

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Université Badji Mokhtar-Annaba-
Badji Mokhtar-Annaba-University



جامعة باجي مختار- عنابة-

Faculté des Sciences de la Terre
Département des Mines

THESE

Présentée par : *MEKTI Zohir*

En vue de l'obtention du diplôme de Doctorat en Génie Minier
Option : Valorisation des Ressources Minérales

*Comportement du laitier de l'usine sidérurgique
d'El-Hadjar sur le mélange clinker : Cas ERCE
Hadjar-Soud, Skikda*

Thèse soutenue le 04/10/2018, devant le jury composé de :

Président :	IDRES Abdelaziz	<i>Pr</i>	Université Badji Mokhtar-Annaba
Rapporteur :	BOUNOUALA Mohamed	<i>Pr</i>	Université Badji Mokhtar-Annaba
Examineurs :			
	CHETTIBI Mohamed	<i>Pr</i>	Université Badji Mokhtar-Annaba
	DERAMCHI Karima	<i>Pr</i>	ENP El-Harrach - Alger
	BOUZIDI Nedjma	<i>MCA</i>	Université A. Mira – Béjaia
	BORDJIBA Tarik	<i>MCA</i>	Université 8 Mai 1945 Guelma

2018/2019

SOMMAIRE

SOMMAIRE	I
REMERCIEMENTS	V
DEDICACES.....	VI
LISTE DES FIGURES	VII
LISTE DES TABLEAUX	IX
RESUME.....	XI
ملخص.....	XIII
INTRODUCTION GENERALE.....	XIV
I. CHAPITRE I : ANALYSE DE LA LITTERATURE SCIENTIFIQUE SUR LES LAITIERS DE HAUT FOURNEAU.....	1
I.1 LAITIERS DE HAUT FOURNEAU	1
I.1.1 Introduction	1
I.2 GENERALITES	2
I.2.1 Quantité de laitier élaboré	2
I.2.2 Caractéristiques du laitier	2
I.3 FABRICATIONS ET PROPRIETES DES DIFFERENTES FORMES DE LAITIERS	4
I.3.1 Laitier rocheux (ou cristallisé).....	4
I.3.1.1 Fabrication de laitier rocheux.....	4
I.3.1.2 Produit obtenu de laitier rocheux.....	4
I.3.1.3 Conditions de fabrication de laitier rocheux.....	4
I.4 LAITIER GRANULE.....	6
I.4.1 Filtration	7
I.4.1.1 Prise hydraulique du laitier vitreux	8
I.4.1.2 Conditions de fabrication	9
I.4.2 Laitier bouleté	9
I.4.2.1 Méthode de Production de laitier bouleté.....	10
I.4.2.2 Conditions de fonctionnement du bouletage	11
I.4.3 Laitier expansé	11
I.4.4 Laine de laitier et laine de roche.....	12
I.5 EMPLOI DES DIFFERENTES FORMES DE LAITIERS	13
I.5.1 Laitier vitrifié en cimenterie	13
I.5.2 Hydratation des ciments au laitier	14
I.5.3 Caractéristiques et domaines d'emploi.....	14
I.5.3.1 Évolution de la résistance dans le temps	14
I.5.3.2 Incidence de l'enthalpie d'hydratation	15
I.5.3.3 Résistance aux agressions chimiques	15
I.5.4 Laitier en technique routière.....	16
I.5.5 Mélanges où le laitier vitrifié sert de liant	18
I.5.5.1 Laitier O/D	18
I.5.5.2 Grave-laitier	18
I.5.5.3 Sable-laitier	20
I.5.5.4 Limon-chaux-laitier.....	20
I.5.6 Utilisation du mélange et laitier vitrifié.....	20
I.5.6.1 Laitier rocheux	20
I.5.6.2 Mélanges	21
I.5.7 Laitier dans le domaine de la construction	21

1.5.7.1	Emploi de la grave-laitier en génie civil.....	21
1.5.7.2	Laitier vitrifié dans le béton	22
1.5.7.3	Laitier employé comme granulat du béton	22
1.5.7.4	Laitier dans les pierres artificielles.....	22
1.5.8	Emplois divers.....	23
I.6	ENVIRONNEMENT	23
I.7	COMMERCIALISATION.....	24
I.8	PERSPECTIVES. GRANULATION A SEC	24
I.9	CONCLUSION	26
II.	CHAPITRE II : PREPARATION DE LA MATIERE PREMIERE ET ELABORATION DU CIMENT.....	27
II.1	INTRODUCTION	27
II.2	SITUATION GEOGRAPHIQUE DE LA CARRIERE DU CALCAIRE.....	29
II.2.1	Rappels sur les travaux d'exploration antérieurs.....	29
II.2.2	Géologie de la région	29
II.3	ÉTUDE GEOLOGIQUE DU GISEMENT.....	29
II.4	CHIMIE DU CIMENT	33
II.4.1	Ciments dans l'antiquité.....	34
II.4.2	Invention du ciment Portland	34
II.4.3	Différentes étapes de fabrication du ciment	36
II.4.4	Extraction et préparation des matières premières.....	37
II.4.5	Procédé par voie sèche	37
II.4.5.1	Atelier de préparation du cru (Extraction et préhomogénéisation).....	37
II.4.5.2	Broyage et homogénéisation	38
II.4.5.3	Atelier de cuisson.....	38
II.4.5.4	Le tour échangeur.....	38
II.4.5.5	La cuisson	39
II.4.5.6	Le refroidissement du clinker.....	41
II.4.5.7	Stockage du clinker	43
II.4.5.8	Atelier de broyage du clinker	43
II.4.5.9	Expédition.....	44
II.5	DIFFERENTS PROCEDES DE FABRICATION.....	46
II.5.1	Procédé par la voie humide	46
II.5.2	Procédé par voie semi-humide	46
II.5.3	Procédé par voie semi-sèche	46
II.5.4	Gypse.....	48
II.6	OXYDES COMPOSANTS BASIQUES DU CIMENT	49
II.6.1	Oxyde de calcium.....	49
II.6.2	Hydroxyde de calcium.....	49
II.6.3	Oxyde de magnésium	49
II.6.4	Oxyde de silicium.....	50
II.6.5	Oxyde d'aluminium.....	50
II.6.6	Oxyde ferrique.....	50
II.7	EFFETS DE CES OXYDES SUR LES PROPRIETES DES CEMENTS	50
II.8	CONCEPT DE CARBONATE	51
II.9	DEGRE DE SATURATION EN CHAUX	52
II.9.1	Calcul de la teneur en CaO.....	52
II.9.1.1	Concept de standard de chaux	53
II.9.1.2	Degré de saturation.....	53
II.10	CALCUL DU DEGRE DE SATURATION	54
II.10.1	Conséquence des variations du degré de saturation	55
II.10.2	Conséquence des variations du degré de saturation	56
II.11	DOSAGE DU CRU	56

II.11.1	Choix des matières premières.....	56
II.11.2	Composants	57
II.11.3	Calcul du mélange cru.....	57
II.12	OBTENTION DE LA COMPOSITION THEORIQUE DU CLINKER	57
II.13	CONCLUSION	59
III.	CHAPITRE III : MATERIELS ET METHODES ; CARACTERISATION DES MATIERES PREMIERES ET TECHNIQUES EXPERIMENTALES.....	60
III.1	INTRODUCTION	60
III.2	METHODES ET CARACTERISATION DES MATIERES PREMIERES	61
III.3	ECHANTILLONNAGE DES MATIERES PREMIERES	62
III.4	ANALYSE CHIMIQUE DES MATIERES PREMIERES.....	62
III.4.1	Détermination de la composition chimique par le FRX	62
III.4.2	Caractérisation physique, chimiques et minéralogiques du laitier utilisé.....	64
III.4.2.1	La composition granulométrique du laitier d'El-Hadjar.....	65
III.4.2.2	Analyse chimique et minéralogique du laitier	67
III.5	PREPARATION DE LA FARINE CRUE A BASE DE LAITIER	70
III.5.1	Détermination des performances du ciment	71
III.5.1.1	Optimisation des proportions des matières premières	71
III.5.1.2	Détermination des modules et indices des oxydes.....	71
III.6	PRODUCTION DU CLINKER AU LABORATOIRE	74
III.6.1	Caractérisation du clinker obtenu	75
III.6.1.1	Discussion des résultats.....	75
III.6.2	La composition minéralogique du clinker obtenu (DRX)	76
III.6.3	Discussion des résultats	77
III.6.4	Caractérisation minéralogique du clinker par sections polies	78
III.6.4.1	préparation des sections polies	78
III.6.4.2	Méthode de la Paraffine	78
III.6.4.3	Discussion des résultats.....	79
III.7	EFFET D'UTILISATION DE LAITIER SUR LE TAUX D'EMISSION DE CO ₂	80
III.7.1	Problématique.....	81
III.7.2	Description de GEMIS	81
III.7.3	Acteurs impliqués.....	83
III.7.4	Exemples d'application	85
III.7.5	Comparaison de systèmes avec production combinée chaleur électricité.	86
III.7.6	Utilisateurs communaux.....	87
III.7.7	Évaluation et perspectives	87
III.8	MODELISATION LE CAS DE LA CIMENTERIE HADJAR-SOUD.....	88
III.8.1	Les données d'entrées de l'usine	88
III.8.2	Les indicateurs d'impact	89
III.8.3	Explication du tableau	90
III.8.4	Discussion des résultats	90
III.9	CONCLUSION	91
IV.	CHAPITRE IV : ANALYSES DES IMPACTS DE L'INDUSTRIE CIMENTIERE SUR L'ENVIRONNEMENT	92
IV.1	INTRODUCTION	92
IV.2	TYPES DE POLLUANTS REJETES	92
IV.2.1	Poussières	92
IV.2.2	Analyse de poussière	92
IV.2.3	Pendant l'extraction.....	93
IV.2.4	Différents gaz rejetés dans l'atmosphère	93
IV.2.5	Bruits et odeurs.....	94

IV.2.6 Impacts de poussière	95
IV.2.6.1 Sur la santé humaine	95
IV.2.6.2 Sur la végétation.....	95
IV.2.6.3 Sur notre quotidien	96
IV.2.7 Impacts des déchets utilisés pour la cuisson.....	96
IV.2.8 Maladies dues aux ciments.....	96
IV.2.8.1 Dermatoses allergiques.....	96
IV.2.8.2 Ulcérations cutanées.....	97
IV.2.8.3 Dermites d'irritation.....	97
IV.2.8.4 Dermites résiduelles	98
IV.2.8.5 Atteinte oculaire	98
IV.2.9 Mesures d'atténuation pour l'environnement	98
IV.3 DECHETS SOLIDES (DANGEREUX ET NON DANGEREUX).....	100
IV.4 MALADIES DUES AUX CIMENTS.....	100
IV.5 CONCLUSION	101
CONCLUSION GENERALE.....	102
REFERENCES.....	104

REMERCIEMENTS

Louange à Allah qui nous a éclairé le chemin de la science et de la connaissance et nous a aidés à accomplir ce devoir et nous accorde le succès à l'achèvement de ce travail.

Je tiens à exprimer mes plus vifs remerciements à Monsieur le Professeur Mohamed Bounouala qui fut pour moi un directeur de thèse attentif et disponible malgré ses nombreuses charges. Sa compétence, sa rigueur scientifique et sa clairvoyance m'ont beaucoup appris. Ils ont été et resteront des moteurs de mon travail de chercheur.

Je suis très honoré à remercier de la présence à mon jury de thèse et je tiens à remercier : Monsieur le président Idres A/Aziz et monsieur Chettibi Mohamed, pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant d'être membre de mon jury de thèse. Je tiens à l'assurer de ma profonde reconnaissance pour l'intérêt qu'il porte à ce travail ; Madame Bouzidi Nedjma ; Madame Deramchi Karima et Monsieur Bordjiba Tarik; pour l'honneur qu'ils m'ont fait pour leur participation à mon jury de thèse, pour le temps consacré à la lecture de cette thèse, et pour les suggestions et les remarques judicieuses qu'ils m'ont indiquées.

Je remercie particulièrement Monsieur Cheraita Kaddour, chef service de processus au niveau de la

cimenterie de Hadjar-Soud, pour son énorme aide et ses précieux conseils qui m'ont permis d'acquérir des techniques de production du ciment et aux nombreuses manipulations réalisées au laboratoire.

Je tien a remercié Monsieur Benselhoub Aissa de l'université Agraire d'état de DNIPRO, UKRAINE, et Monsieur Anouar Ounis de l'université d'El Manar de Tunis, pour l'aide précieuse qu'ils m'ont apportée tout au long de préparation de ce travail et qui ont été disponibles lorsque j'avais besoin de conseils.

Nous adressons enfin nos remerciements et notre gratitude à tous ceux qui nous ont aidés, de près ou de loin, à accomplir ce travail et à surmonter les difficultés auxquelles nous avons dû faire face.

DEDICACES

Je dédie ce travail en premier lieu à mon père, qui a été affligé de maladie et je demande à Allah de le guérir, et de le rendre comme son prédécesseur. Mon père qui ma donner les bonnes bases pour affronter la vie. Mes dédicaces vont aussi pour ma chère mère, la plus courageuse des femmes.

Je dédie ce travail à ma très chère femme, à qui j'exprime toute ma reconnaissance et ma profonde gratitude, pour sa générosité, son sacrifice au quotidien et son soutien et encouragements tout au long de ces années de thèse.

A mes frères Riad, Faical, Abderraouf et Abdelkarim, a mes sœurs Assia, Maissoun et Meriem. A mes enfants Rimas, Ferial, Yassmine et Islam, ceux qui sont devenus ma raison d'exister.

Enfin, je n'oublier pas tous mes amis et ma grande famille.

LISTE DES FIGURES

N°	TITRE	PAGE
I.1	Haut fourneau (Archive Larousse : Grande Encyclopédie Larousse –sidérurgie)	1
I.2	Le laitier de haut fourneau (Rocheux et Granulé)	2
I.3	Situation du laitier de haut fourneau dans le système $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$	3
I.4	Influence de la porosité du laitier cristallisé sur sa résistance à la compression	4
I.5	Pot de granulation	5
I.6	Granulation en rigole et fond filtrant	7
I.7	Schéma simplifié d'un tambour INBA	9
I.8	Bouletage du laitier	11
I.9	Fabrication de laitier expansé	12
I.10	Fabrication de laine de laitier (d'après O. Rosenauer)	13
I.11	Évolution de la résistance à la compression R_c de deux ciments en fonction du temps t	15
I.12	Élévation de la température au moment de la prise du ciment (d'après Lesage)	16
I.13	Prise d'une grave-laitier	19
I.14	Granulation à sec et récupération de chaleur. Système Sumitomo-IHI	26
II.1	Localisation de la cimenterie Hadjar-Soud et le complexe sidérurgique d'El-Hadjar	28
II.2	La bande transporteuse et la carrière du calcaire (Cimenterie Hadjar-Soud)	30
II.3	Le four rotatif et le tour échangeur (Cimenterie Hadjar-Soud)	33
II.4	Les Egyptiens et les Romains depuis l'antiquité assemblent les blocs avec un liant	35
II.5	Le four rotatif (différents phases de transformation de la farine)	40
II.6	Clinker du ciment	41
II.7	Diagramme de transformations de phases qui interviennent dans le four (du cru au clinker)	42
II.8	Technique de refroidissement du clinker sur grille	43
II.9	Le laitier stocké à l'extérieur de la cimenterie de Hadjae-Soud	44
II.10	Etapas de la fabrication du ciment (boutique génie civil, guide de futurs ingénieurs)	45
II.11	Schéma général des différentes voies de fabrication du Ciment	47
III.1	Organigramme de différentes étapes pour de travail	61

III.2	Exemple d'un spectre en énergie du rayonnement fluorescent d'un échantillon	63
III.3	Histogramme de la teneur en éléments chimiques	64
III.4	Le laitier granulé vitrifié de haut fourneau de HADJAR SOUD	65
III.5	La courbe granulométrique	66
III.6	Le laitier de Haut fourneau stocké à l'intérieur de Cimenterie de Hadjar-Soud	66
III.7	Résultat de diffraction des rayons X, de laitier utilisé	67
III.8	Différents matériels et appareils utilisés pour la caractérisation et la production du clinker (Laboratoire de Hadjar –Soud)	68
III.9	Agate mécanique pour la préparation des échantillons à l'analyse par DRX (Université El-Manar, Tunis)	69
III.10	Appareil d'analyse par diffraction des rayons X, DRX (Université El-Manar, Tunis)	69
III.11	Organigramme des étapes de production la farine crue dans le laboratoire	70
III.12	Influence du module silicique sur la composition minéralogique du clinker	73
III.13	Influence du MAF sur la corrélation entre C ₄ AF et C ₃ A	74
III.14	Schéma représentatif montre les étapes pour la production du clinker au laboratoire	75
III.15	Le Clinker à base de laitier obtenu expérimentalement	76
III.16	Diffraction des rayons X, du clinker avec et sans Laitier	77
III.17	Etape de préparation des sections polies avec la parafine	78
III.18	Section polies des deux clinkers	79
III.19	Observation par microscope optique de la section polie	80
III.20	L'ensemble des données de référence relatives	83
III.21	Acteurs impliqués au GEMIS	84
III.22	Emissions de gaz à effet de serre à Darmstadt en 1998 (en t CO ₂ /hab/an)	85
III.23	Répartition des émissions de CO ₂ à Darmstadt (base : 1.9 million t équivalent CO ₂)	85
IV.1	Autres source de poussière	94

LISTE DES TABLEAUX

N°	TITRE	PAGE
Tab I.1	Production du laitier par le haut fourneau d'El-Hadjar	XIII
Tab I.2	Analyse (% en masse) d'un laitier de haut fourneau	3
Tab I.3	Composition massique de la laine de roche	13
Tab I.4	Ciments au laitier (d'après le CTPL)	16
Tab I.5	Caractéristiques des ciments au laitier	16
Tab I.6	Grave-laitier	19
Tab I.7	Formules de sable-laitier à base de sable grossier	20
Tab I.8	Emplois de grave-laitier et de sable-laitier en chaussée neuve	21
Tab I.9	Béton de laitier expansé et bouleté	23
Tab I.10	Parpaings de laitier (25 x 20 x 50 cm, 5 lames d'air)	23
Tab II.1	Coupe stratigraphique de la carrière de Hadjar Soud	31
Tab II.2	Caractéristiques des processus de fabrication du Ciment	48
Tab II.3	La composition chimique théorique du Clinker	58
Tab III.1	Résultat des analyses chimiques des matières premières	64
Tab III.2	Résultats d'analyse granulométrique	65
Tab III.3	Résultats des analyses chimiques de laitier étudié	67
Tab III.4	La composition chimique optimale de la farine crue (norme industriel)	70
Tab III.5	Limites des proportions des éléments et dosage de la matière première	71
Tab III.6	Résultats d'analyse chimique de la farine cru obtenu	71
Tab III.7	modules et indices obtenues pour le ciment cru	71
Tab III.8	Analyses minéralo-chimiques du Clinker avec et sans Laitier	76
Tab III.9	Emissions de gaz à effet de serre	86
Tab III.10	Tableau des coûts	86
Tab III.11	Résultat d'émission des GES en Tonne de CO ₂ EQ/T de Clinker	89
Tab III.12	Résultat par Tonne CO ₂ /t de Clinker	89
Tab III.13	Comparaison des résultats d'émission de CO ₂	89
Tab IV.1	Composition chimique des poussières	93
Tab IV.2	Travaux susceptibles de provoquer les maladies induites par les ciments	97

ABREVIATIONS ET SYMBOLES

SCHS	Société des Ciments de Hadjar-Soud
GICA	Groupe Industriel Des Ciments D'Algérie
GEMIS	Modèle globale des émissions pour les systèmes intégrés
HF	Haut fourneau
CPJ	Ciment Portland composé
CPA	Ciment Portland artificiel
CLK	Ciment de laitier au clinker
CHF	Ciment de haut fourneau
CLX	Ciment de laitier à la chaux
CVG	Cendres volantes de Gardanne
Ciment CLC	Ciment au laitier et aux cendres
GLHP	Grave-laitier à hautes performances
R_c	Résistance de compression
INBA	Incorporating best available
CTPL	Centre technique et de promotion des laitiers sidérurgique
Système Sumitomo IHI	Système Ishikawajima-Harima Heavy Industries
C₂S	Silicate bi-calciqque (Bélite)
C₃S	Silicate tricalciqque (Alite)
C₃A	Aluminate tricalciqque (Célite)
C₄AF	Ferro-aluminate Tétracalciqque (Félite)
Kk	Clinker
RCO₃	La somme des carbonates de calcium et de magnésium
SK	standard de chaux
MS	Module siliciqque
MH	Module hydraulique
MAF	aluminoferrique
LSF	Facteur de saturation
PF	Perte au feu
GES	Gaz effet de serre
GWP	Le potentiel de réchauffement global
OMS	L'organisation mondiale de la santé
PCB	Les polychlorobiphényles

Résumé

La présente étude est menée sur l'utilisation d'un déchet industriel (laitier de haut fourneau), provenant de l'usine sidérurgique d'El-Hadjar située à l'est de l'Algérie. Les travaux de recherche visent à comprendre le comportement de l'ajout du Laitier comme matière première (en remplaçant du sable) dans la préparation du mélange avant cuisson dans le four rotatif ; pour le cas de la cimenterie de Hadjar-Soud à Skikda.

Les échantillons représentatifs prélevés sur le site de la cimenterie sont soumis à un broyage du mélange de calcaire, laitier, argile et minerai de fer. Le matériau préparé à une granulométrie inférieure à 50 μ est soumis à une caractérisation physico-chimique puis un échantillon représentatif est mis dans un four de température allant jusqu'à 1450°C pour mieux cerner l'influence du laitier sur les composés minéralogiques du clinker.

L'originalité de ce travail concerne, son application industrielle, la préparation de la farine crue de ciment à base de laitier du haut-fourneau (matériau déjà décarbonaté) pour un remplacement du sable naturel. D'habitude pour la production du clinker du ciment ; la proportion des matières premières sont : le calcaire (77-80%), l'argile (16-18%), minerai de fer (1.5-3%) et le sable (2-4%). Dans le présent travail, les proportions prises pour l'essai de production du clinker à base de laitier sont respectivement de 70% calcaire de 9% laitier, de 19.2% d'argile et de 1.8% de minerai de fer.

Cependant, les résultats obtenus lors des essais montrent que l'ajout de laitier dans la farine crue n'influe pas sur la composition chimique et minéralogique du clinker :

- le clinker obtenu révèle des résultats significatifs répondant à la norme algérienne NA 442 (CPJ CEM II/A 42,5).
- l'ajout de laitier comme substitut du sable a permis aussi de réduire le taux d'émission annuel en CO₂ d'environ 17.5% ce qui diminue son effet néfaste sur l'environnement (émissions gazeuses). L'estimation du taux d'émission annuelle de CO₂ dans la cimenterie a été réalisée par le Logiciel GEMIS.

Le processus de clinkérisation à base de laitier a une grande importance pour la production du ciment. En conséquence, le prix d'une tonne de clinker produite régresse (par l'ajout du laitier déjà cuit), en parallèle une préservation des matières premières naturelles non renouvelables provenant des gisements de sable, de calcaire : c'est la raison pour laquelle on doit agir dans le sens d'un développement durable, par retrouver et réutiliser des matériaux de substitution issus des déchets miniers ou métallurgiques.

Mots clés : Algérie, déchets métallurgiques, Cimenterie Hadjar-Soud, Matières premières, Ajout laitier, Réduction CO₂.

Abstract

This study is conducted on the use of industrial waste (blast furnace slag) from the El-Hadjar steel plant located in eastern Algeria. The research aims to understand the behavior of the addition of Slag as raw material (replacing sand) in the preparation of the mixture before baking in the rotary kiln; for the case of the Hadjar-Soud cement plant in Skikda.

The representative samples taken from the cement plant site are subjected to a grinding of the mixture of limestone, slag, clay and iron ore, the material prepared at a grain size of less than 50 μ is subjected to a physicochemical characterization. The prepared sample is placed in a furnace with a temperature of up to 1450°C, to better understand the influence of slag on the mineralogical compounds of clinker.

The originality of this work is the preparation of raw cement meal, based on slag (already decarbonated material) instead of sand. Usually for the production of cement clinker; the proportion of the raw materials is: limestone (77-80%), clay (16-18%), iron ore (1.5-3%) and sand (2-4%). In the present work, the proportions for the production test of the slag-based clinker are respectively; limestone 70%, slag 9%, % clay 19.2 and iron ore 1.8%.

However, the results obtained during the tests show that the addition of slag in the raw meal does not influence the chemical and mineralogical composition of the clinker:

- The clinker obtained reveals significant results and meets the Algerian standard; NA 442 (CPJ CEM II / A 42,5).
- The addition of slag as a substitute for sand has also reduced the annual CO₂ emission rate by around 17.5%, which reduces its harmful effect on the environment (gaseous emissions). The estimate of the annual CO₂ emission rate in the cement plant was carried out by the GEMIS Software.

The slag-based clinker process is of great importance for the production of cement. As a result, the price of one tonne of clinker produced decreases (by the addition of the already cooked slag), in parallel with the preservation of non-renewable natural raw materials from sand and limestone deposits: this is the reason why we must act in the direction of sustainable development, by finding and reusing alternative materials from mining or metallurgical waste.

Key words: Algeria, metallurgical waste, Hadjar-Soud cement plant, raw materials, slag, CO₂ reduction.

ملخص

اجريت هذه الدراسة على استخدام النفايات الصناعية (خبث الفرن العالي)، من مصنع الحجار للصلب الموجود في شرق الجزائر. يهدف البحث إلى فهم سلوك إضافة منتجات الخبث كمواد أولية (استبدال الرمل) في تحضير الخليط قبل الطهي في الفرن الدوار؛ في حالة مصنع الإسمنت حجار السود في سكيكدة.

تخضع عينات من مصنع الإسمنت لطحن خليط من الحجر الجيري، والخبث و الصلصال والحديد الخام، وتعرض المواد التي أعدت في حجم الجسيمات أقل من 50µ لتحاليل فيزيائية وكيميائية. يتم وضع العينة المعدة في فرن درجة حرارة تصل إلى 1450 درجة مئوية.

أصالة هذا العمل هو إعداد دقيق الأسمنت الخام المصنوع من الخبث (بالفعل المواد المخلوطة) بدلا من الرمال. عادة لإنتاج الكلنكر الأسمنت؛ نسبة المواد الخام هي: الحجر الجيري (77-80٪)، الطين (16-18٪)، خام الحديد (1.5-3٪) والرمال (2-4٪). وفي هذا العمل، فإن النسب المستخدمة في اختبار إنتاج الكلنكر المصنوع من منتجات الألبان هي على التوالي؛ الحجر الجيري 70٪، الخبث 9٪، الطين 19.2٪، خام الحديد 1.8٪. وقد نفذت تقديرات معدل انبعاثات ثاني أكسيد الكربون السنوي في مصنع الأسمنت بواسطة برنامج GEMIS.

ومع ذلك ، فإن النتائج التي تم الحصول عليها خلال الاختبارات تظهر أن إضافة الخبث في الخلطة الخام لا يؤثر على التركيب الكيميائي والمعدني للكلنكر

- الكلنكر الذي تم الحصول عليه يكشف عن نتائج معتبرة مع معيار الجزائري (CPJ CEM II / A 42.5) NA 442.
- أدت إضافة الخبث كبديل للرمل إلى خفض معدل انبعاثات ثاني أكسيد الكربون السنوي بنحو 17.5٪ ، مما يقلل من تأثيره الضار على البيئة (الانبعاثات الغازية). وقد قام برنامج GEMIS بتنفيذ التقدير السنوي لمعدل انبعاثات ثاني أكسيد الكربون في مصنع الأسمنت.

عملية الحصول على الكلنكر الخبث (النفايات من صناعة الحديد والصلب)، وربما ذات أهمية كبيرة لإنتاج الأسمنت، لعدة أسباب؛ إنتاج طن واحد من الكلنكر بأقل تكلفة ممكنة، في إدارة موازية من المواد الخام الطبيعية غير المتجددة، مثل الرمل ودائع والحجر الجيري، والعمل في اتجاه التنمية المستدامة.

عملية الكلنكر المستندة إلى الخبث ذات أهمية كبيرة لإنتاج الأسمنت. ونتيجة لذلك ، أدى سعر طن واحد من الكلنكر إلى انخفاضات (بإضافة الخبث المطبوخ بالفعل) ، بالتوازي مع الحفاظ على المواد الخام الطبيعية غير المتجددة من الرمل والرواسب الكلسية: ولهذا السبب يجب أن نتصرف في اتجاه التنمية المستدامة ، من خلال إيجاد وإعادة استخدام المواد البديلة من التعدين أو النفايات المعدنية.

الكلمات الدالة: الجزائر ، النفايات المعدنية ، مصنع أسمنت حجار-سود ، المواد الخام ، الخبث ، تخفيض ثاني أكسيد الكربون.

INTRODUCTION GENERALE

L'objectif de cette étude visé à connaître le comportement du laitier de haut fourneau comme substituant du sable dans le mélange des matières premières naturelles. Il est ainsi inscrit dans le cadre de concept de valorisation des matériaux et le développement durable appliqués au laitier de haut fourneau. Ce concept, nous mène à privilégier d'une part un mode de production et de gestion qui réserve pour les générations futures les ressources naturelles non renouvelables, et d'autre part il participe à la réduction des émissions des gaz à effets de serre dans l'environnement, en particulier le gaz de CO₂.

Cependant, une mise au point sur l'élaboration du laitier, ses différentes formes, leurs propriétés et leurs utilisations dans les cimenteries comme matériaux ajouté dans la matière première pour la préparation de la farine crue avant le procédé de clinkérisation.

L'histoire du laitier montre que les progrès de la connaissance et les techniques ont fait d'un matériau considéré à l'origine comme dangereux et fatal, un co-produit de la sidérurgie dont l'éventail des propriétés est aujourd'hui apprécié et recherché. Le laitier de haut fourneau trouve actuellement ses principaux emplois en technique routière et dans l'industrie du ciment et du béton.

Depuis les années 80, le laitier granulé d'El-Hadjar est partiellement valorisé en cimenterie et en technique routière, avec cependant de grande fluctuations annuelles (tableau I.1) qui dépendent essentiellement des conditions économiques locales (production du ciment et construction des routes).

Pour ce faire et en vue d'atteindre les objectifs attendus, plusieurs travaux de recherche sont développées comme suit : Dans le premier chapitre, nous avons réalisé une analyse sur la fabrication des différentes formes de laitiers de haut fourneau et leurs propriétés, à savoir le laitier granulé (vitrifié), le laitier rocheux (cristallisé) et le laitier bouleté. Le laitier de haut fourneau peut avoir des compositions, granulométries, morphologie, et par suite des propriétés et applications très différentes en fonction des minerais, des combustibles, des procédés de fabrication de la fonte et surtout du mode de refroidissement après la coulée. Les interactions entre le laitier et les matrices cimentaires ont été étudiées à la deuxième partie de ce chapitre.

Une synthèse bibliographique sur la fabrication du ciment, présentée dans le deuxième chapitre. Permet d'abord d'évaluer les réserves des gisements de calcaire, d'argile ou de schiste, puisque c'est deux matières premières qui sont utilisées en grande quantité. Lors de la

fabrication du ciment on doit impérativement passer par les différentes étapes suivantes : Extraction des matières premières ; préparation du mélange cru ; Homogénéisation ; cuisson du mélange et finalement le broyage du Clinker.

Tableau I.1 : Production du laitier par le haut fourneau d'El-Hadjar

Désignation	Production ($\times 10^3$)									
	1995		2000		2004		2007		2012	
	t/an	%	t/an	%	t/an	%	t/an	%	t/an	%
Laitier granulé (Vitrifié)	167	53.3	484	71.2	347	62.7	129	34	467	82.5
Laitier rocheux (Cristallisé)	124	41.7	196	28.8	206	37.3	250	66	99	17.5
Total	291	100	680	100	553	100	379	100	566	100

La première partie du troisième chapitre, consacrée à la caractérisation physico-chimique et minéralogique des matières premières (Calcaire, Argile, Laitier et minerai de fer) ainsi que les techniques expérimentales testées pour l'élaboration du clinker à base du laitier.

Le deuxième volet du chapitre constitue le cœur du travail de recherche, avec tout d'abord la détermination de la proportion des matières premières pour la préparation du mélange crue du ciment, puis de trouver un modèle pour produire un clinker au laboratoire adéquat pour la production du ciment composé qui répond à l'exigence de la norme NA 442. La suite de chapitre est consacré à vérifier la qualité de la farine crue et le clinker obtenu. Le modèle réalisé concerne à évaluer la performance du ciment pour vérifier la qualité de la farine crue, et caractériser le clinker obtenu, tout en déterminant la composition chimique et minéralogique du matériau avec la fluorescence X, la diffraction des rayons X et les sections polies. Aussi l'accent est mis sur une étude de l'effet d'utilisation de laitier dans la matière première du ciment sur le taux d'émission de CO₂, en utilisant le logiciel GEMIS.

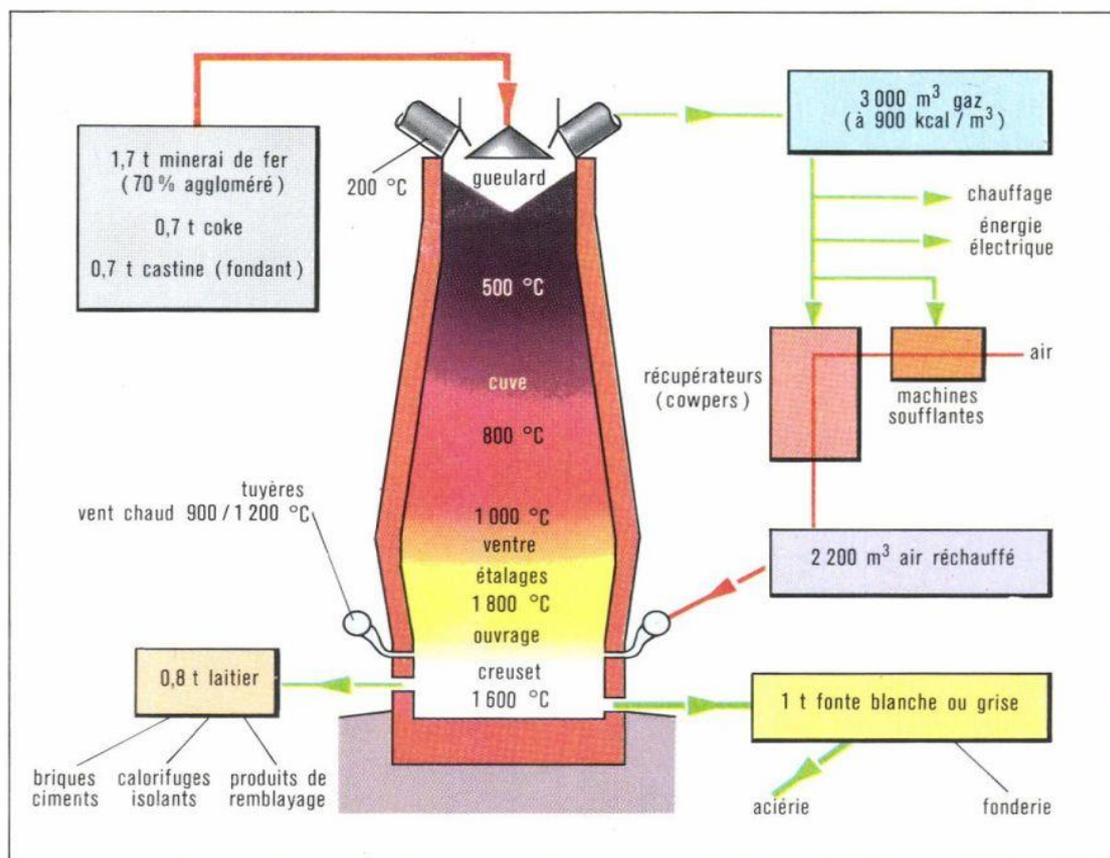
Enfin dans le dernier chapitre est développé une analyse des différents types de pollution que génèrent les industries cimentière et les solutions possibles de protection de l'environnement et la sécurité des travailleurs contre les maladies professionnelles ; les accidents de travail et les contaminations environnementales qui sont des facteurs technico-économiques très lourd pour l'entreprise.

I. CHAPITRE I : ANALYSE DE LA LITTÉRATURE SCIENTIFIQUE SUR LES LAITIERS DE HAUT FOURNEAU

I.1 Laitiers de haut fourneau

I.1.1 Introduction

Dans le procédé de réduction et de fusion du minerai de fer au haut fourneau, la fonte contient entre autres, tous les éléments (fer, manganèse, silicium...) qui sont réduits au cours de l'opération ; les oxydes non réduits, quelle que soit leur provenance (gangue du minerai, additions, cendre du coke), se retrouvent dans un produit complexe, le laitier. Ce dernier est évacué du haut fourneau (sous forme liquide, en même temps que la fonte) ; son enthalpie est d'environ 1800 MJ/t de laitier soit 3,5 % du bilan énergétique du haut fourneau (figure I.1).



Obtention de la fonte au haut fourneau.

