



Département de Génie Mécanique

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

Envue de l'obtention du diplôme de :

MASTER

En Génie Mécanique

Option: Génie des Matériaux

Présenté par :

Benaïssa Aya Malek et Merzougui Asma

Thème

**Caractérisation du minerai de fer comme composé du clinker
pour la fabrication du ciment.**

Devant le jury composé de:

NOM et Prénom	Grade	Qualité
HOCINE Mostapha	MCB	Président
ROUABHI Youcef	MCB	Examineur
FARSI Chouki	MCA	Encadreur

Année Universitaire: 2021/2022

N° d'ordre: GM/...../2022

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciements

D'abord et avant tout, on doit remercier le Dieu le tout puissant de nous avoir donné la patience, la force et la volonté afin de mener à bien ce projet de fin d'étude.

Nous remercions notre encadreur Mr FARSI CHOUKI de nous avoir fait confiance et de nous avoir suivis de près pendant toute la durée de notre travail.

*Aussi nous remercions **tous les enseignants** du département de génie mécanique de l'université de M'sila qui ont contribué de près ou de loin à notre formation.*

*Nous tenons à remercier également **TOUS CEUX QUI ONT** contribué à réaliser ce modeste travail avec leur conseil, surtout avec leur soutien durant ce mémoire.*

Aussi nous tenons à remercier tous le personnel du stage pratique, notamment le directeur et les cadres.

Merci à tous

Dédicace1

Jedédiecet travail:

*A la mémoire de
mon
père Ama
chère mère*

*AMes chers frères et sœurs
Atoutema famille
Atousmes aimables amis.*

Benaissa Aya Malek,

Dédicace2

*Ames chers parents
A Mes chers frères et
sœurs Atoute ma famille
Atousmes aimables amis.*

Merzougui Asma

ملخص

لتصنيع الأسمنت ، يجب الجمع بين أربعة عناصر رئيسية وفقاً للجرعات المحددة مسبقاً: خام الحديد أو (أكسيد الحديد (5٪) ، الجير (65٪) ، السيليكا (20٪) ، الألومينا (10٪). العنصر الأساسي هو الحجر الجيري. أو الطباشير. كما تقع أعمال الأسمنت بالقرب من رواسب كبيرة من هذه المواد كل هذه العناصر ، التي تسمى خام ، يتم معالجتها بعد ذلك في منشآت باستخدام عملية رطبة أو جافة ، اعتماداً على محتوى الماء في الحجر الجيري أو الطباشير في العملية الرطبة ، يتم طحن المادة الخام وخلطها بالماء لتشكيل عجينة سائلة يتم تجانسها وتخزينها في خزانات أسطوانية كبيرة. ثم يتم إدخال هذا المعجون في الجزء العلوي من الفرن. في العملية الجافة ، يتم تجفيف المادة الخام ثم طحنها. ثم يتم تجانسها في صوامع كبيرة. يتم إدخاله أخيراً في شكل مسحوق في برج التسخين المسبق حيث يتم إزالة الكربون جزئياً ، قبل دخول الفرن الفعلي. في هذا العمل ساهمنا في التعرف بشكل أفضل على خصائص خام الحديد ، كمادة مهمة والتي توجد بكميات كبيرة في بلادنا. الهيماتيت Fe_2O_3 : معيني السطوح ، وتعتمد أشكال التبلور على درجة حرارة التصلب. وهو أيضاً أكسيد يحتوي على ما يصل إلى 73٪ من الحديد. بكثافة 5.26 وصلابة 6 ، لونها رمادي لامع في الشكل. يمكن أن يؤدي الاستخدام الصحيح لهذا المنتج إلى تحسين العديد من الأشياء وفقاً لهذه الخصائص الفيزيائية والميكانيكية والكيميائية

Résumé

Pour fabriquer du ciment, il faut réunir quatre éléments principaux selon des dosages préétablis :

Le minerai de fer ou (l'oxyde de fer (5 %), la chaux (65 %), la silice (20 %), l'alumine (10 %),.

L'élément prépondérant étant le calcaire ou la craie. Les cimenteries sont d'ailleurs implantées à proximité d'importants gisements de ces matières.

L'ensemble de ces éléments, appelé cru, est ensuite traité en installations procédant par voie humide ou par voie sèche, suivant la teneur en eau du calcaire ou de la craie.

Dans la voie humide, le cru est broyé et malaxé avec de l'eau pour constituer une pâte liquide qui est homogénéisée et stockée dans de grandes cuves cylindriques. Cette pâte est ensuite introduite dans la partie supérieure du four. Dans la voie sèche, le cru est séché puis broyé. Il est ensuite homogénéisé dans de grands silos. Il est enfin introduit sous forme pulvérulente dans une tour de préchauffage où la décarbonation se déroule partiellement, avant d'entrer dans le four proprement dit. Dans ce travail on a contribué à mieux connaître les caractéristiques du minerai de fer, comme matériaux importants et qui se trouve en grande quantité dans notre pays. **L'hématite** : Fe_2O_3 rhomboédrique, ses formes de cristallisation dépendent de la température de solidification. C'est aussi un oxyde qui contient jusqu'à 73 % de fer. De densité 5,26 de dureté 6, elle est gris brillant sous forme. La bonne exploitation de ce produit permet d'améliorer beaucoup de chose selon ces propriétés physiques, mécaniques et chimiques.

Abstract

To manufacture cement, four main elements must be combined according to pre-established dosages: Iron ore or (iron oxide (5%)), lime (65%), silica (20%), alumina (10%). The preponderant element being limestone or chalk. The cement works are also located near large deposits of these materials. All of these elements, called raw, are then treated in installations using a wet or dry process, depending on the water content of the limestone or chalk.

