité du travail par l'élimination des dysfonctionnements qui perturbent la bonne marche du travail [5].

I.7.2 Sécurité au laboratoire

Toute personne a sa part de responsabilité. La sécurité commence par la prévention.

Il existe plusieurs risques qui dépendent de la nature du travail dont on trouve ; Des risques physiques, chimiques et radioactifs leurs dangers proviennent des pièces mobiles, d'électricité, d'absorption des produits toxiques, corrosifs, irritants et des rayons X...

Ces dangers provoquent des blessures graves et multiples donc en cas d'urgence il faut être prudent et avoir une bonne maniabilité [5].

Partie II. Généralités sur le ciment

II.1 Historique

Historiquement, le ciment a été inventé par les Romains en mélangeant la chaux et la pouzzolane. Les chercheurs ont longtemps étudiés la composition de ces roches dont les propriétés hydrauliques sont remarquables. La première tentative de fabrication de la chaux et la première utilisation du nom ciment date de 1756. Les premiers travaux sur les véritables ciments remontent à 1796 et sont dus à l'anglais PARKE qui a pris un brevet pour la fabrication d'un ciment romain qui était un véritable ciment prompt.

C'est seulement en 1845 que l'Anglais Johnson indiqua les règles de fabrication de ce produit. À la fin du XIXe siècle, en France, Le Chatelier étudia la composition chimique des divers constituants des ciments ; son œuvre fut perfectionnée et achevée par l'Américain Bogue au XXe siècle. [1].

II.2 Définition

Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire un matériau minéral finement moulu qui gâché avec de l'eau forme une pâte qui fait prise et durcit par suite de réactions et de processus d'hydratation et qui après durcissement conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau. Le ciment conforme à la NA 442, appelé ciment CEM, mélangé avec des granulats et gâché avec de l'eau de façon appropriée, doit être capable de produire un mortier ou un béton qui conserve son ouvrabilité pendant un temps suffisamment long.

Un ciment contient toujours du clinker, il peut être additionné de divers minéraux naturels ou artificiels, dont le rôle principal est soit de participer aux réactions d'hydratation (laitiers et produits pouzzolaniques) soit d'améliorer la compacité de la pâte (composants inertes comme les fillers). Il est constitué de 95 à 100 % de clinker. Le clinker est le résultat de la cuisson

d'un mélange d'environ 80 % de calcaire et 20 % d'argile dont les oxydes se combinent au cours de la cuisson pour former C3S, C2S, C3A et le C4AF [3,7].

II.3 Composition des ciments

II.3.1 Matières premières

Les matières premières pour la fabrication d'un ciment Portland sont extraites des roches naturelles (calcaire, marne et argile...) source des éléments chimiques Ca, Si, Al et Fe nécessaires à la formation des silicates et aluminates du clinker.

Le calcaire apporte le calcium ; l'argile apporte la silice SiO_2 , l'alumine Al_2O_3 , et l'oxyde ferrique Fe_2O_3 , nécessaire pour le processus de formation du clinker.

Ces matières premières contiennent par ailleurs d'autres éléments que ces oxydes fondamentaux, tels de la magnésie MgO , des sulfates, des sulfures, des alcalins K_2O , et Na_2O dans les pourcentages doivent être contenus en deçà de limites précises [1].

On classe habituellement les matières naturelles en :

- Calcaire : \longrightarrow plus de 80% de CaCO_3 .
- Eléments argilo- calcaires : \longrightarrow de 40% à 80% de CaCO_3 .
- Argile : \longrightarrow moins de 40% de CaCO_3 .

II.3.1.1 Calcaire

Les calcaires peuvent être de pureté et de dureté variable, ils proviennent du dépôt de CaCO_3 contenu dans les eaux de mer ou des lacs, dépôts provoqués par précipitation chimique ou réalisé par l'intermédiaire d'organisme vivant (mollusques, algues) [1].

Les principaux éléments rencontrés dans les calcaires sont :

- **La silice** : C'est la forme naturelle du dioxyde de silicium (SiO_2) qui entre dans la composition de nombreux minéraux [1].
- **La magnésie** : C'est un élément dangereux du fait de son expansion ultérieure possible au sein du ciment hydraté. Son pourcentage ne doit pas dépassé 5% dans les calcaires [1].
- **Le fer** : se rencontre le plus souvent sous forme d'oxyde Fe_2O_3 ou de pyrite Fe_2S . Le fer joue un rôle utile de fondant [1].
- **Les alcalins** : tels que la soude et le potasse qui sont volatilisés au moment de la clinkérisation et se retrouvent surtout dans les poussières du four lesquelles sont

actuellement souvent recyclées [1].

II.3.1.2 Élément 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 [1].

II.3.1.3 Argiles

Les argiles sont constituées essentiellement de silice, d'alumine et de fer et constituent par là même le complément indispensable du calcaire. On distingue ainsi :

Les argiles résiduelles provenant de la décomposition sur place de roches existantes, déposées sous l'effet des mers, du vent...

Note : Les argiles utilisées en cimenterie ne doivent pas contenir des fragments des roches qui risquent de les rendre impropres à la fabrication du ciment (silex, quartz, sous forme de nodules, de sable etc.) [1].



Figure II.1. Carrière calcaire SSC

- Superficie : 211 ha
- Lieu-dit : Djebel MADJOUZ
- Durée de vie : 85 ans.



Figure II.2. Carrière argile SSC

- Superficie : 141 ha
- Lieu-dit : BEN ZIREGUE
- Durée de vie : 69 ans.

II.3.2 Matériaux de correction

Malgré la grande diversité de matériaux siliceuse et calcaire, la cimenterie doit parfois introduire d'autre composant dans le mélange cru, pour améliorer ses propriétés (résistance, flexibilité, fondation...) [21], on distingue :

II.3.2.1 Minerai de fer (Fe_2O_3)

On appellera minerai de fer tout minerai naturel ou toute association minérale, susceptible d'être utilisé par l'industrie sidérurgique comme source de fer et gisement de minerai de fer. Il est utilisé dans la fabrication du ciment comme fondant qui facilite la flexibilité et donc augmenté la résistance [8].

II.3.2.2 La bauxite

C'est une roche latéritique blanche, rouge ou grise, caractérisée par sa forte teneur en alumine Al_2O_3 et en oxydes de fer et la silice [10].

II.3.2.3 Sable

Les sables sont des substances granuleuses, dont les grains sont tous suffisamment petits pour pouvoir passer dans des trous carrés de 5 mm de côté. Les sables peuvent être naturels ou artificiels. Nous distinguerons, suivant l'origine [1] :

- Les sables naturels : les sables de rivière, de dune, de carrières...
- Les sables artificiels : certains déchets d'industries métallurgiques

- Superficie : 192 ha
- Lieu-dit : TAGHIT



Figure II.3. La source en sable

II.3.3 Ajouts

Ce sont des matières minérales naturelles ou artificielles qui en fonction de leur granulométrie, améliorent les propriétés physiques des ciments. Ils sont dans une proportion qui n'excède pas 5 % en masse [2].

II.3.3.1 Gypse (sulfate de calcium)

➤ Origine et propriétés du gypse :

Le gypse est une roche sédimentaire, dissoute à l'origine dans l'eau de mer. Il existe en masse considérable dans la nature. Il constitue la principale matière première pour la fabrication du plâtre. Il est aussi utilisé dans le ciment comme retardateur de prise, son ajout est recommandé afin d'optimiser aussi les résistances mécaniques [1].

➤ Caractéristiques principales du gypse :

- **Formule chimique** : $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ou sulfate de calcium déshydraté
- **Masse volumique** : 2,32 g/cm³ à 25°C

- Superficie : 112 ha
- Lieu-dit : KNADSSA
- Durée de vie : 80 ans



Figure II.4. Gypse

II.3.3.2 Le laitier

Granule de haut fourneau qui est constitué d'au moins deux tiers en masse de la somme de l'oxyde de calcium (CaO), l'oxyde de magnésium (MgO) et du dioxyde de silicium (SiO₂) [1].

II.3.3.3 Les pouzzolanes

Les matériaux pouzzolaniques sont des substances naturelles siliceuses ou silico-alumineuses, ou une combinaison de celles-ci. Les matériaux pouzzolaniques ne durcissent pas par eux-mêmes lorsqu'ils sont mélangés avec de l'eau mais, lorsqu'ils sont finement broyés ils réagissent à température ambiante. On considère :

➤ **Les pouzzolanes naturelles (P)**

Ils sont en général des matériaux d'origine volcanique ou bien des roches sédimentaires

➤ **Les pouzzolanes calcinées (Q)**

Les pouzzolanes naturelles calcinées sont des matériaux d'origine volcanique, des argiles, des schistes ou des roches sédimentaires activés thermiquement [2].

II.3.4 Additifs

Ils sont des constituants qui sont ajoutés pour améliorer la fabrication ou les propriétés du ciment. La quantité totale des additifs doit être inférieure ou égale à 1,0 % en masse de ciment. En outre, le fabricant est tenu de déclarer, sur les sacs ou sur toutes autres pièces accompagnant le ciment, les propriétés des additifs utilisés, ainsi que leurs proportions [4].

II.3.5 Produit semi-fini (clinker)

Le clinker Portland est un matériau hydraulique qui est obtenu par calcination d'un mélange fixé avec précision de matières premières (farine crue, ou pâte) contenant des éléments couramment exprimés en oxydes CaO, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ et de petites quantités d'autres matières, la partie restante étant constituée de phases contenant de l'aluminium et du fer, ainsi que d'autres composants. C'est un constituant obtenu à partir de la cuisson à haute température, supérieure à 1450°C [3,4].

Les silicates et aluminates hydrauliques formés lors de cette cuisson (clinkérisation) sont

- Le silicate tricalcique, —————> 3 CaO.SiO₂, que l'on écrit C3S
- Le silicate bicalcique, —————> 2 CaO.SiO₂, que l'on écrit C2S
- L'aluminate tricalcique, —————> 3 CaO.Al₂O₃, que l'on écrit C3A
- L'alumino-ferrite tétracalcique —————> 4 CaO.Al₂O₃.Fe₂O₃, que l'on écrit C4AF

II.3.5.1 Composition en oxydes limites de ciment Portland

Tableau II.4. Composition en oxydes limites de ciment Portland [11,12]

Oxydes	SiO ₂	CaO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Na ₂ O+Na ₂ O	Free CaO
Composition pondérale %								
	17-25	60-67	05-6,0	03-08	0,1-5,5	01-03	0,5-1,3	0,5-1,5
	20-23	63-65	03-05	04-08	02-03	2,0-3,5	0,4-1,2	0,5-1,5

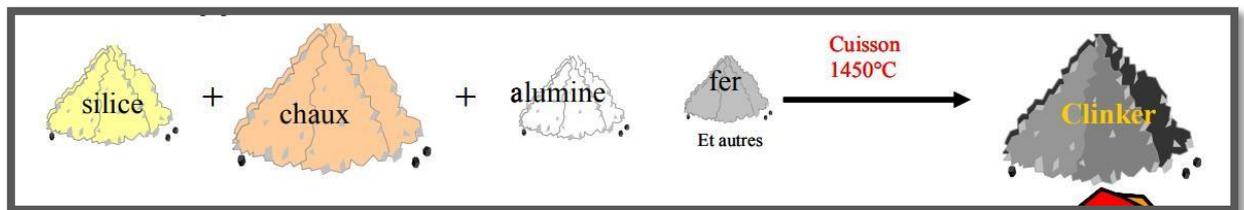


Figure II.5. Clinker

II.4 Types des ciments courants

Le type indique la composition du ciment et les limites des proportions des constituants ainsi que leurs résistances aux sulfates qui diffèrent entre eux et qui est fixée par les normes.