Figure I.1 : Haut fourneau (Archive Larousse : Grande Encyclopédie Larousse – sidérurgie)

I.2 Généralités

I.2.1 Quantité de laitier élaboré

Pour chaque tonne de fonte la quantité de laitier produite dépend principalement de la masse des oxydes non réductibles enfournés, et est donc en raison inverse de la teneur en fer du minerai de fer. On a ainsi, jadis, produit jusqu'à 130 kg de laitier par tonne de fonte, en enfournant des minerais contenant moins de 30 % de fer. À l'inverse, certains hauts fourneaux sud-américains alimentés en minerais à plus de 60 % de fer, et dont le combustible est un charbon de bois à 3 ou 4 % de cendres, n'en produisent pas beaucoup plus de 100 kg/t de fonte (*Tamet, Argentine, 1982*). En minerai riche (*Dunkerque, Fos*) on produit habituellement de 300 à 320 kg de laitier par tonne de fonte.



Figure I.2 : le laitier de haut fourneau, Rocheux et Granulé (source : www.millenniummultitrade.com)

I.2.2 Caractéristiques du laitier

La masse volumique absolue varie de 2,85 à 3 t/m³. La température de fusion et la viscosité du laitier dépendent de son analyse dans ce traité (Haut fourneau N°2 de Sollac à Fos 1992) ; pour les principaux oxydes constituant le laitier (chaux, silice, alumine, magnésie) on vise

donc des fourchettes de teneurs relativement étroites, mais les conditions locales de marche conduisent à des analyses de laitier fort diverses ; par exemple, pour s'en tenir au repère de la basicité ($i = \text{CaO}/\text{SiO}_2$), l'échelle des valeurs va de 0,8 (haut fourneau sud-américain au charbon de bois) à 1,4 (ancienne marche en minerai lorrain non aggloméré) ; à Dunkerque et à Fos, la valeur de i est de 1,18 à 1,20.

Le tableau I.2 donne une analyse mensuelle du laitier du haut fourneau N° 2 de Sollac à Fos ; la somme des teneurs en chaux, silice, alumine et magnésie atteint presque 93%, et justifie que l'on ne considère généralement que ces quatre oxydes. La figure I.3 compare la position des laitiers et celle de divers matériaux dans le diagramme triangulaire chaux-silice-alumine.

Tableau I.2 : Analyse (% en masse) d'un laitier de haut fourneau (Haut fourneau n°2 de Sollac à Fos, 1992)

Éléments	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	MnO	TiO ₂	P ₂ O ₅	FeO	S	K ₂ O	CaO + SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + MgO
Teneur moyenne %	43,23	32,40	10,35	6,94	0,31	0,44	0,02	0,19	0,87	0,38	92,92

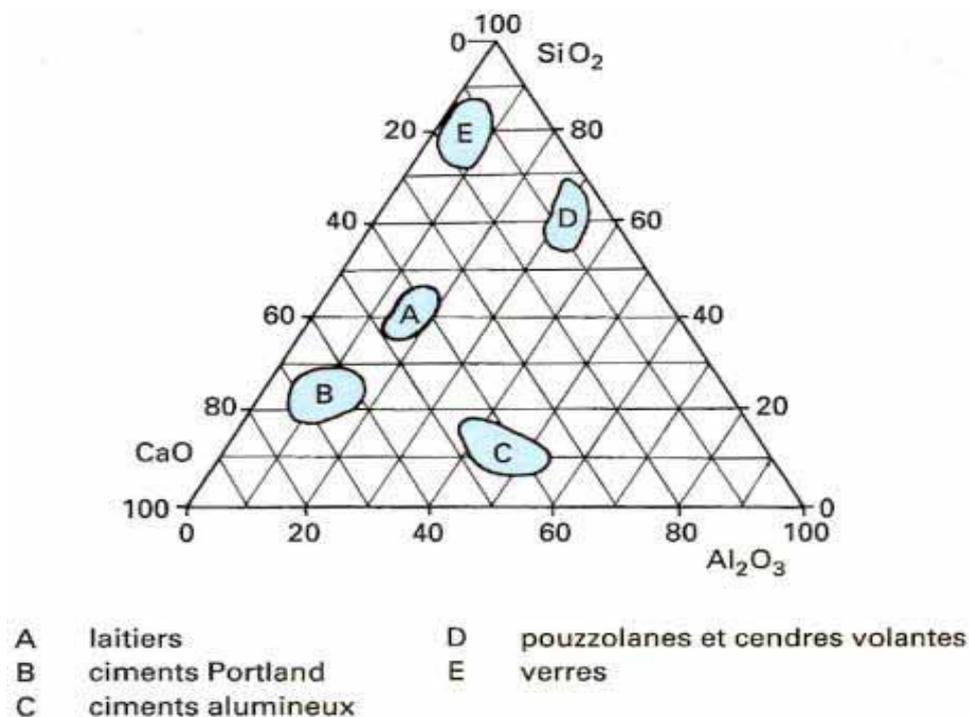


Figure I.3 : Situation du laitier de haut fourneau dans le système CaO-SiO₂-Al₂O₃

I.3 Fabrication et propriétés des différentes formes de laitiers

I.3.1 Laitier rocheux (ou cristallisé)

I.3.1.1 Fabrication de laitier rocheux

Le laitier rocheux s'obtient en déversant le laitier liquide dans une fosse et en l'y laissant refroidir le plus lentement possible. La fosse peut se trouver, comme au haut fourneau N°4 de Dunkerque, près de la halle de coulée du haut fourneau, et le laitier y est alors versé directement par un bec qui termine la rigole à laitier. Dans d'autres cas (comme dans l'usine japonaise de *Chiba*), le laitier est d'abord versé dans des cuves en acier coulé placées sur des chariots circulant sur voie ferrée. Les fosses sont alors installées à distance du haut fourneau, et le laitier y est déversé par basculement des cuves. Après refroidissement, souvent avec arrosage, le laitier est extrait de la fosse par des moyens classiques en travaux publics : pelles sur chenilles et camions de chantier. Dans tous les cas, il faut au moins deux fosses, l'une étant en remplissage, pendant que l'autre est en exploitation.

I.3.1.2 Produit obtenu de laitier rocheux

Le matériau extrait de la fosse est du laitier cristallisé, dont la granulométrie s'étend de 0 à 300 mm ; il peut être concassé puis classé granulométriquement ; sa masse volumique en vrac est alors de 1,2 à 1,4 t/m³. Le laitier en morceaux ainsi obtenu est dur (coefficient Los Angeles de 20 à 24, norme P 18-573), résistant à l'abrasion (coefficient Micro-Deval de 8 à 14, norme P 18-572) et compact ; il comporte une certaine porosité, due à l'oxydation du soufre ; cette porosité (3 à 20 % en masse, norme P 18-554) a une influence sur la masse volumique du morceau (de 2,65 à 2,90 t/m³), sur la résistance mécanique (*figure I.4*), sur la conductivité thermique (de 0,5 à 0,8 W · m⁻¹ · K⁻¹) qui est sensiblement plus faible que celle des matériaux naturels (1,4 W · m⁻¹ · K⁻¹ pour le calcaire, 3,2 W · m⁻¹ · K⁻¹ pour le granite). Le module d'élasticité varie de 70 000 à 95 000 MPa. La rugosité de la surface en fait un matériau très apte à être enrobé par des produits hydrocarbonés.

I.3.1.3 Conditions de fabrication de laitier rocheux

Au refroidissement, les principaux oxydes constituant le laitier peuvent s'unir en plus d'une quinzaine de composés, tels que la gehlénite (2 CaO · Al₂O₃ · SiO₂) ou l'akermanite (2CaO · MgO · 2SiO₂).

Du fait de l'absence d'oxydes libres, et particulièrement de chaux, le laitier rocheux présente une bonne résistance aux attaques chimiques par les sulfates ou les chlorures. Par contre, dans quelques cas rares, il est sujet à l'effusement (réduction en poussière) ; ce phénomène se produit à cause du silicate bi calcique ($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$) qui, dans certaines conditions de refroidissement, peut subir une transformation allotropique avec accroissement de volume. Des formules empiriques, établies pour des laitiers théoriques, donnent les conditions pour éviter l'effusement, par exemple : $\text{CaO} \% + 0,8 \text{MgO}\% \leq 1,2 \text{SiO}_2\% + 0,39\text{Al}_2\text{O}_3\% + 1,75 \text{S} \%$. Les laitiers réels se montrent d'ailleurs moins fusants à cause de la présence d'oxydes de fer, de manganèse...

Quelles que soient les conditions de production, le laitier rocheux comporte une faible partie de laitier vitreux, non cristallisé, ce qui lui confère une certaine hydraulicité. De plus, il y a intérêt à couler en couche mince pour faciliter le dégazage du laitier, et donc améliorer sa compacité. La diminution de la porosité peut aussi être obtenue par l'addition dans le laitier liquide, pendant qu'il s'écoule dans la rigole, de divers produits, comme les pailles de laminoir (pellicules superficielles d'oxydes de fer qui se détachent de l'acier lors du laminage), qui favorisent le dégagement du gaz contenu, et bloquent l'oxydation du soufre.

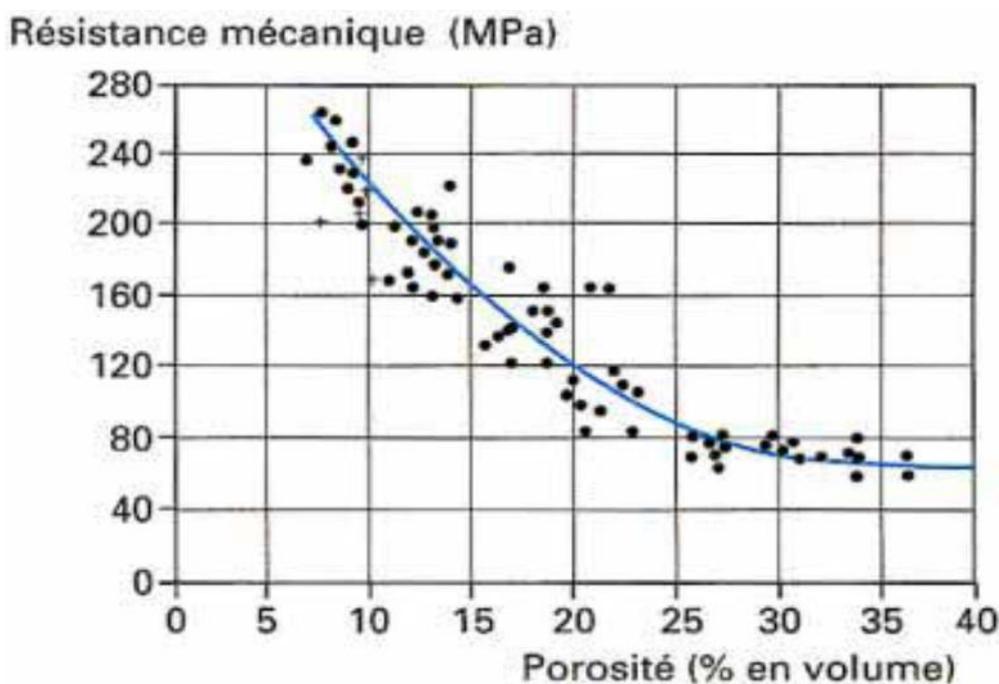


Figure I.4 : Influence de la porosité du laitier cristallisé sur sa résistance à la compression
(Alexandre J. et Sebilleau J.L. – 1988)

I.4 Laitier granulé

Le laitier granulé est obtenu en mettant brutalement en contact le laitier liquide avec une importante quantité d'eau (environ $10 \text{ m}^3/\text{t}$ de laitier), de façon à le diviser en petits grains et à le refroidir très vite.

On exploite différents procédés de granulation :

La granulation en bassin consiste à verser le laitier liquide dans un bassin de grandes dimensions rempli d'eau ; ce procédé a l'inconvénient de fabriquer une fraction parfois importante de laitier cristallisé à cause de l'augmentation de la température de l'eau pendant la granulation ;

La granulation en rigole se fait en laissant couler le laitier liquide dans une goulotte parcourue par un fort courant d'eau, qui sert à la fois à granuler et à transporter le sable de laitier. La granulation en pot (*figure I.5*) est une amélioration de la précédente : le laitier liquide est divisé et refroidi par un ensemble de jets d'eau issus de fentes pratiquées dans une boîte alimentée en eau ; ce système, qui est le seul mis en place dans les installations nouvelles ou renouvelées, permet d'optimiser le débit d'eau, et, en modifiant les fentes d'injection de l'eau, d'optimiser les conditions de granulation.

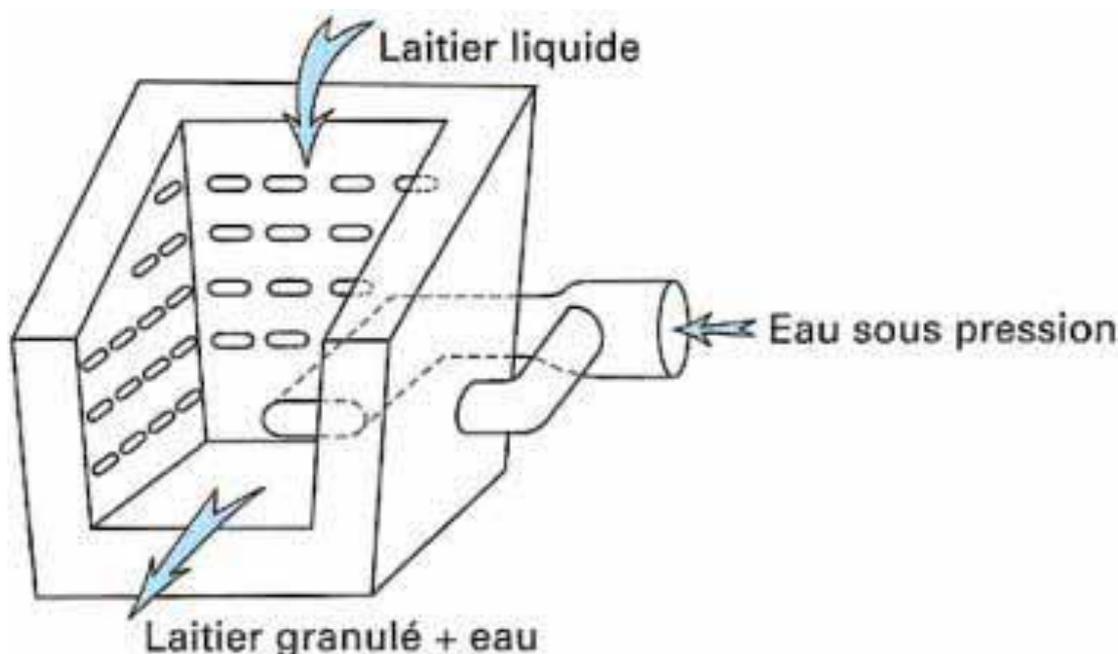


Figure I.5 : Pot de granulation (Alexandre J. et Sebilleau J.L. – 1988)

I.4.1 Filtration

Le laitier granulé doit être séparé de l'eau qui a servi à la granulation et égoutté le mieux possible pour limiter sa teneur en eau. Des systèmes, parfois complexes, ont été utilisés ; on n'exploite plus guère que deux procédés.

Le fond filtrant où la pulpe d'eau et de laitier est versée dans un bassin dont le fond est constitué par une nappe de tuyaux en ciment percés de trous et recouvertes de gravier grossier. La filtration se fait vers les tuyaux, d'abord à travers la couche de laitier granulé, puis à travers le gravier. Après l'évacuation du laitier par un pont muni d'un grappin, on souffle de l'air comprimé dans les tuyaux pour prévenir le colmatage des trous (*figure I.6*). Ce système est très efficace, mais coûteux à l'installation et en frais d'entretien.

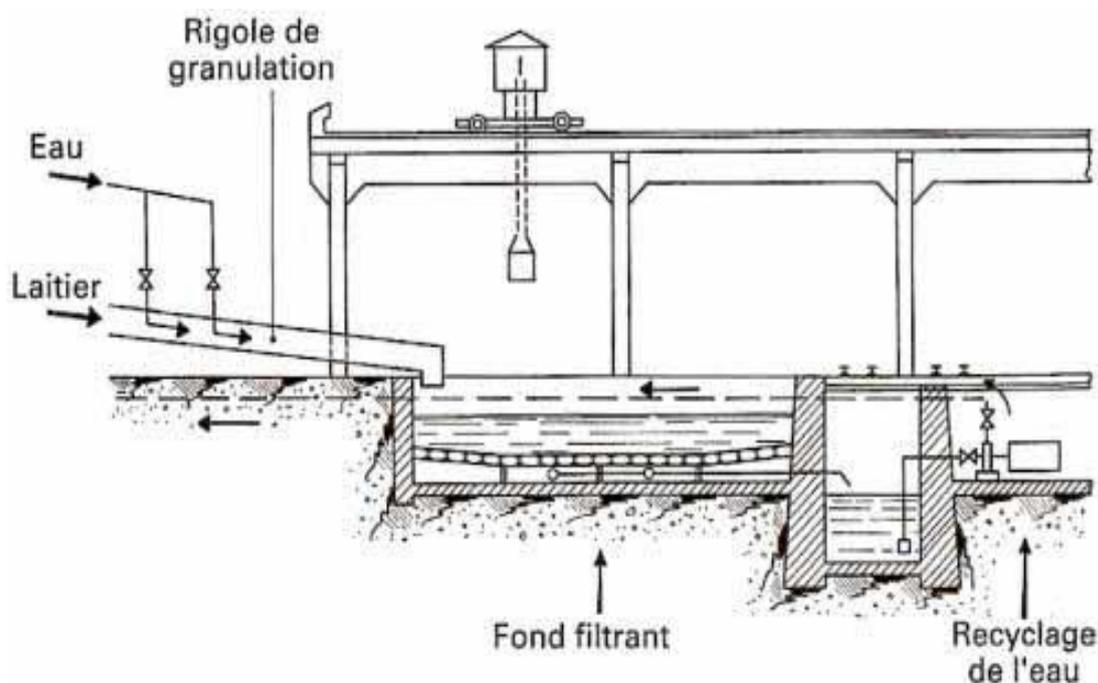


Figure I.6 : Granulation en rigole et fond filtrant

Le tambour INBA développé par la société P. Wurth, où le laitier est séparé de l'eau dans un tambour rotatif muni de tamis filtrants dont l'efficacité est maintenue par un décolmatage à l'air et à l'eau (*figure I.7*). Un convoyeur à bande situé dans l'axe du tambour évacue le granulé égoutté. Ce système tend à se généraliser à cause de son faible encombrement, et de son coût inférieur à celui d'un fond filtrant.

Le laitier granulé se présente sous la forme d'un sable de dimensions 0 à 5 mm, et dont la dimension médiane est de l'ordre du millimètre. La trempe subie par le laitier ayant empêché sa cristallisation, la principale caractéristique du granulé est d'être, pour 85 à 100 %, sous la forme vitreuse ; il s'agit d'un liquide surfondu à très forte viscosité, donc en état instable et susceptible de cristalliser ; la chaleur latente de cristallisation est d'environ 200 MJ/kg.

Le taux de vitrification du laitier peut être mesuré par différentes méthodes, comme, par exemple :

- l'analyse des phases par diffraction des rayons X, où les raies des phases cristallines, comme la merwinite, se distinguent de l'anneau de diffraction créé par la phase vitreuse ;
- l'analyse des phases par comptage au microscope sous lumière naturelle, puis sous lumière polarisée qui révèle les grains cristallisés ;
- la fluorescence aux rayons ultraviolets où le laitier cristallisé donne une couleur noire ou violette, alors que le laitier vitreux donne une couleur jaune ou orange.

L'état instable du laitier granulé est à l'origine de sa capacité à faire prise à la manière d'un liant hydraulique ; cette hydraulicité dépend de la composition du laitier et augmente avec la surface spécifique des grains. D'une part, des formules empiriques établissent une correspondance entre l'analyse et l'hydraulicité : par exemple, on considère que cette propriété est à un niveau suffisant, quand l'indice de Keil : $K = (\text{CaO} + \text{CaS} + \text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3)/(\text{SiO}_2 + \text{MnO})$ est supérieur à 1,5 (il est de 1,58 à Fos). D'autre part, on mesure la faculté qu'a le laitier granulé de développer une surface spécifique importante lors des manutentions, malaxages ou compactages : par exemple, on détermine le coefficient α : $\alpha = SF/1000$, où S est la surface spécifique des fines naturelles du laitier, et F le pourcentage de fines produites par un broyage normalisé. Pour un laitier habituel, la teneur en eau résiduelle varie de 8% à 15%.

I.4.1.1 Prise hydraulique du laitier vitreux

L'hydratation du laitier, qui conduit à sa prise en masse, se fait à partir de l'eau de gâchage, qui, à condition d'être suffisamment basique ($\text{pH} \approx 12$), dissout un peu le laitier ; on obtient alors une solution concentrée, ce qui permet la précipitation de composés hydratés, d'où une baisse de concentration, et le déroulement de cycles :

Dissolution → Concentration → Précipitation.

La prise est semblable à celle du ciment, à la différence que, ce dernier étant très basique (pH du ciment gâché ≈ 13), son hydratation se déclenche dès l'humidification, alors que, pour une prise rapide, le laitier vitreux doit être activé (DRON R. 1984).

I.4.1.2 Conditions de fabrication

L'obtention d'une trempe convenable nécessite que la granulation soit faite dans une eau fraîche, en quantité suffisante. Par ailleurs, la température du laitier, qui est fixée par le réglage thermique du haut fourneau, a une grande influence sur la qualité du granulé : une température trop basse favorise la formation de grains cristallisés ; une température trop forte conduit à la production d'un granulé très léger ayant l'aspect de la meringue, qui est très friable, et retient beaucoup d'eau (jusqu'à 20 % en masse).

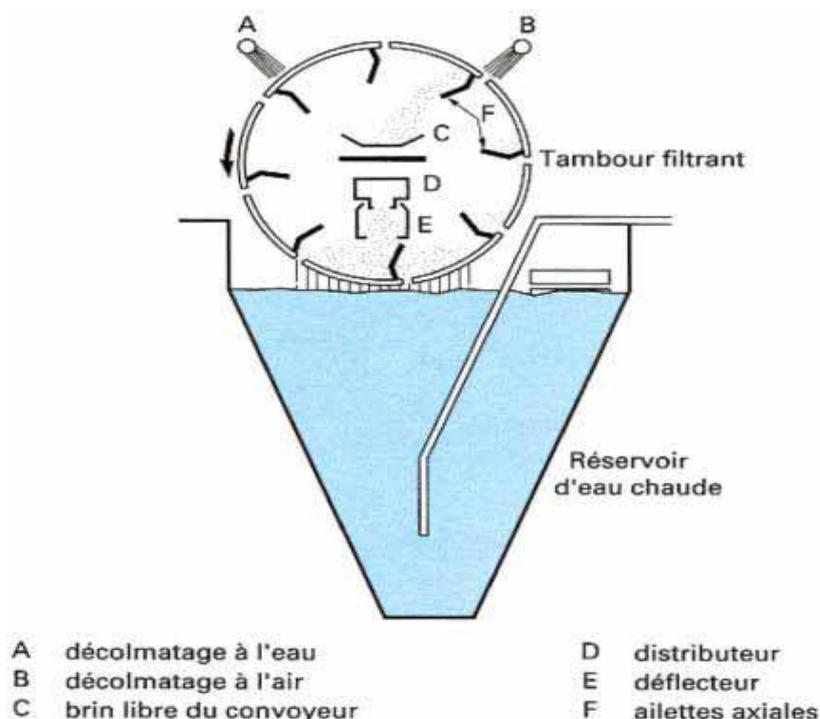


Figure I.7 – Schéma simplifié d'un tambour INBA

I.4.2 Laitier bouleté

Le bouletage consiste à refroidir le laitier dans des conditions telles qu'il se forme des boulettes quasi sphériques, dont l'intérieur est creux. Ce traitement se pratique dans une installation telle que celle décrite à la figure I.8, et qui comprend :

- un déversoir, qui forme une lame de laitier liquide d'épaisseur constante ;
- un couloir d'alimentation incliné, sur lequel coule un film d'eau, et qui est soumis à des vibrations pour éviter le collage du laitier ; là, le laitier commence à se refroidir, devient donc plus visqueux (ce qui lui permet de retenir le gaz inclus) et subit un commencement d'expansion ;
- un tambour, muni d'ailettes, refroidi par un courant d'eau intérieur et tournant à environ 300 tours par minute, qui disperse le laitier ; la plupart des morceaux projetés par le tambour, pas encore solidifiés, sont expansés et prennent une forme sphérique sous l'effet de la tension superficielle ; les autres morceaux éclatent pour donner du laitier granulé ; le tambour projette le laitier sur l'aire de réception où il se refroidit et s'égoutte ;
- des injections d'eau (environ $1 \text{ m}^3/\text{t}$ de laitier).

I.4.2.1 Méthode de Production de laitier bouleté

Le laitier bouleté a une granulométrie qui s'étend de 0 à 20 mm, le laitier de 0 à 3 mm de granulométrie comprend une partie de grains granulés et une partie de grains sphériques creux ; sa masse volumique en vrac est de $0,8 \text{ t/m}^3$ et sa structure est vitrifiée :

Il a les mêmes propriétés hydrauliques qu'un laitier granulé.

Le laitier de granulométrie supérieure à 3mm est fait de boulettes quasi sphériques, dont l'extérieur est vitrifié, et l'intérieur constitué par du laitier cristallisé formant des alvéoles.

La masse volumique en vrac est de $0,6$ à $0,8 \text{ t/m}^3$ pour la fraction 3 à 8 mm, et de $0,5$ à $0,7 \text{ t/m}^3$ pour la fraction 8 à 12 mm. La masse volumique du grain est de $1,4$ à $1,6 \text{ t/m}^3$; le pourcentage de pores représente 45 à 50 % du volume total de la boulette, ce qui explique la faible conductivité thermique du matériau ($0,15 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$). La teneur en eau résiduelle est de 3 à 6 % en masse.

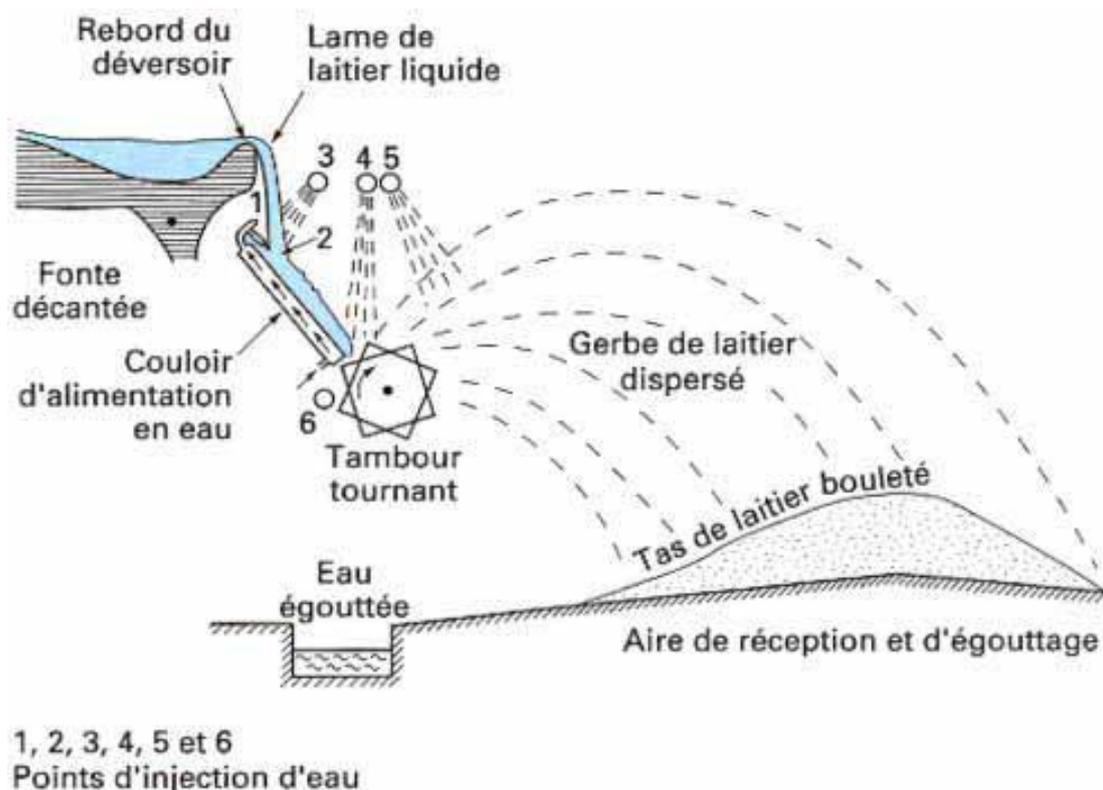


Figure I.8 : Schéma de bouletage du laitier (Kunicki M. et Roussel M. 1977)

I.4.2.2 Conditions de fonctionnement du bouletage

L'obtention de boulettes de bonne qualité nécessite de traiter le laitier aussi chaud que possible ; on place donc l'installation au plus près du trou de coulée de haut fourneau, à l'extérieur de la halle de coulée, en bordure immédiate de celle-ci ; cependant, un laitier trop chaud donne un matériau trop léger et peu résistant, un laitier trop froid donne un matériau lourd et trop compact.

I.4.3 Laitier expansé

C'est un laitier cristallisé dans lequel, pendant le refroidissement, on a provoqué la formation d'alvéoles. Plusieurs méthodes peuvent être employées pour favoriser l'expansion, elles comprennent toujours une injection d'eau (environ $1\text{m}^3/\text{t}$ de laitier), complétée éventuellement par une injection d'air et de vapeur d'eau. La figure I.9 décrit une installation d'expansion.

Le produit obtenu, qui fait l'objet de la norme NF P 18-307, est un granulats dont la masse volumique est de $0,3$ à $1,1\text{ t/m}^3$, d'où une masse volumique en vrac de $0,2$ à $0,75\text{ t/m}^3$; sa

conductivité thermique est faible ($0,1$ à $0,18 \text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$), de même que sa résistance mécanique de 1 à 8MPa à la compression (Kunicki M. et Roussel M. 1977).

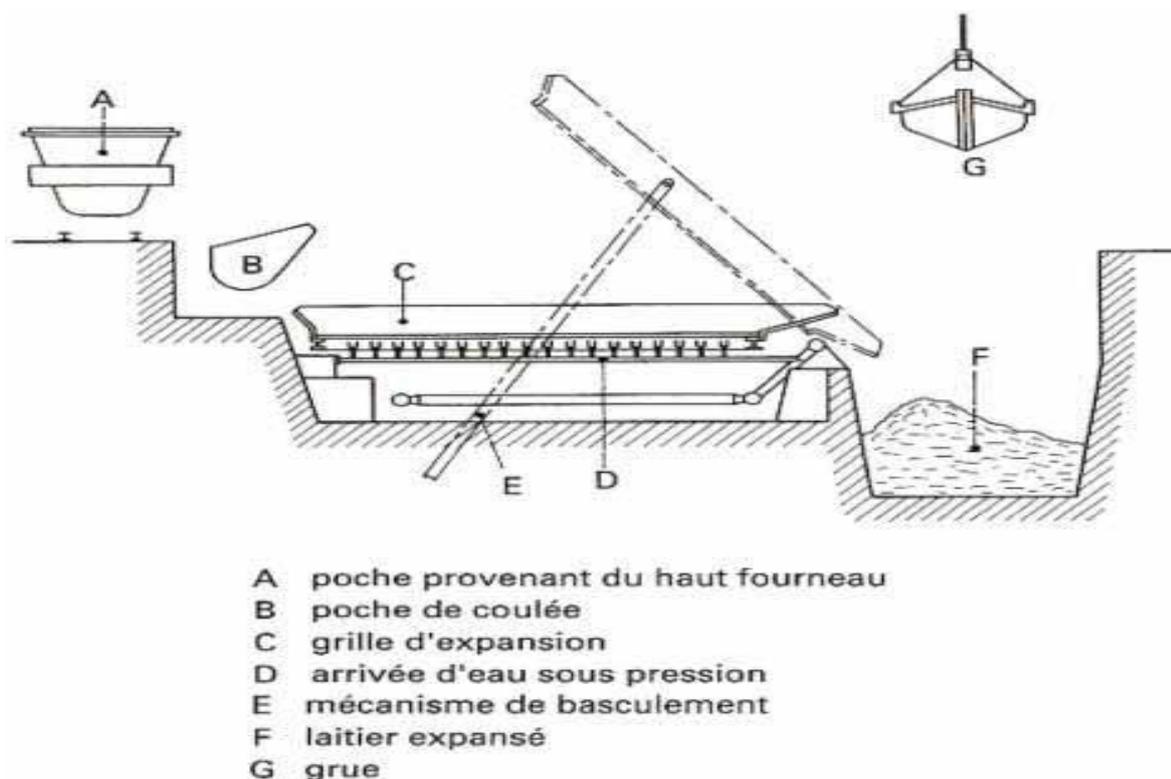


Figure I.9 : Fabrication de laitier expansé

I.4.4 Laine de laitier et laine de roche

La laine de laitier et la laine de roche sont fabriquées par filage d'un matériau liquide dans l'appareil représenté sur la figure I.10 ; le filage nécessite 1000 à 5000m^3 d'air par tonne de laitier. La laine de laitier provient du laitier sortant de la halle de coulée du haut fourneau ; c'est une méthode peu employée, car les conditions pour un bon filage [liquide de viscosité faible et régulière, ayant donc une température suffisamment élevée et une composition bien déterminée (tableau I.3)] sont plus facilement remplies quand on opère la refusions du laitier rocheux dans un four à cuve analogue au cubilot : on peut y ajuster le lit de fusion, qui comprend alors au maximum 80% en masse de laitier, le complément étant du silex, du basalte, voire du minerai de fer.

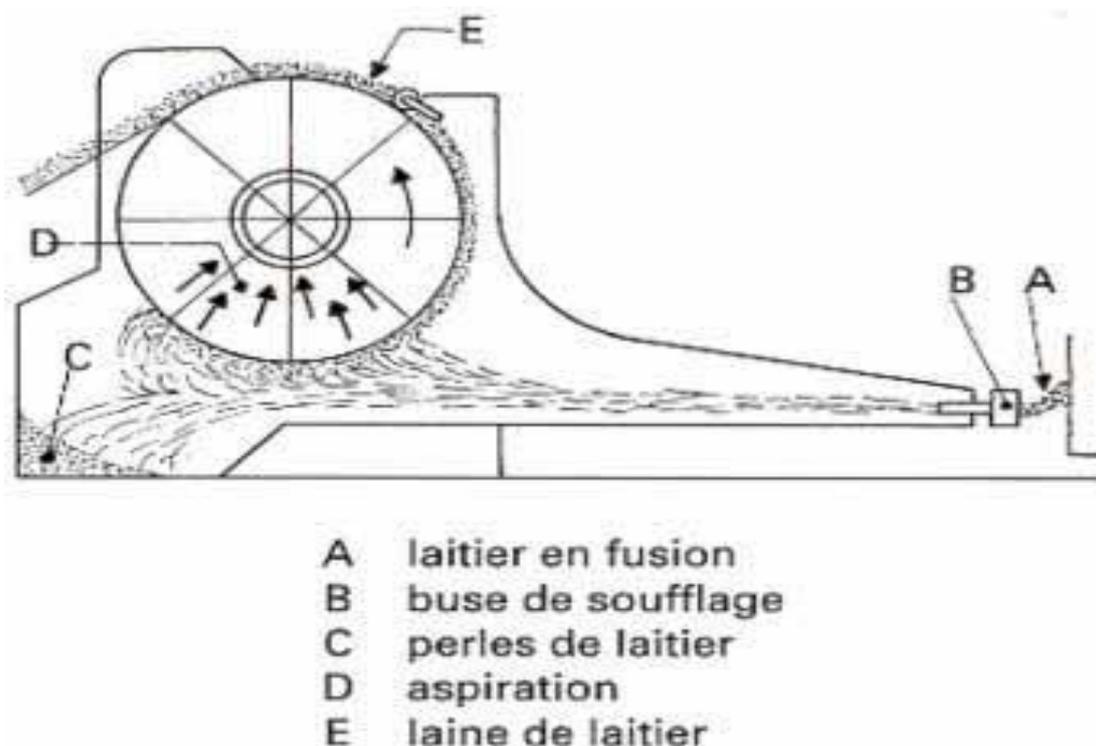


Figure I.10 Fabrication de laine de laitier (d'après O. Rosenauer)

Tableau I.3 : Composition massique de la laine de roche (Alexandre J. et Sebileau J.L. –1988)

Elément	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Oxyde de fer
Pourcentage %	28 à 31	42 à 46	10 à 12	5 à 6,5	3 à 5

Le produit obtenu par refusions est la laine de roche, qui est fibreuse, de faible masse volumique (0,04 à 0,15 t/m³ à la mise en œuvre, en fonction du tassement) possédant de très bonnes propriétés d'isolants thermique et acoustique. Elle a par ailleurs une bonne tenue au feu, car, selon sa composition, elle est stable entre 750 et 1 200 °C, contre 550 à 600 °C pour la laine de verre.