In the wet process, the raw material is ground and mixed with water to form a liquid paste which is homogenized and stored in large cylindrical tanks. This paste is then introduced into the upper part of the oven. In the dry process, the raw material is dried and then ground. It is then homogenized in large silos. It is finally introduced in powder form into a preheating tower where the de carbonation takes place partially, before entering the actual furnace.

In this work we have contributed to better know the characteristics of iron ore, as an important material and which is found in large quantities in our country. Hematite: rhombohedra Fe_2O_3 , its forms of crystallization depend on the temperature of solidification. It is also an oxide that contains up to 73% iron. With a density of 5.26 and a hardness of 6, it is shiny gray in form. The proper use of this product can improve many things according to these physical, mechanical and chemical properties.

Table des Matières

Introduction Générale	1
Historique et origine	2
Chapitre I : Généralités sur le ciment	
I.1. Introduction	4
I.2. Définition	4
I.3. Technologie de fabrication du ciment	4
I.3.1. Etape 1 : Préparation des matières premières	4
I.3.1.1. Exploitation Carrière.....	5
I.3.1.2. Concassage.....	5
I.3.1.3 Stockage	6
I.3.2. Etape 2 : dosage et broyage cru	7
I.3.2.1. Dosage.....	7
I.3.2.2. Broyage du cru.....	8
I.3.3. Etape 3 : Production du Clinker	8
I.3.3.1. Matières premières et ajouts	8
I.3.3.2. Calcaire.....	8
I.3.3.3. La silice.....	9
I.3.3.4. La magnésie; le fer et les alcalis.....	9
I.3.3.5. Les éléments argileux calcaires	9
I.3.3.6. Le gypse.....	10
I.3.3.7. Le minerai de fer.....	11
I.3.3.8. Le tuf.....	12
I.3.3.9. Matériaux de correction.....	12
I.3.3.10. Minerai de fer (Fe_2O_3)	12
I.3.3.11. Bauxite.....	13
I.3.3.12. Gypse	13
I.3.4. La cuisson du clinker.....	16
I.3.4.1. Séchage.....	16
I.3.4.2. Préchauffage.....	16
I.3.4.3. Calcination.....	17
I.3.4.4. Refroidissement.....	18

Chapitre II : Contrôle de Qualité

II.1. Contrôle de Qualité de ciment	20
II.2. Détermination de l'oxyde de fer (Fe_2O_3)	21
II.2.1. L'oxyde de fer	22
II.2.2. Structure	24
II.2.3. Phase alpha	25
II.2.4. Autres phases solides	25

Chapitre III : Préparation clinker pour la fabrication du ciment

III.1. Détermination de la perte au feu (PAF) « NA235 »	26
III.1.1. Objet et domaine d'application	26
III.1.2. Préparation d'un échantillon de ciment	26
III.1.3. Principe	26
III.1.4. Mode opératoire	26
III.1.5. Expression des résultats	27
III.2. TECHNOLOGIE DE PRODUCTION DU CIMENT	28
III.2.1. La carrière de cimentrie	29
III.2.2. La pré-homogénéisation des matières premières	29
III.2.3. Le broyage du cru	30
III.2.4. L'homogénéisation du cru	31
III.2.6. La cuisson	31
III.2.5. Le préchauffage du cru	32
III.2.7. Le refroidissement du clinker	33
III.2.8. Le stockage du clinker	34
III.2.9. Le broyage du ciment	34
III.2.10. Le stockage du ciment	35
III.2.11. Le contrôle qualité du ciment	35

III.2.12. Conditionnement et expédition du ciment et béton	36
III.2.13. Le transport du ciment.....	37
III.3.14. EXEMPLE DE RESULTATS D'ANALYSE CHIMIQUE.....	37
III.3.1. le clinker.....	37
IV. Partie Expérimentale.....	39
IV.1 Principe d'essai.....	39
IV. Partie Expérimentale:	39
IV.1 Principe d'essai.....	39
IV .2 Partie expérimentale.....	39
IV.2 Broyage.....	39
IV .2. Tamisage	40
Conclusion générale	45
Bibliographie.....	46

ListedesTableaux

TABLEAU.IV .1 : Composition chimique du clinker	39
Tableau.IV.2: des classes choisies pour les essais en mm.....	41
TABLEAU.IV.3: Relevé des valeurs de la température du clinker pendant l'échauffement naturel a l'air libre par exposition au soleil le matin de la FARGE cimenterie de Msila.....	41
TABLEAU.IV.4.: Refroidissement naturel de clinker	43

Listedesfigures

ChapitreI:Généralitéssurle ciment

Fig.I.1 :Exploitation carrière	5
Fig.I.2 : concasseur à marteaux.....	5
Fig.I.3 :Concasseur a marteau du type MEKAoù les sections articulées	6
FigI.4 :Le marteaux du concasseur type MEKAoù les marteaux et les grilles.....	6
Fig.I.5 :Sylot de stockage circulaire.....	7
Fig.I.6 : Sylotde stockage linéaire.....	7
Fig.I.7 :Atelier de dosage.....	7
Fig.I.8 : Broyeur de ciment.....	8
Fig.I.9 :Grains de pouzzolane.....	10
Fig.I.10 :Grain de gypse.....	11
Fig.I.11 :le Tuf.....	11
Fig.I.12 :les étapes de production du clinker.....	12
Fig.I.13 :Minerai de fer sous forme de poudre.....	13
Fig.I.14 :Minerai de fer a petite dissemination.....	13
Fig.I.15 :Sable sous forme riche en fer.....	14
Fig.I.16 :Bloc de sable riche en alumina.....	14
Fig.I.17 :Sable combine.....	15
Fig.I.18 :Gypse en poudre.....	15
Fig.I.19 :Gypse en bloc de la carrier.....	16
Fig.I.20 :Les cyclones.....	17
Fig.I.21 :Schéma indiquant le processus pour l'obtention du clinker	17
Fig.I.22 : Dessinreprésentant le minéraux observables au microscope optique d'un grain de clinker.....	18
Fig.I.23 :Opération du refroidisseur.....	19
Fig.I.24 :Les étapes de cuisson du clinker.....	19