Il existe cinq types de ciments courants qui sont :

- Le ciment Portland CEM I
- Le ciment Portland Composé CEM II
- Le ciment de Haut Fourneau CEM III
- Le ciment Pouzzolanique CEM IV
- Le ciment Composé CEM V [3].

II.4.1 Classification des ciments courants selon leurs résistance aux sulfates SR

Les sept familles des ciments courants résistants aux sulfates, traités dans la norme algérienne sont regroupés en trois types principaux comme suit :

➤ Ciment portland résistant aux sulfates :

- CEM I-SR 0 Ciment Portland résistant aux sulfates (C3A du clinker = 0 %)
- CEM I-SR 3 Ciment Portland résistant aux sulfates (C3A du clinker ≤ 3 %)
- CEM I-SR 5 Ciment Portland résistant aux sulfates (C3A du clinker ≤ 5 %)

- **Ciment de haut fourneau résistant aux sulfates :**
 - CEM III/B-SR Ciment de haut fourneau résistant aux sulfates
 - CEM III/C-SR Ciment de haut fourneau résistant aux sulfates
- **Ciment pouzzolaniques résistant aux sulfates :**
 - CEM IV/A-SR Ciment pouzzolanique résistant aux sulfates ($C3A \leq 9\%$)
 - CEM IV/B-SR Ciment pouzzolanique résistant aux sulfates ($C3A \leq 9\%$) [3].

Tableau II.5. Composition des principaux types des ciments Portland [3].

Principaux types	Notation des sept produits (types de ciments courantsrésistants aux sulfates)		Composition (pourcentage en masse ^{a)})				
			Constituants principaux				Constituants secondaires
			clinker	Laitier de hautfourneau S	Pouzzolane naturelle P	Cendre volante siliceuse V	
CEM I	Ciment Portland résistant aux sulfates	CEM I-SR 0 CEM I-SR 3 CEM I-SR 5	95 -100	—	—	—	0 – 5
CEM III	Ciment de haut fourneau résistant aux sulfates	CEM III/B-SR	20 – 34	66 – 80	—	—	0 – 5
		CEM III/C-SR	5 – 19	81 – 95	—	—	0 – 5
CEM IV	Ciment pouzzolanique résistant aux sulfates ^{b)}	CEM IV/A-SR	65 – 79		←--- 21 – 35 ---→		0 – 5
		CEM IV/B-SR	45 – 64		←--- 36 – 55 ---→		0 – 5

a) Les valeurs indiquées au tableau se réfèrent à la somme des constituants principaux et secondaires.

b) Pour les ciments pouzzolaniques résistants aux sulfates, types CEM IV/A-SR et CEM IV/B-SR, les constituants principauxautres que le clinker, doivent être déclarés dans la désignation du ciment (voir un exemple, à l'Article 8).

II.4.2 Autres ciments

Ce sont en général des ciments qui répondent à une norme autre que celle relative aux ciments courants. On peut citer à titre d'exemple le ciment alumineux fondu, le ciment prompt naturel, le ciment à maçonner, les chaux hydrauliques naturelles ou artificielles etc. [2].

II.5 Utilisation des ciments

Les ciments sont utilisés dans divers fabrications tels que : le béton armé ou précontraint avec un décoffrage rapide, préfabrication ouvrages nécessitant des résistances finales élevées, béton à hautes performances, travaux souterrains en milieux chimiquement agressifs, ouvrages en milieux sulfatés et travaux nécessitant une faible chaleur d'hydratation [3].

II.6 Procédé de fabrication du ciment

Toute cimenterie suit un processus bien défini au préalable pour fabriquer du ciment en passant par plusieurs étapes ou chacun joue un rôle incontournable dans l'industrie cimentière. Le cru obtenu après un processus de broyage et d'homogénéisation des matières premières, est transformé en clinker par traitement thermique; ces étapes seront énumérées ultérieurement dans ce paragraphe.

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

- Dans la **voie sèche**, les matières premières broyées et séchées forment le cru ou farine qui a l'aspect d'une poudre fluide. Le cru est ensuite introduit dans le préchauffeur ou le précalcinateur du four.
- Dans la **voie semi-sèche**, la farine mélangée à de l'eau forme des granules qui sont introduits dans un préchauffeur à grilles situé en amont du four ou dans un four long équipé de croisillons.
- Dans la **voie semi-humide**, la pâte est d'abord débarrassée de son eau dans des filtres-presses. Le gâteau de filtre-pressé est ensuite extrudé sous forme de granules et introduit dans un préchauffeur à grilles ou directement dans un sécheur pour la fabrication du cru.
- Dans la **voie humide**, les matières premières (dont la teneur en humidité est souvent élevée) sont broyées dans l'eau pour former une pâte pouvant être pompée. Elle est ensuite introduite directement dans le four où peut passer auparavant dans un sécheur [1].

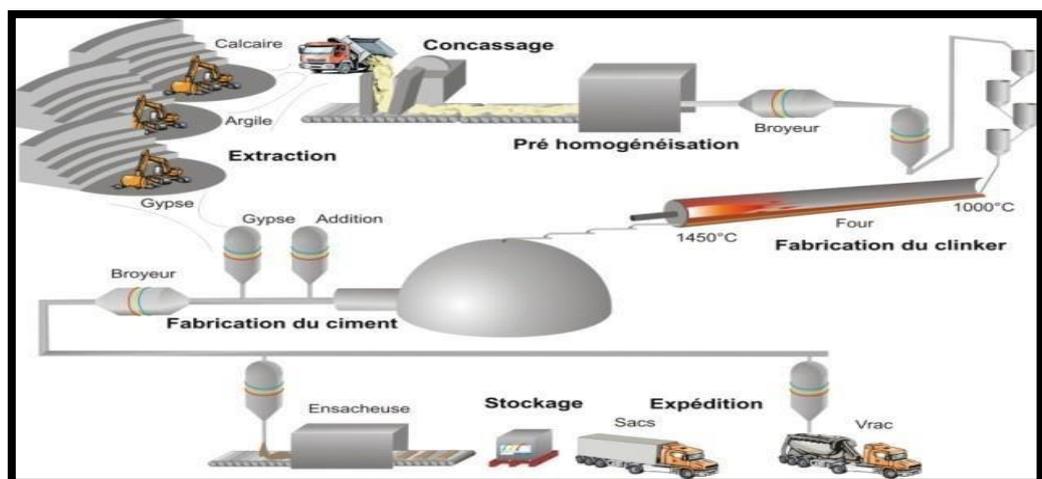


Figure II.6. Fonctionnement de la cimenterie SSC

II.6.1 Extraction des matières premières

Les matières premières sont extraites des parois rocheuses d'une carrière à ciel ouvert par abattage à l'explosif de façon à la fragmenter en blocs. La roche est reprise par des dumpers vers un atelier de concassage. Pour cela toute usine existante ou toute implantation de nouvelle usine nécessite une connaissance approfondie des gisements de matières premières qui entrent en compte dans le choix du procédé d'extraction (Propriété mécanique, physique et chimique qui nous offre la possibilité de fabriquer un bon ciment) [1,2].



Figure II.7. Extraction d'une carrière

II.6.2 Concassage

Les pierres arrivent généralement à l'usine en gros blocs avec leur humidité de carrière il faut les concasser, puis les sécher, ou au contraire les délayer avant de les passer au broyeur [1].

II.6.3 Préparation du cru

La préparation du cru c'est au cours de laquelle on réalise le mélange homogène du calcaire, d'argile, de sable et de minerai de fer.

Tableau II.6. Mélange du cru SSC

Calcaire	Argile	Sable	Minerai de fer
77%	17%	4%	1%

- 65 % de CaO fourchette de 60 à 69 %
- 21 % de SiO₂ fourchette de 18 à 24 %
- 6 % d'Al₂O₃ fourchette de 4 à 8 %
- 3 % de Fe₂O₃ fourchette de 1 à 8 %
- 2 % de MgO fourchette de 0 à 5 % maximum
- 1 % d'alcalis fourchette de 0 à 2 % maximum
- 1 % de SO₃ fourchette de 0 à 3 % maximum.

Ces proportions permettant de prévoir certaines des qualités ultérieures du ciment [1,22].

II.6.4 Préhomogénéisation

Cette phase qui a pour but de réaliser un mélange préliminaire, consiste à déposer les matériaux constitutifs du cru en couches successives, de faible épaisseur formant le « tas de préhomogénéisation » [4].

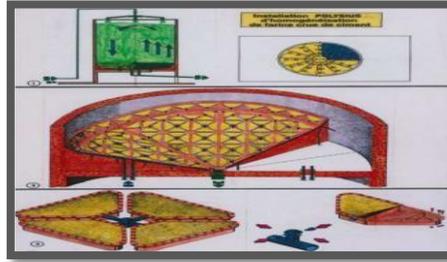


Figure II.8. Différentes méthodes utilisées pour l'homogénéisation

II.6.5 Broyage séchage

Les matières premières préhomogénéisées doivent être finement broyées (inférieur à 160 microns) par des broyeurs à boulets pour être chimiquement plus réactives au cours de leur cuisson. Les réactions chimiques par conduction et les échanges thermiques sont en effet d'autant plus intenses que les surfaces des particules sont plus grandes. Les meilleurs clinkers sont obtenus à partir de la mouture la plus fine [1].

II.6.6 Echantillonnage

L'objectif de l'échantillonnage est de contrôler la qualité de la production, au moyen d'un échantillon représentatif de la totalité de la matière.

Soit la méthode d'analyse en ligne sans prélèvement en développement croissant.

Soit la nécessité de prélever une fraction de flux de taille réduite, manipulable et représentative de l'ensemble de la matière, sur lequel l'analyse est pratiquée [2].

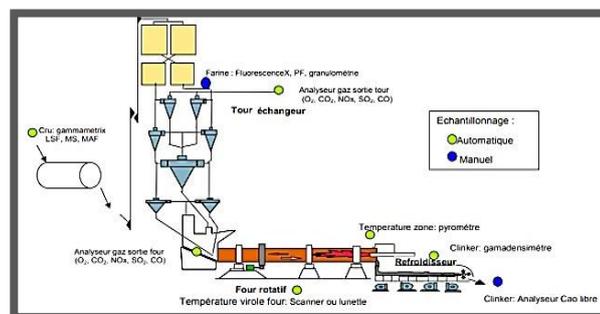


Figure II.9. Différentes méthodes d'échantillonnage

II.6.7 Séparation

Cette phase consiste, suivant le type de séparateur utilisé, à envoyer au broyeur les particules insuffisamment broyées et à récupérer les fines contenues dans les gaz [1].