I.5 Emploi des différentes formes de laitiers

I.5.1 Laitier vitrifié en cimenterie

Le laitier est introduit dans le cycle de fabrication du ciment par mélange avec le clinker, avant le broyage. Forte hydraulicité, et donc taux de vitrification élevé (≥ 90%, on emploie

donc du laitier granulé ou bouleté) ; teneur en chaux aussi forte que possible, qui favorise la prise.

Remarque : une teneur en alumine élevée est parfois recherchée parce qu'elle améliore la résistance initiale (on a, en Allemagne, enfourné de la bauxite au haut fourneau dans ce but) ; l'effet de la teneur en MgO est discuté ; l'effet du MnO semble défavorable.

Bonne aptitude au broyage, on évite donc l'emploi de laitier coulé froid qui donne des grains durs. Teneur en eau inférieure à 10%, pour éviter ou limiter les frais de séchage avant broyage.

Les ciments au laitier qui font l'objet d'une norme sont répertoriés au tableau I.4 ; le tableau I.5 indique quelques caractéristiques de ceux qui sont le plus employés.

I.5.2 Hydratation des ciments au laitier

Lors de l'hydratation, l'activation du laitier est faite par la chaux du *clinker*. Les composés qui apparaissent à la prise dans les ciments contenant ou non du laitier sont des silicates de chaux hydratés, de l'Ettringite ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot3\text{CaSO}_4\cdot32\text{H}_2\text{O}$) et de la Portlandite [$\text{Ca}(\text{OH})_2$] ; toutefois, la chaux libre étant d'autant plus utilisée pour l'activation que la teneur en laitier est plus élevée, plus il y a de laitier, moins il y aura de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ dans le béton : il n'y en a plus dans le béton de ciment CLK. L'hydratation du laitier activé se déroule beaucoup plus lentement que celle du clinker ; la prise est d'autant plus lente que le ciment contient plus de laitier.

I.5.3 Caractéristiques et domaines d'emploi

Pratiquement, le ciment CPJ étant utilisé comme le ciment Portland (CPA), ce qui suit concerne les ciments à forte teneur en laitier (CHF et CLK).

I.5.3.1 Évolution de la résistance dans le temps

La figure I.11 compare l'évolution de la résistance à la compression d'un ciment CPA et celle d'un CHF :

- le ciment CHF prend plus lentement au départ, ce qui nécessite de garder le béton humide assez longtemps, et de prendre des précautions quand il faut décoffrer rapidement. Des adjuvants, comme des chlorures, peuvent accélérer la prise ;

- à long terme, la résistance du ciment CHF dépasse celle du CPA, d'où l'emploi du ciment au laitier quand la résistance finale doit être élevée.

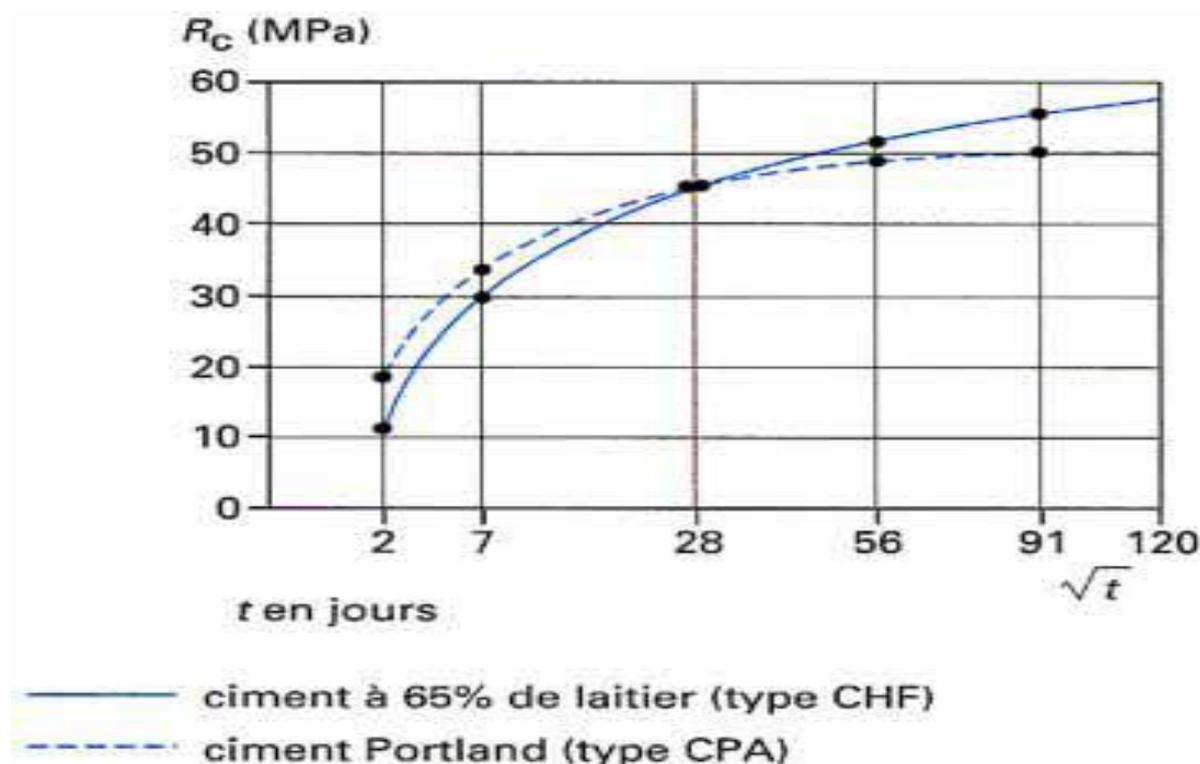


Figure I.11 : Évolution de la résistance à la compression R_c de deux ciments en fonction du temps t (Coquillat G. 1980)

I.5.3.2 Incidence de l'enthalpie d'hydratation

Les ciments ont une enthalpie d'hydratation d'autant plus faible que la teneur en laitier est plus forte (figure I.12), la température au cœur du béton est donc plus faible avec les fortes teneurs en laitier, ce qui réduit le risque de fissuration et fait conseiller l'emploi des CHF et des CLK pour les grandes masses de béton. La mise en œuvre de ces ciments est plus facile par temps chaud, par contre, par temps froid, ils sont plus sensibles au gel que les autres.

I.5.3.3 Résistance aux agressions chimiques

Du fait de leur teneur en chaux faible ou nulle, les ciments CHF et CLK sont peu sensibles à l'attaque des eaux acides, des eaux chargées en chlorures ou en sulfates, et des eaux très pures. Ils sont donc recommandés pour les ouvrages marins, les égouts, les travaux dans la nappe phréatique, etc

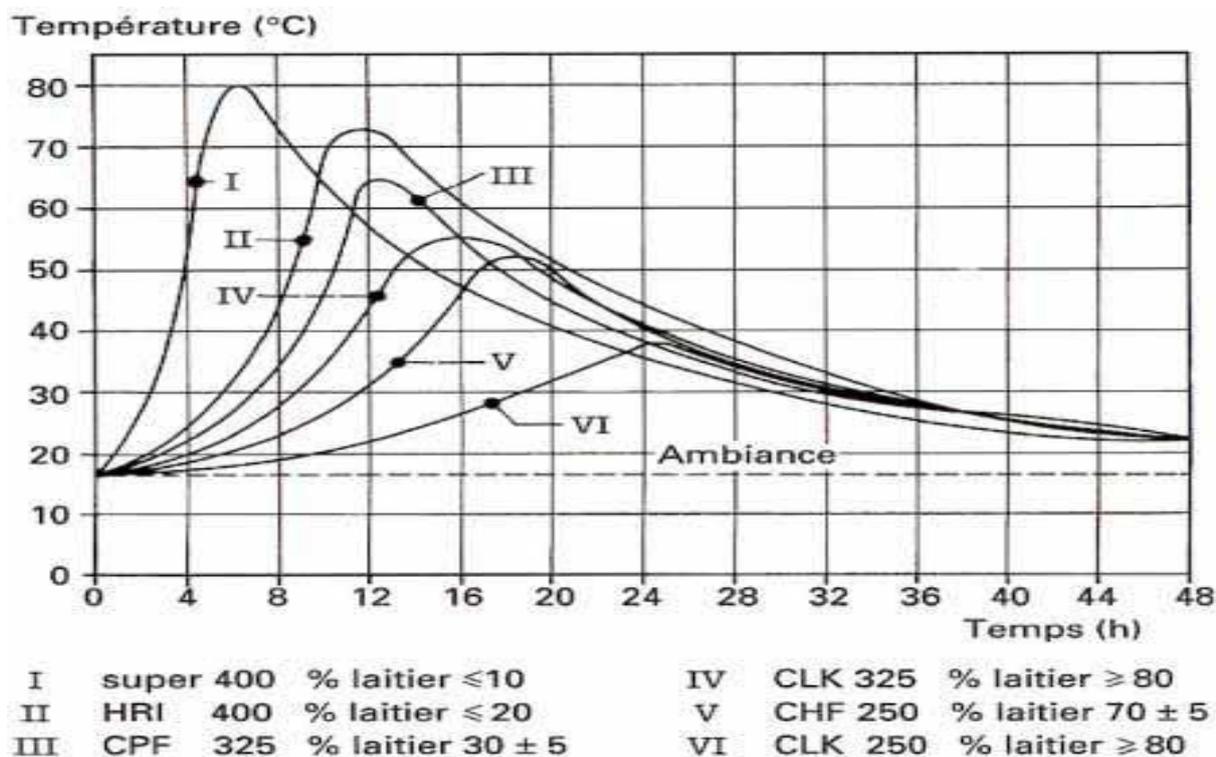


Figure I.12 : Élévation de la température au moment de la prise du ciment (Coquillat G. 1980)

I.5.4 Laitier en technique routière

Le laitier rocheux est employé sous forme de grave ou de gravillon. On obtient la granulométrie demandée par concassage, puis criblage ; on reconstitue souvent des fuseaux granulométriques par mélange, en proportions données, des tranches granulométriques obtenues par le criblage.

Le laitier granulé et la fraction de dimension < 3 mm du laitier bouleté sont utilisés comme liants hydrauliques. On peut utiliser le laitier vitrifié seul ; la prise se fait alors très lentement au contact de l'eau qui percole dans le massif, avec une activation par les sulfates provenant de l'oxydation des sulfures du laitier. La nécessité d'obtenir une prise plus rapide et mieux contrôlée a conduit à mêler au laitier un activant basique, qui est soit de la chaux, soit un mélange de chaux et de gypse, soit des cendres volantes de Gardanne (CVG), soit, plus récemment, du ciment. Quelle que soit sa nature, l'activant est dosé à 1% en masse du laitier sec. L'hydratation du laitier vitrifié étant favorisée par une grande surface spécifique, d'une part, la classe du coefficient α du laitier doit être au moins 20 à 40 (cas des laitiers français),

d'autre part, on fait parfois subir au laitier un prébroyage qui génère 10 à 12% de fines < 80µm.

Tableau I.4 : Ciments au laitier (d'après le CTPL)

Type	Désignation	Composition (% en masse)		
		clinker	laitier	cendres
Ciment Portland composé ⁽¹⁾	CPJ-CEM-II/AB	65 à 94	35 à 6	
Ciment de haut fourneau ⁽¹⁾	CHF-CEM-III/A	35 à 64	65 à 36	
Ciment de haut fourneau ⁽¹⁾	CHF-CEM-III/B	20 à 34	80 à 66	
Ciment de laitier au clinker ⁽¹⁾	CLK-CEM-III/C	5 à 19	95 à 81	
Ciment au laitier et aux cendres ⁽¹⁾	CLC-CEM-V/A	40 à 60	18 à 30	18 à 30
Ciment au laitier et aux cendres ⁽¹⁾	CLC-CEM-V/B	20 à 39	31 à 50	31 à 50
Ciment de laitier à la chaux ⁽²⁾	CLX	70 % de laitier et chaux hydraulique		

(1) NF P 15-301
(2) NF P 15-306

Tableau I.5 : Caractéristiques des ciments au laitier (Alexandre J. et Sebileau J.L. –1988)

Ciment	Masse volumique (t/m ³)	Surface spécifique (m ² /g)	Enthalpie massique d'hydratation (J/g)
CPA ⁽¹⁾	3,05 à 3,2	350 à 420	360 à 420
CPJ	2, 95 à 3,05	300 à 350	250 à 360
CHF		350 à 420	190 à 260
CLK		350 à 420	190 à 260
CLC		—	250 à 360

(1) CPA : ciment Portland artificiel ; ici CPA de classe élevée.

I.5.5 Mélanges où le laitier vitrifié sert de liant

I.5.5.1 Laitier O/D

C'est un mélange de laitier rocheux de dimension maximale D (souvent 50mm) et de laitier granulé (pour 20 à 35 % de la masse totale). Les fines de concassage du laitier rocheux servent de germes de cristallisation ; la prise hydraulique fait de ce mélange une sorte de béton, dont la résistance à la compression à un an peut atteindre 10 MPa. Le laitier O/D n'est plus utilisé tel quel pour les routes publiques.

I.5.5.2 Grave-laitier

C'est un mélange de granulats naturels ou artificiels et de laitier vitrifié auquel on a ajouté un activant. La dimension maximale de la grave est de 20mm, et elle est constituée, par exemple, par le mélange de trois fractions : 0 à 4 ; 4 à 10 et 10 à 20. Quand la grave est du laitier rocheux, on a un grave-laitier-tout-laitier (LCPC/SETRA 1983).

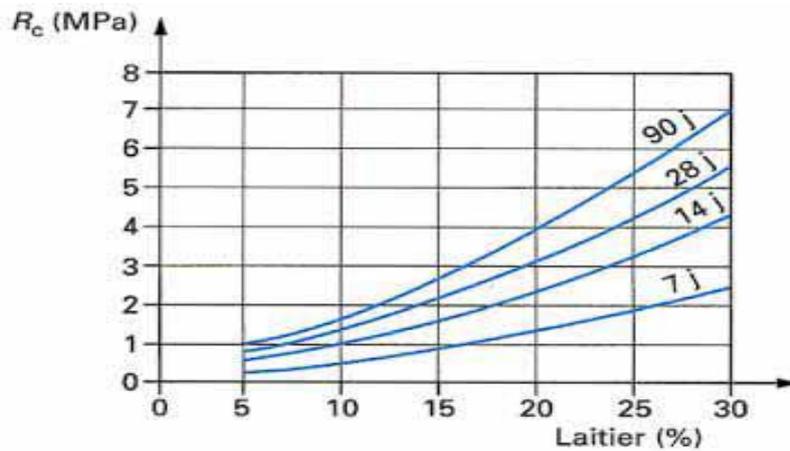
La prise dépend de la présentation du laitier vitrifié et de l'activant utilisé ; le tableau I.6 donne le pourcentage massique de laitier nécessaire pour respecter les spécifications de la Directive pour la réalisation des assises de chaussée en sables traités aux liants hydrauliques.

Tableau I.6 : Grave-laitier (Mémento pour les routes. CTPL, 1988)

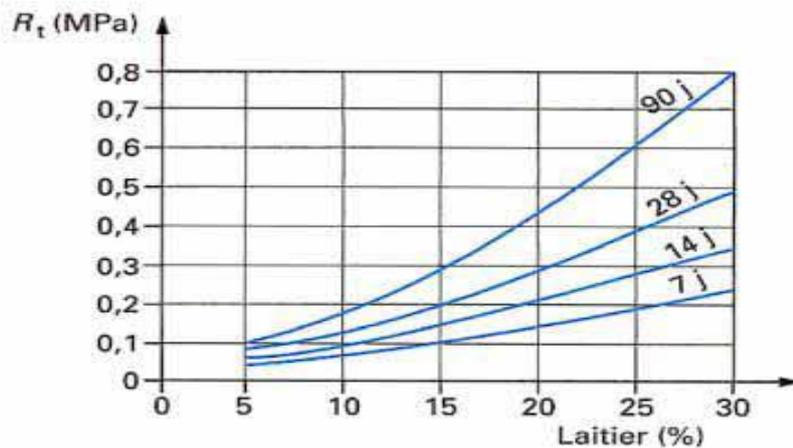
Caractéristiques	Laitier granulé brut	Laitier prébroyé
$E_t 360^{(1)}$ (MPa)	≤ 20000	≤ 25000
$R_t 360^{(1)}$ (MPa)	$> 0,65$	$> 0,80$
Activant utilisé :	% laitier	% laitier
Chaux	15 à 20	10 à 13
Ciment ou CVG	12 à 15	8 à 12
Chaux + gypse	8 à 10	GLHP ⁽²⁾
<p>⁽¹⁾ Valeurs exigées par la Directive de juin 1983 : $E_t 360$: module d'élasticité en traction à un an. $R_t 360$: résistance à la traction à un an.</p> <p>⁽²⁾ GLHP : grave-laitier à hautes performances dont la composition est adaptée en fonction de l'objectif.</p>		

La prise de la grave-laitier est relativement lente comme le montre l'évolution dans le temps des résistances à la traction R_t et à la compression R_c (figure I.13). Avec les dosages indiqués au tableau I.7, on obtient réellement une valeur de R_t 360 (à un an) de 0,7 à 1,5 MPa, et une valeur de R_c 360 de 7 à 15 MPa. Le module d'élasticité varie de 1 500 à 1 700 MPa (à 7 jours) jusqu'à 16 000 à 20 000 MPa (à un an).

Il est possible d'obtenir une valeur de R_t 360 de 1,5 à 3 MPa avec une grave-laitier dite à hautes performances (GLHP), en associant un fort dosage de laitier prébroyé et un activant sulfo-calcique.



(a) résistance à la compression R_c en fonction du pourcentage de laitier



(b) résistance à la traction R_t en fonction du pourcentage de laitier

Figure I.13 : Prise d'une grave-laitier

I.5.5.3 Sable-laitier

C'est un mélange de sable et de laitier vitrifié auquel on a ajouté un activant (D.R.C.R. 1985). Le sable, naturel ou provenant d'un concassage, a une dimension maximale de 6 mm et 65 % de ses éléments doivent être supérieurs à 80µm. Le tableau I.7 indique des exemples de formules de sable-laitier : sa résistance dépend beaucoup de l'ajustement granulométrique du sable.

Tableau I.7 : Formules de sable-laitier à base de sable grossier

Activant	Laitier granulé brut	$R_t 180^{(1)}$ (MPa)
Chaux	10 à 20 %	0,25 à 0,65 ⁽²⁾
	10 à 20 %	0,40 à > 0,65 ⁽³⁾
Chaux + gypse	10 à 15 %	0,40 à > 0,65 ⁽²⁾
	10 à 15 %	> 0,65 ⁽³⁾
<i>Laitier prébroyé</i>		
Chaux ou CVG	10 à 15 %	0,40 à > 0,65
(1) : R_{t180} : résistance à la traction à 180 jours. (2) : sable grossier non corrigé en granulométrie. (3) : sable grossier corrigé en granulométrie		

I.5.5.4 Limon-chaux-laitier

C'est un mélange encore expérimental à base de limon plastique et dont la conception repose sur la floculation des fines argileuses par la chaux. Le limon, préalablement traité avec 1,5 % de chaux est mélangé avec 25 % de laitier granulé (ou 15 % de prébroyé) auquel on a ajouté un activant ; la prise est très lente. La résistance à la traction à un an est comprise entre 0,5 et 1 MPa, avec un module d'élasticité d'environ 3 000 MPa.

I.5.6 Utilisation du mélange et laitier vitrifié

I.5.6.1 Laitier rocheux

En tout-venant, il peut être employé comme remblais (c'est une faible valorisation) ; concassé et classé, il est utilisé comme grave et pour la fabrication des enrobés.

L'enrobé est un gravillon recouvert d'un liant hydrocarboné, et qui est employé pour faire la couche de roulement de la route. L'enrobé de laitier a une très bonne stabilité mécanique et une bonne adhérence au bitume. Il s'utilise plus vite que l'enrobé de basalte, mais a le même coefficient de frottement à la roue.

I.5.6.2 Mélanges

Le tableau I.7 montre des exemples d'emploi de grave-laitier et de sable-laitier en chaussée neuve. Par ailleurs, l'emploi de grave-laitier ou de sable-laitier est intéressant pour le renforcement de chaussée : d'une part, à cause de la prise lente, on peut admettre la circulation dès la fin du compactage, d'autre part c'est un matériau rustique dont la mise en œuvre ne dépend pas des intempéries. Pour un trafic important, on renforce avec 22 à 28 cm de grave-laitier. Dans tous les cas d'emploi, la prise lente permet la rectification du profil, et le réemploi des matériaux surabondants.

Tableau I.8 : Emplois de grave-laitier et de sable-laitier en chaussée neuve ⁽¹⁾ (CTPL 1988)

Trafic PL-MJA ⁽²⁾	Couche de base ⁽³⁾	Couche de fondation ⁽³⁾
300 à 2 000	22 cm GL	20 cm GL ou 25 cm SL (C)
150 à 300	20 cm GL	18 cm GL ou 22 cm SL (C)
< 150	18 cm GL	15 cm GL ou 20 cm SL (C)

(1) Sol et fondation de qualité moyenne.
(2) PL-MJA nombre moyen de poids lourds circulant par jour.
(3) GL grave-laitier.
SL (C) sable-laitier de classe C ($0,4 < Rt < 0,65$ MPa).

La fabrication des mélanges se fait dans une centrale de malaxage (150 à 1 000 t/h) comprenant des trémies doseuses et un malaxeur à palettes à deux arbres. À la mise en œuvre, la qualité du compactage est particulièrement importante : statistiquement, une variation de 1% du taux de compactage (volume absolu du grave et du liant/volume apparent de la grave-laitier) provoque une variation dans le même sens de 4% de la résistance à la traction et de 6% de la résistance à la compression.

I.5.7 Laitier dans le domaine de la construction

I.5.7.1 Emploi de la grave-laitier en génie civil

La grave-laitier peut, avec ou sans armatures, constituer des fondations épaisses (2 à 6 m), qui sont mises en place par couches successives de 30 cm ; on l'emploie également pour des travaux maritimes (quais, formes). Le sable-laitier sert en fondations d'environ un mètre d'épaisseur.

I.5.7.2 Laitier vitrifié dans le béton

Le laitier granulé brut peut remplacer le sable dans le mélange à béton ; à dosage de ciment égal, le béton acquiert alors une résistance finale plus élevée, et il a une meilleure tenue au gel. Si le sable est remplacé, en partie ou en totalité, par du laitier granulé prébroyé, ce dernier apporte des fines qui, à résistance égale, remplacent le ciment masse pour masse ; il en est de même du laitier granulé finement moulu quand on l'ajoute au mélange à béton.

Dans tous les cas, le laitier granulé rend le béton moins facile à la mise en œuvre, il est donc nécessaire de faire des additions (Cendres volantes par exemple) pour rendre au béton, lors de son utilisation, une fluidité et une stabilité convenables.

I.5.7.3 Laitier employé comme granulat du béton

Le laitier concassé peut servir de granulat pour le béton ; le béton dit de *laitier-tout-laitier* est constitué selon la formule : granulat de laitier (6 à 20 mm ; 1 000 kg) + laitier granulé (prébroyé de préférence 0 à 3 mm ; 800 kg) + ciment (CHF ; 350 kg)+additions diverses (pour l'aptitude à la mise en œuvre ; 71 kg + eau (160 kg) Les indications entre parenthèses donnent un exemple de béton, qui, pour une masse volumique en place de 2,4 t/m³, a une résistance R_c 28j d'environ 55 MPa et un module d'élasticité E 28j d'environ 46 000 MPa ; c'est donc un béton de bonne résistance mécanique, qui, de plus, par rapport au béton à base de granulat et de sable naturels, résiste mieux au feu et aux milieux agressifs. Quand le granulat est du laitier expansé ou bouleté, il apporte au béton légèreté et faible conductivité thermique (*tableau I.9*).

Tableau I.9 : Béton de laitier expansé et bouleté

<i>Granulat</i>	<i>Laitier expansé</i>	<i>Laitier bouleté</i>
<i>Masse volumique (t/m³)</i>	1,15 à 1,50	1,70
<i>R_c 28j (MPa)</i>	4,5 à 9	29 à 34
<i>Conductivité thermique (W · m⁻¹ · K⁻¹)</i>	0,25 à 0,35	0,60 à 0,70

I.5.7.4 Laitier dans les pierres artificielles

Le laitier concassé (0 à 5 ; 3 à 8 ; 8 à 12,5 mm) et le laitier granulé (0 à 4 ; 0 à 2 mm) sont utilisés pour la fabrication de parpaings ; ils donnent à ces derniers un avantage de masse et de pertes thermiques plus faibles (*tableau I.10*). Le laitier, généralement granulé, est employé pour la fabrication de briques dont la résistance à la compression est de 5 à 30 MPa ; ces

briques résistent bien au feu, au gel et aux agents agressifs, elles ont une conductivité thermique de $0,52 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ (contre 0,6 à 0,77 pour les autres briques).

I.5.8 Emplois divers

Le laitier cristallisé est utilisé comme ballast de voies ferrées (mais il a été abandonné par la SNCF au fur et à mesure de l'accroissement des sollicitations des voies). Il sert également de matière première pour la fabrication de vitrocéramiques ; dans ce cas, le mélange contient jusqu'à 80 % de laitier, le complément étant surtout du sable siliceux. Les produits obtenus, très résistants aux agents agressifs et mécaniquement ($R_c = 650 \text{ MPa}$), sont utilisés en dallages industriels et comme plaques d'usure.

Tableau I.10 : Parpaings de laitier (25 x 20 x 50 cm, 5 lames d'air)

Matériau	Matériau naturel	Laitier concassé	Laitier bouleté	Laitier expansé
Masse du parpaing (kg)	25	22	19	17
Coefficient de transmission Thermique ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$)	1.63	1.22	0.8 ⁽¹⁾	1.06 ⁽¹⁾
<i>(1) À cause de la porosité, ouverte pour le laitier expansé et fermée pour le bouleté</i>				

Le laitier vitrifié sert de fondant dans le mélange destiné à la fabrication du verre ; il y est ajouté pour 1 à 15 % en masse, la principale limitation d'emploi est la présence d'oxyde de fer qui colore le verre. Dans les céramiques, ce laitier, employé à la dose de 5 à 50 %, comme constituant de la pâte crue, en diminue le coût et augmente la résistance mécanique de la céramique. Le laitier vitrifié est aussi utilisé comme dégraissant des argiles pour terre cuite, où il est incorporé à un pourcentage allant de 5 à 25 % ; enfin, il sert de sable pour le décapage par projection, emploi où il est plus sain pour le personnel que le sable siliceux, et moins cher que le corindon ou la grenaille métallique. En agriculture, le laitier cristallisé peut être employé comme amendement aux terres acides, et le laitier bouleté est testé comme support de cultures.

I.6 Environnement

Le laitier sortant du haut fourneau contient du soufre, qui, au contact de l'air, se transforme en dioxyde et donne parfois avec l'eau de l'hydrogène sulfuré ; ce dégagement est souvent

mêlé à la vapeur provoquée par le refroidissement du laitier dans la fosse, et surtout par la granulation. Il est pratiquement impossible de capter ces vapeurs au-dessus des fosses, et des rigoles ou des bassins de granulation ; par contre, le pot de granulation peut être surmonté d'une cheminée qui rassemble la vapeur, et où on la condense par pulvérisation d'eau. L'eau polluée par la granulation peut être récupérée, refroidie et réutilisée.

Le bouletage produit des nuisances spécifiques : le bruit, dû au fonctionnement du tambour, et la formation occasionnelle de laine de laitier, qui se disperse aux alentours de l'installation. Le remède à ces nuisances consiste à installer une hotte munie d'un grillage qui retient la laine de laitier à la manière d'un filtre. En contrepartie, le soufre est piégé dans les boulettes, ce qui réduit considérablement la teneur en dioxyde de soufre de l'atmosphère (Otsworth R.P.1979). Pour la défense de l'environnement, on note les propriétés d'isolant acoustique de la laine de roche, et, en Grande-Bretagne, l'emploi généralisé de laitier concassé comme lit filtrant des bassins d'épuration.

I.7 Commercialisation

La fabrication de ciment absorbe 70% de la production de laitier vitrifié (ce qui correspond à environ 9% de la production française de ciment), la plus grande partie du reste est utilisée en technique routière, et est ainsi à l'origine de la mise en place d'importants tonnages de grave-laitier qui ont pu aller jusqu'à 15 Mt/an. Au total plus de 4 Mt/an de laitier (vitrifié et cristallisé) sont employées pour les routes. Le génie civil peut employer de très gros tonnages, mais de façon irrégulière. Le laitier est, comme coproduit, un matériau peu cher, mais encombrant et lourd : le coût du transport a donc beaucoup d'importance sur ses possibilités de commercialisation. Sous la forme cristallisée, il est en concurrence avec les graves locales, sous la forme vitrifiée, il peut être employé d'autant plus loin de son lieu de production, que son dosage dans la grave-laitier est plus faible : le prébroyage est donc un moyen de le valoriser à longue distance.

I.8 Perspectives. Granulation à sec

Comme nous l'avons vu, le laitier de haut fourneau a des propriétés remarquables qui le rendent apte à de nombreux emplois ; il n'y a aucun doute que, de ce fait, il gardera dans l'avenir beaucoup de possibilités de valorisation. Toutefois, ces possibilités seront d'autant plus grandes que l'on continuera l'effort de recherche et de développement, dans les domaines de la présentation ou des méthodes de mise en œuvre. La sidérurgie doit d'autant plus réussir

dans ce domaine, que la législation ne permet plus la constitution de crassiers, tels que ceux où l'on a jadis déversé le laitier en excès.

Au Japon en particulier, on a cherché à récupérer l'enthalpie du laitier liquide. Divers procédés de granulation ont été essayés dans ce but, ils font appel soit à la dispersion mécanique à sec ou pneumatique par l'air soit à l'agitation pendant le refroidissement. L'énergie thermique radiante est récupérée par des tubes d'eau et l'enthalpie des granules est récupérée directement par courant d'air ou, en première étape, par contact avec un lit de sable fluidisé. La figure I.14 montre le principe d'une installation de granulation à sec. Les différents procédés ont été testés dans des installations pilotes de 40 à 60 t/h, où l'on récupérait 40 à 70% de l'enthalpie du laitier ; la baisse du prix du pétrole a provoqué l'arrêt des développements. Il est à noter que les systèmes de granulation à sec produisent un sable de laitier, dont le taux de vitrification n'excède pas 80 à 85 %, mais qui est fort utilisé au Japon comme sable pour béton (Pazdej R. 1982).

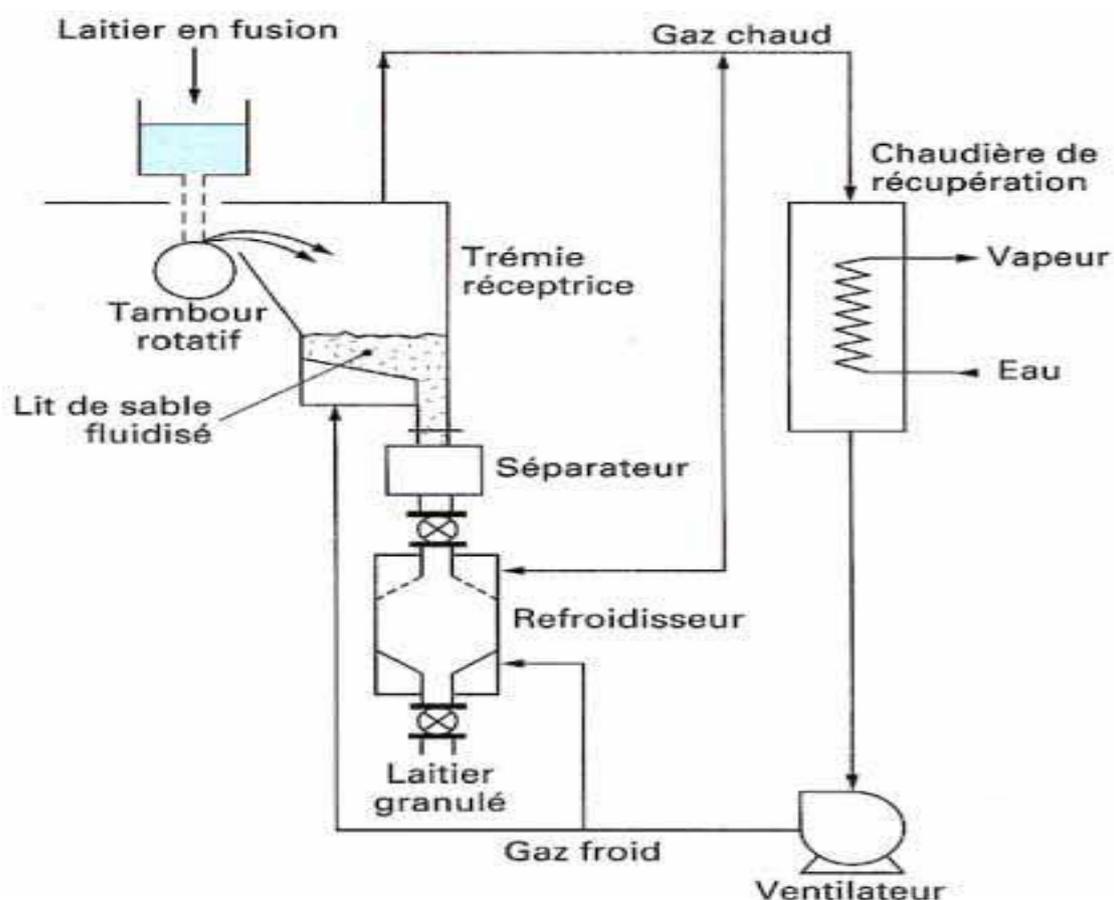


Figure I.14 : Granulation à sec et récupération de chaleur. Système Sumitomo-IHI (Van Den Hove Ch. 1983)

I.9 Conclusion

Dans le ciment de laitier, le laitier joue un rôle bénéfique vis-à-vis des agressions de nature chimique, notamment les eaux sulfatées, lorsque la teneur en laitier est supérieure ou égale à 60%. Les granulats de laitier confèrent aux bétons des améliorations remarquables telles que le gain de résistance en traction, la diminution de la perméabilité et d'autres propriétés.

L'utilisation des diverses formes de laitier (granulé) dans les ciments et le laitier (granulé et cristallisé) dans les bétons est surtout intéressante. Il ne faut pas dans les régions proches des lieux de production du laitier ou les granulats naturels sont manquant ou de qualité discutable (sable fin). Il ne faut pas perdre de vue également le caractère économique et écologique de l'emploi des granulats artificiels en substitution partielle ou totale aux granulats naturels. Nous avons consacré le chapitre II, à étudié les différents procédés de production du ciment, ainsi la production du ciment au niveau de la cimenterie de Hadja-Soud.

II. CHAPITRE II : PREPARATION DE LA MATIERE PREMIERE ET ELABORATION DU CIMENT

II.1 Introduction

La société des ciments de Hadjar-Soud (SCHS) est une filiale du groupe GICA de capital social de 1550000.000 DA, à partir du 01 février 2008 est entré en partenariat avec le partenaire social italien Buzzi-Unicem avec une participation de 35%, le groupe GICA est majoritaire de 65 %. La cimenterie de Hadjar Soud est située sur l'axe de la route N°44 reliant Annaba, Constantine et Skikda, soit à 50Km d'Annaba. La cimenterie fait partie de la commune de Bekkouche-Lakhdar daïra de Ben-Azzouz Wilaya de Skikda. La superficie de l'assiette du terrain de la cimenterie est de 29 ha (*figure II.1*).

Elle longe la ligne du chemin de fer à laquelle elle est raccordée par un tronçon de voie interne. La cimenterie qui est opérationnelle depuis 1973 intègre dans sa globalité le processus de production du ciment : Gisements de matière première, Transport, Production de clinker et ciment, Stockage, Expédition. La cimenterie est constituée de deux lignes fabrication avec une capacité contractuelle de production de 900 000 tonnes par an :

- 1^{ère} Ligne : Date du démarrage 1973, capacité 1250 t/j de Clinker.
- 2^{ème} Ligne : date du démarrage 1975 (Adjonction d'un précalcinateur en 1993 pour porter la capacité à 1800 t/j de clinker).

La carrière d'argile située à une distance de 4 Km de l'usine. Sa superficie est de 72 ha, renferme des réserves estimées à plus de 06 millions de tonnes. L'argile est extraite par ripage à l'aide d'une pelle mécanique, ensuite formée en tas, chargée sur camions à l'aide de chargeuse pour être acheminée vers l'usine.

Le sable il rentre dans la fabrication du mélange cru et présente un bon apport de silice. Il est approvisionné par la cimenterie Elma-Labiad de la Wilaya de Tebessa. Le minerai de fer : il est approvisionné, soit de Ferphos (mine d'El Ouenza). Le gypse : il rentre dans la fabrication du ciment en pourcentage de 5 %, c'est un régulateur de prise. Il est approvisionné par wagons et camions à partir des lacs de Ain-m'lila. Le laitier : il est approvisionné du complexe sidérurgique ARCELOR MITTAL–Annaba, situé à 50Km de l'usine.