ChapitreII:

Fig.II.1: Contrôle de qualité de ciment (pesage)	20
Fig.II.2: Contrôle de qualité de ciment (Echantionnage).....	20
Fig.II.3: Structure de fer.....	24
Fig.II.4 : Minerai de fer en poudre.....	24
Fig.II.5: Diagramme du PH en fonction des phases et charges Standards du Fer.....	24

ChapitreIII

Fig.III.1: balance électronique.....	26
Fig.III.2: Four électrique.....	27
Fig.III.3: creuset.....	27
Fig.III.4: Clinker.....	28
Fig.III.5: Exemple de carrier de cimentrie.....	30
Fig.III.6: La pré-homgéisation des matières premiéres.....	30
Fig.III.7: broyage du cru.....	31
Fig.III.8: L'homogénéisation du cru.....	31
Fig.III.9: Le préchauffage du cru.....	32
Fig.III.10: Le refroidissement du clinker.....	33
Fig.III.11: stockage du clinker.....	33
Fig.III.12: broyage du ciment.....	34
Fig.III.13: stockage du ciment.....	35
Fig.III.14: contrôle qualité du ciment.....	35
Fig.III.15: Conditionnement etexpédition du ciment et béton.....	36
Fig.III.16: La courbe de variation du C_3S en fonction de MgO	36

Figure parti pratique

Figure IV.1: Broyeur du laboratoire du Hall technologique.....	40
Figure IV.2: Boulets utilisées pour le broyage du clinker.....	40
Figure IV.3: Serie des tamies utilisée.....	40
Figure IV.4: Les classes envisagées dans ce travail du clinker obtenu par ajouts du minerai de fer	41
FigureIV.5: Courbe d'échauffement naturel des classes envisagées du clinker obtenu par des ajouts de minerai de fer.....	43
Figure IV.6: Courbe de refroidissement naturel des classes envisagées Du clinker obtenu par des ajouts de minerai de fer.....	44

Introduction Générale :

L'utilisation de liants comme le minerai de fer remonte à l'antiquité. Les égyptiens avaient découvert un liant calcique, obtenu par cuisson de roches calcaires. La chaux vive produite était préalablement éteinte par de l'eau. Son durcissement s'effectuait par carbonatation à l'air. Plus tard les romains ont introduit des cendres volcaniques (la pouzzolane) à la chaux vive. Ce matériau durcissait à température ambiante par ajout d'eau. Il souffrit cependant de la concurrence de la chaux et de la brique et resta peu utilisé. C'est seulement au XIX^{ème} siècle qu'apparut le ciment que nous connaissons. Il doit son essor aux travaux de recherche et la mise au point du ciment artificiel par Louis Vicat. Actuellement, le ciment est présent dans la plus part des édifices, c'est le matériau de base pour la construction d'ouvrages de bâtiment et de génie civil. Il est devenu un matériau incontournable dans la construction. La production de l'industrie cimentière est directement liée à l'activité du secteur de la construction en général et est donc étroitement tributaire de la conjoncture économique générale. Le clinker qui le produit des tous venants des cimenteries est composé d'une partie importante de minerai de fer est composé de chaux, silice, alumine.

Ce travail contribue aux recherches sur ce **minerai de fer** comme un important ajout pour la matière première du ciment.

L'étude de ces caractéristiques que ce soit mécaniques ou physiques avant ou après son exploitation dans les cimenteries est très importante au point de vue qualitatif ou quantitatif pour la production du ciment. Etant donné que ce produit (minerai de fer) est d'une grande quantité dans l'écorce terrestre presque 50% ce qui le favorise à être utiliser.

Les propriétés mécaniques du ciment sont déterminées par les caractéristiques physiques et chimiques de ses constituants et donc sont étroitement liées au comportement et à la réaction de ses composants à des phénomènes aux niveaux micro et nano. Ainsi, une nano-modification du ciment et de ses hydrates pourrait avoir une incidence majeure sur les propriétés du ciment. En outre, l'utilisation d'adjuvants comme les polymères dans le ciment, est une pratique répandue. Une meilleure compréhension du type d'interactions entre ces adjuvants et les silicates de calcium hydratés (C-S-H) au niveau nano pourrait fournir de nouveaux aperçus de la performance des constituants du ciment aux niveaux micro et macro.

C'est dans ce contexte d'interaction entre molécules organiques (Polyéthylène glycol) et les silicates de calcium hydratés ou C.S.H (ciment) que s'inscrit cette étude sur la synthèse et la caractérisation de silicates de calcium hydratés (C.S.H) hybrides Ce mémoire de Master est divisé en deux parties,

l'une théorique composée de trois chapitres et l'autre expérimentale qui en comporte deux. Dans la partie théorique Après l'introduction générale, les chapitres un, deux et trois sont consacrés à une étude bibliographique détaillée se rapportant d'une part au ciment (Principaux constituants de ciment et ajouts, Classification et Processus de fabrication du ciment), des polymères (utilisation et propriétés des polymères ...) et d'autre part à la mise en œuvre des nano composites. Dans la partie expérimentale, le chapitre quatre présentes les méthodes de caractérisation.