II.6.8 Homogénéisation

Grâce à un brassage pneumatique ou mécanique vigoureux, peut être obtenu un produit parfaitement homogène, de caractéristiques chimiques uniformes, apte à être cuit. Cette partie assure la constitution d'un stock important de matériau dont la composition chimique de chaque tranche est peu variable par rapport à la composition moyenne [1].

II.6.9 Cuisson

II.6.9.1 Installation de l'atelier cuisson

Le four rotatif est l'élément principal de l'installation de fabrication du clinker. Il est essentiellement constitué par un tube cylindrique dans lequel brûlent des substances combustibles injectées à fort débit en produisant une flamme de plusieurs dizaines de mètres de longueur. Pour améliorer le rendement thermique mais aussi pour utiliser la chaleur produite par la flamme les gaz de cuisson qui sortent du four sont utilisés dans l'installation pour préchauffer le cru disposé à l'entrée du four.

Selon le procédé de voie sèche utilisé dans la SSC l'installation de cuisson se compose de deux parties [1,2] :

- Une partie fixe : le préchauffeur.
- Une partie mobile : le four.

II.6.9.2 Le préchauffeur

Le préchauffeur est un échangeur de chaleur. La farine crue est introduite dans la partie lente du four et descend par gravité du cyclone supérieur vers le cyclone inférieur par un conduit de diamètre réduit. La farine entre dans le four à $T = 600$ à 800°C , elle atteint l'entrée du four en 30 à 60 secondes et sera réchauffée à environ 850°C [1].

II.6.9.3 Précalcinateur

La calcination est la phase la plus vorace d'énergie, elle exige 60% de la consommation du combustible et la moitié du four. Le précalcinateur permet de sortir environ 95% du processus hors du four [1].

II.6.9.4 Four rotatif

Ce cylindre de 15 à 30 mm d'épaisseur est garni intérieurement d'un matériau réfractaire qui assure sa protection à hautes températures régnantes à l'intérieur de l'appareil dont le transfert thermique rencontré entre combustible et cru se fait par conduction [1].

- Vitesse : 3.8/4.5 tr/min
- Température cuisson : 1450 °C
- Capacité 3 200 T/J



Figure II.10. Four rotatif SSC

II.6.10 Refroidissement

Le clinker nécessite un refroidissement qui permet la récupération d'un maximum de chaleur qu'il en magasiné on appelle cette opération la trempe. Le régime du refroidissement influe positivement ou négativement sur la composition minéralogique et même les propriétés physiques et chimiques du clinker obtenu, par exemple un refroidissement brusque permet de maintenir le C_3S dans un état métastable et garder la chimie cristalline appropriée pour les propriétés hydrauliques du clinker [1].

II.6.11 Broyage clinker

Le broyage a pour objectif, d'une part de réduire les granules de clinker en poudre, d'autre part de procéder à l'ajout du gypse, ce qui permet d'obtenir les différents types de ciments normalisés [4].

- Deux Broyeurs à boulets
- Dimensions : 4.6x14.0m
- Capacité : 120t/h
- Vitesse de rotation : 15 r/min

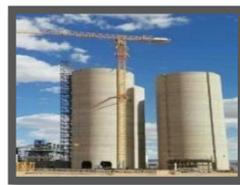


Figure II.11. Broyeur ciment SSC

II.6.12 Stockage

A la sortie du broyeur, le ciment est transporté vers des silos de stockage, pour être soit ensaché soit expédié en vrac [1].

- Nombre : 02
- Capacité : 20 000 t
- 1 500 t



Figure II.12. Silos clinker SSC

II.6.13 *Ensachage et expédition*

L'ensachage s'effectue dans des sacs en papier kraft à l'aide de machines capables de remplir de 2000 à 4000 sacs par heure. La livraison en vrac est assurée par camions et wagons [1].



Figure II.13. Ensachage SSC

II.7 **Aptitude à la cuisson**

Dans une approche systématique, on dira que la fonction de l'atelier de cuisson consiste à transformer, par traitement thermique, un matériau « cru » en un semi-produit désigné sous le nom de clinker [1].

II.7.1 *Le cru*

II.7.1.1 **Généralités**

Le cru est un système finement dispersé, multi phases et multi composants qui se transformera en clinker à travers une série de réactions se produisant entre 400 et 1450 °C.

Généralement dans la plupart des pays, les exigences stœchiométriques des quatre principaux oxydes sont exprimées par les trois rapports suivants : Module d'alumine (AM), module de silice (MS) et le facteur de saturation de la chaux (LSF) [12,5].

Tableau II.7. Limites approximatives de la composition en oxyde du ciment "cru" [13].

Oxydes	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O+ K ₂ O	SO ₃
Composition type (%)	65	21	6	3	2	1	1
Fourchette (%)	60-69	18-24	4-8	1 - 8	0-5 (max)	0-5 (max)	0-3 (max)

II.7.1.2 Objectif de la préparation du cru

Il conditionne la qualité du produit fini (le ciment) puisque la composition chimique recherchée doit être réalisée dans cet atelier, la bonne préparation du cru permet le bon déroulement des opérations ultérieures [1].

Cette qualité est assurée en contrôlant :

- Le cru tout au long de son élaboration par des prélèvements d'échantillons (manuel ou automatique), analyses, ou contrôle en ligne non destructif.
- Homogénéité physique (granulométrie) et chimique de façon à faciliter les combinaisons lors de la cuisson. Elle est obtenue par un pré mélange des matières premières (rôle de la préhomogénéisation) puis après broyage par l'homogénéisation du cru en silos.
- Finesse pour faciliter l'homogénéité et les réactions chimiques. Elle est obtenue après le concassage qui facilite le pré mélange puis le broyage à l'issue duquel le produit ne présente plus qu'un faible pourcentage de grains supérieurs à 100 microns [1].

II.7.1.3 Composition du cru

Le cru est constitué par :

- Des éléments porteurs de calcium
- Des éléments porteurs d'oxydes acides
- Des éléments mineurs

II.7.1.3.a. Eléments Porteurs de Calcium

Qui sont des porteurs d'oxydes basique CaO

- Naturels : calcaire, marbre, craie, marne
- Sous-produits : scories industrielles (laitier), carbonate de calcium chimique [5].

Tableau II.8. Teneur des porteurs de calcium en CaCO_3 [5].

Contenu CaCO_3 %		
Porteur de Calcium	<ul style="list-style-type: none"> • Calcaire haute teneur • Calcaire marneux • Marne calcaire 	96 à 100 90 à 96 75 à 90
Porteur de calcium et d'oxydes à caractère acide	<ul style="list-style-type: none"> • Marne • Marne argileuse 	40 à 75 10 à 40

II.7.1.3.b. Eléments Porteurs d'oxydes acides

Qui sont des porteurs d'oxydes acides SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3

- Naturels : argiles, bauxites, schistes, sable, marnes
- Sous-produits : cendre volantes, scories industrielles (fer et acier) sable de fonderie

Note : La réactivité des minéraux d'argile (capacités des composants acides à se combiner avec CaO) est très importante [5].

II.7.1.3.c. Eléments Mineurs

Quelques éléments peuvent avoir une influence importante sur la cuisson et le processus d'hydratation du ciment. Certains de ces éléments mineurs sont présents dans la matière naturelle comme MgO , Na_2O , K_2O , SO_3 , Cl , Zn . D'autres peuvent être apportés par les sous-produits de plus en plus utilisés en cimenterie soit comme matière première soit comme combustibles [5].

1. Magnésium (MgO)

Presque toujours présent en quantité variable, agit comme fondant. Au-delà de 2%. L'hydratation peut être retardée et accompagnée d'une augmentation de volume et d'effets indésirables sur la qualité des matériaux de construction [5].

2. Alcalins (K_2O , Na_2O)

Ils sont généralement apportés par l'argile. S'ils se combinent à SO_3 , ils améliorent la résistance initiale et diminuent la résistance à 28 jours. Les alcalins sont recyclés avec les gaz avec des risques de croutage dans le four c'est pour cela la teneur en alcalin dans le ciment est limitée max 0.6 % [5].

3. Soufre (S)

Il est présent dans les matières premières et les combustibles. La présence de sulfures peut conduire à l'émission de SO_2 dont il se combine essentiellement avec les alcalins pour former des sulfates. Il provoque la formation de croutage non désiré c'est pour cela les normes fixent une limite à la teneur en SO_3 du ciment entre 2.3 % et 4 % [5].

4. Chlore (Cl)

Les composés du chlore sont particulièrement volatiles à des températures relativement basses. C'est pourquoi il apparaît dans les gaz du cycle interne du four et il favorise le croutage la norme imposent une teneur en chlore maxi (0,05 - 0,1 %) pour éviter les agressions sur le béton [5].

II.7.2 La phase cuisson

La farine crue obtenue à l'issue du processus de broyage et d'homogénéisation de matières premières est transformée en clinker par traitement thermique ce que on appelle cuisson.

Les fours de cuisson du ciment comportent [1] :

- Un système de préchauffage du cru.
- Une zone de décarbonatation.
- Zone de clinkérisation.
- Zone de refroidissement.

Les cinq opérations essentielles à réaliser dans l'atelier de cuisson sont :

- Préchauffage : $\leq 500^{\circ}\text{C}$
- Décomposition des argiles $> 500^{\circ}\text{C}$.
- Décarbonatation des calcaires : de $500 - 1050^{\circ}\text{C}$.
- Clinkérisation de $1200 - 1450^{\circ}\text{C}$.
- Refroidissement de $1450 - 80^{\circ}\text{C}$

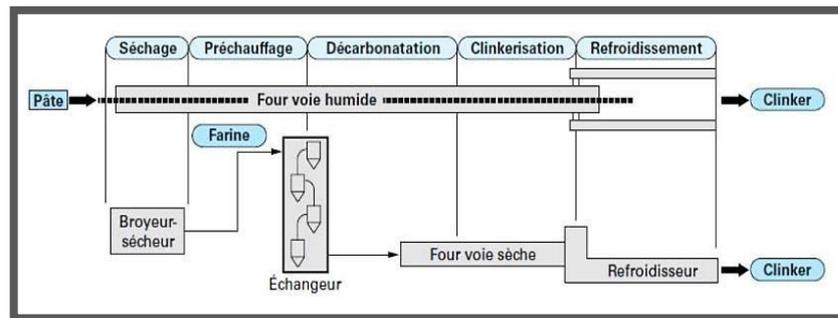


Figure II.14. Les cinq opérations principales réalisées dans l'atelier de cuisson

II.7.2.1 Composition clinker

Nous retrouvons donc dans le clinker :

- **Silicate tricalcique : Alite « C_3S » : 40 à 65%.**

C'est l'élément actif du ciment artificiel. Il confère au ciment les résistances initiales à 28 jours de durcissement. Au microscope, il apparaît dans le clinker sous forme de grains de mêmes dimensions, à couleur bien marquée [1].

- **Silicate bi calcique : Bélite « C_2S » : 8 à 35%.**

Il confère au ciment des résistances moins élevées que le « C_3S », mais développe les résistances à long terme. Son aptitude au broyage est moins bonne que celle de « C_3S », car sa dureté est plus grande. Au microscope, il apparaît sous forme de grains arrondis [1].