II.2 Situation géographique de la carrière du calcaire

La carrière du calcaire est située à Djebel Safia (Daira de Benazzouz) à une distance de 8 Km de l'usine, reliant la cimenterie par des transporteurs (*figure II.2*). Elle s'étale sur une superficie de 162 ha, les réserves géologiques exploitables sont estimées à plus de 150 millions de tonnes, dont sa qualité est caractérisée par un calcaire pur et homogène. Le calcaire est extrait par abattage en grande masse au moyen d'explosif.

II.2.1 Rappels sur les travaux d'exploration antérieurs

Les premiers travaux géologiques effectués en 1967 et 1968 sont exposés dans le rapport «ciments Lafarge» qui concerne l'étude d'un gisement de calcaire pour une cimenterie dans l'Est Algérien à capacité de production annuelle de 500.000 tonnes. Parallèlement à cette étude, des travaux de prospection ont également été réalisés pour localiser des sites de matériaux comme sous dosés et ajouts. Pour l'installation de la deuxième ligne de production de 500.000 tonne/an, le degré de reconnaissance du gisement s'avérait insuffisant pour garantir les réserves indispensables. Pour cela une étude géologique a été effectuée par les équipes de la SNMC en 1972 et 1974.

II.2.2 Géologie de la région

Litho-stratigraphie : La région d'étude est constituée par des schistes du paléozoïque et par des roches du mésozoïque carbonatées et siliceuses ; elles sont caractérisées par des dolomies, calcaires massifs et marno-calcaires, calcaires schisteux, grés et conglomérats (*tableau II.1*).

Structure géologique de la région : La région de Djebel Safia fait partie d'une structure synclinale qui est limitée à l'est par la plaine quaternaire de L'Oued El Kébir ; à l'Ouest cette structure s'ennoie sous les reliefs numidiens, au Nord-Ouest elle se prolonge au massif de Filifila et au Sud elle est limitée par la dépression d'Azzaba, Ain Charchar, Gastu et dorsale Kabyle (chaîne numidienne).

II.3 Étude géologique du gisement

Le Djebel Safia est constitué par des formations géologiques plissées du Jurassique et Crétacé qui sont affectées par un bombement anticlinal. Elles se distinguent comme suit :

Jurassique : Lias inférieur ; Il est constitué par des dolomies qui affleurent à partir de la côte 240m vers le bas du Djebel Safia et constituent une bande longue de 2 km et large de 50 à 200m. Leur épaisseur est approximativement de 60 à 80m. Les dolomies de couleur grise à

nuance brunes ou jaunâtres sont compactes et d'un aspect massif à grains fins. Le contact entre les dolomies et les calcaires massifs du lias moyen et franchement tranché.

Lias inférieur moyen inférieur : L'essentiel de cette formation est constitué par une séquence de calcaires cristallins massifs dans stratification manifeste. Sa puissance est de 100m à l'extrémité Sud-Est et plus de 200m sur le versant Nord- Ouest. Dans les assises inférieures, les calcaires sont de couleur claire presque rose ou jaunâtre et compactes mais fortes diaclases. Vers le haut, ces calcaires passent progressivement à une couleur gris-bleuâtre moins fracturés avec une structure oolithique et graveleuse. La porosité des calcaires est faible et leur poids volumique est de $2,65 \text{ t/m}^3$.

Marno-calcaires siliceux jurassique : Cette formation affleure d'une manière discontinue sur le flanc nord-est Djebel Safia ; ces marno-calcaires sont localement un peu gréseux noduleux et à amygdales de silex. Calcaires à silex (puissance 14m) et calcaires argileux, siliceux (puissance 15m).



a)



b)

Figure II.2 : a) La bande transporteuse b) la carrière du calcaire (Cimenterie Hadjar-Soud)

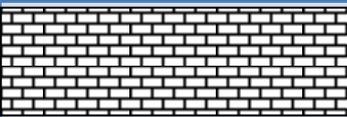
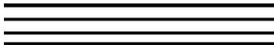
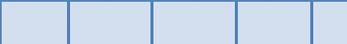
Crétacé : Néocomien et Barrémien ; Cette série est constituée par des calcaires roux ou bleuâtres qui s'enrichissent progressivement en dépôts argileux. Ces marnes sont schisteuses et lustrées, mais le métamorphisme dynamique est à peine sensible ; aucune recristallisation de minéraux phyllitiques ne se manifeste franchement.

- Calcaires mameux (puissance 200m).
- Marnes (puissance 100m).

Flysch-Sénonien et Cénomaniens : Cette série de 20m de puissance est caractérisée par des phtanites à radiolaires du Cénomaniens ainsi que des pélites calcaireuses, des brèches

d'inocéramus et à globotruncana du Sénonien. La couverture est représentée par la couche végétale et les blocs de calcaires de puissance variant de 0 à 0,30m.

Tableau II.1. Coupe stratigraphique de la carrière de Hadjar Soud

Ere	Système	Coupe	Lithologie
Quaternaire	Alluvions		Argile sableuse avec les cailloux de calcaire
Mezozoïque	Crétacé supérieur		grès et schistes
			
	Crétacé inférieur		Marne, calcaire et marne
	Jurassique		Marne calcaire
			Calcaire à silex
			
Jurassique Lias		Calcaire	
		Dolomie	
			

Le gisement de calcaire de Djebel Safia est constitué par un anticlinal complexe résultant de deux plis anticlinaux simples.

La série entière du Djebel Safia est fortement étirée et a subi un très léger métamorphisme dont témoigne l'aspect schisteux et lustré des calcaires argileux néocomiens. Encore plus au nord ce métamorphisme est davantage manifeste, ce dont témoignent les marbres et les cipolins à épidote. La tectonique a cependant causé une fissuration intense.

La carrière argile est située à Oued El-Kebir (commune d'Ain-Charchar) à une distance de 4Km de l'usine. Reliant l'usine par route servant au transport de l'argile par camion. Sa superficie est de 72ha, elle renferme des réserves estimées à plus de 06 millions de tonnes.

L'argile est extraite par ripage à l'aide d'une pelle mécanique, ensuite formée en tas, chargée sur camions à l'aide de chargeuse pour être acheminée vers l'usine.

Le sable et le minerai de fer sont approvisionnés par camion, ce sont des matières de correction du mélange cru et ce pour un appoint de silice et d'oxyde de fer.

Pour la préparation de la farine, les matières premières réceptionnées des deux carrières calcaires et argile sont reprises respectivement par extracteurs et excavatrices et acheminées vers des trémies de dosage via des bandes transporteuses. Le broyage du calcaire et de l'argile avec des appoints de minerai de fer et de sable se fait en circuit fermé dans trois broyeurs à boulets de 110 t/h pour les CRUS 1 et 2, et 130 t/h pour le CRU3.

La farine dénommée communément farine est acheminée à travers un séparateur où les grosses particules sont recyclées aux broyeurs et les fines sont acheminées par des élévateurs à godets vers des silos d'homogénéisation.

La farine crue est homogénéisée à l'extraction avant d'être alimentée à travers une tour échangeur (figure II.3) ou elle est préchauffée pour être ensuite pré calcinée où elle subit des transformations physicochimiques (déshydratation et décarbonatation) avant d'arriver dans un four rotatif de 70 m de longueur et de 4,4 m de diamètre protégé par la brique réfractaire où elle est clinkérisée à 1450°C où la farine pareillement décarbonatée subit les transformations chimiques aboutissant à la formation de nodules de clinker.

Le clinker résultat de la cuisson de la farine subit à la sortie du four rotatif une trempe à travers un refroidisseur à grille avant d'être stocké dans des silos d'une capacité de 5000 tonnes chacun (six silos par ligne). Ce clinker qui est un produit semi-fini et produit de base pour la fabrication de ciment serait destiné à l'atelier de broyage pour être finement broyé dans deux broyeurs à boulets d'une capacité de 100 t/h chacun avec un ajout de « Laitier » (déchets sidérurgiques provenant de l'usine sidérurgique de l'Hadjar et le « Gypse » (régulateur de prise) et ce pour donner le produit fini de type CPJ CEM II/A 42,5 conforme à la norme algérienne NA 442.

Le ciment obtenu est stocké dans des silos de stockage (04 silos par ligne) et ne serait livré qu'après autorisation explicite du laboratoire.



Figure II.3 : Le four rotatif et le tour échangeur (Cimenterie Hadjar-Soud)

II.4 Chimie du ciment

La dénomination de ciment a été autrefois employée dans le commerce pour désigner de nombreux matériaux dont la propriété essentielle était de pouvoir servir de liant. Ainsi, il était communément appelé «ciment», les liants inorganiques tels que la chaux, les pouzzolanes, etc...et les liants organiques souvent appelés ciment, tels que «ciment caoutchouc» ou «ciment époxy». Afin d'éviter des malentendus, les diverses commissions de normalisation, dans différents pays ont fixé pour le ciment la définition suivante : Les ciments sont des liants durcissant à l'air. Ils consistent essentiellement en combinaisons d'oxyde de calcium, de silice, d'alumine et d'oxyde de fer et remplissant les conditions fixées par les normes pour leur durcissement et leur stabilité. La matière première crue ou au moins, la plus grande

partie des éléments constituant les ciments aura été chauffée jusqu'à clinkérisation (c'est à dire jusqu'à vitrification)

II.4.1 Ciments dans l'antiquité

Depuis longtemps déjà, et avec la découverte du feu, l'homme commençait à assembler des blocs avec un liant. Les monuments les plus anciens notamment les pyramides d'Egypte en témoignent (*figure II.4*). Les Egyptiens utilisaient du gypse calciné comme liant. Les Grecs et les Romains calcinaient la chaux ; la chaux vive ainsi formée était gâchée avec de l'eau, des agrégats, du sable et de la brique pilée. En introduisant les agrégats, les Romains se sont aperçus que les terres volcaniques produisaient des résistances et des durabilités supérieures (ces terres provenaient du pied du volcan Vesuve). Les Egyptiens découvrent la chaux grasse, obtenue par cuisson de roches calcaires à une température proche de 1000°C, suivie d'une extinction avec de l'eau. Les Romains ont fait véritablement du ciment en ajoutant à la chaux de la pouzzolane. Louis Vicat en 1817 élabore la théorie de l'hydraulicité, propriété jusque-là inexplicée. En 1824, l'écossais Aspdin donne le nom de Portland au ciment qu'il fabrique dans cette région. La première usine de ciment a été créée par Dupont et Demarle en 1846 à Boulogne-sur-Mer.

II.4.2 Invention du ciment Portland

Plusieurs recherches et études ont été entreprises par différents savants pour pouvoir trouver un liant résistant et durable. Vers 1756, John Smeaton (ingénieur britannique 1724-1792) a mis en évidence, contrairement à ce que l'on croyait généralement, que les meilleurs chaux étaient obtenues, non pas avec les calcaires les plus durs, mais avec des calcaires tendres et argileux. Il améliora ainsi la qualité de son ciment en y ajoutant un tuf volcanique venu d'Italie. Puis, entre 1812 et 1818 L. Vicat démontra ce que Smeaton avait entrevu mais non réalisé, à savoir que, en l'absence d'argile dans la roche on pouvait atteindre le même résultat par mélange artificiel d'argile et du calcaire pur. Un tel procédé eut l'avantage de permettre de faire varier à volonté les proportions et par conséquent de maintenir constantes les propriétés du produit obtenu. Quand la proportion de chaux était relativement élevée le produit après calcination s'éteignait comme une chaux ordinaire. Quand le produit contenait assez de matières argileuses il devient hydraulique ; on l'appela ainsi chaux hydraulique. Quand une certaine quantité de magnésie, d'alumine et d'oxyde de fer était présente le produit ne s'éteignait pas mais il possédait une haute valeur hydraulique.



Figure II.4 : les Egyptiens et les Romains depuis l'antiquité assemblent les blocs avec un liant (Source : realspinesurgery.com)

Mais la palme revient à Smeaton lors de la construction du phare d'Eddystone près de la cote de Cournouaille dans le sud de l'Angleterre. Pour la construction de ce phare il a utilisé plusieurs roches provenant de différentes régions. Il a constaté que la roche venant de la région de Portland donnait des résultats meilleurs.

Pour améliorer et produire le ciment hydraulique Aspdin a breveté, en 1824, un produit qu'il appela «ciment Portland», mais rien n'indique que le produit soit original.

A partir de là, ont essayé de reconstituer artificiellement la composition de la roche de Portland d'où le nom de Ciment Portland Artificiel qu'on note en abrégé CPA.

II.4.3 Différentes étapes de fabrication du ciment

La fabrication du ciment implique la mise en œuvre de deux matières premières essentielles au moins, il s'agit du calcaire et de l'argile (Schiste), et parfois quand la nécessité le demande on fait appel à des matières de correction telle que le sable et le minerai de fer. Ces matières de correction sont utilisées quand les matières premières de base sont pauvres en silice et en oxyde de fer. Pour fabriquer du ciment il faut d'abord disposer d'une carrière de calcaire et d'une carrière d'argile ou de schiste, puisque c'est deux matières qui sont utilisées en grande quantité. Lors de la fabrication du ciment on doit impérativement passer par les différentes étapes suivantes :

- L'extraction en carrière,
- Le concassage et le broyage des matières premières,
- La cuisson, de laquelle sortira un clinker,
- Le broyage de ce dernier avec les additions nécessaires pour produire les différents types de ciment,
- L'expédition.

Il existe quatre (4) voies de fabrication du ciment qui se différencient au niveau des opérations 2 et 3 mentionnées ci-dessus.

- La voie humide ;
- La voie semi-humide,
- La voie semi-sèche,
- La voie sèche qui sera décrite en détail dans cette partie.

II.4.4 Extraction et préparation des matières premières.

Les matières premières extraites des parois rocheuses d'une carrière à ciel ouvert par abattage à l'explosif ou à la pelle mécanique ou encore par ripage au bulldozer sont souvent sous forme de roche de grande dimension qu'il faut réduire. La roche est reprise par des dumpers vers un atelier de concassage qui est caractérisé par le diamètre avant et après concassage.

Pour produire des ciments de qualités constantes, les matières premières doivent être très soigneusement échantillonnées, dosées et mélangées de façon à obtenir une composition parfaitement régulière dans le temps.

Mais si elle peut varier d'une cimenterie à l'autre en fonction de la qualité du gisement exploité, la composition du cru reste dans des proportions bien définies :

- Carbonate de calcium (CaCO_3) : de 77 à 83 %
- Silice (SiO_2) : de 13 à 14%
- Alumine (Al_2O_3) : de 2 à 4%
- Oxyde ferrique (Fe_2O_3) : de 1,5 à 3 %

La roche est échantillonnée en continu pour déterminer la quantité des différents ajouts nécessaires (oxyde de fer, alumine et silice). Le mélange est ensuite réalisé dans un hall de préhomogénéisation où la matière est disposée en couches horizontales superposées puis reprise verticalement.

II.4.5 Procédé par voie sèche

II.4.5.1 Atelier de préparation du cru (Extraction et préhomogénéisation)

Toutes les cimenteries disposent d'une carrière de calcaire et autre gisements d'argile (rouge ou brune). D'habitude les matières premières calcaire et argile (brune et rouge) utilisées sont extraites de la carrière à proximité de l'usine. Les roches abattues à l'explosif sont stockées dans leurs silos respectifs au niveau de la carrière qui alimente de façon prédéfinie en quantité par le service contrôle qualité un concasseur afin d'obtenir un produit de composition régulier. Un deuxième mélange est effectué dans le but de corriger le manque en oxyde de fer ou de silice.

Le produit concassé est transporté vers le hall de préhomogénéisation de l'usine à l'aide d'une bande transporteuse ou avec les camions. Le hall est constitué de sorte que lorsqu'un

tas est en confection, l'autre est à la reprise. Sur la bande transporteuse de la carrière est placé un analyseur automatique à fluorescence X qui analyse la matière première toutes les 2 minutes afin de contrôler la qualité et de la corriger en cas de variation.

II.4.5.2 Broyage et homogénéisation

La matière préhomogénéisée et stockée dans le hall est reprise et envoyée dans le circuit de broyage du cru qui est constitué d'habitude de broyeur à boulets. Elle est ensuite très finement broyée en circuit fermé pour obtenir un mélange parfaitement homogène des constituants qui conditionne les réactions chimiques ultérieures. A la sortie des broyeurs, on obtient une poudre appelée farine qui est expédiée vers la zone d'homogénéisation qui est l'ultime étape avant la cuisson.

Cette opération se fait dans des silos d'homogénéisation en béton par brassage intime d'air qui confère à la matière crue une composition chimique stable. La stabilité dépend de la régularité des propriétés du clinker. La base de chaque silo est constituée de plusieurs secteurs formés d'une surface poreuse à travers laquelle l'air comprimé est soufflé alternativement dans chacun des secteurs permettant ainsi l'homogénéisation de la couche extraite et le lissage des écarts de composition de l'alimentation.

II.4.5.3 Atelier de cuisson.

La cuisson se fait à une température de 1450°C dans un four rotatif (*figure II.6*), corps cylindrique tournant de 1,5 à 3 tr/min et légèrement incliné. La matière chemine lentement et se combine en venant à la rencontre de la source de chaleur, une longue flamme alimentée au charbon pulvérisé, au fuel lourd, au gaz naturel, ou encore partiellement avec des combustibles de substitution (valorisation de résidus d'autres industries).

L'énergie calorifique consommée est considérable: 3200 à 4200 K Joules (l'équivalent de 100 kg de charbon) par tonne de clinker produit. Pour améliorer le bilan thermique, on utilise en amont du four un échangeur thermique qui déshydrate et précalcine le cru à environ 800°C.

II.4.5.4 Tour échangeur

Une opération de préchauffage commence par l'évaporation de l'eau contenue dans la farine et se poursuit par une décarbonatation partielle de cette farine. Le préchauffage se fait dans une série de cyclones disposés verticalement sur plusieurs étages appelée « tour

d'échangeur thermique ». La matière froide introduite dans la partie supérieure se réchauffe au contact des gaz chaud provenant du four.

D'étage en étage, elle arrive partiellement décarbonatée jusqu'à l'étage inférieur à une température d'environ 800°C. Une précalcination se fait dans une boîte à fumée placée entre le préchauffeur et le four. Ainsi, la décarbonatation commencée dans le préchauffeur se fait pour l'essentiel dans le précalcinateur et se termine dans le four.

Cette opération qui s'effectue entre 650 et 900°C permet de libérer le gaz carbonique pour obtenir la chaux vive nécessaire à la formation des constituants du clinker.

II.4.5.5 Cuisson de la farine crue

La cuisson se fait à une température de 1450°C. Elle est réalisée dans un four rotatif cylindrique tournant (1 à 3 tr/min environ), dans lequel la matière est acheminée lentement vers la source de chaleur (flamme de gaz). Dans l'ensemble du processus de cuisson, au fur et à mesure de l'élévation de température, les transformations suivantes se déroulent :

- De 800 à 900°C : décarbonatation partielle.
- De 900 à 1250°C : décarbonatation total donnant de la chaux libre (CaO) et du gaz carbonique (CO₂).
- De 1250 à 1280°C : formation de la phase liquide par l'alumine, le fer avec la chaux (aptitude au croutage).
- De 1300 à 1450°C : combinaison total de la chaux libre avec la silice, l'alumine et l'oxyde de fer pour donner les silicates bicalcique et tricalcique, du ferroaluminate tétracalcique et de l'aluminate tricalcique qui les composants principaux du ciment (c'est la clinkérisation).
- 1250°C : refroidissement.

Ainsi sous l'effet de cette variation de température (*figure II.8*), différentes réactions se produit tout au du four à des températures bien spécifiques pour former les composants nécessaire pour les différentes réactions lors de l'élaboration du mortier et du béton.

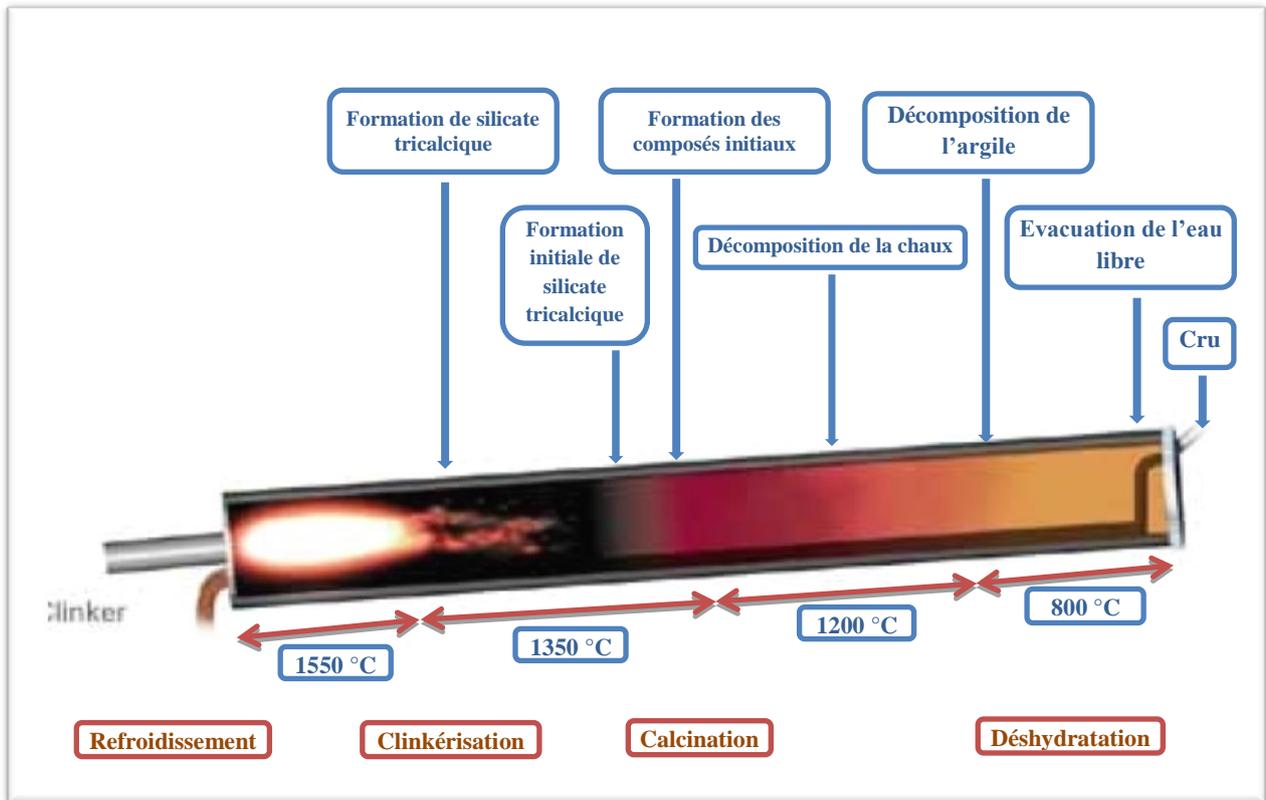
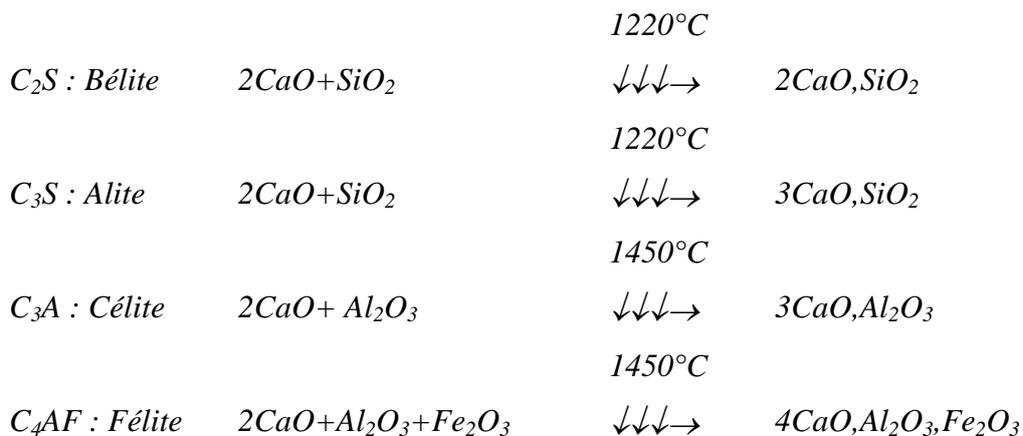


Figure II.5 : Four rotatif (différentes phases de transformation de la farine)

Les différentes réactions chimiques que se déroulent dans le four rotatif en fonction de la température, sont comme suite :



Le clinker se présente sous formes de petites «granules» (*figure II.7*) dures et cristallisées, de teinte grise foncée pour les ciments habituels. Sa composition est en moyenne pour un bon clinker est :

- Silicate tricalcique : C_3S 50 à 65%
- Silicate bi-calcique : C_2S 15 à 20%
- Aluminate tricalcique : C_3A 5 à 15%
- Ferro-aluminate tétracalcique : C_4AF 5 à 10%



Figure II.6 : Clinker du ciment

II.4.5.6 Le refroidissement du clinker

Il existe différents type de refroidisseurs à grilles (*figure II.9*), à ballonnets et rotatifs, le clinker est refroidi comme dans la plupart des cimenteries actuelles par un refroidisseur à grilles :

- le clinker va progresser à l'intérieur du refroidisseur grâce aux à-coups répétés de marteau sur les grilles sur lesquelles il repose,
- au travers ces grilles, de puissants ventilateurs vont souffler de l'air sous le clinker afin de le refroidir à une température d'environ 100°C (cette opération est appelée trempé).

À l'entrée ou à la sortie du refroidisseur, selon le modèle utilisé, un concasseur à marteau à un ou plusieurs rouleaux (appelé brise mottes) va broyer le clinker de manière grossière.

La composition minéralogique du clinker obtenu après traitement thermique des matières crues introduites dans le four rotatif est fonction de la composition du mélange introduit mais,

aussi de la température à laquelle la cuisson est réalisée et des conditions de refroidissement (trempe à l'air).

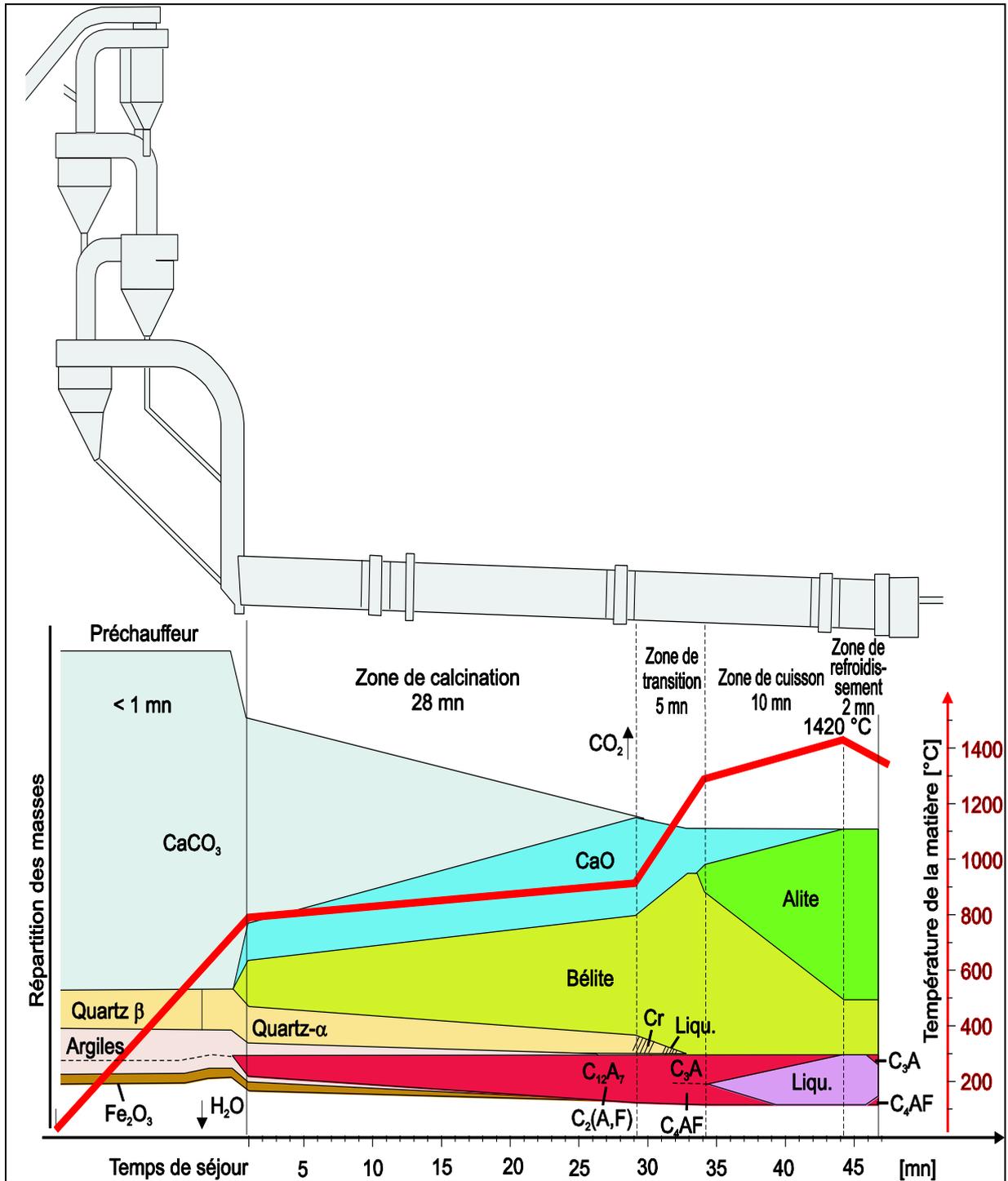


Figure II.7 : Diagramme de transformation de phases qui intervenant dans le four (du cru au clinker)

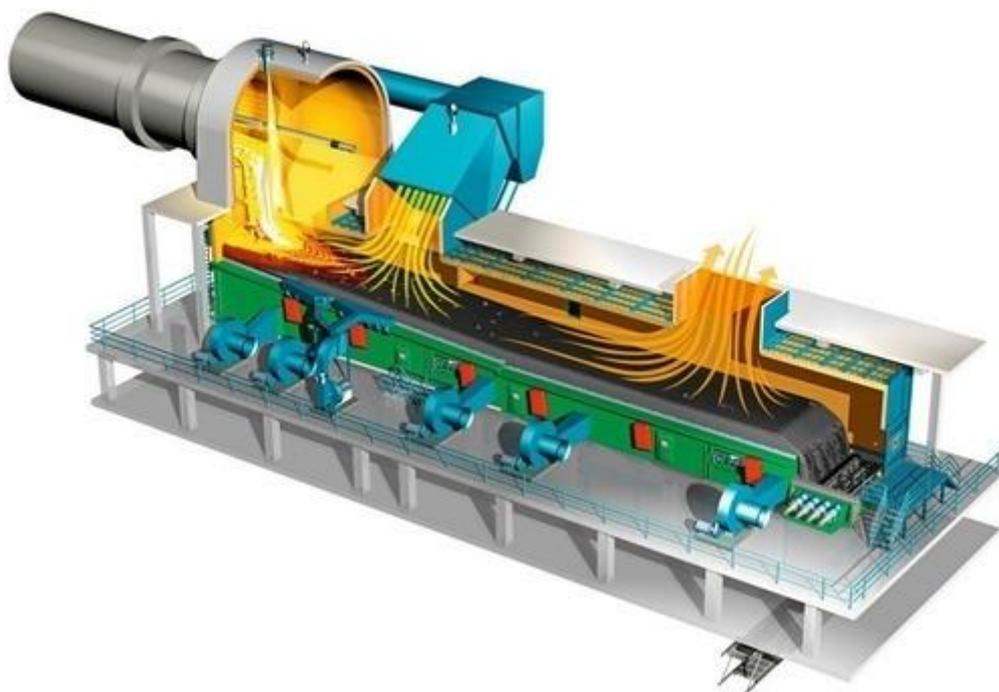


Figure II.8 : Technique de refroidissement du clinker sur grille (source : www.indiamart.com)

II.4.5.7 Stockage du clinker

Le clinker concassé sortant du refroidisseur est transporté par un transporteur métallique dans la boîte de chute et orientés vers un autre transporteur à godets afin d'être envoyé soit directement à l'atelier de broyage clinker, soit vers le hall de stockage clinker.

II.4.5.8 Atelier de broyage du clinker

Le clinker doit être finement broyé pour obtenir le ciment qui réagira au contact de l'eau. Les broyeurs à ciment sont des cylindres tournants. Les corps broyant sont constitués de boulets d'acier et de "cylpeds" qui, par chocs, font éclater les grains de clinker et progressivement, amènent le ciment à l'état de fine farine, ne comportant que très peu de grains supérieurs à 80 μm .

L'alimentation des broyeurs est faite en continu. Des distributeurs automatiques assurent un dosage défini et constant des éléments qui doivent entrer dans la composition du ciment fini : clinker + gypse (5 à 7% destiné à assurer la régularité de la prise) + éventuellement des produits d'addition (laitier de haut-fourneau, cendres volantes, calcaire, fumée de silice, tuf pouzzolane). A la suite du broyeur, le ciment est transporté mécaniquement ou pneumatiquement vers les silos ou il est stocké en attente d'expédition.

II.4.5.9 Expédition.

Après le broyage, le ciment est sous sa forme définitive, tel que nous le connaissons sur les chantiers. Il est alors stocké dans des silos verticaux qu'il faut entretenir régulièrement. En effet au bout d'un certain temps, le ciment sèche dans les silos et s'entasse. Il faut donc qu'il se renouvelle régulièrement dans les silos afin qu'il n'y stagne pas.

Pour se faire, on a installé des injections d'air dont la pression est plus forte vers l'extérieur et moins forte vers le centre du silo. En tête du silo un aspirateur d'air est également mis en place pour dégonfler le silo, par ce procédé, le ciment acquiert les propriétés d'un fluide et ne se bloque plus, économisant des pertes qui peuvent être conséquentes.

Le ciment est ensuite extrait de ces silos par un bec verseur. Ensuite, les ciments quittent l'usine en sacs ou en vrac.



Figure II.9 : Le laitier stocké à l'extérieur de la cimenterie de Hadjar-Soud

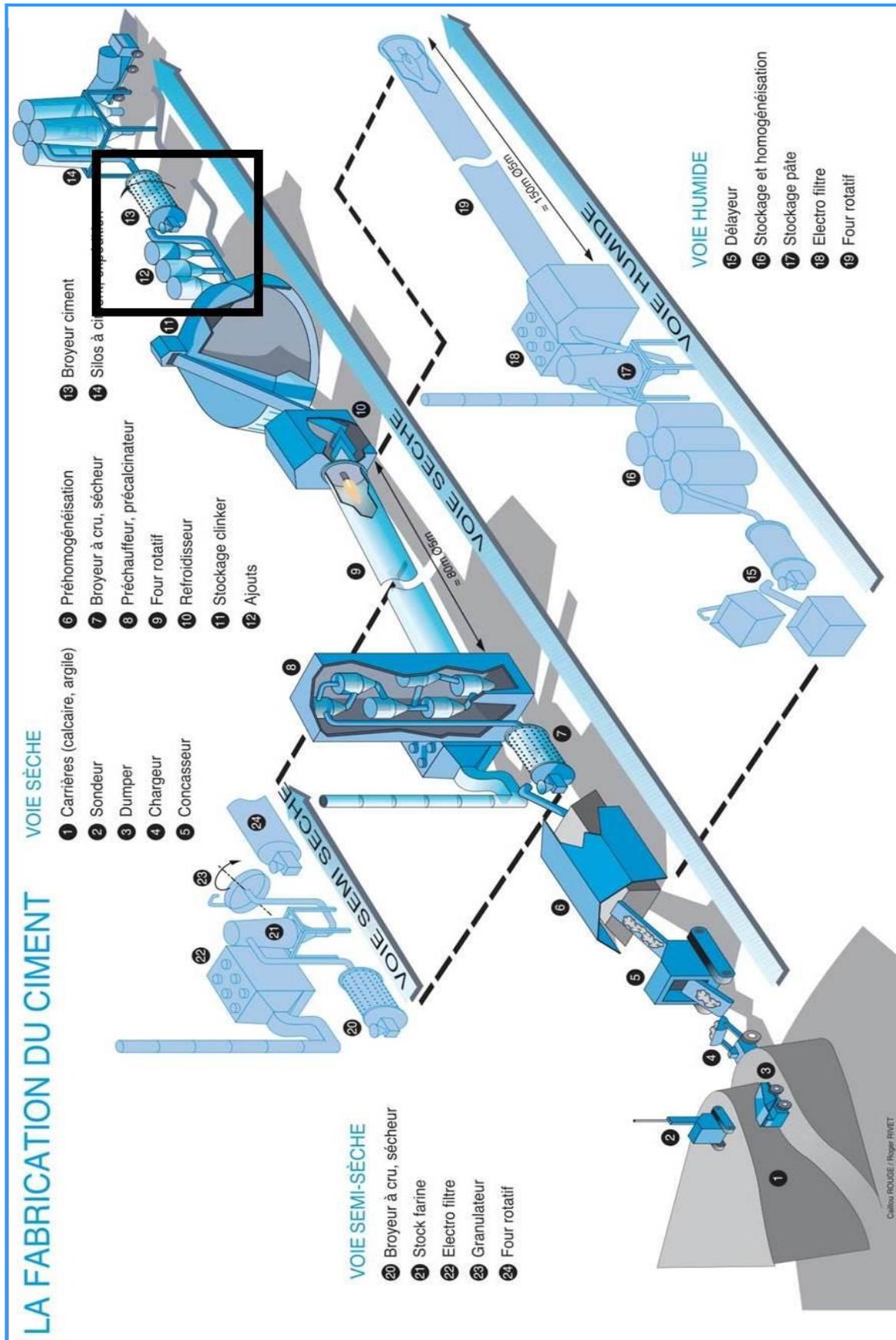


Figure II.10 : Etapes de la fabrication du ciment (boutique genie civil,guide de future ingénieur)

II.5 Différents procédés de fabrication

Dans l'industrie cimentière, autre que le procédé par voie sèche il existe autre différents procédés de fabrication du ciment (*figure II.12 et tableau II.1*). Parmi ces procédés on cite :

- Procédé par voie humide
- Procédé par voie semi-sèche
- Procédé par voie semi-humide

II.5.1 Procédé par la voie humide

C'est la méthode la plus ancienne, d'ailleurs en voie de disparition à cause de sa grande consommation d'énergie pour le séchage de la matière, il ne reste plus que quelques usines dans le monde utilisant ce procédé, à savoir une en Algérie, au Gabon, etc. Le procédé consiste à introduire la matière concassée dans un circuit de broyage humide dans lequel on ajoute jusqu'à 30 à 35 % d'eau. Le mélange obtenu sous forme de pâte est pompé dans des cuves de dosage pour être délayée puis homogénéisée par agitation mécanique combinée à un soufflage d'air comprimé dans des cuves de stockage avant d'être introduit dans le four.