Historique et origine:

Le ciment aurait d'abord été inventé par les Égyptiens, qui a été améliorée par les civilisations suivantes par l'ajout de chaux à de l'argile. Les Grecs d'Italie le renforcèrent avec des cendres pouzzolaniques (cendres volcaniques de la région de Pouzzoles), et cet usage a été repris et généralisé par les Romains. Jusqu'à l'Époque moderne, le ciment est un liant, souvent une chaux, additionnée à des adjuvants comme les tuiles ou briques concassées, dont l'argile possède des propriétés hydrauliques. La pouzzolane est très utilisée comme adjuvant. Le ciment ne prit son acception contemporaine qu'au XIXe siècle, lorsque Louis Vicat identifia le phénomène d'hydraulicité des chaux en 1817, et celle des ciments, qu'il appelait chaux éminemment hydrauliques, ou chaux limites, en 1840. La recherche sur l'hydraulicité des chaux débuta à la fin du XVII pour aboutir vers 1840, à la fabrication des ciments modernes. Elle concernait les chaux grasses, non hydrauliques, qui ne durcissent pas sous l'eau, les chaux hydrauliques qui durcissent même sous l'eau, les chaux éminemment hydrauliques (riches en argiles) qui se solidifient très rapidement, et les chaux limites (trop riches en argiles) qui se solidifient très rapidement puis se décomposent, si elles ne sont pas cuites au degré de fusion pâteuse [2]. En 1796, James Parker découvrit sur l'Île de Sheppey, en Grande Bretagne, le ciment prompt (une chaux éminemment hydraulique ou ciment naturel à prise rapide, cuit à 900 °C comme les chaux naturelles ordinaires) qu'il baptisa commercialement ciment romain. Ce ciment acquit par la suite, de 1820 à 1920 environ, une grande réputation. Il fut fabriqué dans toute l'Europe et servait à faire des moulages au gabarit, ou à fabriquer des pierres artificielles de ciment moulé. Au début du XIXe siècle, toute l'Europe s'active, la France surtout, pour ne rien devoir aux britanniques ni à la pouzzolane italienne. Et le français Louis Vicat découvrit en 1817 le principe d'hydraulicité des chaux (concernant la proportion d'argile et la température de cuisson) et publia ses travaux sans prendre de brevet. En 1824, le Britannique Joseph Aspdin déposa un brevet pour la fabrication d'une chaux hydraulique à prise rapide qu'il appela commercialement le ciment Portland, car la couleur de son produit ressemblait

aux célèbres pierres des carrières de la péninsule de « Portland » situées en Manche. C'est un ciment similaire à ceux que décrivit Vicat, encore que son brevet soit imprécis. Mais il fallut attendre 1840, et la découverte des principes d'hydraulicité des ciments lents (dits aujourd'hui ciments Portland) toujours par Louis Vicat (une cuisson à la température de fusion pâteuse soit 1 450 °C qui permet d'obtenir le clinker) pour voir une réelle fabrication de ces ciments modernes, et voir apparaître ensuite une architecture de béton coffré puis de béton armé. La première usine de ciment a été créée par Dupont et Demarle en 1846 à Boulogne-sur-Mer. Le développement n'a pu se faire que grâce à l'apparition de matériel nouveaux, comme le four rotatif et le broyeur à boulets. Les procédés de fabrication se perfectionnèrent sans **CESSE**, et le temps nécessaire à produire une tonne de clinker, constituant de base du ciment, est passé de quarante heures en 1870, à environ trois minutes actuellement [3,4].

CHAPITRE I

Généralités sur le ciment

I.1.Introduction:

La fabrication du ciment est complexe et coûteuse elle consiste à broyer et chauffer des matériaux pour fabriquer une poudre réactive qui fera une prise hydraulique lorsque mise en contact de l'eau lors du mélange du béton. Le ciment est un Liant hydraulique (qui durcit sous l'action de l'eau), utilisé dans la préparation du béton et aujourd'hui le plus souvent employé dans la confection des dallages, des parpaings, des enduits et des mortie

I.2. Définition :

Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire une matière inorganique finement moulue qui, gâchée avec de l'eau, forme une pâte qui fait prise par suite de réaction et processus d'hydratation et

Qui après durcissement, conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau. Dans le langage courant, le terme de ciment peut être source de confusion lorsqu'il est utilisé pour désigner à la fois :

- La poudre de ciment (par exemple telle qu'elle est commercialisée en sac).
 - La pâte de ciment au moment de son gâchage à l'eau.
 - Le produit obtenu après durcissement. Dans tout ce qui suit, on distinguera ces différents états en appelant :
 - Ciment anhydre: (sans eau) la poudre de ciment avant son gâchage à l'eau.
 - Ciment hydraté : les composés, insolubles dans l'eau, obtenus par combinaison chimique de l'eau avec le grain de ciment anhydre.
 - Pâte fraîche de ciment : le mélange d'eau et de ciment anhydre avant que l'hydratation n'ait conduit à en faire un solide appelé pâte de ciment durcie.
- L'expression de : "pâte de ciment durcissant" sera utilisée pour désigner la pâte de ciment dans sa transformation d'un état plus ou moins fluide en un état solid [1,2]

I.3. Technologie de fabrication du ciment :

Pour produire le ciment il faut respecter les étapes suivantes:

I.3.1.Etape 1 : Préparation des matières premières

I.3.1.1. Exploitation Carrière :

Elle permet de fournir deux matières premières essentielles :le calcaire et l'argile, elles sont extraites comme des roches et cela par méthode de l'abattage à l'explosif, Ensuite les matières premières sont déversées dans des camions qui amèneront ses roches jusqu'à l'atelier de concassage. D'autres matières sont nécessaires pour la fabrication du ciment tel que le sable, le minerai de fer et le gypse. Mais, contrairement au calcaire et l'argile, elles sont achetées [1].