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

Il confère au ciment une très bonne résistance initiale à 1 ou 2 jours de durcissement. Mais par la suite, il influe très peu sur cette dernière [1].

➤ **Aluminate tétra calcique : Féelite, C₄AF : 3 à 14%.**

Il confère au ciment des résistances faibles et peu précises. On peut dire qu'il est inactif sur le plan hydraulique, et il constitue un fondant pendant la cuisson avec « C₃A » [1].

Les autres éléments apportés par le cru et ses combustibles sont retrouvés en petites quantités dans le clinker qui sont :

- Les alcalins : sodium (Na) sous forme de Na₂O, potassium (K) sous forme de K₂O
- Les sulfates K₂SO₄, Na₂SO₄, CaSO₄, CaO
- La chaux libre CaO libre qui apporte l'expansion lors de la prise néfaste au béton
- La magnésie (MgO) responsable de l'expansion après plusieurs années néfaste au béton
- Plus les éléments mineurs (P₂O₅, TiO₂, Mn₂O₃...) et des traces des métaux, lourds...

En résumé les grandes étapes de la clinkérisation et leurs localisations apparaissent sur le schéma suivant [2] :

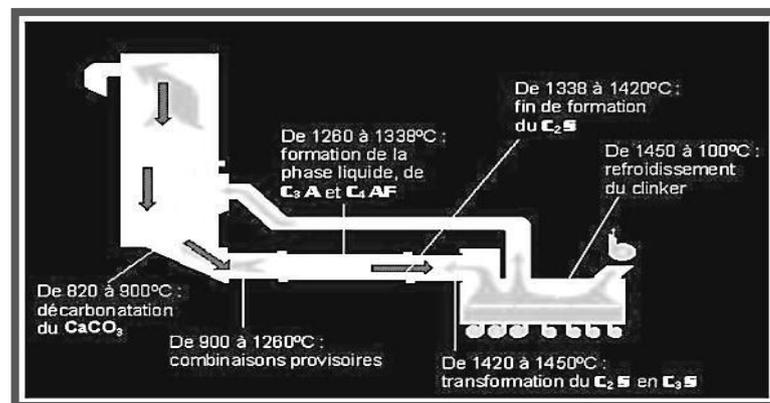


Figure II.15. Shéma de clinkérisation

Chapitre III. Synthèse du cru

III.1 La chimie en atelier cuisson

III.1.1 Un réchauffement

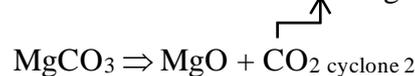
1. Première étape : l'évaporation de l'eau à 100°C

En théorie l'humidité doit être proche de 0%, sinon il y aurait un colmatage ou un collage de la farine dans les transporteurs.

2. Deuxième étape : déshydratation de l'eau de la constitution des argiles de 250 à 450°C

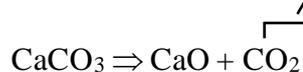
Cette opération n'aura lieu que lorsque l'on utilisera des matières premières ou des matières de correction contenant de l'eau [2].

3. Troisième étape : décarbonatation du Carbonate de Magnésie de 450 à 620°C



III.1.2 Décarbonatation

Décarbonatation du Carbonate de Calcium de 820 à 850°C



Le taux de décarbonatation dépendra du type de tour (avec ou sans précalcinateur) et des paramètres de marches [6]. Celui qui est obtenu en entrée du four rotatif est généralement compris entre 85 % et 95 %.

III.1.3 Clinkérisation

Il s'agit ici de la combinaison de la chaux CaO produite par la dissociation du carbonate CaCO₃ à la silice, l'alumine et les oxydes de fer pour former les minéraux du clinker. Le processus de clinkerisation implique des phénomènes diffusionnels et des réactions à l'état solide et à l'état pâteux en présence d'une proportion d'environ 25 % à 30 % de phase liquide à la température maximale de clinkérisation (autour de 1450°C) [21].

Elle se déroule essentiellement entre 1200 et 1500 °C

1. A partir de 1200°C apparition de phase liquide due aux alcalins (Na₂O et K₂O) et la magnésie (MgO) dans un premier temps.
2. Entre 1260 et 1338°C formation de C₄AF et C₃A.

3. Dès 1338°C, C₄AF et C₃A donnent naissance à la phase liquide qui favorise les réactions chimiques solide / solide entre silice et chaux et donc l'aptitude à la combinaison du cru.
4. De 1338°C à 1420°C combinaison du C₂S
5. A partir de 1420°C formation du C₃S par réaction du C₂S avec la chaux restante. Généralement, la réaction n'est pas totale et il reste un peu de chaux non combinée : c'est la chaux libre dont l'excès peut être nocif dans le ciment (risque d'expansion).

Il est intéressant de constituer un cru qui conduit à un clinker dont le pourcentage de phase liquide et le pourcentage de C₃S soient des constantes [2].

Habituellement la phase liquide conseillée pour une cuisson facile est de :

$$17\% < \text{phase liquide} < 25\%$$

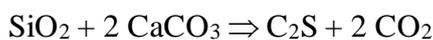
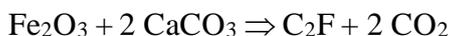
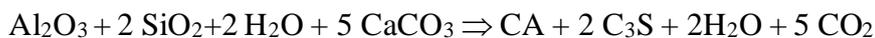
III.1.4 Refroidissement

1. Trempe du clinker de 1400 à 600°C afin de fixer les propriétés acquises au cours de la cuisson
2. Refroidissement du clinker jusqu'à 100°C pour une manutention, sécurité et qualité [2].

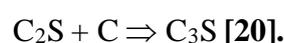
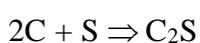
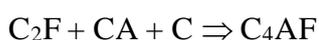
III.2 Réactions chimiques

Lors de la formation du clinker, les oxydes principaux se combinent entre eux pour former d'autres minéraux [2].

➤ Entre 600 et 1100°C



➤ Entre 1200 et 1450°C



III.3 Critères pour l'évaluation chimique des crus

III.3.1 Calcul de la farine crue

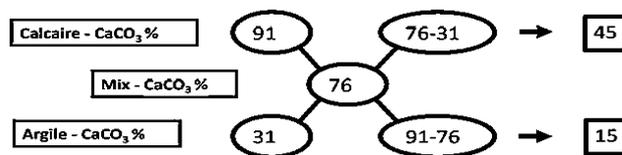
Le calcul des modules et des phases est nécessaire et suffisant pour définir un cru de cimenterie. Il permet de calculer les proportions de matières premières nécessaires connaissant leurs analyses chimiques respectives.

A savoir ;

- Pour le cru ; LSF, MS, A/F ...
- Pour le clinker ; C₃S, C₃A, phase liquide ... [2].

Méthode de calcul : Exemple de deux constituants:

Nous avons un calcaire contenant 91 % de CaCO₃ et une argile avec 31 % de CaCO₃. Pour obtenir un cru à 76 % de CaCO₃, la méthode de calcul est [5] :



➤ Composition

$$\frac{15}{60} \times 100 = 25\% \text{ d'argile}$$

$$\frac{45}{60} \times 100 = 75\% \text{ de calcaire}$$

III.3.2 Modules

III.3.2.1 Facteur de saturation en chaux (LSF)

Une façon plus fine d'exprimer la capacité des oxydes composant le mélange de se lier et de donner naissance à des composés hydrauliques (susceptible de se combiner) est le facteur de saturation en chaux, aussi appelé LSF, Kalk standard, KS ou Kühl selon le nom du premier scientifique à l'avoir utilisé. D'où la formule théorique [5].

$$\text{LSF} = \frac{\text{chaux réelle}}{\text{chaux théorique}} \times 100 \quad \text{ou} \quad \text{KS} = \frac{100 \text{ CaO}}{2,8 \text{ SiO}_2 + 1,65 \text{ Al}_2\text{O}_3 + 0,35 \text{ Fe}_2\text{O}_3}$$

En pratique on choisira :

$$\text{LSF} = \frac{100 \text{ CaO}}{2,8 \text{ SiO}_2 + 1,2 \text{ Al}_2\text{O}_3 + 0,65 \text{ Fe}_2\text{O}_3}$$

KS = 100 correspond théoriquement à une composition du clinker qui contient : C₃S, C₃A et C₄AF KS < 100 correspond théoriquement à une composition du clinker qui contient aussi du C₂S

Pour un ciment normal LSF est compris entre 90 et 95 %, pour un ciment aux caractéristiques plus élevées (résistances ...) il est compris entre 95 et 98 %, en dessous de 90% le cru est en sous dosage de chaux, le C₃S va baisser ainsi que la chaux libre [2].

III.3.2.2 Module silicique

Le module silicique permet de régler la proportion des silicates de calcium par rapport aux aluminates et alumino ferrites (C₃S+C₂S face au C₃A+C₄AF). De plus, il permet d'apprécier

l'aptitude à la cuisson du cru [5].

$$MS = \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3} \approx 2,0 - 4,0$$

III.3.2.3 Module alumino-ferrique

Le rapport Alumine / Oxyde de Fer informe sur la qualité future du clinker, son aptitude à la cuisson et nous donne la répartition C₃A/C₄AF [5].

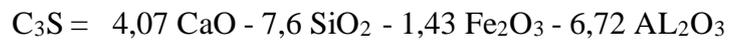
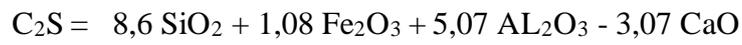
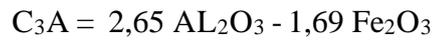
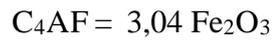
$$AF = \frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3} \approx 1,5 - 3,0$$

III.3.2.4 Formule de Bogue

La composition potentielle en phases du ciment s'obtient soit par des méthodes directes (analyse par diffractométrie des rayons X, microscopie optique électronique), soit à partir de la combinaison d'analyses chimiques et de formules mathématiques dont les plus largement utilisées restent celles écrites par Bogue en 1929. BOGUE a élaboré une méthode de calcul permettant de déterminer, sur la base d'une analyse chimique, la composition minéralogique du clinker [14].

Tableau 0.1. Composition de Bogue du ciment

Phases du ciment	Masse %
C ₃ S	70.15 +7
C ₂ S	7.77 + 6
C ₃ A	3.81 + 0.2
C ₄ AF	5.95 + 0.1
Gypse	5.22 + 0.4

➤ Equations de Bogue [14] :

Chapitre IV. Contrôle Qualité

IV.1 Qualité produit

Procédé utilisé par les opérationnels pour atteindre les objectifs « produit » et « processus ». Il nous appartient de l'obtenir en développant le contrôle qualité aux points clés du processus de fabrication, on peut ainsi définir la qualité de production comme la capacité d'avoir le contrôle sur la variabilité des paramètres qualitatifs des produits semi-finis et des produits finis à toutes les étapes du processus de fabrication [5].

La qualité devient la référence et l'objectif de chacune des activités menées par la SSC dont les bénéfices du produit pour la société sont relatifs à une meilleure rentabilité et derrière cette bonne qualité acquise il y a un personnel qualifié en préparation et en contrôle du produit depuis les carrières des matières premières au produit fini.