II.5.2 Procédé par voie semi-humide

La pâte (obtenue d'une façon analogue au procédé d'écrit pour la voie humide) est essorée grâce à des filtres presses constitués par des séries de plateaux carrés de 1.5m de côté comprimant la pâte avec une pression 10 et 25 bars pendant 20 à 30mn. Le gâteau formé de 5 à 7cm d'épaisseur ne renferme plus que de 18 à 20% d'eau. La pâte plastique est transformée en bâtonnets lisses ou striés de 2cm de diamètre à l'aide d'une boudineuse. Ces bâtonnets sont introduits dans le four comprenant deux parties :

Une grille métallique mobile dite de décarbonatation recevant des gaz chauds du four et ou la matière subit un séchage et un début de décarbonatation ; Un four rotatif court (de 60 à 80 m de long).

II.5.3 Procédé par voie semi-sèche

La poudre obtenue comme dans le cas du procédé par voie sèche que nous allons décrire ci-dessous est agglomérée sous forme de boulettes de 10 à 20mm de diamètre à l'aide d'une assiette granulatrice de 2 à 4m de diamètre inclinée de 50° et recevant la poudre et de l'eau (12 à 14%). Ces boulettes passent dans un four constitué de deux parties : Une grille de décarbonatation et un four rotatif court.

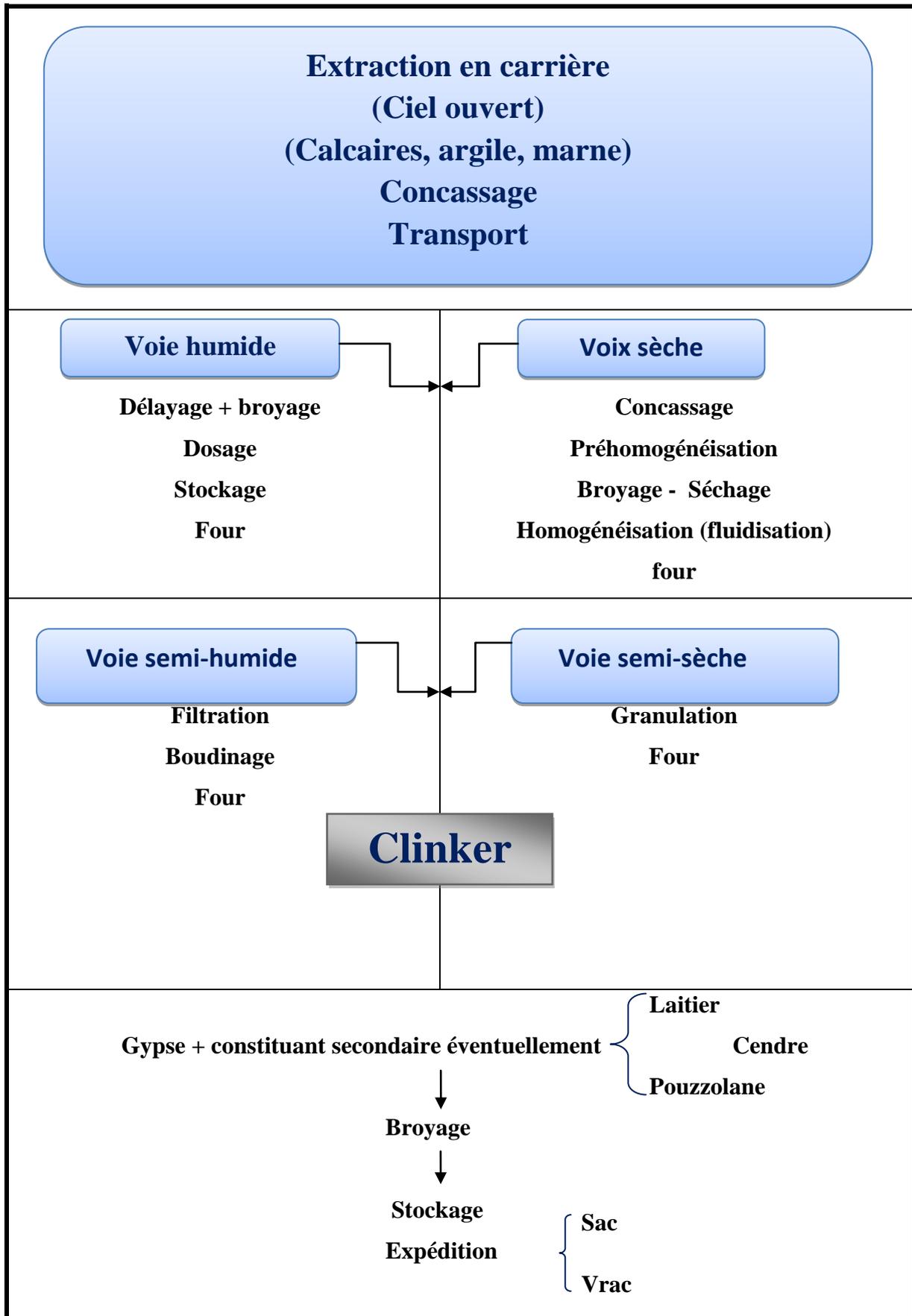


Figure II.11 : Schéma général des différentes voies de fabrication du Ciment (source : www.ineris.fr)

II.5.4 Gypse

Le gypse est un minéral qui se trouve dans la nature, et dont la formule chimique est $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. C'est une substance blanche utilisée dans la fabrication du ciment comme retardateur de prise.

Lorsque l'on chauffe le gypse à plus de 130°C , il perd à peu près les trois quarts de son eau de cristallisation en formant une substance pulvérulente appelée hémihydrate de formule $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ communément appelée plâtre.

En mélangeant le plâtre avec l'eau, les petits cristaux se dissolvent, puis se recristallisent en de longues aiguilles de $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Ces aiguilles s'entremêlent en formant une masse solide, et conservent leurs formes lors du moulage de la poussière et de l'eau.

Si on chauffe le gypse à 400°C , il se déshydrate totalement et se transforme en anhydrite CaSO_4 .

Tableau II.2 : Caractéristiques des processus de fabrication du Ciment (Smolczyk H.G. 1980)

<i>Processus</i>	<i>Avantages</i>	<i>Inconvénients</i>
<i>Sec : four à préchauffeur 0,5 à 1% d'humidité consommation calorifique 3000 à 4000 Kj/Kg de kk selon le type de préchauffeur</i>	<i>utilisation des fumées pures le séchage du cru basse consommation calorifique four court</i>	<i>exige des équipements de mélange et d'homogénéisation plus sophistiqués</i>
<i>Semi-sec : Granules avec 10 à 15% d'eau Consommation calorifique 3500 Kj/Kg De kk</i>	<i>four court peu de poussière bonne granulométrie du kk basse consommation calorifique</i>	<i>processus additionnel : granulation addition d'eau consommation calor élevée</i>
<i>Humide : Pâte avec 30 à 40% d'eau Consommation calor. 5000 à 6000 Kj/Kg de kk</i>	<i>homogénéisation facile</i>	<i>four long forte consommation d'énergie pour l'évaporation de l'eau consommation d'eau production de poussière de four</i>
<i>Semi-humide : Pâte avec 30 à 40% d'eau Gâteau filtré avec 17 à 22% d'eau Consommation calor. 4000 Kj/Kg de kk</i>	<i>homo facile four court consommation calor. Réduite peu de poussière bonne granulation du kk</i>	<i>matériau doit avoir bonne aptitude à la filtration consommation d'énergie plus forte que voie sèche processus additionnel filtrage, séchage gâteaux de pâte filtrée</i>

II.6 Oxydes composants basiques du ciment

II.6.1 Oxyde de calcium

La plupart des éléments qui entrent dans la composition du ciment sont combinés avec l'oxygène, c'est-à-dire sous forme d'oxydes. Certains oxydes sont basiques d'autres sont acides.

La combinaison du calcium avec l'oxygène donne de l'oxyde de calcium de formule chimique CaO, qu'on appelle aussi chaux.

La chaux provient de la décarbonatation du carbonate de calcium CaCO_3 , qu'on appelle aussi calcaire, selon la réaction.



L'oxyde de calcium est blanc, amorphe, cassant, avec un poids spécifique qui varie entre 3,08 et 3,30. Sa température de fusion est de 2570°C.

La chaux préparée à basse température est légère et spongieuse, raison pour laquelle elle offre une grande surface à l'action de l'eau. Son hydratation se réalise rapidement.

II.6.2 Hydroxyde de calcium

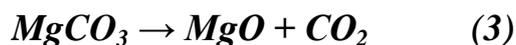
L'hydroxyde de calcium est le produit résultant de l'hydratation de l'oxyde de calcium selon la réaction :



Dans le clinker, on ne le trouve pas. Il est normalement produit en très petite quantité pendant le broyage du ciment par l'action de l'eau injectée dans le broyeur et par l'humidité du gypse.

II.6.3 Oxyde de magnésium

L'oxyde de magnésium ou magnésie est, en général, inclus dans le ciment Portland en petites quantités. Il provient de la décarbonatation du carbonate de magnésium selon :



Il peut aussi provenir des argiles qu'on utilise comme matière première. Sa température de fusion est de 2800°C.

II.6.4 Oxyde de silicium

L'oxyde de silicium ou silice, le plus abondant des minéraux est inclus dans le groupe des silicates, parmi lesquelles se trouvent les argiles.

Chimiquement, la silice est un corps inerte à la température ambiante, mais il réagit vivement avec les bases quand il est fortement chauffé. Une température élevée le fait réagir comme un oxyde acide capable de se combiner avec les bases pour former des silicates.

Si on réduit le quartz en poussière impalpable par un procédé de broyage prolongé, il devient si actif qu'il peut se transformer en acide silicique hydraté colloïdal, seulement en l'introduisant dans de l'eau à la température d'ébullition (100°C). On en déduit l'importance capitale qu'à la finesse du cru dans le procédé de cuisson.

II.6.5 Oxyde d'aluminium

L'oxyde d'aluminium, ou alumine, se trouve dans la nature à l'état de corindon. L'alumine a une température de fusion de 2040°C.

L'alumine quand elle est combinée, est un important composant du ciment, en se comporte comme un acide dans certains cas. Elle apparaît avec la silice dans les argiles, on peut alors la considérer comme une base. Elle se trouve aussi libre sous forme hydratée, dans la bauxite.

II.6.6 Oxyde ferrique

L'oxyde de fer se trouve en quantité très faible dans le ciment. Il provient du schiste ou des argiles. Ses caractéristiques sont semblables à celle de l'alumine, il agit dans ciments comme un radical acide, puisqu'il se combine avec les bases existantes, principalement la chaux.

Notes complémentaires :

Les principaux oxydes qui entrent dans la composition du ciment portland sont :

- Oxyde de calcium ou chaux CaO
- Oxyde de silicium ou silice SiO_2
- Oxyde d'aluminium ou alumine Al_2O_3
- Oxyde de fer Fe_2O_3

II.7 Effets de ces oxydes sur les propriétés des ciments

Le contenu en chaux des ciments varie entre 58 et 67%. Les ciments à haute teneur en chaux sont de prise lente et de durcissement rapide, offrant de fortes résistances. Les ciments à basse teneur en chaux sont de prise rapide, qu'il n'est pas toujours possible de corriger en

ajoutant la quantité de gypse correspondante. Ainsi, pour éviter ou corriger la prise rapide du ciment, il suffit d'élever son contenu en chaux.

Le contenu en silice varie entre 19 et 25%. Les ciments à haute teneur en silice sont de prise lente et offrent une grande résistance à la traction, mais il leur faut une température de cuisson élevée.

Le contenu de l'alumine varie entre 4 et 10%. Quand la teneur en alumine augmente, plus rapide est la prise du ciment, et, pour cela, un ciment a généralement 2,5 fois plus de silice que d'alumine.

II.8 Concept de carbonate

Il est de nos jours, possible d'obtenir rapidement, avec des techniques modernes de fluorescence et de rayons X, des analyses complètes de matières premières, de crus et de clinkers. Ceci a contribué à ce que le contrôle du dosage des crus, qui, jusqu'à présent, était fait par la détermination du titre en carbonate, ait moins d'importance, bien qu'il existe encore des usines à ciment qui continuent d'utiliser ce genre de contrôle. Si on ne dispose pas de moyens rapides d'analyse complète, on contrôle approximativement le dosage du cru au moyen du dosage des carbonates RCO_3 . Le fait d'avoir choisi ce type de dosage est dû au fait qu'il est le composé dont la teneur est la plus élevée dans le cru, et que sa détermination est simple et rapide.

On appelle RCO_3 la somme des carbonates de calcium et de magnésium présent dans le cru ($\text{RCO}_3 = \text{CaCO}_3 + \text{MgCO}_3$) exprimée sous forme de CaCO_3 tout en faisant abstraction de MgCO_3 (Cloutier, V. 2004).

Il est évident qu'avec ce genre de contrôle, on ne peut pas garantir que l'on obtiendra les consignes de qualité fixées d'une façon régulière, puisque l'on ne fait que fixer le carbonate qui correspond, par exemple à un standard de chaux SK déterminé à travers l'analyse complète du cru.

Mais il est fréquent que les proportions de CaCO_3 et de MgCO_3 , présents dans les matières premières formant le cru, varient, et bien que le RCO_3 se maintienne constant, le SK varie.

Exemple : Prenons un cru avec des teneurs de 75% en CaCO_3 et 2% en MgCO_3 .

Le RCO_3 sera alors de $75\% + 2\% = 77\%$, mais nous savons que le seul élément qui intervient dans le calcul du SK, est le CaO et non pas le MgO (Cloutier, V. 2004).

Dans ce cas, la quantité de CaO présente dans 77% de RCO_3 est de :

$$CaO = \frac{75}{56} * 100 = 42\%$$

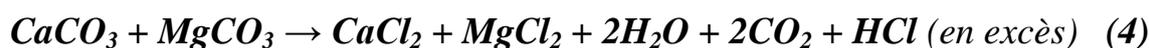
Mais, comme la variation de la composition dans les matières premières peut transformer ces 77% de RCO_3 en 74% de $CaCO_3$ + 3% de $MgCO_3$, la quantité de CaO sera alors de :

$$CaO = \frac{74}{56} * 100 = 41\%$$

Comme on peut observer, bien que dans les deux cas RCO_3 soit égal à 77%, la quantité de CaO a varié donc celle de SK aussi.

Le fait que, lorsque l'on parle de RCO_3 , il s'agisse de $CaCO_3$ + $MgCO_3$ est dû à ce que le dosage se fait par attaque de l'acide chlorhydrique HCl, en excès et neutralisation par NaOH. Ces deux réactifs ont des concentrations connues.

La réaction chimique qui se produit est :



Le HCl en excès est titré par NaOH, et de cette façon, le seul élément connu est la quantité de HCl qui a réagi avec les deux carbonates, sans pouvoir évaluer leurs quantités séparément.

II.9 Degré de saturation en chaux

II.9.1 Calcul de la teneur en CaO

Le CaO est un élément principal dans la composition du ciment, c'est pourquoi il est impératif de déterminer la quantité nécessaire pour que tous les autres oxydes puissent réagir et se combiner. Cette limite est atteinte lorsque ces oxydes sont sous forme composée avec la teneur la plus élevée en chaux.

En partant de la base incorrecte que SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 se combinent avec la chaux avec la même affinité, et en considérant que les composés de base qui vont se former pendant le processus de clinkérisation contiennent :

- 2,8 parts de CaO pour une molécule de SiO_2
- 1,1 part de CaO pour une molécule de Al_2O_3
- 0,7 part de CaO pour une molécule de Fe_2O_3

Il en résulte que les composés qui se forment, ressemblent à la composition que donneraient les phases formée par C_3S , C_2S , C_2A , C_2F qui sont prises ici comme base de

calcul pour expliquer le processus de façon simple, sans avoir recours à l'étude, assez complexe des diagrammes d'équilibre des phases.

$$\text{CaO combinée avec SiO}_2 \text{ pour former : } C_3S = \frac{168}{60} = 2.8$$

$$\text{CaO combinée avec Al}_2\text{O}_3 \text{ pour former } C_2S = \frac{112}{102} = 1.1$$

$$\text{CaO combinée avec Fe}_2\text{O}_3 \text{ pour former } C_2F = \frac{112}{160} = 0.7$$

À partir de ces relations H. Kuhl calcula la teneur maximum de CaO qui peut se combiner selon la formule :

$$\text{La teneur max de CaO} = 2,8 \text{ SiO}_2 + 1,1 \text{ Al}_2\text{O}_3 + 0,7 \text{ Fe}_2\text{O}_3$$

II.9.1.1 Concept de standard de chaux

On donne le nom de standard de chaux SK à la relation entre la chaux totale et la chaux maximum nécessaire pour saturer les éléments acides en présence dans le cru, exprimés en pourcentage et elle s'exprime de la façon suivante :

$$SK = \frac{CaO}{CaO \text{ max}} * 100 = \frac{CaO * 100}{2.8 SiO_2 + 1.1 Al_2O_3 + 0.7 Fe_2O_3}$$

Les composés qui se forment normalement pendant la clinkérisation, peuvent varier, et de ce fait il varie, en fonctions de nombreux facteurs, mais l'application de cette formule pour le dosage des crus fournit des résultats satisfaisants pour la pratique industrielle.

II.9.1.2 Degré de saturation

L'application de cette formule au clinker ou au ciment comporte des modifications, c'est pourquoi on doit soustraire la chaux non combinée (chaux libre) et celle qui correspond au SO₃, au contenu total de chaux, tout en supposant que le SO₃ est sous forme de CaSO₄.

D'autre part on enlève à la quantité de silice les résidus insolubles (RI) et on obtient la formule :

$$GS = \frac{CaO - (CaO \text{ libre} + 0.7 SO_3)}{2.8 (SiO_2 - RI) + 1.1 Al_2O_3 + 0.7 Fe_2O_3}$$

L'application de la première formule nous donne le degré de saturation potentiel, tandis que la deuxième nous donne le degré réel

II.10 Calcul du degré de saturation

La teneur limite en CaO fut aussi étudiée par Lea et Parker, lesquels considéraient qu'à la température de clinkérisation, les composés étaient donnés par C_3S , C_4AF et un mélange de CaO - C_3S - C_3A . Les compositions de ces trois éléments sont :

	<u>CaO</u>	<u>Al₂O₃</u>	<u>SiO₂</u>	<u>Fe₂O₃</u>
<u>3CaO.SiO₂</u>	73,7	/	26,3	/
<u>CaO- C₃S - C₃A</u>	59,7	32,8	7,5	/
<u>C₄AF</u>	46,1	21,0	/	32,9

Une fois connues les compositions des trois éléments considérés, on peut, au moyen d'un système d'équations, calculer les coefficients de multiplication pour SiO_2 , Al_2O_3 et Fe_2O_3 , en vue d'obtenir la teneur maximale de chaux nécessaire pour saturer les éléments acides.

L'équation de base est :

$$CaO \text{ max} = x SiO_2 + y Al_2O_3 + z Fe_2O_3$$

Le système d'équation sera donc :

$$73,7 = x \cdot 26,3$$

$$59,7 = x \cdot 7,5 + y \cdot 32,8$$

$$46,1 = y \cdot 21,0 + z \cdot 32,9$$

Dans la première équation on tire

$$2,8 x = \frac{73,7}{26,3} = 2,8$$

Dans la deuxième équation, on remplace x par sa valeur et on tire y

$$59,7 = 2,8 \cdot 7,5 + y \cdot 32,8 \leftrightarrow y = \frac{38,7}{32,8} = 1,18$$

Dans la troisième équation, on remplace y par sa valeur et on tire z

$$46,1 = 1,18 \cdot 21,0 + z \cdot 32,9 \leftrightarrow z = 0,65$$

En remplaçant les inconnues par leur valeur dans la première équation on obtient :

$$CaO \text{ max.} = 2,8 \cdot SiO_2 + 1,18 \cdot Al_2O_3 + 0,65 \cdot Fe_2O_3$$

Cette formule nous donne la teneur maximum de chaux nécessaire pour la combinaison des éléments acides.

II.10.1 Conséquence des variations du degré de saturation

On remarque que la formule employée par H. Kuhl diffère légèrement de celle employée par Lea et Parker en ce qui concerne les facteurs de multiplication de Al_2O_3 et de Fe_2O_3 .

L'emploi de l'une ou l'autre de ces formules donne des résultats satisfaisants en les utilisant comme base de calcul pour le dosage des crus, dans la pratique industrielle.

En désignant respectivement par x, y, et z les facteurs de multiplication de SiO_2 , Al_2O_3 , et Fe_2O_3 , selon la formule de H.Kuhl et Lea et Parker, le standard de chaux maximum théorique que l'on peut fixer est de 100%.

$$SK_{max} = \frac{\%CaO \cdot 100}{x\% \cdot SiO_2 + y\% \cdot Al_2O_3 + z\% \cdot Fe_2O_3}$$

$$x = \frac{73.7}{26.3} = 2.8$$

Dans la deuxième équation, on remplace x par sa valeur et on tire y :

$$59,7 = 2,8 \cdot 7,5 + y \cdot 32,8$$

$$y = \frac{38.7}{32.8} = 1.18$$

Dans la troisième équation, on remplace y par sa valeur et on tire z :

$$46,1 = 1,18 \cdot 21,0 + z \cdot 39,2$$

$$z = \frac{21.32}{32.9} = 0.65$$

En remplaçant les inconnues par leur valeur dans la première équation on obtient :

$$CaO_{max} = 2,8 \cdot SiO_2 + 1,18 \cdot Al_2O_3 + 0,65 \cdot Fe_2O_3$$

Cette formule nous donne la teneur maximum de chaux nécessaire pour la combinaison des éléments acides.

II.10.2 Conséquence des variations du degré de saturation

On remarque que la formule employée par H. Kuhl diffère légèrement de celle employée par Lea et Parker en ce qui concerne les facteurs de multiplication de Al_2O_3 et de Fe_2O_3 .

L'emploi de l'une ou l'autre de ces formules donne des résultats satisfaisants en les utilisant comme base de calcul pour le dosage des crus, dans la pratique industrielle.

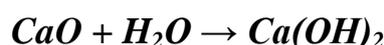
En désignant respectivement par x , y , et z les facteurs de multiplication de SiO_2 , Al_2O_3 , et Fe_2O_3 , selon la formule de H.Kuhl ou Lea et Parker, le standard de chaux maximum théorique que l'on peut fixer est de 100%.

$$SK_{max} = \frac{\%CaO \cdot 100}{x\% \cdot SiO_2 + y\% \cdot Al_2O_3 + z\% \cdot Fe_2O_3} = 100\%$$

Dans la pratique industrielle, il est très difficile d'obtenir des clinkers sans chaux libre avec le standard de chaux du cru de 100%, raison pour laquelle on le fixe généralement entre 94 et 98%.

Il est évident que plus le SK d'un cru est proche de 100%, si on obtient par la suite un clinker à faible teneur en chaux libre (moins de 2%) meilleure sera sa qualité puisque les composants basiques seront formés.

Un cru dont le SK est supérieur à 100% produira un clinker avec une teneur importante en chaux libre, parce que les éléments acides seront saturés, et en s'hydratant il provoquera une expansion



Plus le SK d'un cru, sera en dessous de 100%, pire sera la qualité du clinker obtenu, puisque les composés basiques n'auront pu se former par manque de chaux.

II.11 Dosage du cru

II.11.1 Choix des matières premières

Les matières premières utilisées pour le dosage du ciment sont choisies en fonction de

- Leur prix,
- Leur qualité,
- Les consignes de marche (SK, MS, MF),
- Pourcentage d'éléments perturbateurs ou nocifs pour le processus, tels que K_2O , Na_2O , SO_3 , MgO ...

II.11.2 Composants

On peut dire, en principe, que le dosage d'un cru peut-être effectué à l'aide d'autant de composants que l'on veut, pourvu que ceux-ci soient compatibles entre eux afin de satisfaire aux consignes fixées au préalable. Quand le dosage s'effectue avec un petit nombre, la condition de compatibilité s'évalue à vue d'œil, en tenant compte de leur composition chimique ; cependant, quand on dose plus de trois composants, il est nécessaire de poser les équations correspondantes et de déterminer leur compatibilité par calcul.

II.11.3 Calcul du mélange cru

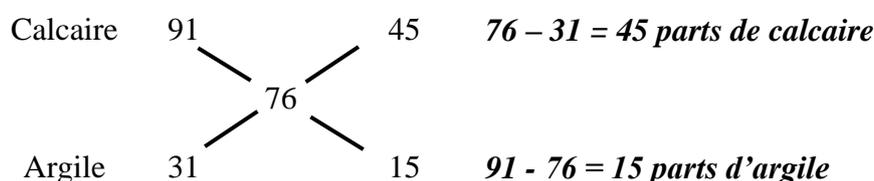
Les méthodes de calcul du mélange cru sont nombreuses, de la plus simple à la plus compliquée, selon le nombre de matières premières en présence dans le cru.

La méthode croisée : Le calcul du mélange par la méthode croisée est le plus simple. Généralement, on l'utilise quand on est en présence de deux matières premières.

Il met en évidence les teneurs en carbonates des deux matières.

Exemples : Soit un calcaire titrant 91% de $CaCO_3$ et une argile contenant 31% de $CaCO_3$

Quelles sont les proportions de chaque matière pour avoir un mélange titrant 76% de $CaCO_3$



II.12 Obtention de la composition théorique du clinker

Lorsque l'on a l'analyse complète d'un cru et que l'on désire connaître l'analyse du clinker qu'on obtiendra postérieurement, pour, par exemple, calculer la composition potentielle, il faut recourir au calcul théorique de la façon suivante :

Pour obtenir théoriquement du clinker, nous avons, en premier lieu, cherché la perte au feu du cru. Nous savons que la perte au feu d'un cru est produite par la décomposition des carbonates de calcium et du magnésium et par l'évaporation de l'eau contenue dans les composants minéraux.

On sait aussi que lorsqu'un cru est clinkérisé à haute température, sa perte au feu théorique devrait être égale à zéro, puisque les composés volatiles auront disparu.

Exemple : Pour 100g de cru, on obtient 100 – PF g de clinker.

Un cru moyen pour ciment a une perte au feu de 35,5

$$\frac{100}{100 - 35.5} = 1.55$$

Pour obtenir les différents éléments du clinker, on multiplie la valeur de l'élément correspondant du cru par le facteur.

Ce type de calcul sert pour donner une idée assez approximative du linker que nous allons obtenir en partant d'un cru déterminé, mais ne doit pas être pris comme rigoureusement exact, puisque dans la pratique, il existe des ségrégations causées principalement par :

- Entraînement des poussières à travers de la cheminée ou des électrofiltres
- Volatilisation des sulfates ou alcalis

Ceci fait qu'entre le clinker obtenu par calcul théorique et la réalité, il y a une légère différence (Tableau II.3).

Tableau II.3 : Composition chimique théorique du Clinker

<i>Elément</i>	<i>Analyse du cru (%)</i>	<i>Analyse théorique du clinker (%)</i>	
<i>TiO₂</i>	0.15	x 1.55039	0.23
<i>SiO₂</i>	13.80	x 1.55039	21.40
<i>Al₂O₃</i>	3.51	x 1.55039	5.44
<i>Fe₂</i>	2.51	x 1.55039	3.90
<i>CaO</i>	42.50	x 1.55039	65.88
<i>MgO</i>	1.00	x 1.55039	1.55
<i>SO₃</i>	0.03	x 1.55039	0.05
<i>K₂O</i>	0.80	x 1.55039	1.24
<i>Na₂O</i>	0.20	x 1.55039	0.31
<i>PF</i>	35.50		
Total	100 %		100 %

II.13 Conclusion

Les systèmes industriels de production cimentière sont caractérisés par une complexité importante. La fabrication du ciment nécessite un colossal apport de calcaire, qui est extrait des carrières calcaires. Après concassage et homogénéisation de ce dernier avec l'argile et d'autres matières premières, la première étape de la fabrication est la calcination du carbonate de calcium, qui est suivie de la cuisson de l'oxyde de calcium ainsi produit, avec de la silice, de l'alumine et de l'oxyde de fer, à des températures élevées pour former le clinker. Le clinker obtenu est ensuite broyé, après ajout de gypse et d'autres constituants comme le laitier et la pouzzolane, pour donner le ciment final sous forme de poudre.

La clinkérisation a lieu dans un four rotatif, celui-ci pouvant faire partie d'un système de cuisson du type à four long en voie humide ou sèche, d'un système à four et préchauffeur à grille en voie semi-humide ou semi-sèche, d'un système à four avec préchauffage en cyclones ou d'un système à four avec préchauffeur/précalcinateur. On considère que la meilleure technique disponible pour la production du clinker est le four en voie sèche avec multi-cyclones et précalcination. Dont celle utilisée à la Cimenterie de Hadjar-Soud est la méthode par la voie sèche.

La plupart des éléments qui entrent dans la composition du ciment sont combinés avec l'oxygène, c'est-à-dire sous forme d'oxydes. Certains oxydes sont basiques d'autres sont acides. Le contenu en chaux des ciments varie entre 58 et 67%. Les ciments à haute teneur en chaux sont de prise lente et de durcissement rapide, offrant de fortes résistances. Les ciments à basse teneur en chaux sont de prise rapide, qu'il n'est pas toujours possible de corriger en ajoutant la quantité de gypse correspondante.

Le contenu en silice varie entre 19 et 25%. Les ciments à haute teneur en silice sont de prise lente et offrent une grande résistance à la traction, mais il leur faut une température de cuisson élevée. Le contenu de l'alumine varie entre 4 et 10%.

Le chapitre III est consacré à la caractérisation du laitier HF d'El-Hadjar, ainsi les matières premières et clinker obtenu à base du laitier.

III. Chapitre III : Matériels et méthodes ; Caractérisation des matières premières et techniques expérimentales

III.1 Introduction

Dans ce chapitre, le but visé est d'étudier le comportement du laitier de haut fourneau comme substituant du sable dans le mélange des matières premières naturelles, et sur le taux d'émission de CO₂. Un ciment qui est composé principalement, de laitier de haut fourneau et de ciment Portland, a été commercialisé en Chine depuis plus de 20 ans, et utilise environ 40% de la production totale de *scories* d'acier, ce type de ciment présente les avantages d'un coût, résistance à l'abrasion plus élevée, une baisse de l'évolution de la chaleur d'hydratation et plus tard le développement de force, mais l'inconvénient est que le temps de prise plus long et la résistance initiale plus faible, aussi la teneur en CaO des scories d'acier peut provoquer des problèmes d'expansion du volume.

Dans le haut fourneau, en plus du minerai de fer et du coke, on introduit un fondant, généralement à base de chaux, pour abaisser le point de fusion de la gangue et permettre ainsi au minerai de s'extraire à une température de 1400°C à 1500°C.

Les oxydes de la charge non transformés en métal constituent le laitier, il est évacué de haut fourneau à l'état liquide à la température de fusion de la gangue surnageant la fonte par différence de densité. Selon le procédé de refroidissement correspondant, on obtient deux types de laitier ; le laitier granulé (vitrifié) lors de refroidissement brusque (cas étudié) et le laitier rocheux (cristallisé) résultent de refroidissement lente.

Alors, le laitier est un sous-produit issu de la transformation du fer en acier, Il présente des différences de la composition chimique selon les matières premières et le processus. Cinquante millions de tonnes/an de scories d'acier sont produits comme déchet industriel dans le monde, actuellement ; les cimenteries utilisent le laitier comme ajout avec le gypse dans le ciment après cuisson, afin d'améliorer d'une part les caractéristiques du ciment, et d'autre part d'augmenter la production en produit cimentiers.

Selon le Global Carbon Project, 36 milliards de tonnes de CO₂ ont été émises dans l'atmosphère en 2013, à cause de la combustion des ressources fossiles (pétrole, gaz, charbon) et les cimenteries. Pour l'industrie production du ciment 0,7Mt CO₂/an pour une cimenterie-type produisant 1 000 000 t/an (0,7t CO₂ par tonne de ciment), l'évaluation des divers impacts sur l'environnement révèle que la combustion du gaz naturel (CH₄) contribue à la cuisson de

la farine au four rotatif, ainsi la phase de décarbonatation du calcaire a une part importante au réchauffement climatique par formation des gaz effet de serre (GES).

Les essais de préparation et de dosage pour la production du clinker, sont réalisés dans les laboratoires suivants :

- Laboratoire de valorisation des Ressources minières et environnement (LAVAMINE) de l'université Badji-Mokhtar – Annaba ;
- Laboratoire de préparation Analyses Chimiques et mécaniques de la cimenterie Hadjar-Soud (Skikda);
- Laboratoire des ressources minérales et environnement "diffraction des rayons x" à l'Université El-Manar, Tunis, Tunisie ;
- Laboratoire de métallurgie et génie des matériaux, université d'Annaba.

III.2 Méthodes et Caractérisation des matières premières

Pour produire un clinker adéquat a base du laitier ; une série des opérations et procédures doit être réalisés, tel que la prise d'échantillons des matières premiers (Calcaire ; Laitier ; Argile et le minerai de fer), le dosage et la préparation de la farine crue ; Vérification la qualité de la farine obtenue ; la cuisson du mélange dans un four à 1450°C (la Clinkérisation) et finalement la caractérisation du clinker obtenue à base du laitier, et finalement la simulation du taux d'émission de CO₂ avec le logiciel GEMIS.

Les opérations réalisé durant ce chapitre ; sont mentionnées dans la figure III.1.

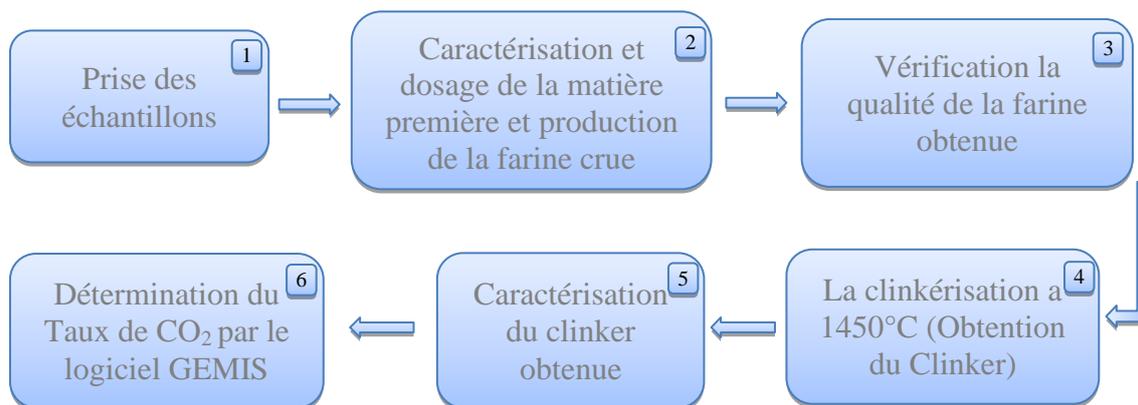


Figure III.1 : Organigramme de différentes étapes pour de travail

III.3 Echantillonnage des matières premières

Les échantillons représentatifs des essais pour la production du clinker à base de laitier, sont fournis par la cimenterie de Hadjar-Soud. L'usine est équipée par un analyseur sondeur des matières premières, mais actuellement il est en arrêt. Alors le prélèvement sur chantier du calcaire, l'argile et le minerais du fer a été effectué manuellement, et directement sur le tapis transporteur, tandis que le laitier a été prélevé sur tas (laitier stocké à l'extérieur de l'usine).

La masse des échantillons est ensuite réduite par la méthode de quartage pour être analysé et dosé au laboratoire.