Figure I.1: Exploitation par carrière [1]

I.3.1.2. Concassage :

L'opération de concassage a pour objectif , la réduction des blocs de pierres en fragments de faibles cetteopération est assurée par un concasseur à marteaux ce sont les plus utilisés en cimenterie [1].



Figure I.2 : Concasseur a marteau du type MEKA



Figure I.3 : Concasseur a marteau du type MEKA où les sections articulées



Figure I.4 : Les marteaux du concasseur type MEKA où les marteaux et les grilles qui peuvent être facilement remplacés pour atteindre la taille de grain ciblée

I.3.1.3. Stockage :

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

calcaire et un hall a stockage linéaire pour l'argile et le sable et minerai de fer[1].



FigureI.5 :Sylot de stockage circulaire [1]



FigureI.6 : Sylot de stockage linéaire [1]

I.3.2.Etape 2 : dosage et broyage cru

I.3.2.1Dosage[1] :

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



FigureI.7: Atelier de dosage [1].

I.3.2.2 Broyage du cru :

Après l'opération de dosage, les matières premières extraites sont chargées sur un seul convoyeur à bande puis transportées au broyeur cru. La plupart des broyeurs dans l'usine de cimenterie de Biskra sont des broyeurs à boulets horizontaux à 2 chambres. La première a un rôle de concassage et la deuxième a un rôle de finisseur. Dans le cas de matières humides à traiter on a recours à une chambre de séchage. Dans le cas de matières humides à traiter on a recours à une chambre de séchage [1]



Figure .I.8 : Broyeur de ciment [1]

[1] Documentations de l'usine Biskria cimenterie SPA.

I.3.3. Etape 3 : Production du Clinker

I.3.3.1. Matières premières et ajouts :

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

On classe habituellement les matières premières naturelles en : - Calcaire : plus de 80% de CaCO_3 . - Eléments argilo- calcaires : de 40% à 80% de CaCO_3 . - Argile : moins de 40% de CaCO_3 [5].

I.3.3.2. Calcaire :

Les calcaires peuvent être de pureté et de dureté variable, ils proviennent du dépôt de CaCO_3

contenu dans les eaux de mer ou des lacs, dépôts provoqués par précipitation chimique ou réalisé par l'intermédiaire d'organisme vivant (mollusques, algues). Certains de ces dépôts soumis à une pression et à une température suffisante, ont donné des calcaires cristallins [5]

Les principales impuretés rencontrées dans les calcaires sont :

I.3.3.3.La silice :

Elle se présente sous plusieurs formes :

- Libre : elle ne peut se combiner et doit être éliminée si elle apparaît en nodules de silex ou de quartz, il peut en être autrement si elle se trouve finement divisée à l'état naturel et répartie dans la masse de calcaire.

- Combinée : divers éléments tel que le fer, la magnésie, l'alumine, la silice et l'alumine déjà combinée sous forme d'argile réagissent bien avec la chaux [5]

I.3.3.4.La magnésie : le fer et les alcalis :

-La magnésie est un élément dangereux du fait de son expansion ultérieure possible au sein du ciment hydraté. Les calcaires ne doivent pas contenir plus de 5% de magnésie [5].

- Le fer se rencontre le plus souvent sous forme d'oxyde Fe_2O_3 ou de pyrite Fe_2S (le maximum permis est de 2% dans ce dernier cas). Le fer joue un rôle utile de fondant [5].

-Les alcalis

Tels que soude et potasse sont volatilisés au moment de la clinkérisation et se retrouvent surtout dans les poussières du four, lesquelles sont actuellement souvent recyclées. Les alcalis peuvent provoquer certaines difficultés au cours de la fabrication du ciment (formation d'anneaux dans le four, modification de certaines caractéristiques physique du ciment). Les calcaires dits « purs » contiennent au moins 95% de $CaCO_3$ et les impuretés mentionnées ci-dessus jouent alors un rôle mineur [5]

I.3.3.5.Les éléments argileux calcaires :

Ils contiennent les éléments principaux nécessaires à la fabrication du ciment mais doivent être corrigés par des apports de calcaire ou d'argile afin de faire leur dosage. Certains calcaires argileux renferment naturellement les divers constituants du ciment portland en proportion voulues. Ces « pierres à ciments » sont évidemment très rares [5].

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

- les argiles résiduelles provenant de la décomposition sur place de roches existantes, du fait d'agents physico-chimiques.

- les argiles transportées et déposées sous l'effet des mers, des cours d'eau, des glaciers, du vent. Du point de vue physico-chimique on peut classer les argiles en différents groupes :

- groupe kaolin : formule générale : $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.
- groupe halloysite : formule générale : $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$.
- groupe montmorillonite : formule générale: $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$.
- groupe des minéraux Argileux micacés : (ex : séricite).
- groupe des minéraux argileux magnésiens : (ex : sépiolite).