IV.1.1 Plan de contrôle

Le plan de contrôle a pour objectif de s'assurer si le produit est conforme aux exigences (spécifications) et de supporter l'effort d'amélioration continue du processus [5].

Tableau IV.1. Programme de contrôle

Que contrôler	Matières premières, produits intermédiaires, produits finis, étapes du process
Origine du matériau	Carrière, fournisseurs, points d'échantillonnage
Spécifications	Spécifications pour ordre d'achat. Spécifications internes
Point d'échantillonnage	A la carrière. Au point d'arrivée. A un endroit spécifique
Fréquence d'échantillonnage	Mensuelle - Hebdomadaire - Journalière - Horaire - Fraction horaire
Opérateur échantillonnage	Carrière - Labo - Production -Automatique

Ce contrôle se fait manuellement ou automatiquement.

IV.1.1.1 Préparation d'un échantillon de ciment pour essais

Avant l'analyse chimique, pour obtenir un échantillon d'essai homogène, prélever environ 100 g de ciment dans l'échantillon de laboratoire, au moyen d'un diviseur d'échantillon ou par quartage, passer cette prise d'essai dans un tamis de 150 μm ou 125 μm jusqu'à refus constant, transférer l'échantillon dans un récipient propre et sec, à fermeture hermétique et agiter vigoureusement pour l'homogénéiser. L'échantillonnage et les analyses sont une nécessité à tous les stades de la fabrication [5] :

- Pour assurer la régularité de la production
- Pour assurer le respect des normes et la satisfaction de la clientèle



Figure IV.1. Exemple d'échantillonneur automatique de farine crue

IV.1.1.1 Analyseurs en ligne

L'usine s'est dotée de deux analyseurs en ligne pour l'analyse de calcaire et cru ainsi que pour le clinker (mélange calcaire / argile concassé - mélange cru - alimentation broyeur cru) qui se trouvent à la sortie concasseur et alimentation broyeur cru [5].

IV.2 Techniques d'analyse

IV.2.1 Fluorescence X (XRF)

La spectrométrie de fluorescence des rayons X est une technique d'analyse chimique utilisant une propriété physique de la matière. Cette technique peut être utilisée pour déterminer la composition chimique d'une grande variété de types d'échantillons, y compris les solides, les liquides, les boues et les poudres libres [5].

Le principe de l'analyse est que les photons X sont produits après éjection d'un électron «orbital» interne d'un atome excité. Un faisceau de rayons X traversant la matière est soumis à trois processus : l'absorption, la dispersion et la fluorescence.

La fluorescence X est une émission secondaire de rayons X, caractéristique des éléments atomiques qui composent l'échantillon, elle comprend deux parties:

- Une source d'excitation: provoque l'émission d'un spectre de rayons x caractéristique de la composition de l'objet.

- Un détecteur et un analyseur de rayonnement : identifiant des raies composant le spectre [5].



Figure IV.2. Appareil spectromètre fluorescence XRF du SSC

IV.2.1.1 Pratique de l'analyse par fluorescence X

➤ Préparation des échantillons

L'échantillon doit faire l'objet d'une préparation.

- Dans le cas de la poudre, une fois le matériau broyé, il peut être mis dans une coupe dont le fond est un film polymère, l'analyse se fait sous hélium pour éviter que la poudre ne vole sous l'effet du pompage.
- Lorsque l'on dispose de peu de poudre, cette dernière peut également être pressée sur une pastille d'acide borique qui assure sa tenue mécanique. Elle peut également être pressée sous la forme d'une pastille, avec ou sans liant (cire et cellulose) ou en forme d'une perle [5].

1. Pour pastille

- Peser 6g de l'acide borique et le mettre dans le moule de la presse
- Peser 6g de ciment et le mettre sur le support de l'acide borique
- Presser l'ensemble à une charge de 2000 psi (~ 140 bar)
- Récupérer la pastille et analyser par le spectromètre de fluorescence des rayons X

2. Pour perles

- Dans un creuset en platine peser :
 - 0.0200g de Bromure de lithium
 - 6 g du fondant (tétraborate de lithium)
 - 1.2 g de ciment calciné
- Homogénéiser et amener le mélange à fusion
- Couler la masse fondue dans le moule en platine et laisser refroidir
- Démouler la perle et analyser par le spectromètre de fluorescence du rayon X

L'usine s'est dotée d'une Perleuse à deux positions avec des pièces de rechange.

Avant chaque analyse, vérifier la perle de l'échantillon « ETALON » ou de référence correspondant au programme choisi pour vérifier la fidélité de l'appareil [5].



Figure IV.3. Différentes perles fabriquées dans un dessiccateur

IV.3 Analyses chimiques

Divers analyses chimiques sont réalisées au sein du labo SSC afin d'obtenir une bonne qualité

finale du ciment et avoir l'aptitude au contrôle du caisson.

Tableau 0.2. Identification d'analyses chimiques [5].

Qu'analyse-t-on ?	Pourquoi ?	Comment?
Taux d'humidité	Pour le dosage des matières premières	Par pesée avant/après
Perte au Feu (PAF)	Contrôle de la cuisson	Par pesée avant/après
CaO, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, SO₃	A toutes les étapes du procédé et pour la qualité finale du ciment	Par FX (fluorescenceX)
Chaux Libre	Contrôle de la cuisson	Par dosage chimique
MgO, Na₂O, K₂O, Cl	Pour la qualité finale du ciment et le contrôle de la cuisson	Par FX
Autres : Cr, Mn, P, Ti, Sr	A titre informatif	Par FX
Phases C₃S, C₂S, C₃A, C₄AF	pour la qualité finale du ciment	Par DRX (diffraction X) ou estimation par les calculs de Bogue

IV.3.1 Perte au feu

IV.3.1.1 Principe

La perte au feu (PAF) est déterminée en atmosphère oxydante (air). Par calcination à l'air à (975 ± 25) °C, le gaz carbonique et l'eau sont chassés et les éléments oxydables

éventuellement présents sont oxydés l'objectif de cette analyse est de calculer le dioxyde de carbone (CO₂) dégagé ainsi que la quantité d'ajouts [15].

IV.3.1.2 Matériels utilisés

- Creuset
- Four à moufle (950 ± 25°C)
- Un dessiccateur
- Spatule
- Balance de précision électrique 0.0001g



Figure IV.4. Creuset



Figure IV.5. Balance électrique

IV.3.1.3 Mode opératoire

- Peser le creuset vide préalablement calciné et taré (m_0)
- Peser dans ce creuset 1g de ciment (m_1) et placer le dans le four électrique dont la température est stabilisée à 950 °C
- Après 1h de chauffage retirer le creuset et le refroidir dans le dessiccateur à la température ambiante et enfin le peser (m_2) [19].

IV.3.1.4 Expression des résultats

La perte au feu brute est calculée en pourcent par la formule :

$$\text{PAF} = (m_0 + m_1) - m_2 \times 100 \quad (1)$$

Où m_0 : est la masse de la prise d'essai initiale du creuset vide, en grammes

m_1 : est la masse de la prise d'essai du ciment

m_2 : est la masse du creuset après séchage [15].

IV.3.2 Sulfates et sulfures

IV.3.2.1 Principe

Les ions sulfate mis en solution par une attaque chlorhydrique du ciment sont précipités entre pH 1 et 1,5 par une solution de chlorure de baryum. L'opération est réalisée à ébullition dont l'objectif est de déterminer la teneur en SO₃ (< 3%) afin d'éviter le phénomène du gonflement.

Le dosage est ensuite effectué par gravimétrie et exprimé en SO₃ [17].

IV.3.2.2 Matériels et produits utilisés

- Eau distillé - HCL dilué 1+1 - Chlorure de barium BaCl_2 - Balance de précision - Spatules
- Papiers filtres - Bêchers - Plaque chauffante - Creuset en platine - Four à moufle - Entonnoir



Figure IV.6. Plaques chauffantes



Figure IV.7. Filtration SO_3



Figure IV.8. Echantillons ciments

IV.3.2.3 Mode opératoire

- Peser 0.5 g de ciment (m_1) et la mettre dans un bêcher de 250 ml
- Délayer avec 20 ml d'eau chaude distillée
- Ajouter 10 ml d'HCl dilué 1+1 et remplir jusqu'à 50 ml avec de l'eau distillée
- Chauffer quelques instants en écrasant l'échantillon avec l'extrémité aplatie d'un agitateur en verre jusqu'à la décomposition complète du ciment et laissé digérer la solution pendant 15 min juste au-dessous du point d'ébullition
- Filtrer le résidu sur un papier filtre moyen dans un bécher de 400 ml
- Laver soigneusement à l'eau chaude jusqu'à disparition des ions chlorures (vérifier par l'essai au nitrate d'argent) et récupérer le filtrat à environ 250 ml
- Ajuster le pH de la solution entre 1,0 et 1,5 porter à ébullition pendant 5 min
- Ajouter goutte à goutte 10 ml de la solution de chlorure de baryum BaCl_2 (à 120 g/l) chauffée juste au-dessous du point d'ébullition
- Laisser ensuite reposé le bêcher couvert à température ambiante de la salle des fours pendant 4h avant le filtrage
- Filtrer le précipité sur un papier filtre fin et laver à l'eau bouillante jusqu'à la disparition complète des ions chlorure
- Placé le papier filtre et son contenu dans le creuset en platine préalablement calciné pendant 15min sur la plaque chauffante
- Mettre au four à 950 °C pendant 40min puis laisser refroidir dans le dessiccateur et peser ensuite le creuset et son contenu (m_2) [19].

IV.3.2.4 Expression des résultats

La teneur en sulfate exprimée en SO_3 est calculée en pourcent par la formule :

$$\text{SO}_3 = \frac{m_2 \times 100}{m_1} \quad (2)$$

Où m_1 : est la masse de la prise d'essai du ciment, en grammes

m_2 : est la différence des masses du creuset après et avant séchage, en grammes [17].

IV.3.3 Résidu Insoluble

IV.3.3.1 Principe

Il s'agit d'une méthode conventionnelle dans laquelle le résidu insoluble des ciments est obtenu au moyen d'une attaque par une solution diluée d'acide chlorhydrique pour éviter au maximum la précipitation de la silice en solution. Le résidu de cette attaque est repris par une solution bouillante de carbonate de sodium afin de remettre en solution les traces de silice qui auraient été précipitées notre objectif de cette analyse. Le résidu est dosé par gravimétrie après calcination [16].