III.4 Analyse chimique des matières premières

III.4.1 Détermination de la composition chimique par le FRX

La spectrométrie de fluorescence X (FX, ou XRF pour X-ray fluorescence) est une technique permettant l'analyse élémentaire, c.-à-d. que l'on peut savoir quelle quantité on a de tel ou tel atome, mais on ne sait pas sous quelle forme chimique. Cette technique utilise des phénomènes physiques qui ont été découverts et développés dans le domaine de la physique quantique (effet photoélectrique, émission spontanée, diffraction des rayons X).

Cette technique permet de quantifier des échantillons très variés : minéraux, métaux, huiles, eau, ciments, polymères, verres... Cependant, elle ne peut pas mesurer les éléments légers (faible numéro atomique Z) : la mesure de l'hydrogène H, du lithium Li et du béryllium Be est impossible, celle du bore B, du carbone C, de l'azote N, de l'oxygène O et du fluor F est délicate.

Globalement, on place l'échantillon à analyser sous un faisceau de rayons X. Sous l'effet des rayons X, l'échantillon «entre en résonance» et réémet lui-même des rayons X qui lui sont propres - c'est la fluorescence. Si l'on regarde le spectre en énergie des rayons X fluorescents, on voit des pics caractéristiques des éléments présents (*figure III.2*), on sait donc quels éléments on a, et la hauteur des pics permet de déterminer en quelle quantité.

Un des grands problèmes de cette technique est la prise en compte des «effets de matrice». En effet, plusieurs échantillons contenant la même quantité d'aluminium Al (par exemple) ne donneront pas le même signal, car l'environnement des atomes d'Al (la matrice) absorbe plus ou moins le signal, ou bien peut au contraire amplifier ce signal. Il faut donc utiliser des algorithmes informatiques basés sur les phénomènes physiques pour pouvoir calculer les concentrations.

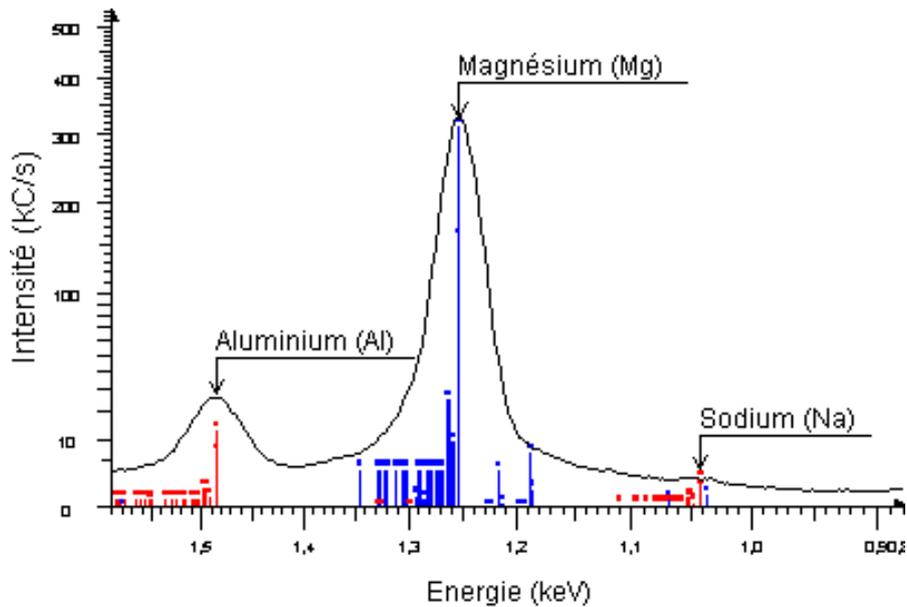


Figure III.2 : Exemple d'un spectre en énergie du rayonnement fluorescent d'un échantillon (source : deuns.chez.com/sciences)

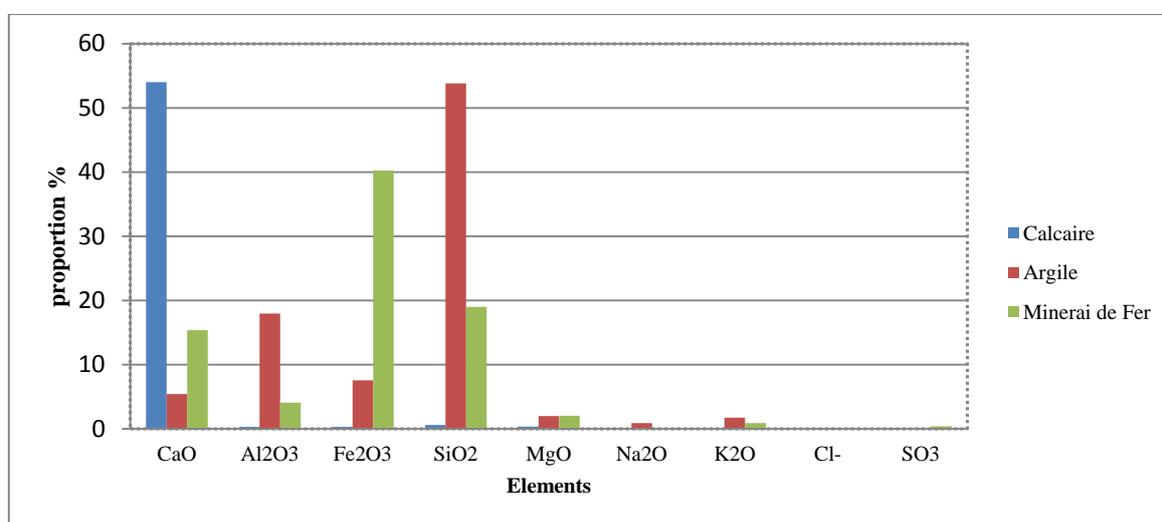
L'idée de la technique en elle-même date de 1912 (Henry Moseley), mais il a fallu attendre les années 1950 pour avoir les premiers spectromètres commerciaux. Par ailleurs, il fallut attendre les années 1980 pour avoir des logiciels d'exploitation des résultats permettant de prendre en compte de manière exacte les effets de matrice ; les équations sont connues depuis 1955 (J. Sherman), mais il manquait les algorithmes d'optimisation et la puissance de calcul informatique.

Entre temps, des méthodes de correction dites « empiriques » des effets de matrice ont été développées, mais elles ne sont valables que pour des gammes d'étalonnage restreintes, c-à-d. si tous les échantillons sont à peu près semblables. Les méthodes empiriques n'ont normalement plus de raisons d'être. Mais par habitude, et aussi parce qu'elles sont parfois plus simples, on continue à les utiliser bien qu'elles soient d'une précision parfois douteuse.

L'usine de Hadjar-Soud est équipée d'un appareil de fluorescence des rayons X de type Bruker AXS S8 LION. Le calcaire utilisé dans l'usine est caractérisée par un calcaire pur et homogène. Pour la préparation de la farine crue, les trois matières premières (Calcaire, argile et fer), sont pulvérisées à l'aide d'un pulvérisateur de type Seibtechnik, et séchées dans un four à 110°C pendant 30min. ensuite les échantillons sont subis un analyse chimique par le FRX, les résultats obtenues sont mentionnées dans le tableau III.1 et la figure III.3.

Tableau III.1 : Résultats des analyses chimiques des matières premières par fluorescence X

<i>Elément</i>	<i>Calcaire</i>	<i>Argile</i>	<i>Fer</i>
CaO	54	5,44	15,36
Al₂O₃	0,32	17,94	4,11
Fe₂O₃	0,29	7,57	40,26
SiO₂	0,61	53,8	19
MgO	0,36	2,01	2,07
Na₂O	0,07	0,89	0
K₂O	0,03	1,75	0,9
Cl⁻	0	0,013	0
SO₃	0	0,02	0,4

**Figure III.3 : Histogramme de la teneur en éléments chimiques**

D'après les résultats obtenus lors des analyses par le FRX, les teneurs en éléments chimiques indique de grandes variations dans les valeurs de CaO, Al₂O₃, Fe₂O₃ et le SiO₂ dans les trois matériaux analysés. La présence des éléments nuisible ; est relativement faible et se traduit par une valeur moyenne inférieure à 2% pour le MgO et 0.11% pour le SO₃. La somme des alcalis est de 3% ; elle présente une valeur admissible par les normes industrielles, le chlore signale une moyenne de 0.013%.

III.4.2 Caractérisation physique, chimiques et minéralogiques du laitier utilisé

Le laitier de haut fourneau d'El-Hadjar, est avant tout un sous-produit du processus d'élaboration de la fonte, sa composition chimique est ajustée de façon à lui permettre d'avoir une bonne fluidité à la température d'élaboration de la fonte et d'éliminer une partie des éléments nuisible à la marche de haut fourneau et à la qualité de la fonte.

Le laitier granulé se présente sous forme d'un gros sable de granulométrie étalé (*figure III.4*), et un module de finesse voisin de 3, la masse volumique apparente peut varier de 900 à 1000 kg/m³ et sa masse volumique absolue de 2800 à 3000 kg/m³.



Figure III.4 : Le laitier granulé vitrifié de haut fourneau de HADJAR SOUD

III.4.2.1 Composition granulométrique du laitier d'El-Hadjar

Pour étudier la composition granulométrique du laitier ; un échantillon de 400g de ce matériau a été pris, le matériau séché à l'étuve à une température maximale de 105°C pendant 30min. les tamis utilisé pour l'essai correspond respectivement les mailles suivantes : 1 mm ; 0,5 mm ; 0,250 mm ; 0,125 mm ; 0,063 mm ; 0,045 mm et le tamis plat. Le matériau étudié est versé en haut de la colonne de tamiseuse électrique (*figure III.6*), le temps de tamisage est égale à 30 min avec une amplitude de vibration égale à 60. L'analyse granulométrique s'effectuée au niveau de laboratoire de valorisation des ressources minières et environnement (*LAVAMINE*) de l'université de Badji Mokhtar Annaba. Les résultats de l'analyse sont représentés dans le (*Tableau III.2*).

Tableau III.2 : Analyse granulométrique sur tamiseuse Retsch

Tranche granulométrique	Pondérale (g)	Pondérale (%)	Le cumule des refus (%)	Le cumule des passants (%)
+1	147.18	36,86	36.86	100,00
-1 +0.5	156.49	39,20	76.06	63,14
-0.5 +0.250	57.53	14,41	90.47	23,94
-0.250 +0.125	19.07	4,78	95.24	9,53
-0.125 +0.063	9.59	2,40	97.64	4,76
-0.063 +0.045	3.13	0,78	98.43	2,35
-0.045 +0	6.26	1,57	100	1,57
Total	399.25			

La courbe granulométrique de l'échantillon du laitier granulé (figure III.5) ; montre une distribution des particules dans les tranches granulométriques d'une manière irrégulière, produit présente deux populations de particules de tailles respectivement comprises dans des intervalles de +1 à une proportion de 36.86% et dans l'intervalle de -1 +0.5mm a une proportion de 39.20%.

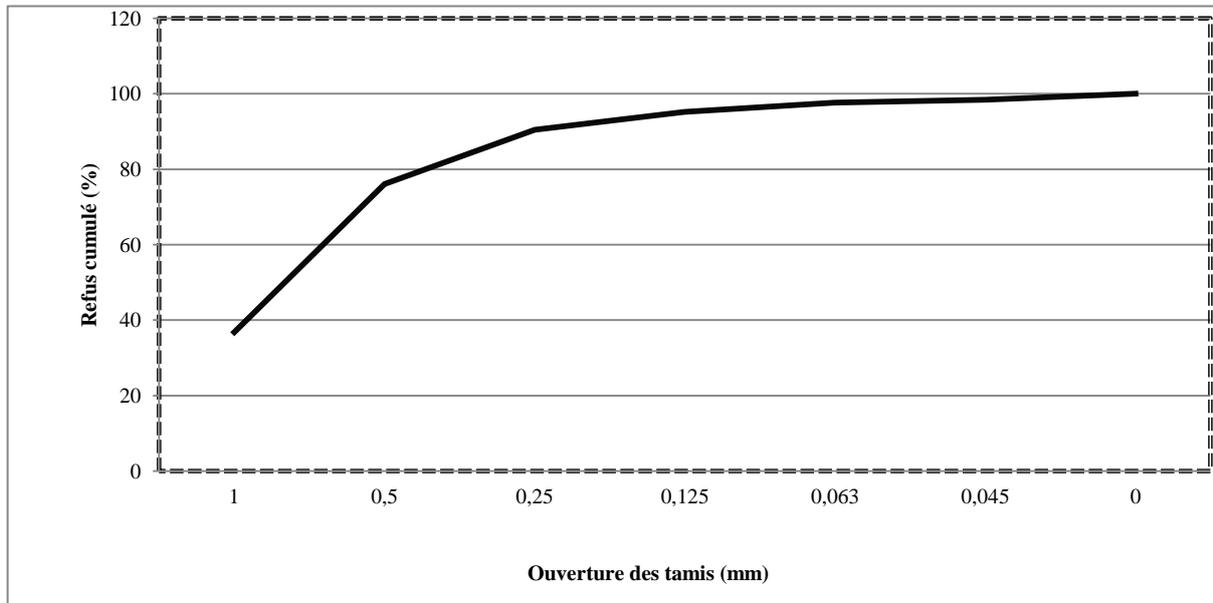


Figure III.5 : Courbe granulométrique de l'échantillon de laitier



Figure III.6 : Tamiseuse pour les analyses granulométriques (LAVAMINE)

III.4.2.2 Analyse chimique et minéralogique du laitier

La composition chimique du laitier peut varier dans de larges limites, suivant la pureté du minerai, la nature et la quantité des fondants, la nature du combustible et les procédés employés. Les résultats de l'analyse chimique présentés dans le tableau III.3, montrent que le laitier est constitué de 95 à 98 % d'un mélange de quatre oxydes : La silice SiO_2 , La chaux CaO , L'alumine Al_2O_3 et La magnésie MgO ; Le complément est constitué des oxydes secondaires tels que FeO , MnO et les composés sulfurés. La composition minéralogique est déterminée par DRX (*figure III.9 et III.10*), les résultats obtenus sont illustrés dans la figure III.7, ils sont des constituants cristallisés, étant essentiellement des silicates ou des silico-aluminates de chaux. Entre autre, on rencontre aussi des oxydes, des sulfures, et exceptionnellement des nitrures.

Tableau III.3 : Analyses chimiques de laitier étudié

Elément	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	Cl	SO ₃
Quantité %	34.04	6.61	4.46	32.89	8.08	0.42	6.67	-	0.42

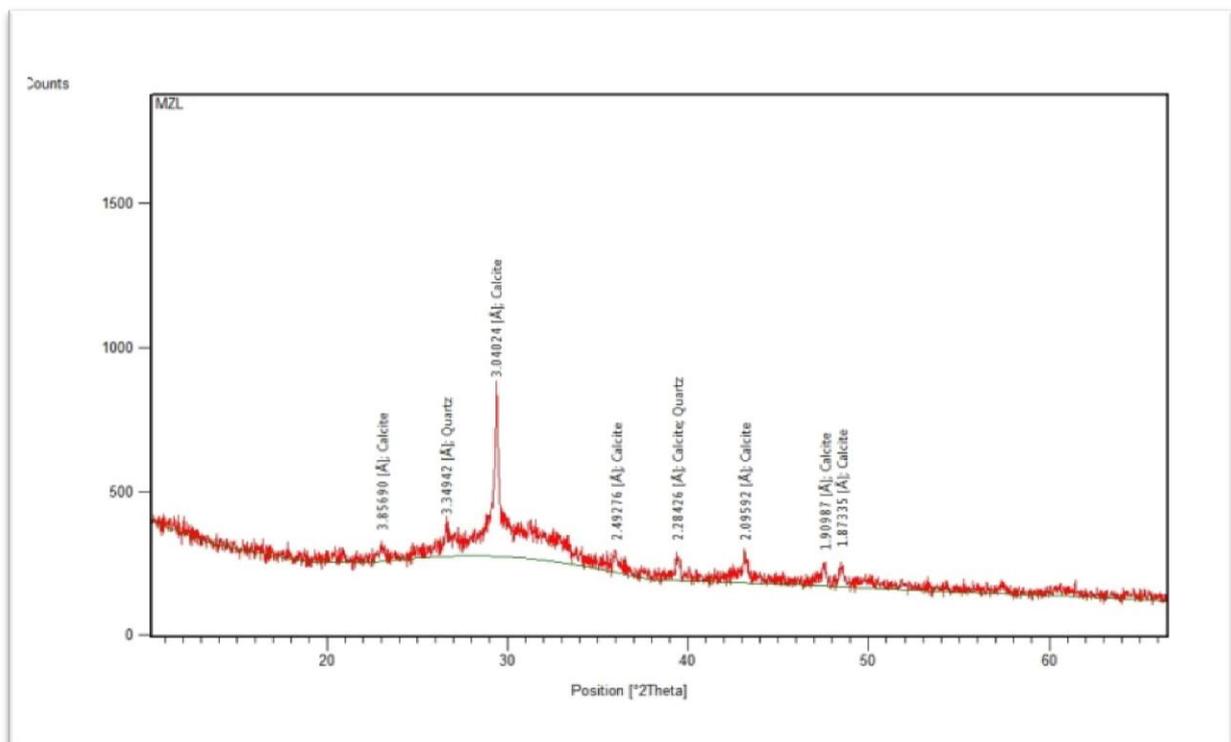


Figure III.7 : Spectre de diffraction des rayons X, du laitier étudié



Broyeur à disque (Model HERZOG)



Broyeur pulvérisateur (Model SIEBTECHNIK)



Mélangeur homogénéisateur (Model TURBULA)



Diffractomètre FRX (Model BRUKER)



Four de cuisson T max 1600°C (Model CARBOLITE)



Presse manuelle pour plasties (Model HERZOG)

Figure III.8 : Différents matériels et appareils utilisés pour la caractérisation et la production du clinker (Laboratoire de Hadjar –Soud)



Figure III.9 : Agate mécanique pour la préparation des échantillons à l'analyse par DRX
(Université El-Manar, Tunis)



Figure III.10 : appareil d'analyse par diffraction des rayons X, DRX (Université El-Manar, Tunis)

III.5 Préparation de la farine crue à base de laitier

Pour réaliser l'essai de préparation de mélange de la farine crue d'une composition chimique optimale (figure III.11) ; un mélange de 20g des quatre échantillons (Calcaire, Argile, Laitier et fer) sont broyés et ensuite pesés sur une balance électronique, puis pulvérisés par un broyeur pulvérisateur (type Herzog) (figure III.8), le mélange ensuite a subis un homogénéisation parfaite à l'aide de l'appareil mélangeur homogénéisateur model Turbula pendant 5min (figure III.8). A chaque fois l'opération de dosage termine ; on passe le mélange pour le concasseur à disque et puis à l'analyse chimique par le FRX, la granulométrie doit être inférieure à 50µm et le taux d'humidité ne dépasse pas le 5%. L'opération de dosage doit être répétée jusqu'à l'obtention des valeurs admissible par les normes industrielles (tableau III.4) en limitant le pourcentage de certains éléments dans le mélange cru tel que le CaO, Al₂O₃, Fe₂O₃ et le SiO₂, les valeurs optimales des éléments chimiques de la farine sont mentionnées dans le tableau III.5.

Tableau III.4 : La composition chimique optimale de la farine crue (norme industriel)

Elément	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃
Quantité %	42.90-43.50	3.55-4.77	2.4-2.6	13.5-14.5	0.4-1.8	0.1-0.2	0.1-0.6	0.03-0.09

La composition chimique des farines crues, préparées selon les proportions optimales des matières premières, est récapitulée dans les tableaux III.6. Pour déterminer les performances de ciment ; un calcul des modules de la farine crue a été effectué.

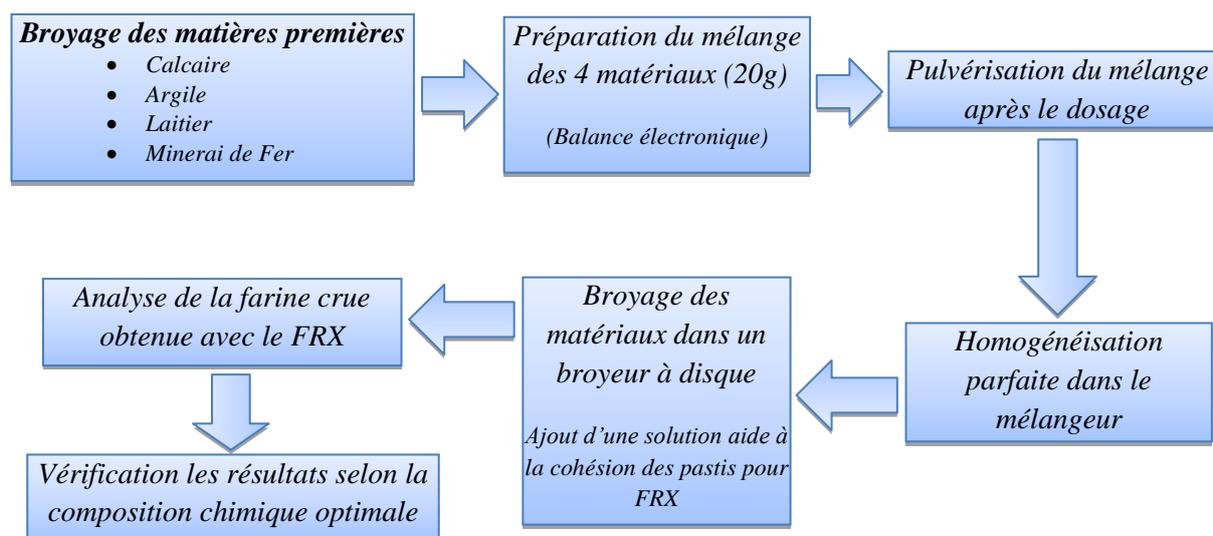


Figure III.11 : Organigramme des étapes de production la farine crue dans le laboratoire

Tableau III.5 : Limites des proportions des éléments et dosage de la matière première

Désignation	Calcaire	Argile	Minerai de fer	Laitier	Sable	Total
Limites des éléments (Farine à base de laitier) (%)	68-72	18.9-19.4	1.6-2	8.5-9.5	-	
Limites des éléments (Farine sans laitier ou ordinaire) (%)	77-83	13.-14	1.5-3	-	2-4	
<i>La teneur prise pour l'essai</i>						
Proportion des éléments prise pour l'essai (avec laitier) (%)	70	19.2	1.8	9	-	
Proportion des éléments prise pour l'essai (sans laitier) (%)	81.5	13.5	2	-	3	100

Tableau III.6 : Résultats d'analyse chimique de la farine crue obtenu

Elément	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	Cl	SO ₃
Farine avec laitier	42.56	4.09	2.48	13.78	1.36	0.14	0.36	0.005	0.13
Farine sans laitier	43.97	3.65	2.34	12.39	1.19	0.12	0.32	0.006	0.14

III.5.1 Détermination des performances du ciment

III.5.1.1 Optimisation des proportions des matières premières

Les proportions des matières premières destinées pour la préparation de la farine crue ordinaire (à base de sable) sont bien connues. Tandis que celles de la farine à base de laitier nécessitent une optimisation préalable. Pour la détermination des quantités optimales des matières premières, des différents essais de dosage sont effectués. Les résultats obtenus montrent que à 9% d'ajout de laitier dans la farine crue, permet de réduire la quantité du calcaire jusqu'à 70%, voir tableau III.5. Il est évident que les 9% de laitier ont remplacé partiellement le taux de CaO et le SiO₂ se trouvant respectivement dans le calcaire et le sable. L'analyse chimique des deux farines crues effectuée par FRX, présente une différence en composition chimique, quoique les teneurs restent toujours dans les normes.

III.5.1.2 Détermination des modules et indices des oxydes

Depuis l'époque de Le Chatelier (1850–1936), presque tous les chercheurs qui se sont penchés sur les problèmes de ciment Portland, ont travaillé à la recherche des relations entre les quatre oxydes fondamentaux CaO, SiO₂, Al₂O₃ et Fe₂O₃ qui constituent le ciment portland. Les différentes relations entre ces oxydes s'appellent Modules.

En pratique, la proportion des principaux constituants du clinker se calcule sous la forme de rapports, de modules ou d'indices chimiques, résultats des études de nombreux savants sur

les mécanismes de formation et de réaction du clinker Portland. Les valeurs des modules et des indices calculés à la base des résultats des analyses chimiques de la farine crue à base de laitier obtenues auparavant sont présentés dans le tableau III.7. Selon les résultats de calcul (voir tableau III.6) on peut mentionner les points suivants :

Tableau III.7 : Modules et indices obtenus pour le ciment cru

<i>Modules et indices</i>	<i>Formule</i>	<i>Valeurs</i>	<i>Limites</i>
<i>Module hydraulique de Michaelis (MH)</i>	$\frac{CaO}{SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3}$	2.09	2-2.1
<i>Module silicique de Kühl (Ms)</i>	$\frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3}$	1.10	2.2-2.6
<i>aluminoferrique de Kühl (MAF)</i>	$\frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3}$	1.65	1.5-2.5
<i>Indice d'hydraulicité de Vicat (HI)</i>	$\frac{SiO_2 + Al_2O_3}{CaO + MgO}$	0.41	0.4-0.5
<i>Facteur de saturation de Lea et Parker (LSF)</i>	$\frac{CaO}{2.8 SiO_2 + 1.18 Al_2O_3 + 0.65 Fe_2O_3}$	0.9	0.85-1

$MH = 2.09$; d'habitude le module hydraulique est compris entre 1,7 et 2,3 généralement on travaille entre 2 et 2,1. Si $MH < 1,7$ ciment à résistance faible, Prise difficile à régler, Si $MH > 2,3$ cuisson difficile, Résistance initiale élevée. Augmentation du volume du ciment suite à la chaux libre.

$Ms = 1.10$; Le Module silicique de Kühl des ciments ordinaires est compris entre 2.2 et 2.6. Les ciments à fort teneur en silice ont un module silicique très élevé ($Ms > 5$). Ces types de ciment comportent une petite quantité de phase vitreuse ce qui rend difficile la cuisson de son clinker, par ailleurs on constate la diminution des temps de prise et de durcissement.

Les clinkers à petit module silicique cuisent facilement à cause de la grande quantité de la phase vitreuse, cette dernière constitue un enduit pour le four rotatif. Dans certaines limites, plus Ms est élevé plus la teneur en $(C_3S + C_2S)$ est élevée, et la teneur en $(C_3A + C_4AF)$ est faible.

Si $Ms > 3$ l'aptitude à la cuisson du mélange cru diminue en raison de la réduction du pourcentage de la phase liquide. Le clinker est normalement pulvérulent, le croûtage devient instable par sa faible résistance au choc thermique. Le ciment aura une prise plus longue.

Lorsque $Ms < 2$ l'aptitude à la cuisson du mélange cru augmente ainsi que le pourcentage de la phase liquide dans la zone de cuisson, la résistance du ciment diminue et le temps de

prise sera raccourci. La figure III.12 montre la corrélation entre les minéraux silicates et des fondants pour une valeur donnée de Ms.

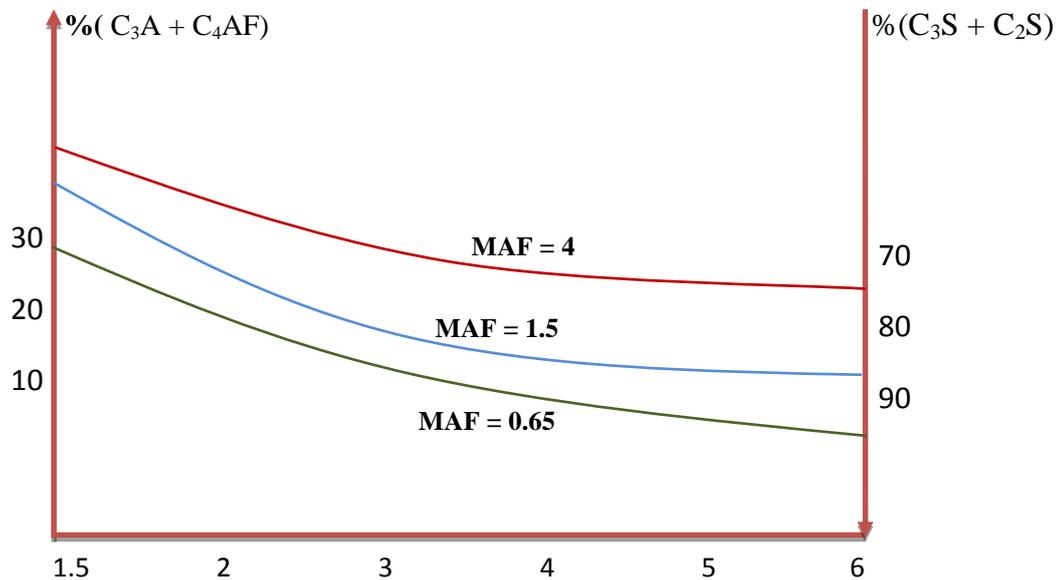


Figure III.12 : Influence du module silicique sur la composition minéralogique du clinker

MAF (Module aluminoferrique de Köhl) est compris entre 1.5 et 2.5. Il représente le rapport entre la teneur de l'alumine d'une part et d'oxyde de fer d'autre part, sa valeur est généralement comprise entre 1.5 et 2.5.

Lorsque $MAF < 1.5$, le clinker ne contient pas de C_3A , mais uniquement du C_4AF lors de la formation des minéraux de clinker ($MAF < 0.64$) le C_3A se formera lorsque le C_4AF est saturé. Dans ce cas le ciment présente une chaleur d'hydratation faible et une résistance à l'attaque des ions riches en sulfate.

Si le $MAF > 2.5$, alors le clinker contient une forte teneur en alumine, et C_3A sera très important dans le ciment. La viscosité de la phase liquide augmente considérablement ; ce qui rend difficile la formation de C_3S , la résistance initiale du ciment s'accroît, la chaleur d'hydratation du ciment s'accroît et le temps de prise devient plus rapide. La résistance du ciment dans les milieux agressifs diminue.

Le MAF détermine la quantité de la phase liquide lors de la cuisson du clinker ainsi que les propriétés de cette phase liquide (viscosité et tension superficielle). Une augmentation du MAF provoque l'accroissement de la teneur en C_3A et fait diminuer C_4AF (figure III.13).

Pour l'indice d'hydraulicité de Vicat HI, les composants sont exprimés en moles et non en pourcent. L'indice d'hydraulicité de Vicat est compris entre 0.4 et 0.5.

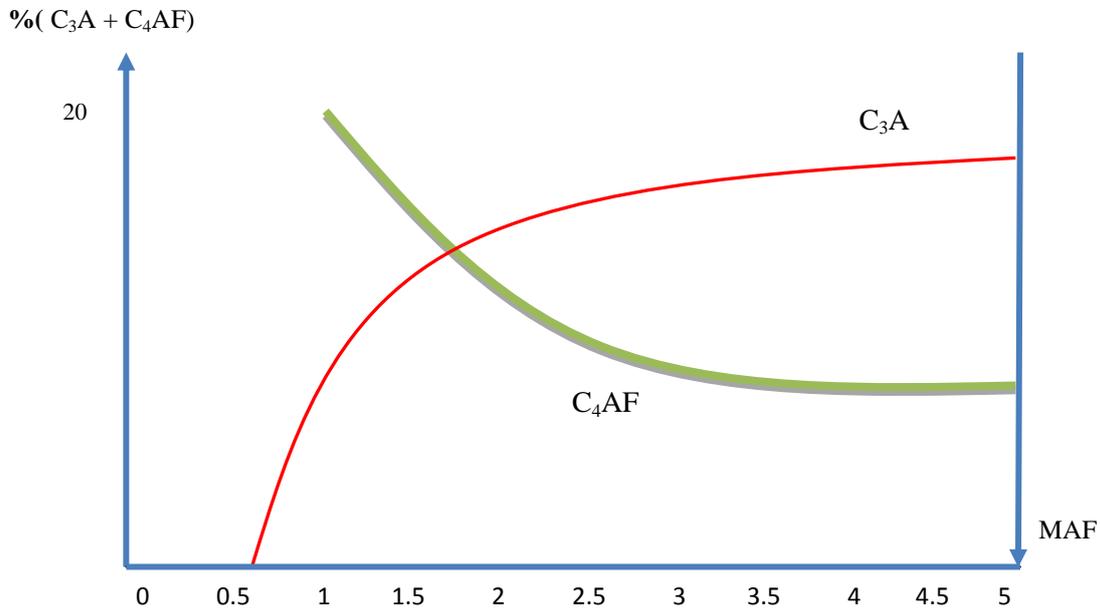


Figure III.13 : Influence du MAF sur la corrélation entre C_4AF et C_3A

Le facteur de saturation de Lea et Parker (LSF) est compris entre 85 et 100. Ce module exprime le rapport entre la chaux présente dans le mélange et la quantité de celle qui peut être liée dans le clinker. Le standard de chaux permet de connaître le comportement du mélange à la cuisson et de prévoir la qualité du ciment. Les résistances du ciment s'accroîtront en augmentant le standard de chaux, Quoique la cuisson devienne difficile, ce qui nécessitera un accroissement de la consommation calorifique. Par ailleurs, un standard en chaux élevé influe négativement sur la stabilité de volume du ciment hydraté (teneur en chaux libre).

D'après les résultats obtenus, il est évident que ces derniers répondent aux normes, ainsi la farine à base de laitier est adéquatement acceptable pour la production du clinker du ciment.

III.6 Production du clinker au laboratoire

Pour la production du clinker avec et sans laitier ; une quantité de 200g des deux farines crues a été préparés selon le pourcentage indiqués dans le tableau III.5, et séchés dans une étuve à 110°C pendant 30min, le processus de cuisson appliqué est le même pour la production des deux types de clinker.

En réalité le temps de séjours de la farine à l'intérieur de four rotatif et de 60min, y compris les trois phases de clinkérisation (préchauffage, cuisson, clinkérisation), pour simuler au maximum l'opération au niveau de laboratoire; les échantillons sont placés à l'intérieur de four à 500°C (type Carbolite RHF 16/8, tmp max 1600°C) (figure III.8), la température était Augmentée à 1000°C, à laquelle les échantillons ont restés pendant 30 minutes, et enfin, la température a été encore augmentée à 1450°C, Où les échantillons sont restés encore 30 min (figure III.14).

Dans le but d'éviter le retour de C₃S en C₂S, à la fin du processus, les échantillons sont rapidement refroidis. Les clinkers produits ont été analysés par analyse chimique, diffraction des rayons X et microscopie optique.

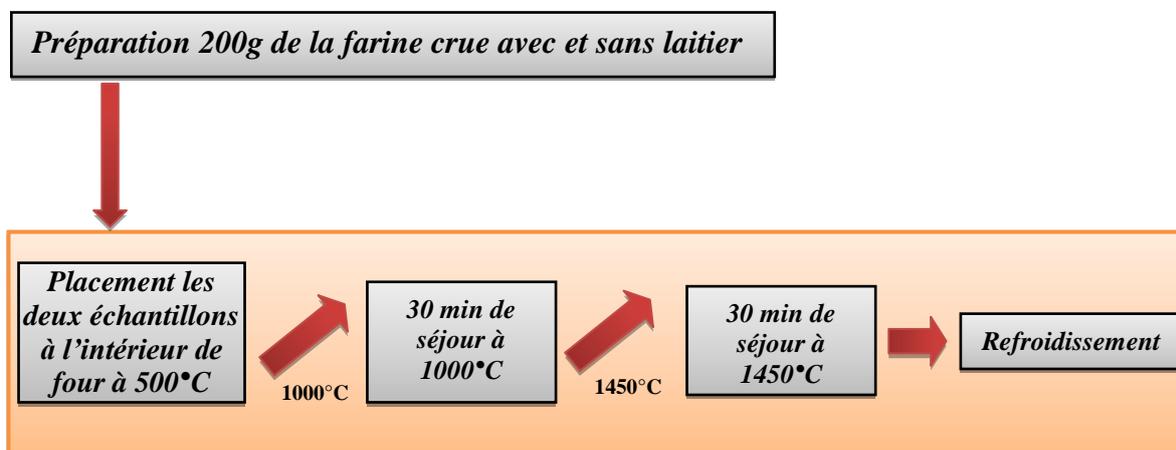


Figure III.14 : schéma représentatif montre les étapes pour la production du clinker au laboratoire

III.6.1 Caractérisation du clinker obtenu

III.6.1.1 Discussion des résultats

L'analyse chimique du clinker obtenue, a été effectuée au niveau du laboratoire de la cimenterie Hadjar-Soud, l'appareil de FRX et de type Bruker AXS S8 LION. Les résultats d'analyses des deux clinkers sont présentés dans le tableau III.8. On outre, les clinkers obtenus ont subis des analyses par diffraction des rayons X (figure III.16) et microscopie optique. L'observation microscopique des sections polies des Clinkers est effectuée à l'aide d'un microscope optique assisté par ordinateur de type LEICA DMLM, les résultats d'observation sont montrés dans la figure III.19.