Les argiles utilisées en cimenterie sont des argiles communes qui peuvent être constituées par des mélanges des groupes énumérés. De plus les argiles résiduelles contiennent souvent des fragments des roches qui leur ont donné naissance et qui risquent de les rendre impropres à la fabrication du ciment (silex, quartz, sous forme de nodules, de sable,...etc.). Là encore les impuretés telles que magnésie, soufre, soude, potasse, doivent être en quantité très limitée. D'une manière générale, le coût de la préparation des matières premières croît avec le nombre de constituants à mélanger. Il faut donc s'efforcer d'avoir un nombre de constituants aussi réduit que possible. Ces constituants doivent être faciles à broyer, peu coûteux à sécher s'il s'agit de voies humides et faciles à combiner lors de la clinkérisation [5]

. Les principaux ajouts qui entre dans la correction de la matière première sont :

La pouzzolane:

La pouzzolane est une roche naturelle (figI.7) constituée par des scories (projections) volcaniques basaltiques ou de composition proche. Elle possède une structure alvéolaire. La pouzzolane est généralement rouge ou noire, avec toutes les teintes intermédiaires, exceptionnellement grise.



Figure .I.9: Grains de pouzzolane [6,7]

Le terme « pouzzolane » vient du latin pelvis puteolana, désignant les sables de Pouzzoles ancienne Dikearchie

(Cité de la Justice), port italien riche en sable volcanique, situé au pied du Vésuve au nord du golfe de Naples. Cette roche locale était déjà remarquée par Vitruve pour son intérêt dans la fabrication du béton romain résistant à l'eau. La pouzzolane est à la base de la fabrication de certains ciments [6,7].

I.3.3.6.Le gypse :

Le gypse est une espèce minérale composée de sulfate dihydraté de calcium de formule $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Le mot gypse désigne ainsi à la fois une espèce chimique et une roche. La Mine de Naica permet de voir des cristaux géants de ce minéral dépassant 11 mètre de long (Fig) Le gypse est le minerai qui permet de fabriquer le plâtre [6,7].



Figure I.10 : Grain de gypse [6,7].

I.3.3.7.Le minerai de fer :

Le minerai de fer comme notre partie spéciale, est une quantité de roches contenant du fer, généralement sous la forme d'oxydes, comme la bauxite. Les minerais de fer ont une teneur en fer variable selon le minéral ferrifère comme indiqué dans; sachant également que l'isomorphisme, presque toujours présent dans les minéraux naturels, réduit la teneur théorique.

I.3.3.8.Le tuf

Le tuf est un type de roche à structure vacuolaire pouvant avoir deux origines :

- Le tuf volcanique, qui provient des téphras de petite taille emprisonnant parfois des fragments plus gros s'accroissent et sont consolidés par l'eau. - Le tuf calcaire ou travertin, d'origine sédimentaire et qui provient des ions carbonate dissous dans l'eau qui a précipité en milieu continental (ruisseau, source riche en carbonate dissous,... etc.) en incluant souvent des traces de végétaux ou de coquilles [6,7]



Figure I.11: le Tuf[6, 7].

I.3.3.9. Matériaux de correction:

Des correcteurs, minerai de fer qui apporte Fe_2O_3 , bauxite pour Al_2O_3 , calcaire pour (CaO) , sable pour SiO_2 sont ajoutés pour atteindre la composition souhaitée du cru et le gypse ($CaSO_4, 2H_2O$) qui est un retardateur de prise est broyé avec le clinker [1].

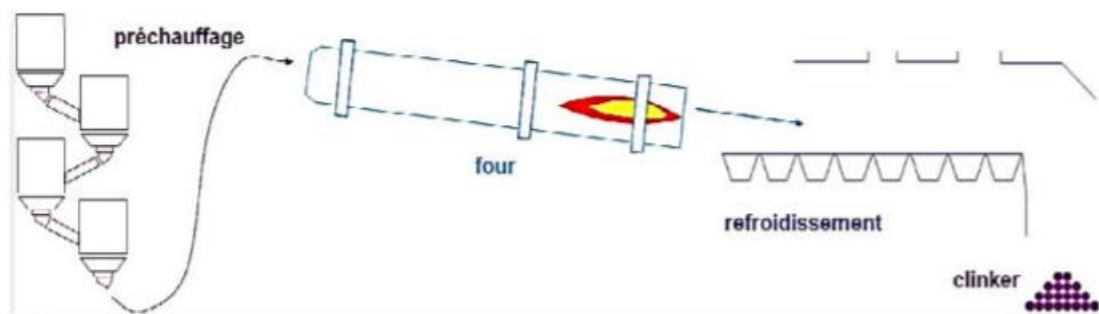


Figure.I.12 : les étapes de production du clinker [1]

I.3.3.10. Minerai de fer (Fe_2O_3) :

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

Les minerais de fer ont une teneur en fer variable selon le minéral ferrifère, sachant également que l'isomorphisme, presque toujours présent dans les minéraux naturels, réduit la teneur théorique [2].



Figure I.13:Minerai de fer sous forme de poudre [2].



Figure I.14 :Minerai de fer a petite dissémination

I.3.3.11.Bauxite :

Est une roche latéritique blanche, rouge ou grise, caractérisée par sa forte teneur en alumine Al_2O_3 et en oxydes de fer. Cette roche constitue le principal minerai permettant la production d'aluminium. Elle se forme par altération continentale en climat chaud et humide. De structure variée, elle contient dans des proportions variables des hydrates d'alumine, de la kaolinite, de la silice et des oxydes de fer qui lui confèrent souvent une coloration rouge [1].



Figure I.15: Sable sous forme riche en fer [1].