IV.3.3.2 Matériels et produits utilisés

- HCl 1+1 - Carbonate de sodium (Na_2CO_3) - Eau distillée chaude - Nitrate d'argent
- Bêcher de 250ml - Plaque chauffante - Papiers filtre moyen - Entonnoir - Creuset en platine
- Agitateur en verre - Four à moufle 950°C - Balance de précision – Dessiccateur - PH mètre



Figure IV.9. Filtration RI

IV.3.3.3 Mode opératoire

- Peser 0.5 g de ciment à analyser (m_1) et le mettre dans un bêcher de 250 ml
- Ajouter 90 ml d'eau distillée tout en agitant vigoureusement le mélange
- Ajouter 10 ml d'HCl dilué 1+1 et chauffer la solution doucement en écrasant l'échantillon avec l'extrémité aplatie d'un agitateur en verre, jusqu'à la décomposition complète
- Laisser digérer la solution pendant 15 min à une température juste au-dessous du point d'ébullition

- Filtrer le résidu sur un papier-filtre moyen et laver soigneusement avec de l'eau presque à ébullition puis le placer avec son contenu dans le bécher à réaction et ajouter 100 ml de la solution de carbonate de Sodium Na_2CO_3 à (50g/l)
- Faire bouillir pendant environ 30 min et filtrer après sur un papier-filtre moyen et laver avec de l'eau presque à ébullition, puis laver quatre fois avec de l'acide chlorhydrique chaud jusqu'à l'obtention d'un $\text{pH} < 2$ et avec de l'eau presque à ébullition, jusqu'à la disparition complète des ions chlorure
- Peser le creuset préalablement calciné et mettre dedans le papier filtre, chauffer environ 15min et puis le mettre dans le four pendant 40min
- Mettre dans le dessiccateur pour refroidir et peser après le creuset (m_2) [19].

IV.3.3.4 Expression des résultats

$$\text{Résidu insoluble (RI)} = \frac{m_2}{m_1} \times 100 \quad (3)$$

Où m_1 : masse de la prise d'essai, en grammes

m_2 : masse du résidu insoluble calciné, en grammes [19].

IV.3.4 Dosage des éléments majeurs

IV.3.4.1 Principe

L'analyse est effectuée après dissolution complète du ciment, la décomposition par l'acide chlorhydrique et le chlorure d'ammonium (variante) peut être utilisée pour le ciment dont le résidu insoluble ne dépasse pas 1,5 %. L'objectif est de déterminer la composition du ciment afin de confirmer les résultats de l'appareil XRF [5].

IV.3.4.2 Matériels et produits utilisés

- **Produits** : Acide chlorhydrique HCl 1+1 - Acide nitrique diluée HNO_3 - Bicarbonate de sodium Na_2CO_3 - Chlorure d'ammonium NH_4Cl - Hydroxyde d'ammonium NH_3 aqueux - Ethanol 96% - Triethanolamine $\text{N}(\text{CH}_2\text{CH}_2\text{OH})_3$ (> 99 %) - Hydroxyde de potassium KOH - Sel disodique dihydraté de l'acide éthylène diamine tétracétique (EDTA) - Sulfate de cuivre ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) - Acide sulfosalicylique sodique $\text{C}_7\text{H}_5\text{NaO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ - Acétate de sodium (CH_3COONa) - Acide acétique (CH_3COOH)
- **Matériels** : - Spatule - Bêcher 600ml et 250ml – Burette - Papier-filtre moyen - Fiole jaugée 250ml - Balance de précision - Dessiccateur - Bain marie - Four 950°C - Creuset en platine. - Capsule d'évaporation en porcelaine [19].

Note : la verrerie utilisée doit être propre et désinfectée afin d'assurance on utilise l'étuve



Figure IV.10. Etuve



Figure IV.11. Agitateur magnétique



Figure IV.12. Matériels de la pesée



Figure IV.13. Filtration de la matière



Figure IV.14. Évaporation à sec

IV.3.4.3 Mode opératoire

IV.3.4.3.a Déterminations de la silice SiO_2

- Sécher la matière avant de démarrer l'essai
- Peser à 0,0001 g 0,50 g de ciment, la mettre dans un creuset en platine et calciner le creuset avec la matière à 950°C pendant 5 min
- Ajouter 0.3 g de Na_2CO_3 tout en agitant doucement le mélange puis calciner le creuset avec le mélange à 950°C pendant 15 min et laisser refroidir pendant 1 min
- Ajouter 5 ml HCl dilué et transférer la matière dans une capsule en porcelaine, rincer le avec 10 à 15 ml de l'acide chlorhydrique diluée chaud 1+1 et agiter avec un agitateur en verre, en écrasant les grumeaux éventuels
- Ajouter 5 gouttes de l'acide nitrique concentré et évaporer à sec au bain-marie.
- Ajouter 1g de chlorure d'ammonium NH_4Cl après l'apparition de la patte gélatineuse et continuer l'évaporation de l'acide chlorhydrique de cette patte sur une plaque chauffante
- Ajouter 10 ml de l'acide chlorhydrique chaud (1+1) et filtrer sur un papier-filtre moyen (mettre deux papiers-filtres) dans une fiole jaugée de 250 ml
- Laver la capsule avec l'acide chlorhydrique chaud (1+1) ; répéter l'opération de lavage trois (03) fois avec l'eau distillée chaude
- Laver le papier-filtre avec l'eau distillée chaude douze (12) fois et puis refroidir la fiole jaugée contenant le filtrat et les eaux de lavages provenant de la précipitation de la silice avec l'eau froide en portant au trait de jauge avec de l'eau distillée

- Agiter la fiole vigoureusement pour que la solution soit prête à être utilisée pour le dosage complexométrique de l'oxyde de fer, de l'oxyde d'aluminium, de l'oxyde de calcium et de l'oxyde de magnésium.
- Calciner le creuset et son contenu à 950 °C pendant 1heure dans le four puis laisser refroidir à température ambiante dans le dessiccateur pendant 15 min et le peser [19].

➤ *Calcul et expression des résultats*

$$\text{SiO}_2 = \frac{m_2}{m_1} \times 100 \quad (4)$$

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

m2: masse de creuset et son contenu calciné en grammes [19].

IV.3.4.3.b Détermination d'oxyde de calcium CaO

- Au moyen d'une pipette, prélever 25 ml de la solution préparée pour le dosage complexométrique dans la fiole jaugée de 250 ml et l'introduire dans un bécher de 250ml
- Porter au volume de 200ml avec de l'eau distillée et ajouter 5ml de la solution de triéthanolamine (ITEA + 2H₂O)
- Ajouter environ 0,1g d'indicateur mixte (CMP)
- Ajouter environ 25ml de la solution d'hydroxyde de potassium KOH tout en agitant la solution jusqu'à l'apparition d'une coloration verte aux parois du bécher
- Ajouter 8 ml de la solution d'hydroxyde de potassium KOH (200g/l)
- Titrer avec la solution d'EDTA 0,015 mol/l jusqu'au virage du vert au rose et enregistrer le volume V_i de la solution EDTA ajoutée [19].

➤ *Calcul et expression des résultats*

$$\text{CaO} = \frac{T_{cao} \times V_1}{m_1} \quad (5)$$

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

V1: volume de la solution d'EDTA utilisé pour le titrage, en millilitres

Tcao : facteur de la solution d'EDTA 0,015 mol/l [19].

IV.3.4.3.c Déterminations d'oxyde de magnésium MgO

- Au moyen d'une pipette, prélever 25 ml de la solution préparée pour le dosage complexométrique dans la fiole jaugée de 250 ml et l'introduire dans un bécher de 250ml
- Porter au volume de 200ml avec de l'eau distillée et ajouter 5ml de la solution de triéthanolamine
- Ajouter 25ml de la solution PH₁₀
- Ajouter environ 0,05g d'indicateur chrome bleu (KB) tout en agitant la solution

- Titrer avec la solution d'EDTA 0,015 mol/l jusqu'à l'apparition d'une coloration bleu clair et enregistrer le volume V2 de solution EDTA ajoutée [19].

➤ *Calcul et expression des résultats*

$$\text{MgO} = \frac{T_{\text{Mgo}} \times (V2 - V1)}{m1} \quad (6)$$

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

V1: volume de la solution d'EDTA enregistré pour le titrage de l'oxyde de calcium Cao, en millilitres

V2: volume de la solution d'EDTA utilisé pour le titrage, en millilitres

T mgo : facteur de la solution d'EDTA 0,015 mol/l [19].

IV.3.4.3.d Détermination d'oxyde de fer Fe₂O₃

- Au moyen d'une pipette, prélever 25 ml de la solution préparée pour le dosage complexométrique dans la fiole jaugée de 250 ml, et l'introduire dans un bécher de 250ml
- Porter au volume de 100ml avec de l'eau distillée, et ajouter 10 gouttes de la solution de l'acide sultosalicylique sodique (C₇H₆O₆S.2H₂O)
- Ajouter quelques millilitres d'hydroxyde d'ammonium NH₃.H₂O (1+1), tout en agitant la solution, jusqu'à l'apparition d'une coloration jaune
- Ajouter environ 5 gouttes d'acide chlorhydrique (1 + 1) jusqu'à l'apparition d'une coloration violet pâle. Puis ajouter 5 gouttes d'acide chlorhydrique pour obtenir un pH de 2
- Chauffer à 70 °C et titrer avec la solution d'EDTA 0,015 mol/l jusqu'au virage du violet pâle au jaune pâle
- Enregistrer le volume, Vi de solution EDTA ajoutée
- Cette solution titrée est conservée pour la détermination de la teneur en oxyde d'aluminium.

➤ *Calcul et expression des résultats*

$$\text{Fe}_2\text{O}_3 = \frac{T_{\text{Fe}_2\text{O}_3} \times V3}{m1} \quad (7)$$

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

V3: volume de la solution d'EDTA utilisé pour le titrage, en millilitres

T_{Fe₂O₃}: Facteur de la solution d'EDTA 0,015 mol/l [19].

IV.3.4.3.e Détermination d'oxyde d'aluminium Al₂O₃

- Porter au volume de 200ml avec de l'eau distillée la solution conservée depuis la détermination de la teneur d'oxyde de fer

- Ajouter 15 ml de la solution PH = 4.3
- Ajouter 10 ml de la solution d'EDTA 0,015 mol/l
- Chauffer jusqu'à l'ébullition puis ajouter 10 à 15 gouttes d'indicateur PAN
- Titrer avec la solution de sulfate de cuivre $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 0,015 mol/l jusqu'à l'apparition d'une coloration violet
- Enregistrer le volume, V_A de la solution de sulfate de cuivre ajoutée [19].

➤ *Calcul et expression des résultats*

$$\text{Al}_2\text{O}_3 = \frac{T_{\text{al}_2\text{o}_3} (V - V_4 \times K)}{m_1} \quad (8)$$

Où m_1 : masse de la prise d'essai en grammes

V : volume de la solution d'EDTA 0,015 mol/l ajouté

V_4 : volume de la solution de sulfate de cuivre utilisé pour le titrage, en millilitres

K : Facteur de la solution de sulfate de cuivre 0,015 mol/l $K = \frac{V_{\text{EDTA}}}{V_{\text{CuSO}_4}}$ [19].

Note : Pour la détermination de ces éléments il faut tout d'abord passer par la préparation des solutions tel que ; l'indicateur mixte CMP, la solution d'EDTA, la solution de sulfate de cuivre, la solution à ph-10, l'indicateur chrome bleu KB, l'indicateur acide sulfosalicylique sodique, la solution pH 4,3 et l'indicateur PAN en suivant des méthodes bien définis.