Tableau III.8 : Analyses minéralo-chimiques du Clinker avec et sans Laitier

<i>Elément</i>	<i>CaO</i>	<i>Al₂O₃</i>	<i>Fe₂O₃</i>	<i>SiO₂</i>	<i>MgO</i>	<i>Na₂O</i>	<i>K₂O</i>	<i>Cl</i>	<i>SO₃</i>	<i>C₃S</i>	<i>C₂S</i>	<i>C₃A</i>	<i>C₄AF</i>
<i>Clinker à base de Laitier</i>	65.98	6.34	3.84	21.36	2.11	0.22	0.56	0.007	0.2	57.61	17.80	10.30	11.69
<i>Clinker ordinaire sans Laitier</i>	66.16	5.64	3.78	22.08	1.01	0.22	0.43	0.017	0.10	57.30	20.10	8.35	11.5

**Figure III.15 : Clinker à base de laitier obtenu expérimentalement**

III.6.2 La composition minéralogique du clinker obtenu (DRX)

La cristallographie aux rayons X, radiocristallographie ou diffractométrie de rayons X (DRX, on utilise aussi souvent l'abréviation anglaise XRD pour *X-ray diffraction*) est une technique d'analyse fondée sur la diffraction des rayons X par la matière, particulièrement quand celle-ci est cristalline. La diffraction des rayons X est une diffusion élastique, c'est-à-dire sans perte d'énergie des photons (longueurs d'onde inchangées), qui donne lieu à des interférences d'autant plus marquées que la matière est ordonnée. Pour les matériaux non cristallins, on parle plutôt de diffusion.

Cette méthode utilise un faisceau de rayons X qui, rencontrant un cristal, est renvoyé dans des directions spécifiques déterminées par la longueur d'onde des rayons X et par les dimensions et l'orientation du réseau cristallin. Par la mesure des angles et de l'intensité des rayons diffractés, il est possible d'obtenir les dimensions de la maille cristalline, les symétries de la structure cristalline (groupe d'espace) et une image tridimensionnelle de la densité électronique dans la maille. À partir de cette densité, la position moyenne des atomes du

crystal formant le motif cristallin peut être déterminée ainsi que la nature de ces atomes (dans une certaine mesure), leurs liaisons chimiques, leur agitation thermique et d'autres informations structurales.

L'appareil de mesure s'appelle chambre de diffraction quand il est photographique et diffractomètre quand il comporte un système de comptage des photons (détecteur ou compteur). Les données collectées forment le diagramme de diffraction ou diffractogramme

III.6.3 Discussion des résultats

Les phases minéralogiques des clinkers ont été déterminées par le diffractomètre de type PANalytical (X'Pert PRO) les résultats illustrées dans la figure III.16. Dans les deux types de clinker, les principales Phases, C_3S , C_2S , C_3A et C_4AF , étaient bien formées. Le clinker avec Laitier contenait plus de C_4AF et moins de C_2S , une différence qui était attribuée au remplacement partiel du Calcaire et du sable avec de laitier, qui est plus élevé en fer que le premier. La distribution dans la plupart des clinkers, les phases ont été développées modérément et distribuées de manière inhomogène. Les phases de clinker ont été bien développées et les grains de l'alite et des de Belite ont également été observés.

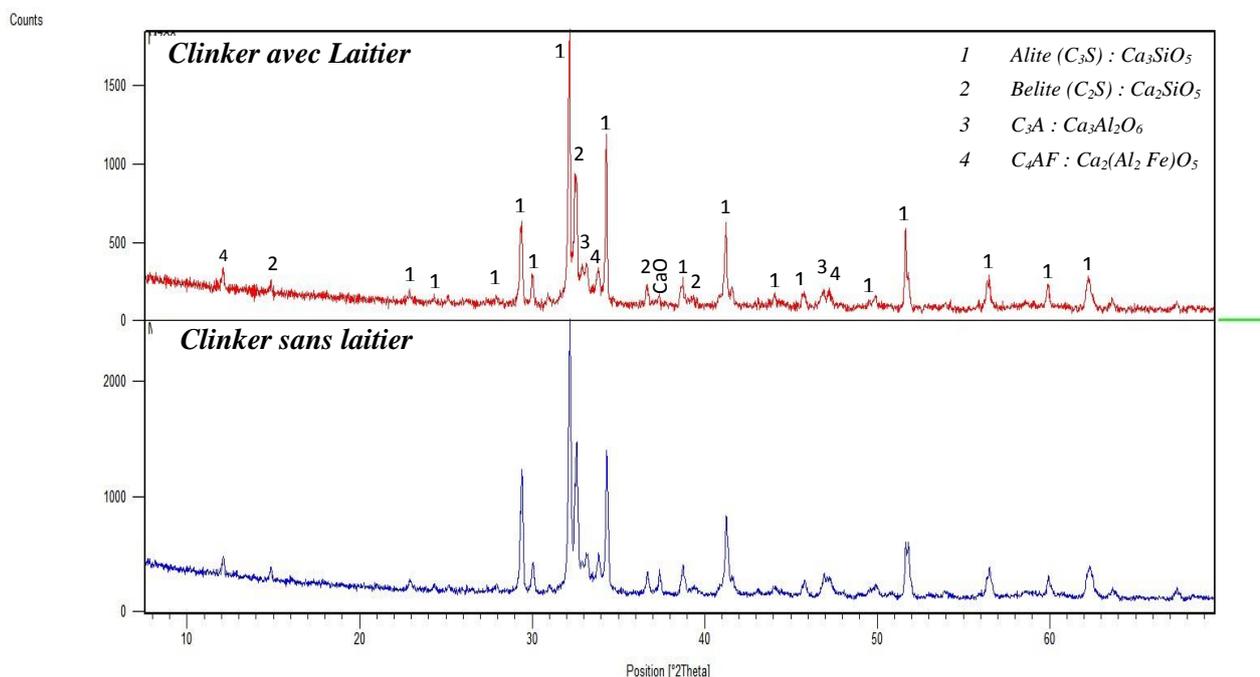


Figure III.16 : Spectre du clinker avec et sans Laitier

III.6.4 Caractérisation minéralogique du clinker par sections polies

III.6.4.1 Préparation des sections polies

pour l'observation des phases minéralogiques avec le microscope optique ; des sections polies on été préparés pour les deux clinkers obtenues, avec et sans laitier. La nature hydraulique du clinker, et en particulier la forte affinité de la CaO libre avec l'eau, rend difficile la préservation des sections polies pour de longues périodes. D'habitude l'humidité de l'air suffit pour attaquer la section polie. Cette attaque, peut être plus ou moins intense, selon les caractéristiques minéralogiques du clinker et le degré d' humidité. En effet, on remarque soit une attaque superficielle, remuée par lavage avec de l'alcool et une nouvelle polissure; et on peut en arriver même jusqu' à une destruction complète de la section polie par la formation de fissures et la désagrégation du clinker. On peut utiliser deux méthodes pour la préservation des sections polies de clinker: la méthode du silica gel et la méthode de la paraffine .

III.6.4.2 Méthode de la Paraffine

Cette méthode est basée sur l'imperméabilisation de la section polie par une pellicule de paraffine (*figure III.17*) .

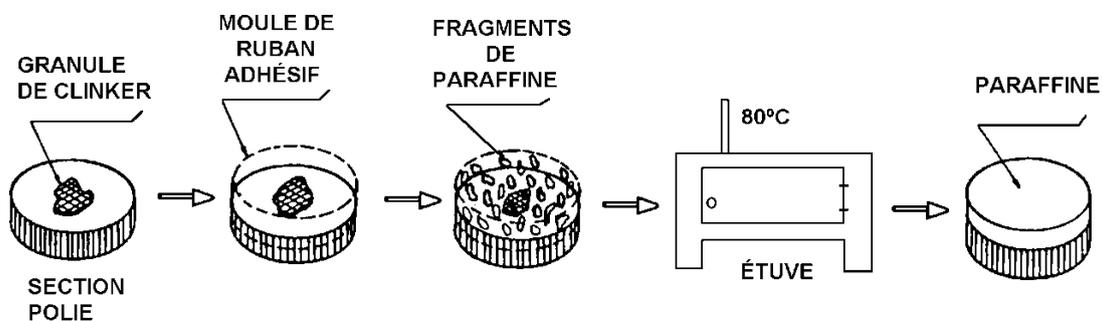


Figure III.17 : Etape de préparation des sections poliés avec la paraffine

Étapes du procédé:

- Faire une nouvelle polissure de la section polie;
- Enveloppez la section polie à l'aide d' un ruban adhésif, en laissant ressortir une partie du ruban de façon à qu' il puisse être utilisé comme un moule pour la paraffine;
- Introduisez quelques fragments de paraffine dans le moule;
- Laissez la section polie dans l' étuve à 80°C pendant quelques minutes, jusqu' à ce que la paraffine fonde;
- Enlevez la section polie de l' étuve et attendez la paraffine se solidifie.

Pour allonger la préservation des sections polies de clinker nous recommandons d'envelopper la section polie paraffiné avec du papier moelleux et de les garder dans un récipient fermé contenant du silica gel.



Figure III.18 : Section polies des deux clinkers

Dans les deux types de clinker (*figure III.19*), les principaux Phases, C_3S , C_2S , C_3A et C_4AF , étaient bien formées. Le clinker avec Laitier contenait plus de C_4AF et moins de C_2S , une différence qui était Attribué au remplacement partiel du Calcaire et du sable avec de Laitier, qui est plus élevé en fer que le premier. La distribution dans la plupart des clinkers, les phases ont été développées modérément et distribuées de manière inhomogène. Les phases de clinker ont été bien développées et les grains de l'alite et des de Belite ont également été observés.

III.6.4.3 Discussion des résultats

Les valeurs les plus importantes obtenues du clinker et celles du l'alite, le belite Aluminate tricalcique et l'Alumino-ferrite tetra calcique. La phase Alite se présente sous forme de petits cristaux bien formés. Les cristaux de Belite étaient uniformément répartis par rapport à l'Alite, Ce qui indique que la réaction de clinkérisation avait dans la direction de l'Alite et que le mélange de la farine crue était homogène. La phase liquide se présente sous la forme de cristaux fins, uniformément répartis.

La composition minéralogique et chimique du clinker est apte pour la préparation des ciments composés (CPJ CEM II / A 42.5) qui répond aux exigences de la norme algérienne NA 442 : 2015.

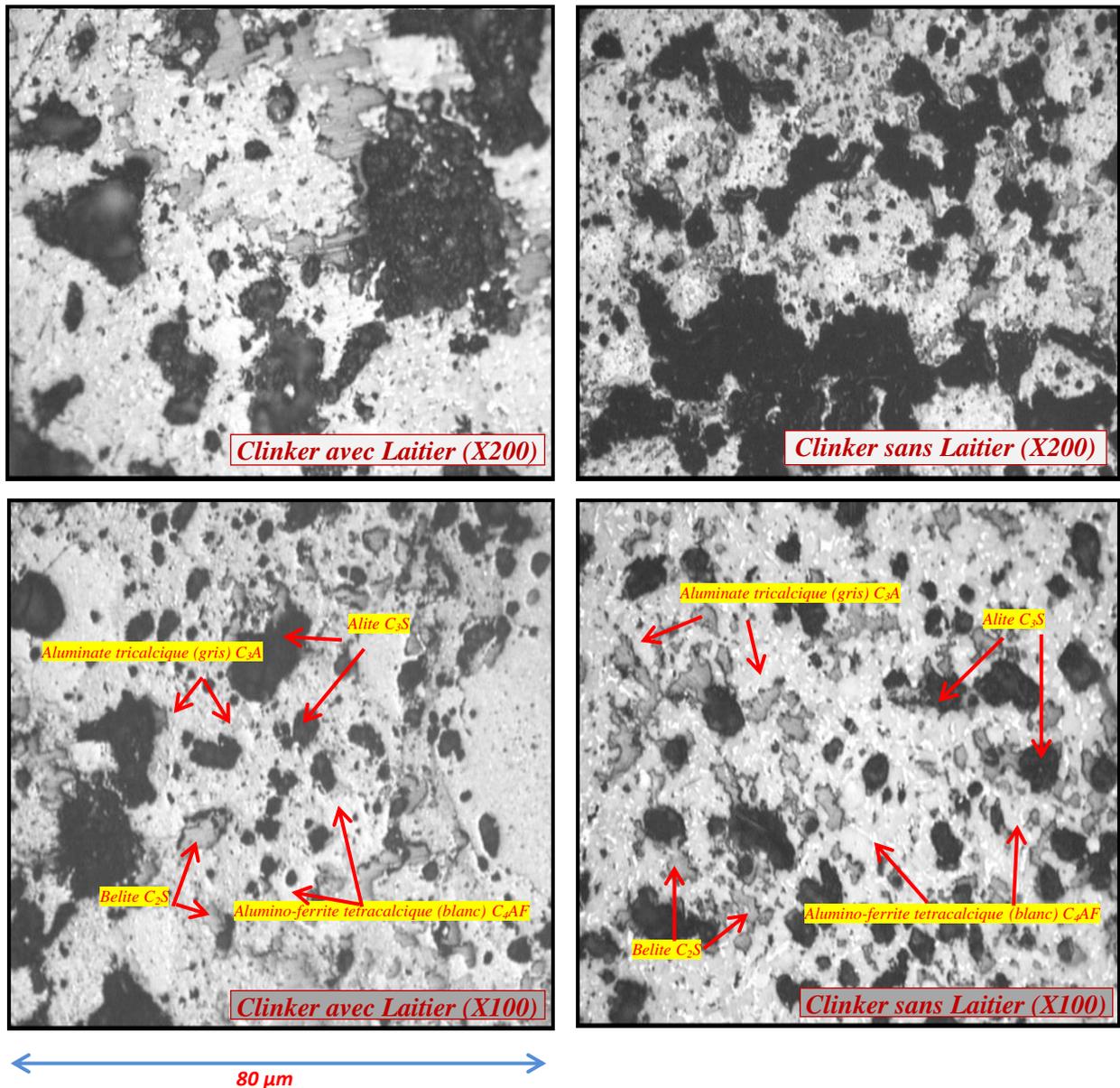


Figure III.19 : Observation par microscope optique de la section polie

III.7 Effet d'utilisation de laitier sur le taux d'émission de CO₂

La comparaison de taux d'émission de CO₂ lors de la production de Clinker avec et sans Laitier, est effectuée à l'aide de Modèle globale des émissions pour les systèmes intégrés (GEMIS). La planification énergétique locale connaît actuellement un regain d'actualité. Les divers outils mis en place dans ce domaine sont plus ou moins utilisés selon les villes. Le logiciel GEMIS (TEMIS, en version anglaise) est sans aucun doute l'instrument le plus répandu à l'échelon international pour l'analyse énergétique, écologique et financière des

systèmes d'énergie, de transport et de flux de matières. Il a contribué à imposer l'analyse des impacts environnementaux en tant que partie intégrante des processus décisionnels en matière d'économie énergétique à l'échelle communale.

III.7.1 Problématique

Les discussions relatives à la planification énergétique communale et, partant, à l'avenir de l'alimentation énergétique locale souffrent notamment du fait qu'elles sont souvent extrêmement simplifiées. Les analyses objectives, la transparence des intérêts et la recherche de solutions adaptées aux problèmes sont le meilleur instrument pour lutter efficacement contre les raccourcis argumentaires de tous types.

Dans ce contexte, le logiciel GEMIS constitue un outil scientifique optimal pour appréhender de manière objective les réalités complexes de l'économie et de la politique de l'énergie.

III.7.2 Description de GEMIS

Dès 1987-89, le logiciel GEMIS (modèle global d'émissions pour les systèmes intégrés) a été mis au point par l'Öko-Institut E.V. (Institut allemand d'écologie appliquée) et la Gesamthochschule Kassel (Université polyvalente de Kassel) pour le compte du gouvernement régional de Hesse en tant qu'instrument permettant l'analyse comparative des impacts environnementaux et financiers des systèmes d'énergie, de transport et de flux de matières. Depuis lors, GEMIS a été développé, élargi et actualisé en permanence. Il permet de mesurer aussi bien la consommation d'énergie primaire que les émissions de substances nocives ou les flux de matières. Depuis 1990, une traduction anglaise de GEMIS est disponible sous le nom de TEMIS (Total Emissions Model for Integrated Systems) avec des mises à jour pour les versions 2 à 4.

Entre 1993 et 1995, l'"EM" (Environmental Manual for Power Development) a par ailleurs été élaboré à l'intention de la Société allemande pour la coopération technique (GTZ) et de la Banque mondiale. L'"EM" est similaire au logiciel GEMIS mais sa base de données a été spécialement adaptée à la situation des pays en développement. De nouvelles fonctions y ont en outre été ajoutées pour la conception des infrastructures énergétiques. Par ailleurs, le «contrôle de la conformité avec les standards relatifs aux émissions» est également l'une des particularités d'origine de l'"EM". Pour davantage de détails concernant l'"EM", ses applications et ses utilisateurs, prière de se reporter au site Internet qui lui est consacré sous (www.oeko.de/service/em/index.htm).

Depuis la version 4.0 de GEMIS (achevée en 2001), tous ces modèles sont désormais intégrés dans un unique logiciel qui englobe l'ensemble de leurs caractéristiques, données et fonctions de support utilisateur (aide en ligne, guide utilisateur et site Internet). Compte tenu de la nouvelle structure multilingue de son interface et de sa base de données, l'ensemble du modèle peut désormais passer de la version anglaise à la version allemande et inversement. La version espagnole et la version française sont à l'étude.

GEMIS comprend à la fois une base de données et une méthode pour élaborer des bilans énergétiques (*figure III.20*), il prend en compte:

- L'exploitation de l'énergie primaire et des matières premières (par ex. : uranium, charbon et gaz naturel, pétrole, matières premières agricoles/biomasse et hydrogène),
- Toutes les principales technologies de production d'énergie et d'électricité (par ex : systèmes de chauffage, eau chaude, centrales électriques de toutes dimensions et de tous combustibles, centrales de cogénération, pompes à chaleur, piles à combustible),
- La mise à disposition des matériaux (par ex. : matériaux de base, matériaux de construction), les autres charges liées à l'énergie et aux matériaux auxiliaires ou au transport (essence, diesel, électricité, carburants biologiques) par les voitures particulières, les véhicules de transports publics (bus, trains) et les avions ou le transport des matériaux (camions, trains, bateaux et pipelines) ainsi que leur élimination.
- L'ensemble des données de référence relatives
- à la puissance et à la durée de vie des équipements,
- aux émissions directes de polluants atmosphériques (SO₂, NO_x, etc.)
- aux émissions de gaz à effet de serre (CO₂, CH₄, CFC, etc.),
- aux substances résiduelles solides et liquides
- à l'emprise au sol des installations;

GEMIS comprend en outre diverses données de référence relatives aux coûts (par ex. : combustibles et carburants, coûts d'investissement et d'exploitation pour les processus énergétiques et les processus de transport). GEMIS permet faire des analyses énergétiques et financières et d'évaluer les résultats.

Grâce à l'intégration des coûts environnementaux externes ou à la conversion en équivalents CO₂ de tous les polluants ayant une incidence sur le climat, il est en outre possible

d'identifier non seulement les coûts et les impacts traditionnels mais également les coûts socio-économiques globaux.

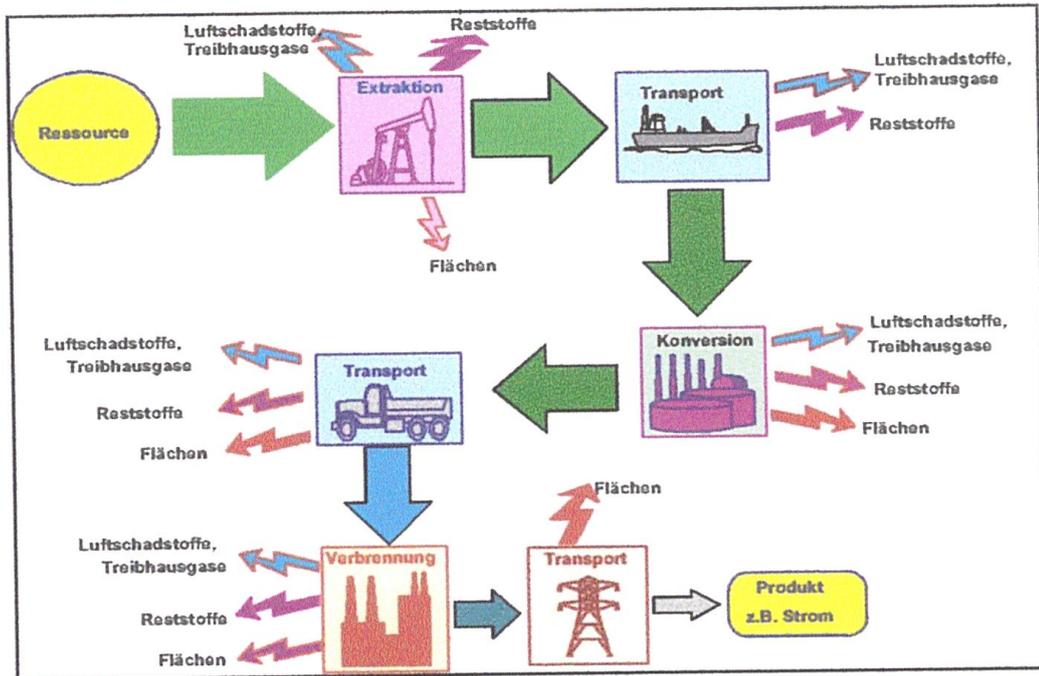


Figure III.20 : L'ensemble des données de référence relatives

Cet outil se révèle bien sûr très utile dans le choix des futurs investissements et plus globalement, il constitue également un précieux soutien pour les décideurs œuvrant aux différents niveaux de la planification énergétique locale.

Depuis 1996, GEMIS est disponible gratuitement en tant que logiciel du domaine public et peut être copié et transmis de manière illimitée. Il fonctionne sur tous les micro-ordinateurs compatibles IBM.

III.7.3 Acteurs impliqués

La fonction de chef de file lors de l'élaboration et du développement de GEMIS est assumée par l'Öko-Institut. L'Öko-Institut e.V. – Institut d'écologie appliquée – a été créé en 1977 en tant qu'institut de recherche privé d'utilité publique.

Sa création a été étroitement liée aux discussions qui ont accompagné la construction de la centrale nucléaire de Wyhl en Bade-Wurtemberg.

Aujourd'hui comme hier, l'objectif de l'institut consiste à assurer la réalisation de travaux de recherche indépendants des gouvernements ou de l'industrie dans l'intérêt exclusif de la

société. Environ 80 personnes travaillent actuellement dans les bureaux de Freiburg, de Darmstadt et de Berlin.

L'élaboration de GEMIS est financée par plusieurs sources, notamment par le gouvernement régional de Hesse. Le développement du programme a été assuré en coopération avec plusieurs partenaires scientifiques en Allemagne et à l'étranger, par exemple:

- L'Université polyvalente de Kassel pour l'élaboration du modèle et les recherches de données ;
- Les universités de Braunschweig, Giessen, Göttingen, Hohenheim et München,
- PNL et le département américain à l'énergie (US-DOE) pour l'élaboration de la version anglaise TEMIS,
- L'Office fédéral de l'environnement (Umweltbundesamt, UBA) à Berlin,
- Le Ministère fédéral allemand de la Recherche,
- L'Agence fédérale de l'environnement à Wien pour les données relatives à l'Autriche et à la République tchèque.

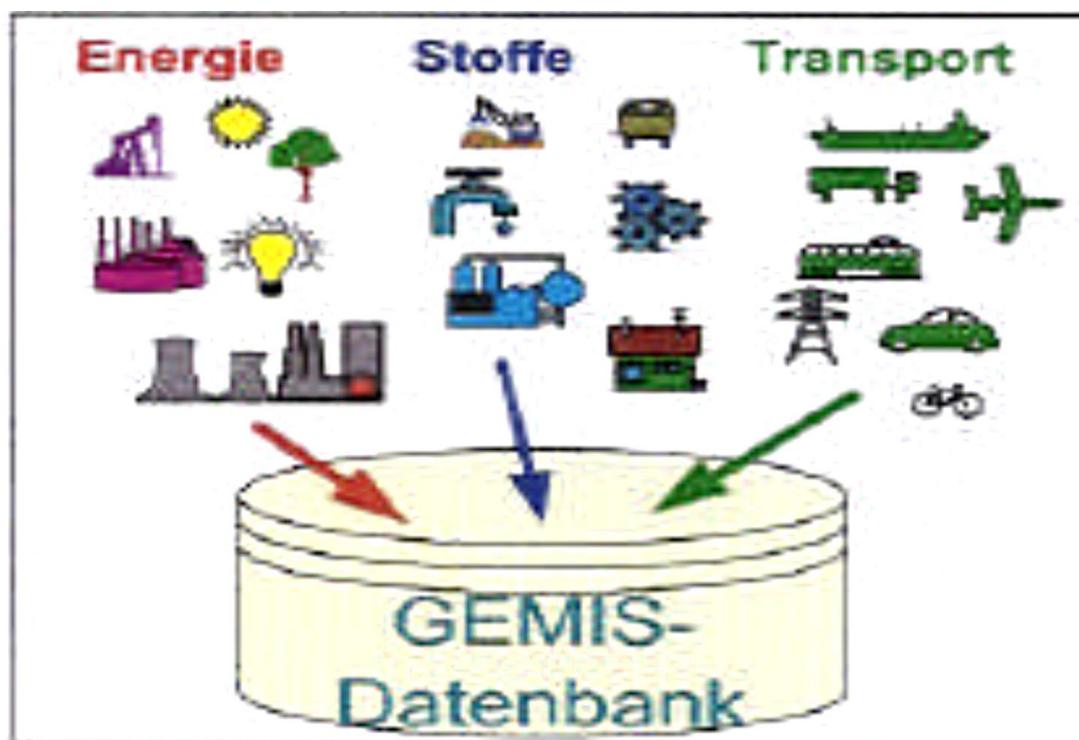


Figure III.21 : Acteurs impliqués au GEMIS

III.7.4 Exemples d'application

Bilan des émissions de la ville de Darmstadt Au début de l'année 2000, l'Öko-Institut a utilisé GEMIS pour établir le bilan 1998 des émissions de polluants de la ville de Darmstadt (située à 40 km au sud de Frankfurt/Main). Les résultats reflètent les taux d'émissions produits par les habitants, l'artisanat et l'industrie de la ville.

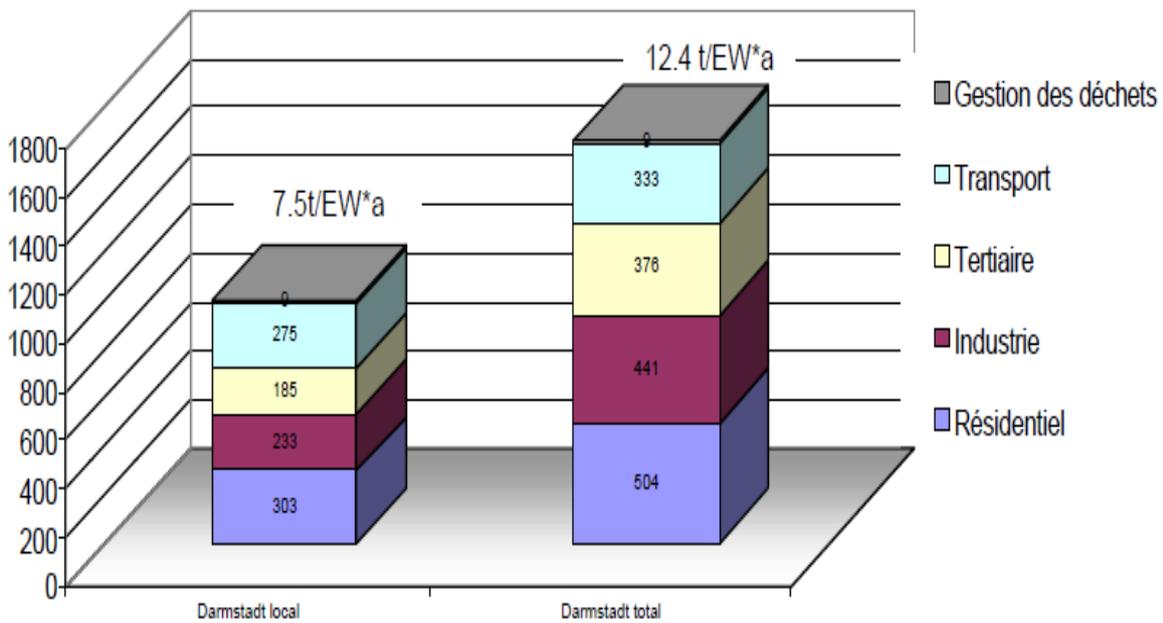


Figure III.22 : Emissions de gaz à effet de serre à Darmstadt en 1998 (en t CO₂/hab/an)

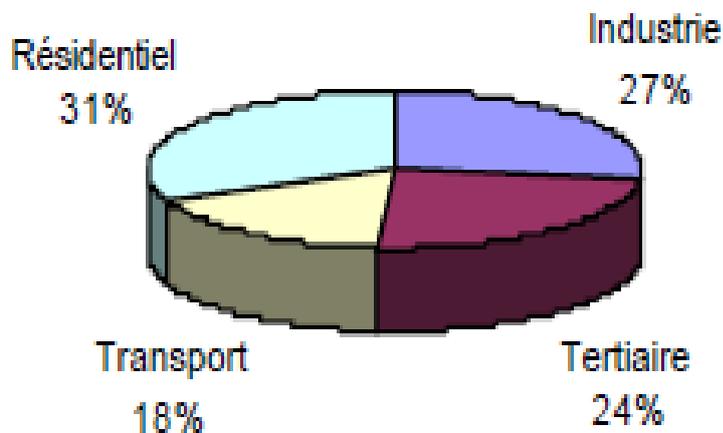


Figure III.23 : Répartition des émissions de CO₂ à Darmstadt (base : 1.9 million t équivalent CO₂)

Le graphique présente tout d’abord les émissions locales, c’est-à-dire les gaz à effet de serre produits à l’intérieur des limites de la ville (*figure III.22*).

La seconde colonne montre les émissions globales, celles-ci comprenant également les gaz à effet de serre émis en dehors des limites de la ville (production d’électricité, raffineries, exploitation minière, etc.).

A l’aide de GEMIS, il est également possible de déterminer la part des émissions de CO₂ et autres gaz à effet de serre de chaque secteur (*figure III.23*).

III.7.5 Comparaison du systèmes avec production combinée chaleur électricité.

En 1999, le land fédéral de Schleswig-Holstein a fait réaliser une étude comparative de la production d’électricité avec cogénération (Combined Heat Power). Les systèmes comparés étaient au nombre de cinq :

- Centrale nucléaire complétée par un système de chauffage au fioul (CNCF),
- Centrale thermique au charbon (CTC),
- Centrale thermique au gaz et à la vapeur (CTGV),
- Centrale de cogénération au gaz (CCG),
- Centrale de cogénération au biogaz (CCB).

Les deux tableaux tirés du rapport d’étude (*tableau III.9 et III.10*) montrent les différents taux d’émissions de gaz à effet de serre ainsi que les coûts de génération de l’énergie.

L’étude a également permis de réaliser le bilan des émissions de polluants atmosphériques, des matières premières solides et des besoins en ressources.

Selon les scénarios/systèmes, les résultats établis pour les différentes variantes diffèrent notablement les uns des autres.

Tableau III.9 : Emissions de gaz à effet de serre

<i>g pour 1 kWh_e et 2 kWh_{th}</i>	<i>CO₂</i>	<i>CH₄</i>	<i>N₂O</i>	<i>Equivalents CO₂</i>
<i>Nucléaire fioul</i>	<i>737</i>	<i>0.300</i>	<i>0.011</i>	<i>141</i>
<i>CTC</i>	<i>1.226</i>	<i>5,705</i>	<i>0,059</i>	<i>1.364</i>
<i>CTGV charbon</i>	<i>812</i>	<i>1,413</i>	<i>0,026</i>	<i>850</i>
<i>CCG cogénération au gaz</i>	<i>707</i>	<i>3,652</i>	<i>0,020</i>	<i>790</i>
<i>CCB cogénération biogaz</i>	<i>11</i>	<i>0,548</i>	<i>0,087</i>	<i>50</i>

Tableau III.10 : Tableau des coûts

<i>g pour 1 kWh_e et 2 kWh_{th}</i>	<i>Internes</i>	<i>Externes</i>	<i>Totaux</i>
<i>CNCF</i>	<i>0,40</i>	<i>0,05</i>	<i>0,45</i>
<i>CTC</i>	<i>0,21</i>	<i>0,08</i>	<i>0,29</i>
<i>CTGV</i>	<i>0,24</i>	<i>0,05</i>	<i>0,29</i>
<i>CCG</i>	<i>0,25</i>	<i>0,04</i>	<i>0,29</i>
<i>CCB</i>	<i>0,38</i>	<i>0,02</i>	<i>0,40</i>

III.7.6 Utilisateurs communaux

De nombreuses communes ont déjà effectué des analyses énergétiques et environnementales à l'aide de GEMIS dont notamment : Berlin, Darmstadt, Frankfurt, Freiburg, Hannover, Heidelberg, Jena, Kassel, München, Saarbrücken, Ulm, Wuppertal (toutes en DE), Newcastle upon Tyne (UK), Bologna + Palermo (I), Luxembourg + Luetzeburg (L), Amsterdam + Delft (NL), Aarhus (DK), Wien (A), Luzern (CH) et Barcelona (E). Pour la France, l'agence Rhône-Alp énergie-Environnement et le bureau d'études INESTENE à Paris ont déjà procédé à plusieurs analyses (*Ministre, P., & de l'Ecologie, M. 2003*).

III.7.7 Évaluation et perspectives

Lorsque le projet GEMIS a démarré à la fin des années 80, personne ne savait s'il allait un jour pouvoir être mis en œuvre et, si oui, comment. Grâce à des corrections et à des extensions permanentes, à l'intégration de données collectées par d'autres institutions, notamment l'Office fédéral de l'environnement et l'Association des centrales électriques allemandes, le projet a pu gagner en transparence et en clarté.

L'élargissement des données au secteur de l'agriculture et de l'alimentation avec les données mises à disposition par l'Université polyvalente de Kassel, diverses données internationales (à l'échelle des pays), la mise en liaison avec le projet du ministère fédéral de la Recherche et le nombre grandissant d'utilisateurs les plus divers en Allemagne comme à l'étranger laissent présumer que GEMIS contribue largement à rendre plus objectives les discussions menées en matière de politique énergétique. En tant qu'instrument relativement universel, GEMIS peut être employé aussi bien au niveau communal que dans le secteur scientifique pour l'économie énergétique ou environnementale. Constituant un outil des plus

maniables pour l'analyse des impacts environnementaux, il est appelé à devenir partie intégrante des processus décisionnels en matière de gestion de l'énergie.

Depuis la publication de la première version de GEMIS en 1989, le cercle de ses utilisateurs a continuellement augmenté. En 1996, le nombre d'utilisateurs était de 500 environ. Leur nombre a connu une hausse radicale avec la mise à disposition du programme via Internet. A la fin de l'année 2000, ils étaient déjà plus de 1000.

Dans la plupart des pays d'Europe, le programme est utilisé par les communes, les instituts de recherche et bureaux d'étude, les distributeurs d'énergie et les ministères. Des adaptations de données ont été effectuées pour plusieurs pays (par ex. l'Italie, le Luxembourg, l'Autriche et la République tchèque). En Australie, au Japon et aux Etats-Unis, le programme est utilisé par les ministères de l'Energie et de l'Environnement, les instituts de recherche et les communes. Dans les pays en développement, les applications sont effectuées par l'intermédiaire de la Banque mondiale et de la Société allemande pour la coopération technique (GTZ) mais également d'autres bailleurs de fonds, notamment en Chine, en Inde, en Indonésie, au Maroc, au Zimbabwe, en Afrique du Sud et dans le Pacifique Sud. Il est prévu de traduire l'interface utilisateur également vers le français et l'espagnol.

Depuis l'apparition d'un autre modèle baptisé BASiS (Beduerfnisfeldorientierte Analyse von Stoffstroemen in Szenarien = analyse des flux de matières axée sur les besoins via l'élaboration de scénarios), GEMIS tend de plus en plus à modéliser explicitement la demande (sur la base de "besoins" spécifiques tels que le logement). BASIS est également un modèle dynamique comprenant plusieurs séries de scénarios temporels pour l'offre et la demande. BASIS étant un modèle beaucoup plus complexe, il n'est pas disponible gratuitement mais peut être utilisé sur demande dans le cadre de projets de recherche.

III.8 Modélisation le cas de la cimenterie Hadjar-Soud

III.8.1 Les données d'entrées de l'usine

Les données d'entrées pour la production d'une tonne (01) de clinker, sont les suivantes :

- La production du clinker en 2015 est de 814000 T du clinker ;
- Gaz naturel CH₄ : pour produire 01 kg du clinker, la consommation du Gaz naturel (CH₄) atteint 0.1017 Nm³, ou bien 0.0856 kg de combustible;
- Matière cru (Farine) : 01 kg du clinker nécessite 1.89 kg de la farine crue ;

- Energie électrique : la consommation d'électricité est de 120 kw/h pour produire 01 tonne du ciment;
- L'usine travaille à 100% de ces capacités ;
- Proportions des matières premières pour préparer 01 tonne de Clinker à base de laitier sont : 700 kg du calcaire, 192kg d'argile (marne), 18kg de fer et 90kg du laitier ;
- Proportions des matières premières pour préparer 01 tonne de Clinker à base de sable sont : 815 kg du calcaire, 135 kg d'argile (marne), 20kg de fer, 30kg du sable.