Figure I.16 :Bloc de sable riche en alumine [1].

Elle se présente sous plusieurs formes :

- a.** Libre : elle ne peut se combiner et doit être éliminée si elle apparaît en nodules de silex ou de quartz, il peut en être autrement si elle se trouve finement divisée à l'état naturel et répartie dans la masse de calcaire.
- b.** Combinée : divers éléments tel que le fer, la magnésie, l'alumine, la silice et l'alumine déjà combinée sous forme d'argile réagissent bien avec la chaux [3].



Figure I.17 : Sable combiné [3].

I.3.3.12. Gypse :

Le gypse est une espèce minérale composée de sulfate di hydraté de calcium de formule $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Le mot gypse désigne ainsi à la fois une espèce chimique et une roche. La Mine de Naica permet de voir des cristaux géants de ce minéral dépassant 11 mètre de long



Figure I.18 : Gypse en poudre [3].



Figure I.19 : Gypse en bloc de la carrière [3].

Le gypse est le minerai qui permet de fabriquer le plâtre [4].

I.3.4. La cuisson du clinker :

-La cuisson du clinker passe par plusieurs étapes :

I.3.4.1. Séchage :

Les matières premières sont séchées à l'air chaud pour déshydrater l'eau à la surface des particules, la température peut atteindre 100 °C.

I.3.4.2. Préchauffage :

Avant introduction dans le four, la farine (le cru) est chauffée à environ 800 °C dans un préchauffeur à grille ou à cyclones appelé échangeur de chaleur. Un échangeur de chaleur comportant une série de quatre à cinq cyclones dans lesquels la poudre déversée à la partie supérieure descend vers l'entrée du four rotatif. La matière froide, introduite dans la partie supérieure, se réchauffe au contact des gaz circulant à contre-courant.

D'étage en étage, elle arrive partiellement décarbonatée, jusqu'à l'étage inférieur, à la température d'environ 800 °C [5].

1. $T \geq 100^\circ\text{C}$: Evaporation de l'eau constitutive à l'intérieur des minéraux.

2. $T \geq 600^\circ\text{C}$: Décomposition des matières argileuses. (SiO_2 , Fe_2O_3 , Al_2O_3) et décarbonatation de magnésie.

3. $T \geq 850^\circ\text{C}$: Décarbonatation du calcaire

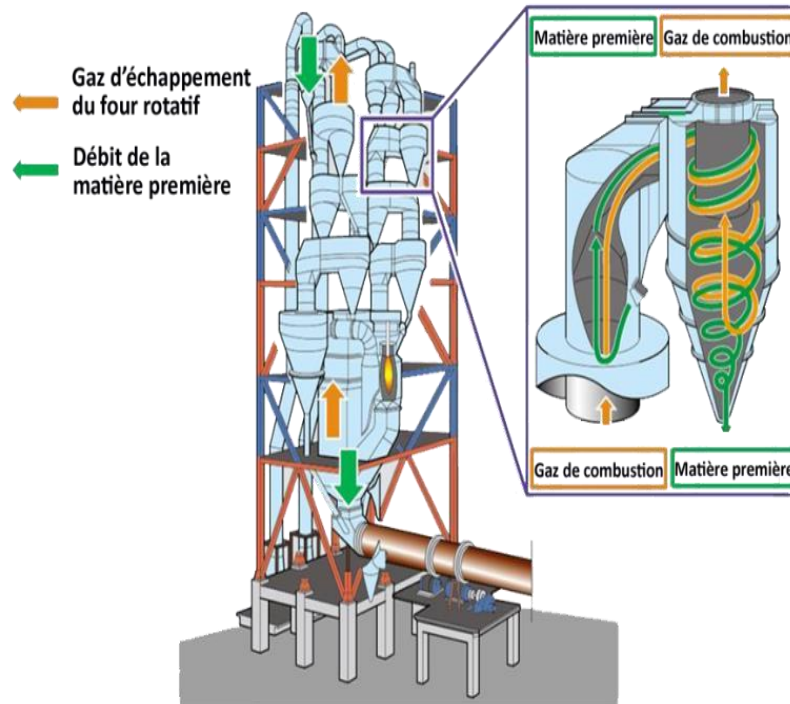


Figure I.20 : Les cyclones

I.3.4.3. Calcination

Une fois préchauffée et décarbonatée, la farine "cru" entre dans le four rotatif et progresse jusqu' à la zone de clinkerisation (à environ 1450 °C). Le temps de parcours est de l'ordre d'une heure. À partir de 850 °C, le carbonate de calcium du calcaire subit une décarbonatation ($\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$). On obtient alors de la chaux vive (CaO) accompagnée d'un important dégagement gazeux (CO_2).



Figure I.21: Schéma indiquant le processus pour l'obtention du clinker

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

Alors, le processus de calcination est suivi de la cuisson du clinker ou clinkérisation pendant laquelle l'oxyde de calcium réagit à haute température (en général entre 1400 et 1500 °C) avec la silice, l'alumine et l'oxyde ferreux pour former des silico-aluminates de calcium composant le clinker. (Figure 7) montre un schéma indiquant la cuisson du clinker (clinkerisation). Alors, à partir de 1400 °C les réactions de clinkérisation se produisent.

Ces deux composés nouvellement formés constituent la phase liquide du mélange. Celui-ci progresse vers la partie la plus chaude du four. La silice (SiO_2) et la chaux (CaO) réagissent entre-elles : La silice (SiO_2) et la chaux vive (CaO) produisent du silicate de calcium (Ca_2SiO_4).