Pour ce qui concerne le calcul des facteurs des solutions il faut tout d'abord déterminer la concentration de la solution d'EDTA en suivant un mode opératoire chimique bien défini par ces formules [19] :

- $T_{\text{CaO}} = C_{\text{EDTA}} \times m_{\text{CaO}}$
- $T_{\text{CaO}} = C_{\text{EDTA}} \times 56,08$
- $T_{\text{MgO}} = C_{\text{EDTA}} \times m_{\text{MgO}}$
- $T_{\text{Fe}_2\text{O}_3} = C_{\text{EDTA}} \times \frac{m_{\text{Fe}_2\text{O}_3}}{2}$
- $T_{\text{Al}_2\text{O}_3} = C_{\text{EDTA}} \times \frac{m_{\text{Al}_2\text{O}_3}}{2}$

Chapitre V. Résultats et discussions

Ce chapitre abordera les différentes analyses des résultats expérimentaux relatives au contrôle qualité et l'optimisation du cru dans le but d'étudier l'influence de ces derniers sur la cuisson du ciment.

V.1 Identification des échantillons

Le prélèvement des échantillons ainsi que sa préparation se fait maintenant de plus en plus avec une très grande précision.

Suite aux analyses de mes échantillons objets de mon étude j'ai obtenu les résultats suivants

V.1.1 Optimisation du cru

Le tableau ci-dessous regroupe les analyses effectuées par l'XRF sur un mélange de cru et de clinker pour déterminer les concentrations de leurs compositions.

Tableau 0.1. Analyses Composition minéralogique

Composition minéralogique	Echantillons		
	Ciment silo4 (sortie broyeur)		
C₃A	6.63	6.199	6.715
C₄AF	9.251	8.276	8.365

La chimie du cru est un paramètre important qui indique la qualité du KK, donc au finale du ciment. Lors de la formation du clinker, les oxydes principaux se combinent entre eux pour former d'autres minéraux comme il est bien expliquer dans la partie cuisson (III.2.1)

- Si après formation du C₄AF il reste de l'alumine pour se combiner en C₃A ce qui nous donne un nombre de molécules d'Al₂O₃ supérieur au nombre de molécules de Fe₂O₃, le C₃A restant se formera de plus en plus de C₃A qui est notre cas.

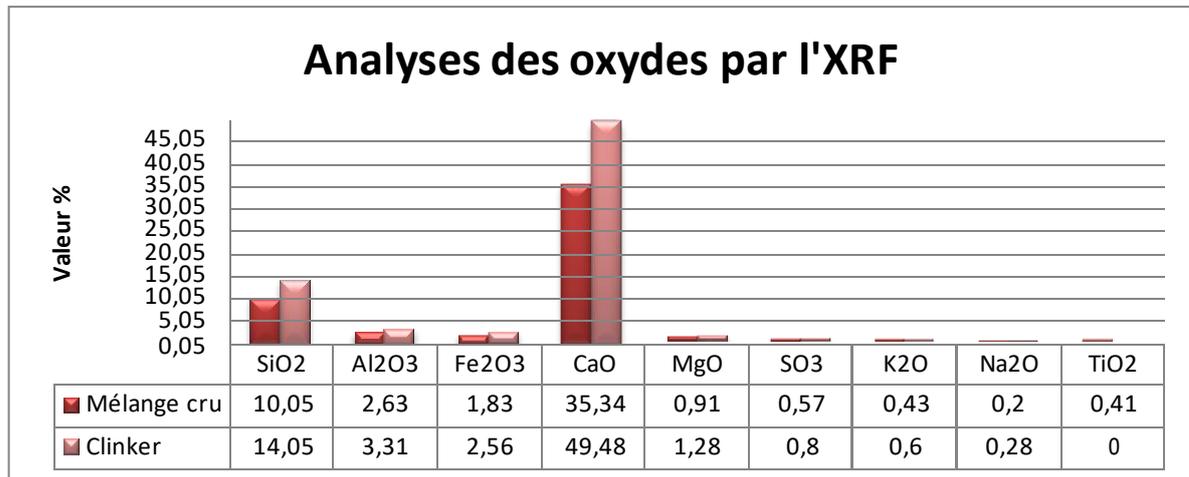
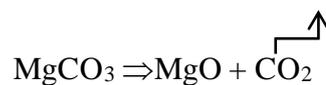


Figure 0.1. Analyse de la composition par l’XRF

On peut dire que notre histogramme montre que;

- La quantité des oxydes de notre échantillon clinker augmente proportionnellement par rapport à celui du mélange cru en fonction de la température de l'atelier de cuisson, ce qui conduit à dire qu’il existe une relation importante entre une bonne température de l'atelier de cuisson et une bonne clinkérisation par conséquent une composition minéralogique plus importante.
- La présence infime des éléments mineurs du cru et dans la limite des normes est satisfaisante.
 - Le MgO étant un alcalin impure et nuisible sa présence provoque des formations d’anneaux, l’expansion du béton, et une mauvaise qualité du ciment.

Donc c’est un élément on essaiera de l’éviter dans la préparation du cru, sa réaction chimique sera donc peu présente



- Les alcalins (K₂O, Na₂O, SO₃, TiO₂) leurs présence provoque une instabilité et une fissuration du four, un effet sur la couleur, une réduction de C₃S et de la résistance de 2js et peuvent être comme minéralisateur ou fondant.

Les différents gaz chassés avant la clinkérisation qui se déroule entre 1200 et 1500 °C sont présentés par ce graphe.

Tableau 0.2. Evaporation et décarbonatation aperçu dans l’atelier cuisson

Matières	H ₂ O	MgCO ₃	CaCO ₃
Température °C	100	450-620	820-850

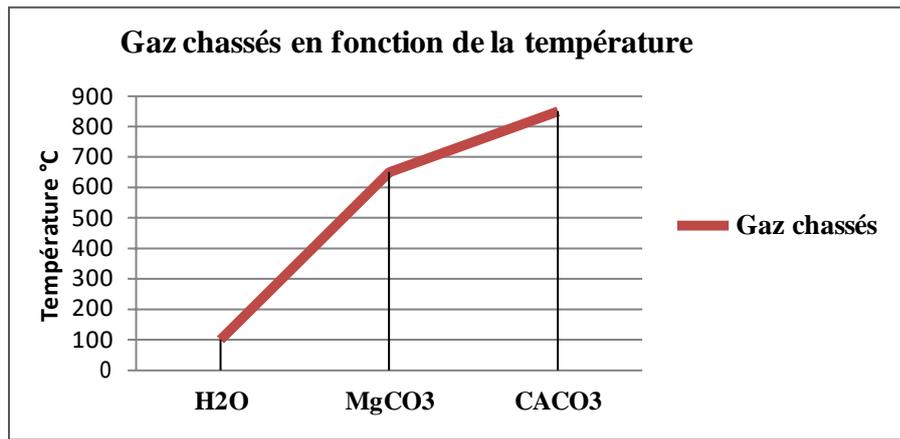


Figure 0.2. Gaz chassés en fonction de la température

- D'après notre graphe l'aperçu des réactions principales qui peuvent se produire dans l'atelier cuisson était formulé tel que H₂O qui a pour but d'éviter que la farine colle dans le transporteur.

Tableau 0.3. Contrôle des indices chimiques

Analyses Echantillons	Ciment (CEM II)			Normalisation
	LSF	90.16	102.87	
MS	3.24	2.47	2.39	2.5-3,2
MAF	1.46	2.09	1.8	1,5-3

- D'après les résultats des analyses effectuées (voir tableau V.3) en limitant la valeur du LSF on maîtrise le rapport C₂S/C₃S.
 - Le LSF est compris entre 90 et 98% ce qui nous donne un ciment normal et avec des caractéristiques plus élevées (résistances ...).
 - Le LSF étant un paramètre important de l'aptitude à la cuisson, on constate que si le LSF baisse (↘) l'aptitude à la cuisson (↗).
 - Une saturation en chaux trop élevée entraînera la formation de chaux libre qui provoquera un gonflement des ciments.
- Donc d'après les résultats on constate que notre LSF est satisfaisant.
- Le module silicique étant faible, la somme A+F est élevée donc la quantité de la phase liquide augmente ce qui facilite la cuisson d'où diminution de la consommation calorifique, moins de poussière et croûtage donc notre aptitude à la cuisson (↗) si MS (↘)

- Le module alumino-ferrique qui se forme pendant la cuisson influe sur le rapport entre aluminates (C_3A) et alumino-ferrites (C_4AF), par conséquent l'aptitude à la cuisson augmente (↗) si AF diminue (↘)

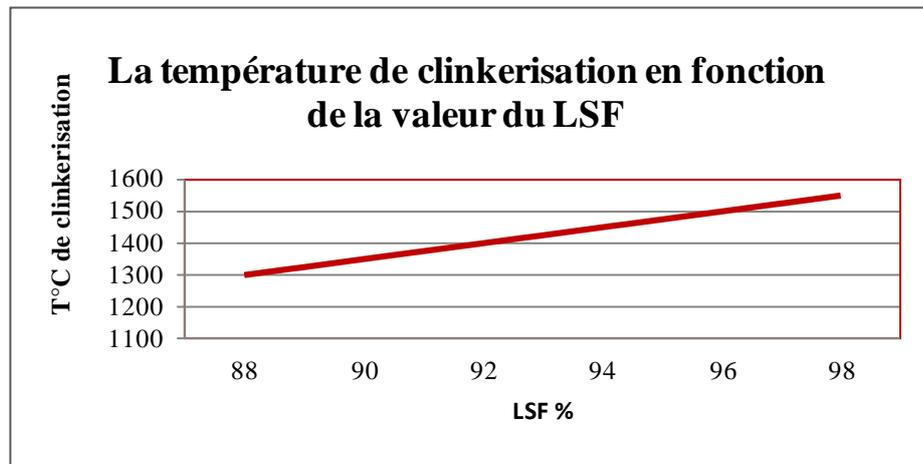


Figure 0.3. Température de clinkerisation en fonction de l'LSF

V.1.2 Résultats contrôle qualité

Les tableaux ci-dessous regroupent les résultats expérimentaux obtenus au laboratoire des analyses chimiques sur différents échantillons de ciment.