On remarque que, les inventaires des entrées sont identiques pour les deux types de clinker, sauf qu'un changement dans les proportions des matières premières (calcaire, laitier, argile, sable et fer), voir tableau III.5. Les résultats de modélisation sont récapitulés dans les tableaux III.11, III.12 et III.13.

III.8.2 Indicateurs d'impact

Le potentiel de réchauffement global (GWP), en équivalent de dioxyde de carbone, est la contribution à l'absorption atmosphérique du rayonnement infrarouge par gaz anthropiques dérivés tels que CH₄, CO₂ et le N₂O, qui contribuent à une augmentation de la température mondiale. Les résultats donnés par la simulation sont mentionnées dans les tableaux ci-dessous, les trois gaz principales effet de serre sont : le CO₂, le CH₄ et le N₂O, mais ce que nous intéresse en plus c'est l'émission de CO₂.

Tableau III.11 : Résultats d'émission des GES en Tonne de CO₂EQ/T de Clinker

Elément	Quantité (t) x 10 ⁻⁶	Facteur	Equivalent en CO ₂ x 10 ⁻³	Part (%)
CO ₂	0.802	1,00	802,29	98,3447
CH ₄	410,77	25,00	10,27	1,2588
N ₂ O	10,76	298,00	3,21	0,393
<i>Somme</i>			815,79	100

Tableau III.12 : Résultats par Tonne CO₂/t de Clinker

Process	Quantité (t) x 10 ⁻³	Part (%)
Non metallic minerals/cement clinker-DZ-2015	545,00	67,93
heat-process-CaO-gas-DZ-2010 (end-energy)	192,51	23,99
gas-CC-DZ-2010-1	48,45	06,04
diesel motor-DE-2010	7,63	951,36x10 ⁻³
compressor-GT-DZ-2010-1	4,76	593,61x10 ⁻³
gas-boiler-DZ-2010-1	0.96	119,16x10 ⁻³

III.8.3 Explication du tableau

- Non mettalic mineral-clinker : Décarbonations
- Heat-process-CaO-gas-DZ-2010 : Combustion du gaz naturel (Algerie)
- Gas-CC-DZ-2010-1 : Electricité utilisée
- Diesel motor-DE-2010 : Camion utilisés dans les carrières du fer, du calcaire et marne
- Compressor-GT-DZ-2010-1 : Compresseur utilises dans le transport du gaz naturel
- Gas-boiler-DZ-2010-1 : Gaz consommé dans les chaudières des processus annexes

Le gaz naturel (CH₄) utilisé dans la préparation du Clinker contribue à 23,99% soit (0,192 T de CO₂) du bilan total d'émission des GES (802,29x10⁻³ Tonne de CO₂ EQ/T de Clinker). La principale source d'émission du CO₂ est la phase de décarbonations, elle vient principalement de la transformation de calcaire en chaux et CO₂, d'après la réaction chimique suivante :



La phase de décarbonation contribue à 67,93% d'émission de CO₂, soit (0,545 T de CO₂/tonne de Clinker produit).

Si on refait la modélisation de l'émission de CO₂ par le programme (GEMIS) pour le Clinker à base de sable, et on garde les mêmes données d'entrés que celle de la farine à base de laitier ; sauf la proportion des matières premières soit : calcaire 78%, argile 18%, fer 2% et le sable 3%. Les résultats obtenus sont mentionnées dans le tableau ci-dessous.

Tableau III.13 : Comparaison des résultats d'émission de CO₂

<i>Nature du clincker</i>	<i>Décarbonation T CO₂/T Clinker</i>	<i>Combustion T CO₂/T Clinker</i>	<i>CO₂ T/an</i>
<i>Clinker à base de sable</i>	<i>0.663</i>	<i>0.231</i>	<i>727716</i>
<i>Clinker à base de laitier</i>	<i>0.545</i>	<i>0.192</i>	<i>599918</i>
<i>Différence CO₂/T Clinker</i>	<i>0,118 T</i>	<i>0,039 T</i>	<i>127798 T/an</i>
<i>Différence annuelle</i>	<i>96052 T/an</i>	<i>31746 T/an</i>	

III.8.4 Discussion des résultats

Les résultats de la simulation par le logiciel GEMIS, montre que ; la substitution du sable par le laitier dans des matières premières au niveau de la cimenterie de Hadjar Soud à

engendrer une diminution dans le taux annuelle de CO₂ émis par les deux processus ; la décarbonatation et la combustion, cette diminution allant jusqu'à 17.56% (127798 T).

La cause principale de cette réduction du CO₂; due principalement au remplacement partiel du calcaire (CaCO₃) dans la matière première, par un produits déjà décarbonatés (laitiers), sachant que plus de 60% des émissions de CO₂ dans la fabrication des ciments proviennent des processus de décarbonatation (dans notre cas étudié, Le taux d'émission due à la décarbonatation est de 67%).

III.9 Conclusion

Les résultats des différents essais pour la production du clinker à base du laitier, nous ont permis de conclure les points suivants :

L'ajout de 9% de laitier dans la matière première, n'affecte la composition chimique et minéralogique du clinker, quoi que il résulte une diminution de la quantité du calcaire, allant jusqu'à 10%.

La composition chimique de la farine est maintenue dans les normes, la qualité de ce dernier est vérifiée par les modules et les indices de contrôle.

L'observation des sections polies montre que les cristaux de Belite sont uniformément répartis par rapport à l'Alite, ce qui indique que la réaction de clinkérisation est dans la direction de l'Alite, ce qui confirme l'homogénéité de la farine.

Le clinker produit est une matière apte pour la fabrication des ciments composés répond aux exigences de la norme NA 442 : 2000. (CPJ CEM II / A 42.5).

IV. Chapitre IV : Analyses des Impacts de l'industrie cimentière sur l'environnement

IV.1 Introduction

D'une manière générale, la pollution est une modification défavorable du milieu naturel qui apparaît en totalité ou en partie comme un sous-produit de l'action humaine par des effets directs ou indirects. La pollution est définie par l'organisation mondiale de la santé (OMS) comme étant la présence dans l'atmosphère de substances étrangères à la composition normale de cette atmosphère et à des concentrations suffisamment élevées pour entraîner un impact sur l'homme, les animaux, les végétaux, les matériaux ou l'environnement d'une manière générale.

Après plusieurs années d'exploitation, des signes de déséquilibre écologique ont été remarqués au niveau atmosphérique où apparaît une couche poussiéreuse résultant des rejets de la cimenterie et de sa carrière, au niveau de l'agriculture qui se traduit par une diminution sensible de la production potagère et végétale et au niveau sanitaire où des maladies liées à cette industrie, tel l'asthme et autres maladies respiratoires apparaissent de plus en plus.

IV.2 Types de polluants rejetés

Dans l'industrie du ciment, les principaux rejets vers l'atmosphère sont constitués essentiellement par les poussières pendant l'extraction et fabrication du ciment, les gaz de combustion au niveau des fours de cuisson mais surtout par les émissions de poussières à tous les niveaux de production du ciment.

IV.2.1 Poussières

Les poussières représentent la forme de pollution la plus importante au niveau des cimenteries. Elles sont les plus ressenties par la population pour des raisons physiologiques et psychologiques. Leur granulométrie est un facteur important, les poussières fines restent en suspension dans l'atmosphère alors que les plus grosses se déposent sur le sol à différentes distances de la source selon leur taille.

IV.2.2 Analyse de poussière

La composition chimique des poussières déposées sur les bacs analysée à l'aide de la fluorescence X est donnée par le tableau IV.1.

Tableau IV.1 : Composition chimique des poussières

<i>Eléments</i>	<i>SiO₂</i>	<i>Fe₂O₃</i>	<i>MgO</i>	<i>CaO</i>	<i>K₂O</i>	<i>Na₂O</i>	<i>SO₃</i>	<i>Cl</i>	<i>Al₂O₃</i>
<i>Teneur (%)</i>	20.10	2.81	2.09	36.37	0.35	0.20	0.08	0.83	0.004

L'échantillon de poussière analysé présente une très forte teneur en CaO de par sa présence en grand pourcentage dans le ciment. Il contient aussi une teneur assez élevée en SiO₂ (silice) et une présence de moyenne à faible en Al₂O₃ (alumine), en Fe₂O₃ (oxyde ferrique) et en MgO (magnésie). Elles sont dues à la présence de l'argile dans le clinker (de 22% à 25%).

Le potentiel d'émission de poussières est lié au mode d'exploitation de chaque carrière. Chaque étape du processus, de l'extraction du matériau à son évacuation hors site, peut être une source potentielle de poussières. Ainsi les différentes sources de provenance des poussières sont diverses dont nous essayons d'énumérer les plus pertinentes :

IV.2.3 Pendant l'extraction

- **L'abattage** : Cette opération utilise des explosifs qui après le tir leur effet dégage d'énormes quantités de poussières et de bruit qui perturbent notre milieu environnemental.
- **Le transport** : Les particules, suffisamment petites peuvent rester longtemps en suspension dans l'air, et être transportées par les vents sur de grandes distances.
- **Le pré concassage** : Cette opération dégage beaucoup de poussières ainsi que de bruit qui peuvent être nocifs à la santé humaine.
- **Le dépôt** : Il se déclenche lorsque la vitesse du vent tombe en dessous de la vitesse limite nécessaire au transport. Il s'effectue en général par piégeage des éléments grossiers.

La figure IV.1 montre les autres sources de poussières sur une exploitation en précisant les principales opérations générant des émissions de poussières.

IV.2.4 Différents gaz rejetés dans l'atmosphère

Les polluants contenus dans les gaz de combustion dépendront de la nature du combustible utilisé (charbon, fuel ou gaz naturel) et de la composition du minerai. Les principaux polluants rencontrés dans l'industrie du ciment sont :

- Le dioxyde de soufre (SO₂) émis principalement par la combustion au niveau du four et se transforme en SO₃ dans l'atmosphère ;
- L'oxyde d'azote (NO₂) produit au niveau du four pendant la combustion. Sa formation est favorisée par un excès d'oxygène, et surtout par la température de la flamme ;
- Le monoxyde de carbone (CO) produit au niveau du four lorsque la combustion est incomplète ou lorsque le four est mal réglé. Il est très toxique ;
- Le dioxyde de carbone (CO₂) produit quand la combustion est complète (avec suffisamment d'air) ;
- Le CO₂ est également rejeté durant la calcination suite à la décarbonatation du calcaire contenu dans la matière première.

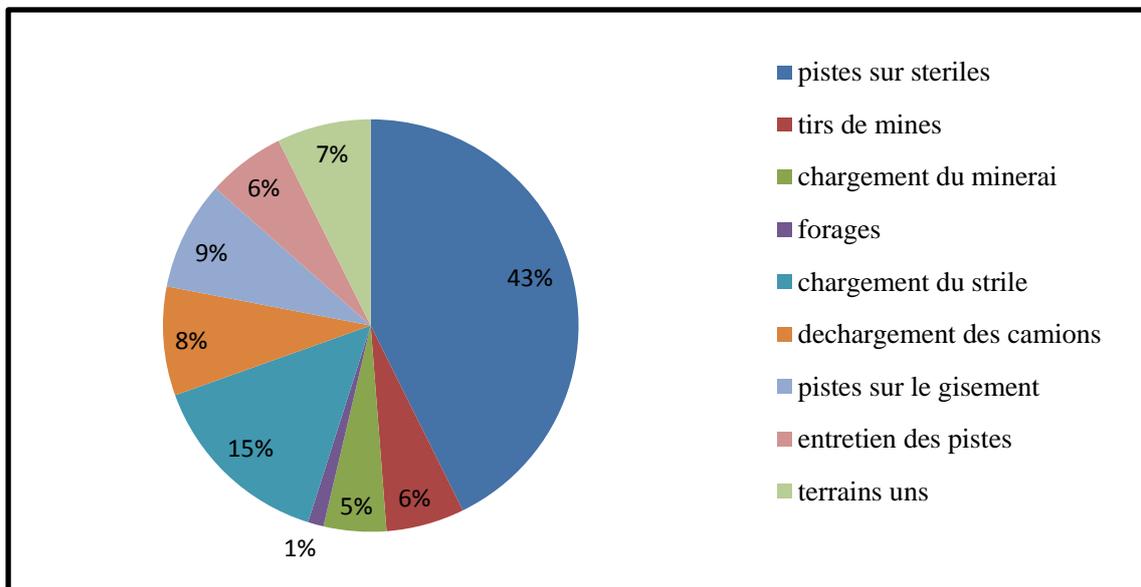


Figure IV.1 : Autres sources de poussière (ICEDD, 2005)

IV.2.5 Bruits et odeurs

Le bruit une fois supérieur à une norme devient insupportable chez les êtres humains, et chez les animaux. On peut mentionner le bruit de fond en continu en provenance de la cimenterie exploitée 24 heures sur 24, toute une semaine, ainsi que celui provenant des opérations de dynamitage découlant de l'exploitation des carrières, des wagons de train qui s'arrimaient. Les bruits contribuent à l'apparition des traumatismes. Ils influent sur le système nerveux en provoquant la fatigue et surtout la surdité. Les sondeuses, concasseurs et marteaux perforateurs en sont les principaux responsables.

Les odeurs provenant de la cimenterie contraignaient les citoyens à fermer leurs fenêtres et à demeurer à l'intérieur.

IV.2.6 Impacts de poussière

IV.2.6.1 Sur la santé humaine

Les effets des poussières sur la santé dépendent essentiellement de trois facteurs :

- le niveau de concentration auquel est exposé l'organisme (milieux professionnels) ;
- la durée d'exposition ou le temps durant lequel l'ouvrier ou l'habitant est exposé à ce milieu;
- l'effort physique qui s'accompagne d'une augmentation de la ventilation pulmonaire.

- **Court terme**

- Le SO₂ provoque une irritation des muqueuses de la gorge et une inflammation des bronches. Quand il est associé aux particules, il peut affecter tout l'appareil respiratoire jusqu'aux alvéoles ;
- Le CO se fixe sur les globules rouges du sang et empêche le transport de l'oxygène vers les cellules. A forte dose, il peut causer une asphyxie mortelle ;
- Le NO₂ est un gaz irritant pour les bronches. Chez les asthmatiques, il augmente la fréquence et la gravité des crises ;
- Les poussières fines (<1µ) atteignent les alvéoles et peuvent pénétrer dans le sang. Elles peuvent transporter d'autres polluants qui y sont adsorbés et causent des décès pour causes respiratoires et cardio-vasculaires.

- **À long terme**

Ces polluants peuvent provoquer des maladies respiratoires telles que l'asthme, les bronchites (SO₂, poussières), allant jusqu'au cancer des poumons (NO₂, particules).

IV.2.6.2 Sur la végétation

- Les poussières déposées sur les plantes les empêchent de respirer et peuvent causer leur mort progressive. A la longue, cela provoque la disparition de toutes les espèces végétales;
- Les différentes études de recherche ont montré que certains rejets chimiques comme le SO₂, le fluor et le peroxyacétyl nitrate avaient des effets néfastes sur la végétation ;

- Les plantes affectées sont aussi rendues plus sensibles aux infections cryptogamiques, ce qui entraîne avec le temps une réduction du rendement des cultures.

IV.2.6.3 Sur notre quotidien

- Impossibilité d'étendre des vêtements à l'extérieur ;
- Impossibilité de manger à l'extérieur ;
- Infiltration de poussière dans les maisons de la zone rouge et obligation de fermer les fenêtres.

IV.2.7 Impacts des déchets utilisés pour la cuisson

Les déchets électroniques se composent d'ordinateur et accessoires, consoles, outils de communication, jouets et également les produits blancs tels que les appareils de cuisine ou des appareils médicaux. Les déchets électroniques contiennent, d'une part des substances nocives à la santé et à l'environnement tel que le Cl, Br, P, Cd, Ni, Hg, PCB et les composés bromés ignifuges à haute concentration.

IV.2.8 Maladies dues aux ciments

Dans le ciment classique 20% à 30 % de son poids est constitué par des poussières d'un diamètre inférieur à 5 micromètre. Son pH est de 12 à 13 dans l'eau ce caractère basique entraîne des effets caustiques sur la peau (brûlures) et de par les poussières, des irritations des voies aériennes supérieures. Il comporte des traces de nickel, de chrome, et de cobalt susceptibles d'engendrer des réactions allergiques à la suite de contacts prolongés et répétés avec la peau, après adjonction d'eau (Pietri, A. M. 2011). Le tableau IV.2 nous illustre une liste indicative de travaux susceptibles de provoquer les maladies induites par les ciments.

IV.2.8.1 Dermatoses allergiques

Mécanisme physico-pathologique de l'eczéma de contact. Le chrome présent dans le ciment à faible concentration est un allergène très puissant. Il se fixe sur une protéine pour donner une molécule très petite pénétrant de préférence dans la peau par les pores des glandes sudoripares et les follicules pileux. Une peau saine sera moins attaquée qu'une peau déjà malade. C'est au cours du contact ultérieur avec l'antigène que se déclenche la réaction immunitaire qui conduit à l'eczéma. L'eczéma de contact est une réaction d'hypersensibilité retardée. Elle est différente de l'hypersensibilité immédiate responsable d'asthme et de rhinite.

Tableau IV.2 : Travaux susceptibles de provoquer les maladies induites par les ciments

<i>Affectations causées par les ciments</i>	<i>Lieux exposés</i>	<i>Professions exposées</i>
<i>Emploi des ciments dans les chantiers du BTP</i>	<i>Gros œuvre, bâtiment Génie civil</i>	<i>Manœuvre Maçon Coffreur-boiseur Conducteur de centrale à béton</i>
	<i>Travaux en façade de bâtiment</i>	<i>Enduiseur de façade (façadier) Ravaleur Tailleur de pierre</i>
	<i>Aménagements intérieur et extérieur de bâtiment</i>	<i>Carreleur Poseur de revêtements de sol chapiste</i>
	<i>ensemble de métiers du second œuvre</i>	<i>plombier chauffagiste menuisier poseur</i>
	<i>travaux publics génie civil</i>	<i>canalisateur maçon projecteur de béton</i>
	<i>autres</i>	<i>fondations travaux souterrains travaux en mer, en eau douce</i>
<i>Fabrication à l'aide de ciments de matériaux agglomérés et objets moulés</i>	<i>fabrication et préfabrication de matériaux de construction</i>	<i>Mouleur en béton industriel Mouleur en parpaing Ouvrier en préfabrication</i>

IV.2.8.2 Ulcérations cutanées

Plus ou moins arrondies et douloureuses touchant habituellement la pulpe des doigts, des brûlures chimiques touchant les jambes et les pieds à la suite, par exemple du déversement de ciment liquide à l'intérieur d'une botte au cours de travaux de coulage. Elles sont liées au contact direct du ciment avec la peau en raison de sa causticité d'où l'importance d'un lavage rapide.

Aggravés par des traumatismes physiques (manipulation de briques, de parpaings), action agents atmosphériques (froid et humidité) et des agressions chimiques.

IV.2.8.3 Dermites d'irritation

S'accompagnent de rougeur, d'œdème, de suintement peuvent prêter à confusion avec des dermites allergiques.

IV.2.8.4 Dermites résiduelles

Qui persistent assez longtemps après l'arrêt de l'exposition au ciment, traduisent l'usure cutanée, mais aussi sa réactivité à n'importe quel irritant.

Les atteintes unguéales (ongles) souvent associées à des mycoses peuvent se rencontrer ainsi que des infections cutanées.

IV.2.8.5 Atteinte oculaire

Le caractère pulvérulent du ciment, sa causticité peuvent entraîner une irritation des paupières (blépharite) oculaire (conjonctivite) entraînant larmoiement, œil rouge, hypersensibilité à la lumière... ceci nécessite un lavage immédiat de l'œil courant pendant 15 mn au minimum et le transport dans les cas, du salarié chez l'ophtalmologiste en urgence.

IV.2.9 Mesures d'atténuation pour l'environnement

Les différentes mesures d'atténuation des impacts énumérés ci-dessous peuvent être résumées de la manière ci-après ;

a. Émissions (poussières) provenant des carrières, les principales sources de risque sont :

Forage, abattage à l'explosif, chargement et déchargement, concassage, transport, circulation.

- Perforer les trous de mine avec des trépan affûtés et forer avec des arroseurs (forage à l'eau) afin de produire le moins de poussière possible ;
- Appliquer des méthodes d'élimination des poussières (arrosage) sur les surfaces/sites avant et après l'abattage à l'explosif et pendant le chargement ;
- Imposer une vitesse limite aux camions/tombereaux circulant dans la zone minière ;
- Arroser régulièrement les routes pendant le transport des matières premières ;
- Fournir des masques anti-poussières aux personnes travaillant sur les sites où des particules atmosphériques sont émises : points de forage de chargement et Aménager une ceinture verte dans le site minier ;
- Utiliser des explosifs de bonne qualité, équilibrés en oxygène ;
- Limiter les émissions atmosphériques résultant du broyage en utilisant des dépoussiéreurs à sacs filtrants.

b. Émissions provenant des cheminées, Principales sources de risque sont : Émissions atmosphérique : Concasseur, broyeur de cru, cheminée, refroidisseur de clinker, broyeur à ciment, les Mesures d'atténuation sont :

- Assurer une combustion optimale dans les cheminées ;
- Veiller à la bonne conception des dépoussiéreurs à sacs ;
- Prévoir dans le dispositif de commande, un déclencheur automatique qui signale toute panne de matériel de résistance à la pollution ;
- Installer sur la cheminée du four, un système de surveillance continue de la poussière ;
- S'assurer que le SO₂ et le NO_x rejetés par les cheminées soient conformes aux normes admissibles ;
- Diminuer la flamme de combustion primaire permettra de réduire la quantité de NO_x grâce à un système de brûlage à faible NO_x bien conçu ;
- Réduire au minimum l'impact des émissions de CO en recourant à l'utilisation d'explosifs garantissant un niveau d'oxygène équilibré.

c. Émissions de bruit, Principales sources de risque sont: Utilisation d'engins bruyants tels que compresseurs, pompes, entretien Mouvements de la circulation, Le niveau total du bruit sur les passages et les chantiers doit être inférieur à 85 dB (A) et les travailleurs ne devront pas être exposés à des niveaux de bruit supérieurs à 85 dB (A) sans le port de dispositifs de protection antibruit :

- Le niveau du bruit aux abords de l'usine doit être inférieur à 70 dB (A) ;
- Effectuer l'abattage à l'explosif uniquement dans la journée et à l'aide de détonateurs à microretard muni d'un dispositif de relai à cordeau afin d'atténuer le bruit ;
- Acheter des matériels de forage et de chargement, tombereaux et autres, à cabine de commande insonorisée ;
- Entretenir régulièrement les matériels bruyants ;
- Se doter de silencieux, le cas échéant ;
- Fournir aux conducteurs le matériel de sécurité et de protection requis (bouchons d'oreilles, casques antibruit etc.) ;
- Aménager un espace vert sur le site de l'usine et aux abords.

d. Vibration du sol/projection de roches, les principales sources de risque sont : Forage, abattage à l'explosif. Les mesures d'atténuation sont la Planifier minutieusement, vérifier, exécuter et suivre chaque opération d'abattage à l'explosif.

- Toujours perforer les trous de mine avec des détonateurs à microretard plutôt que d'utiliser le système de tir instantané. Un léger décalage dans la détonation de trous successifs permet d'atténuer efficacement les vibrations ;
- Dégager convenablement les fronts de tout déblai meuble et de morts-terrains avant l'abattage ;
- Utiliser le système de tirs en plusieurs rangées ;
- Utiliser le nitrate-fuel qui a une faible vitesse de détonation ;
- permettra également d'atténuer les vibrations à microretard plutôt que d'utiliser le système de tir instantané. Un léger décalage dans la détonation de trous successifs permet d'atténuer efficacement les vibrations.

IV.3 Déchets solides (dangereux et non dangereux)

Les principales sources de risque sont l'entretien et exploitation de l'usine intégrée, entreposage et manipulation des hydrocarbures, fuite accidentelle. Les mesures d'atténuation sont :

- Utiliser si possible des matériaux non dangereux plutôt que des matériaux dangereux ;
- Stocker tous les matériaux dangereux (combustibles, réactifs, produits inflammables, corrosifs et toxiques) dans des conteneurs ou récipients clairement libellés Brûler tous les déchets dangereux, résidus de processus, solvants, hydrocarbures et boues dans un four après autorisation des autorités compétentes ;
- Recycler les matériels ou les mettre en valeur, le cas échéant ;
- Transporter avec précaution les déchets vers les décharges et désinfecter les carrosseries des véhicules de transport.

IV.4 Maladies dues aux ciments

Principales sources de risque sont la projection du béton, maçonnerie, carrelage...les mesures d'atténuation sur l'utilisation du ciment sont les mesures de prévention collectives tels que étiquette clairement les sacs de ciments ; Informer les utilisateurs habituels et occasionnels du risque encouru.

Et les mesures de prévention individuelle ; comme éviter tout contact direct entre la peau et le ciment frais ; porter des gants adaptés (en nitrile ou en néoprène doublés de jersey) ; ne pas s'agenouiller sur du ciment frais, changer régulièrement de tenue de travail, après avoir manipulé du ciment, se laver les mains avec un savon neutre, utiliser des crèmes protectrices

pendant et/ou après la manipulation de ciment, se doucher à la fin de la journée de travail, si du ciment frais entre en contact avec la peau ou avec les yeux, rincer à l'eau pendant 15 min.

IV.5 Conclusion

Le ciment est un matériau indispensable pour la construction et le développement de tous les pays, mais les poussières et les gaz dégagés lors de sa fabrication polluent l'atmosphère et mettent en danger la vie humaine et l'agriculture avoisinantes.

D'après les analyses des sols réalisées au laboratoire, il ressort que les teneurs en silice, en alumine et en chaux sont très remarquable, affirmant qu'il y a des apports extérieurs de ces matières dont la source principale est la poussière et les gaz dégagés de la cimenterie, d'où la dépollution dans cette zone devient aujourd'hui une nécessité pour éviter plus de pollution et une mort progressive des sols qui l'avoisinent. Des dépoussiéreurs appropriés, de sorte que les poussières ne peuvent s'échapper dans l'atmosphère.

Concernant la localisation : la nocivité des cimenteries serait moindre si ces usines étaient installées dans des régions à faibles densité humaines et sur des terres non agricoles.

CONCLUSION GENERALE

L'étude menée sur le comportement du laitier de haut fourneau de l'usine sidérurgique d'El-Hadjar sur le mélange clinker, nous a permis de tirer les conclusions suivantes :

- La composition granulométrique du laitier granulé d'El-Hadjar montre une distribution granulométriques d'une manière irrégulière, le produit présente deux grandes populations de particules de tailles inférieure à 1mm, d'une proportion relative de 36.86%, par contre la deuxième population se situe dans l'intervalle de -1 +0.5mm, offre un taux de 39.20%.
- Les résultats de l'analyse chimique, montrent que le laitier est constitué de 95 à 98 % d'un mélange de quatre oxydes : La silice SiO_2 , La chaux CaO , L'alumine Al_2O_3 et La magnésie MgO ; Le complément est constitué des oxydes secondaires tels que FeO , MnO et les composés sulfurés. La composition minéralogique déterminée par la diffraction des rayons X, révèle principalement des constituants cristallisés, étant essentiellement des silicates ou des silico-aluminates de chaux. Entre autre, on rencontre aussi des oxydes, des sulfures, et exceptionnellement des nitrures.
- La composition chimique de la farine crue obtenue à base de laitier ; répond à la norme NA 442 : 2000. (CPJ CEM II/A 42.5), la qualité de ce dernier est vérifiée par les modules et les indices de contrôle.
- En comparaisons les deux types de clinkers produit (avec et sans laitier) ; les principales Phases, C_3S , C_2S , C_3A et C_4AF étaient bien formées. Le clinker avec laitier contenait plus de C_4AF et moins de C_2S , une différence qui était attribué au remplacement partiel du calcaire et du sable par le laitier, qui est plus élevé en fer que le premier (sans laitier).
- L'observation des sections polies sous le microscope optique assisté par ordinateur ; montre que dans les clinkers ; les phases ont été développées modérément et distribuées de manière inhomogène. Les phases de clinker ont été bien formés et les grains de l'alite et de Belite ont également été observés.
- Les essais réalisés sur plusieurs proportions de laitier montre que, l'ajout de 9% de laitier dans la matière première, n'influe pas sur la composition chimique et minéralogique du clinker, quoi qu'il résulte une diminution de la quantité du calcaire, allant jusqu'à 10%.
- Les principaux composés minéralogiques identifiées sont présentés par l'Alite, le Belite, l'Aluminate tricalcique et l'Alumino-ferrite tétra calcique. La phase Alite se présente sous forme de petits cristaux bien formés. Les cristaux de Belite étaient

uniformément répartis par rapport à l'Alite, ce qui confirme que la réaction de clinkérisation avait dans la direction de l'Alite et que le mélange de la farine crue était homogène. La phase liquide se présente sous la forme de cristaux fins, uniformément répartis.

- A l'aide de logiciel GIMIS, les essais de clinkérisation à base de laitier réalisée au niveau de laboratoire, montrent une diminution dans le taux annuel d'émission de CO₂ allant jusqu'à 17.56%. Cette baisse due principalement au remplacement partiel du calcaire (CaCO₃) dans la matière première par un produit déjà décarbonatés (le laitier).
- Le clinker aussi obtenue répond aux exigences industrielles des ciments composés ; la norme NA 442 : 2000. (CPJ CEM II/A 42.5).
- L'utilisation des déchets sidérurgiques tels que les laitiers comme ajout dans la matière première du ciment, peut jouer un rôle important dans le développement durable, car les matériaux sont disponibles localement qui se trouvent non loin de la cimenterie. Les déchets de laitier peuvent faire l'objet d'un substitue du sable et partiellement du calcaire, car ces dernières matières premières naturelles sont des gisements non renouvelables, à cet effet l'utilisation de déchet industriels et minières est atout positifs pour la préservation de l'environnement et de ressources naturelles de réserves limitées.

REFERENCES.

- **Altun A., Yilmaz I., 2002**, Study on steel furnace slags with high MgO as additive in Portland cement, Cem. Concr. Res. 32 (8), p : 1247–1249.
- **Alexandre J. et Sebileau J.L., 1988**, Le laitier de haut fourneau. C.T.P.L.
- **Alvarez, D. et Abanades J. C., 2005**, Determination of the critical product layer thickness in the reaction of CaO with CO₂. Industrial & engineering chemistry research, 44 (15), 5608-5615.
- Annual Mean Global Carbon Dioxide Growth Rates, 2012. Dlugokencky and Tans. Published in. Retrieved on 18 November 2013.
- **Arabi N., 1988**, « Etude des briques silico-calcaire à base de laitier granulé ». Université Badji Mokhtar Annaba.
- **Belboom, S. (2008)**. Influence de l'utilisation des combustibles de substitution sur le cycle de vie du ciment (Doctoral dissertation, Université de Liège, Liège, Belgium).
- **BENCHANAA, M. et KAMALI, A.** Étude de la réactivité de crus de cimenterie en fonction des paramètres d'optimisation du procédé de clinkérisation. In : Annales de Chimie Science des Matériaux. No longer published by Elsevier, 2000. p. 241-262.
- **Bendib A., 2006**, Historique du ciment et situation de la production du ciment en Algérie de 1962 à 2005. Groupe industriel et Commercial de Ciment et Dérives de l'Est/ GICA.
- **Bogue R.H., 1952**. La chimie du ciment portland.
- **Burteaux M., 1985**, La filtration du laitier granulé par le système INBA. Laitier de hauts fourneaux, no58.
- **C.E.T.I.M, 1975**, « centre d'étude technologique industrielle des matériaux de construction » BOUMERDES / Rapport géologique actualisé- gisement calcaire SCHS.
- **C.E.T.I.M, 2012**, rapport géologique actualisé juillet.
- **Camille D., 2004**, Chimie du ciment valorisation des déchets en cimenterie. FDSA, Université Libre de Bruxelles
- **CETIM 2015**, Bilan thermique de l'atelier de cuisson de ligne N°2 (SCHS).
- **Cloutier V., 2004**, Origine et évolution géochimique des eaux souterraines du système aquifère des Basses-Laurentides dans les roches sédimentaires paléozoïques des basses-terres du Saint-Laurent, Québec, Canada (Doctoral dissertation, Université du Québec, Institut national de la recherche scientifique).
- **Coquillat G. et autres mars 1980**, Granulats légers pour bétons de structure. Granulats légers pour béton légers isolants et porteurs. Fiches d'information. Annales de l'ITBTP. No 193.

- **Cotsworth R.P., 1979**, The pelletizer. Description, installation and operation. National Slag Association Meeting. Cincinnati.
- **CTPL, 2004**, Centre technique et de promotion des laitiers sidérurgiques ;5 rue Luigi Cherubini 93212 La Plaine Saint Denis cedex, Paris.
- Directive pour la réalisation des assises de chaussée en graves traitées aux liants hydrauliques, juin 1983, (LCPC/SETRA) DRCCR.
- Directive pour la réalisation des assises de chaussée en sables traités aux liants hydrauliques. 1985, (L.C.P.C./S.E.T.R.A.) D.R.C.R.
- **Dron R., 1984**, Les nouveaux activants du laitier. Laitier de hauts fourneaux, no 57.
- **Dron R., 1984**, Structure et réactivité des laitiers vitreux. Laboratoire Central des Ponts-et-Chaussées. EDIP method. Environ news, vol : 80.
- **Gaye H. et Steiler, J.M., 1987**, Données thermodynamiques et physiques des laitiers de haut fourneau. IRSID. PCMRF337 bis.
- **Gharnouti Y., Abadlia M.T. et Chaid R., 2003**, «Effet des ajouts cimentaires ultrafins sur les propriétés physico-mécaniques et la durabilité des bétons». Séminaire International de géomatériaux, GEOMAT 02 M'sila.
- **Hauschild MZ., Potting J., 2003**, Spatial differentiation in life cycle impact assessment: the
- **ICEDD, 2005**, Situation environnementale des industries cimentières. wallonne.
- **Idrissi, M., 2012**, Etude de l'inclusion du fer dans les ciments sulfao-alumineux et valorisation du caoutchouc dans leurs mortiers.
- **Jacobs J.P., 2007**, « La contribution de l'industrie cimentière à la réduction des émissions de CO₂ » syndicat française de l'industrie cimentière.
- **Javelle P. et Ponteville P., 1966**, Caractéristiques et emploi des laitiers de hauts fourneaux. Commission des hauts fourneaux. A.T.S.
- **Keil F., 1949**, Hochofenschlacke. Düsseldorf Verlag Stahleisen.
- **Kunicki M. et Roussel M., 1977**, Le Galex (laitier bouleté), granulats légers de béton expansé. Silicates Industriels.
- **Morandea A. 2013**, Carbonatation atmosphérique des systèmes cimentaires à faible teneur en portlandite. 2013. Thèse de doctorat. Université Paris-Est.
- **Namoulniara, D. K., 2015**, Etude expérimentale de la diffusion du CO₂ et des cinétiques de carbonatation de matériaux cimentaires à faible dosage en clinker (Doctoral dissertation, Université de La Rochelle).
- **Tsakiridis P.E., 2008**, "Utilization of steel slag for Portland cements clinker production" Journal of Hazardous Materials 152 (2008) 805–811.
- **Pazdej R., 1982**, Traitements particuliers du laitier de hauts fourneaux. Récupération de chaleur sensible et fabrication de sable de laitier. MCFN 1741. IRSID.

- **Pazdej R., 1982**, Traitements particuliers du laitier de hauts fourneaux. Récupération de chaleur sensible et fabrication de sable de laitier. MCFN 1741, IRSID.
- **Philibert et al. 1997**, Métallurgie, du minerai au matériau. Masson Editeur, Paris.
- **Pliskin, 1993**, « chimie des ciments » Edition Eyrolles – p 217, Paris.
- **Ponteville P. 1978**, Le béton hydraulique de granulats de laitier. Laitier de hauts fourneaux, no43.
- **Pré Consultants; GEMIS 4.9, 2014**, Life cycle assessment software package, Global Emission Model for integrated systems, Version 4.9. Öko-Institut;.
- **Regourd M., 1980**, Structure et comportement des hydrates des ciments au laitier. 7^e congrès international de la chimie des ciments, Paris.
- **Shi C. et Hu S., 2003**, Cementitious properties of ladle slag fines under autoclave curing conditions, Cem. Concr. Res. 33 (11), p : 1851–1856.
- **Smolczyk H.G., 1980**, Structure et caractérisation des laitiers. 7^e congrès international de la chimie des ciments, Paris.
- **Thomas G.H. et Stephenson I.M., 1978**, The beta to gamma dicalcium silicate phase transformation and its significance on air-cooled slag stability. Silicates Industriels.
- **Van Den Hove Ch., 1983**, Les procédés de récupération de la chaleur sensible des laitiers de hauts fourneaux. Commission Européenne des Hauts Fourneaux. Paris.