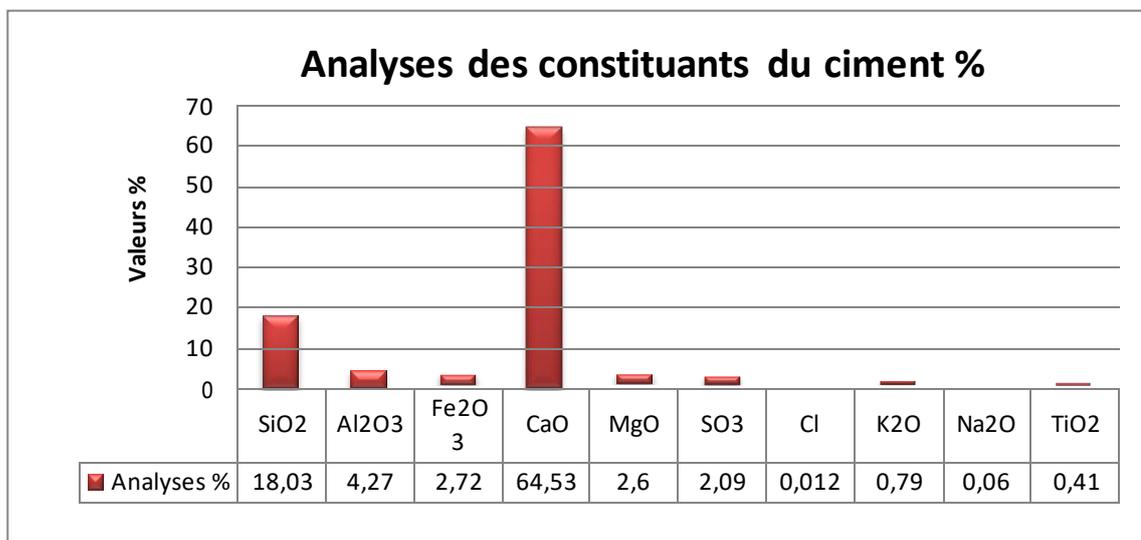


Figure 0.4. Analyse composition ciment

- Notre analyse est effectuée sur un échantillon de ciment à la sortie du broyeur et les résultats sont obtenus par l'XRF.
- En tenant compte des explications précédentes en ce qui concerne les exigences et les meilleurs résultats dans un bon contrôle qualité dans notre exemple les pourcentages des alcalins étant faible et les pourcentages des oxydes formés étant en bonne répartition cela

nous donne un résultat satisfaisant, ce qui influe sur la qualité du ciment, le bon déroulement du processus et l'émission de gaz nocif à la cheminée (SO₂, chlore, matière organiques, oxyde d'azote, mercure...).

- Le pourcentage de CaO étant supérieur à (>64,53%) les combinaisons C₃S, C₂S, C₃A et C₄AF sont positives donc de façon suffisante puisque l'oxyde de fer se combine avec la CaO pour former une ferrite de calcium CF, cette ferrite de calcium se combine à une partie du C₃A pour former C₃A + CF C₄AF en résumé la quantité de la composition minéralogique formée dépend de la CaO disponible.
- La quantité de la CaO étant suffisante sa réactivité pour se combiner aux composés acides est importante.

Cette dernière dépend de :

- La microstructure de la roche carbonatée (la taille des cristaux de calcite)
- La température de décarbonatation
- La température et la durée pendant laquelle le CaO ne se combine pas

Tableau 0.4. Résultats d'analyse perte au feu PAF

Echantillons Masses (g)	Creuset vide	Ciment d'essai	Après séchage	PAF	Normalisation
Bk1	38.0240	1.0009	39.0094	1.55 %	≤ 5%
Bk2	38.1851	1.0009	39.1442	4.18 %	
Silo3	38.6352	1.0013	39.5819	5.46 %	

- La perte au feu représente le pourcentage de matière qui passe à l'état gazeux comme il est indiqué dans la partie contrôle qualité (IV.3.1). D'après les résultats obtenus on constate que notre ciment est stable et aux normes. Cette stabilité s'explique par le fait que le contrôle de la perte au feu a une relation directe avec le contrôle de la cuisson et si notre ciment est cuit ou incuit.

Tableau 0.5. Résultats analyses de la teneur du ciment en sulfate
et des résidus insolubles

Echantillons	Bk1	Silo1	Silo2	Normalisation
SO ₃ (%)	2.19	2.10	2.03	≤ 3.5%
RI (%)	0.26	0.48	0.49	≤ 5%

- D'après nos résultats la quantité du SO₃ trouvée dans le ciment est faible donc satisfaisante puisque elle ne dépasse pas la norme et le soufre (SO₃) ne va pas influencer sur la qualité du ciment qui peut provoquer le bouchage des tuyauteries et les rejets à la cheminée d'acide sulfurique.
- Vu que la présence de SO₃ dans le clinker a tendance à réduire le pourcentage de C₃A et C₃S ainsi que le rapport de C₃S/C₂S mais elle n'affecte pas le pourcentage de C₄AF ; donc on peut dire que notre clinker est de bonne composition.
- La quantité des résidus insolubles ne dépassant pas 1% dans notre ciment sachant que la norme est jusqu'à 5%, la quantité de silice combinée qui provient du sable en général n'est pas importante et notre ciment est avec peu de résidus insolubles et impuretés nuisibles.

L'histogramme au-dessous représente notre analyse.

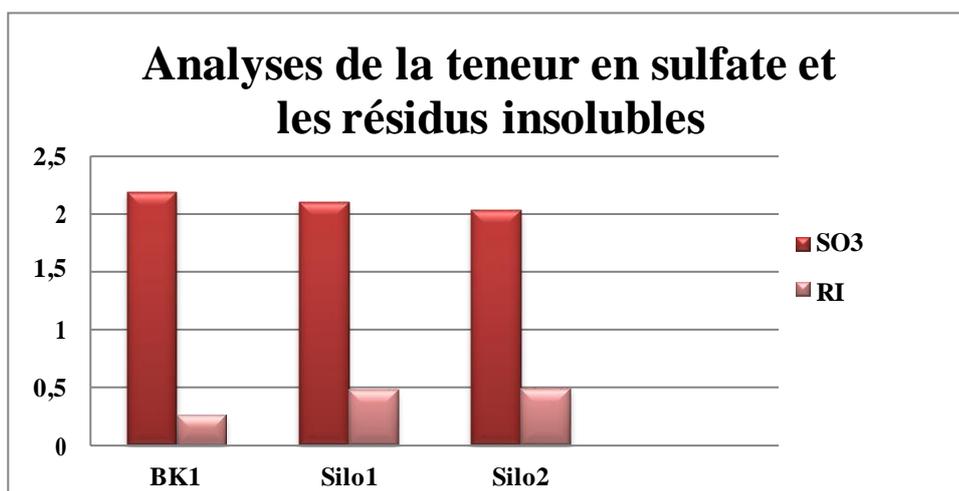


Figure 0.5. Analyse de l'SO₃ et les RI

Conclusion générale

Le stage que j'ai effectué au niveau de la Société Saoura Des Ciments a été très bénéfique, il m'a permis d'approfondir mes connaissances acquises durant mes études et de m'intégrer dans le milieu professionnel.

J'ai pu saisir l'importance de l'influence d'un bon contrôle qualité sur la cuisson d'un ciment conforme dont d'après toutes les analyses chimiques.

Les résultats trouvés nous permettent de tirer les conclusions suivantes :

- ✓ La chimie du cru est un paramètre important qui indique la qualité du clinker et donc du ciment dont lors de la formulation les oxydes principaux se combinent entre eux pour former d'autres minéraux pour avoir une meilleure composition minéralogique.
- ✓ L'impact des éléments mineurs du cru est important dont leurs proportions doivent respecter les limites typiques car ce sont des impuretés nuisibles et que leurs effets provoquent des résultats néfastes sur le ciment.
- ✓ Les modules repérés d'après les résultats des analyses chimiques sont des paramètres très importants concernant l'aptitude à la cuisson (LSF, MS, AM) donc il faut maîtriser la bonne préparation du cru et le bon suivi de la qualité.
- ✓ Les oxydes entrant dans la formulation du ciment doivent être en bonne répartition pour avoir des valeurs qui auront une bonne influence sur la qualité du ciment, le bon déroulement du processus et pour que les phases formés influent sur la cuisson positivement.
- ✓ Le contrôle qualité de la perte au feu, la teneur en sulfates et sulfures, les résidus insolubles ainsi que les éléments majeurs et mineurs nous permet de contrôler notre cuisson et d'éviter tout problème influant sur le ciment ou le déroulement du processus de fabrication.
- ✓ Une qualité importante des matières premières utilisées pour la fabrication du ciment est leurs niveaux de réactivité en particulier celle de CaO pour se combiner aux composés acides (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3).
- ✓ Pour conclure il faut toujours avoir une conformité entre la moyenne des résultats et celle de la référence utilisé par le laboratoire selon les normes algériennes pour preuve les échantillons les plus représentatifs sont-ce qui ont une meilleure conformité avec les exigences de ces normes

Et en fin, cette expérience m'a permis d'acquérir une vision réelle du fonctionnement d'une cimenterie, sur la la formulation et sur les méthodes d'analyses chimiques pour obtenir une meilleure qualité et une meilleure cuisson du ciment.

Références

- [1]. Document de l'entreprise SSC du processus de fabrication
- [2]. Control Room Operator Algérie, Lafarge Ciments Centre de Viviers, service formation, septembre 2014.
- [3]. Norme Algérienne NA 442 Ciments : composition, spécification et critères de conformité des ciments courants. Edition n°04, 2013.
- [4]. Norme Algérienne NA 5040, ciment partie 2 : Évaluation de la conformité. Edition n°02, 2015.
- [5]. Document de l'entreprise SSC, direction de formation.
- [6]. Norme Algérienne NA 5039, Guide utilisation des ciment.2012
- [7]. H.F.W. Taylor, 'Cement chemistry', 2nd edition, University of Aberdeen, 2007.
- [8]. Sidérurgie des métaux ferreux, 2^{ème} édition, Réf internet 42368, page 28.
- [9]. Mohammed Amine Benhadda, la durabilité du mortier à base de ciment de Béni-Saf vis-à-vis de milieux basiques NaOH et NH₄OH. Diplôme d'ingénieur d'état en chimie industrielle, Génie des procédés, Université Abou-Bakr Belkaïd, p. 2-13, 2011/2012
- [10]. Le siège Neyrtec mineral, Ensemblier et Équipementier, process de la mine, de la carrière, l'orient Franceet de l'industrie.
- [11]. Soroka, I. (1997) Portland Cment Paste and Concrete. Civil Engineering Materials, Edited By N. Jackson. doi: 10.1007/978-1-349-03994-4.
- [12]. Anjan, K. C. (2018) Cement Production Technology: Principles and Practice. Taylor & Francis Group.
- [13]. Dreux, G. and Festa, J. (2007) 'Nouveau guide du béton et de ses constituants'. Huitième édidtion, troisieme tirage Eyrolles, p. 418.
- [14]. Bogue, R. H. The chemistry of Portland cement. LWW, 1955.

- [15]. Norme Algérienne NA 235, ciments détermination de la perte au feu. Edition n°02,2005
- [16]. Norme Algérienne NA 236, ciments détermination des insolubles. Edition n°02,2005
- [17]. Norme Algérienne NA 237, ciments détermination des sulfates. Edition n°02,2005
- [18]. Norme Algérienne NA 5042, méthodes d'essais des ciments partie 2 : analyse chimique des ciments. Edition n°02,2015
- [19]. Document entreprise SSC. Manuel des modes opératoires chimiques.
- [20]. Chouikh Fethi, étude physicochimique du ciment. Ingénieur d'état en génie des matériaux, université de Jijel, Algérie, 2007
- [21]. BENAÏSSA Abouseyf et HASSINOUI Yousouf, Optimisation du Taux Des Incuits Dans le Ciment CEM II/A 42,5, mémoire de Master, université d'Aïn-temouchent, 2018
- [22]. Bitar Zeyneb, mémoire master, influence de la surface spécifique des ciments aux ajouts minéraux (calcaire) sur le comportement mécanique du mortier, 2016