S'il reste de l'oxyde de calcium (CaO) qui n'a pas encore réagi, la réaction peut se poursuivre : Le silicate bicalcique (Ca_2SiO_4) et la chaux vive créent (CaO) du silicate tricalcique (Ca_3SiO_5) [6].

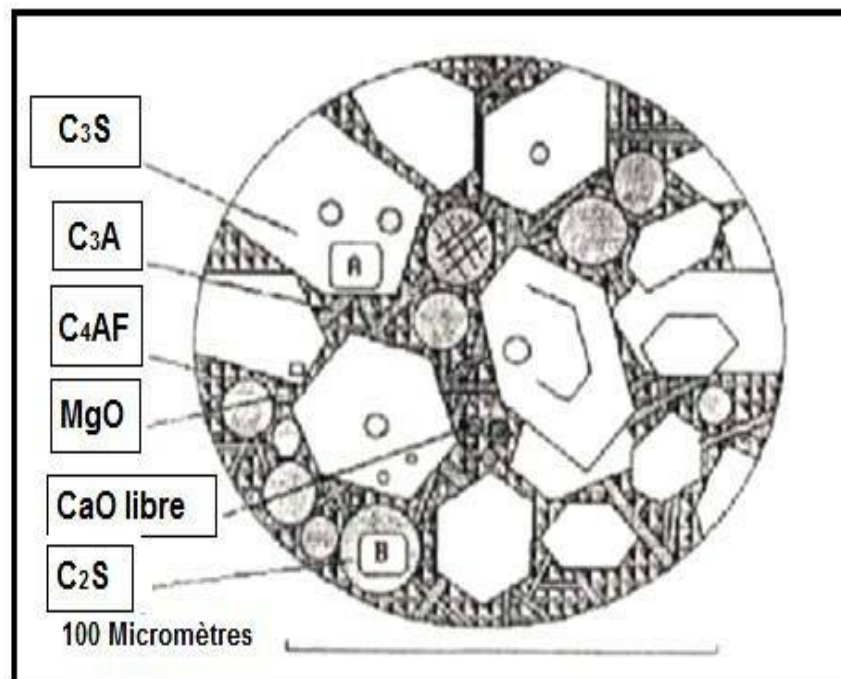


Figure .I. 22 : Dessin représentant les minéraux observables au microscope optique d'un grain de clinker[6].

I.3.4.4 Refroidissement

Le clinker sort du four à une température supérieure à 1350°C, le passage dans le refroidisseur à plusieurs fonctions. C'est un appareil qui a pour but de tremper et refroidir le clinker, récupérer des thermies pour l'air de combustion et éventuellement un broyeur cru ou charbon. Le refroidisseur est un échangeur thermique[7].

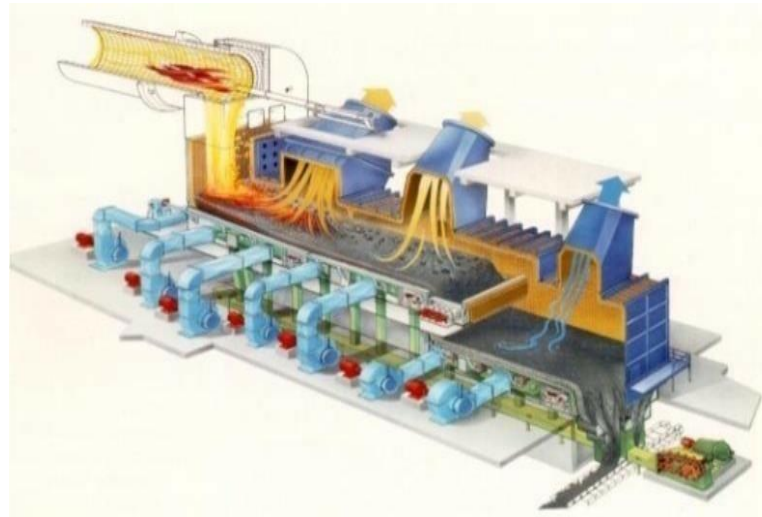


Figure I.23 : Opération du refroidisseur [7]



Figure I.24 : Les étapes de cuisson du clinker[7]

Chapiter II



Contrôle de qualite en
fonction des
propriétés du minerai
de fer

II-1 Contrôle de qualité de ciment :

Lors de son stockage, le ciment est prélevé, analysé chimiquement et physiquement et des essais de résistance sur mortiers normalisés sont réalisés, afin de garantir son niveau de qualité.

Les analyseurs du laboratoire de la cimenterie sont à la pointe des technologies d'analyse comme la Fluorescence X et la Diffraction des rayons X.

Les prélèvements d'échantillons, ainsi que leur préparation, se font maintenant de plus en plus au moyen de robots de très grande précision.

La qualité d'un ciment se reconnaît par la régularité de sa composition et de ses performances persee.fr/doc/bulmi_0366-3248_1935_num_58_1_4363.



Figure II.1:Contrôle de qualité de ciment (pesage)



Figure II.2:Contrôle de qualité de ciment (Echantionnage)

II-2 Dosage pour la détermination des oxydes :

Au point de vue minéralogique, on a depuis longtemps reconnu l'existence de L'hydrate de fer cristallisé, mais dès le début il se produisit une confusion dans la nomenclature.'

Il existe en effet deux formes polymorphes de monohydrate de fer constituant deux espèces minéralogiques distinctes, qui ont été longtemps confondues.

On trouve la première description d'un « rubinrother Eisenglimmer » (mica de fer rouge rubis) provenant des mines de fer de la région de Siegen dans l'ouvrage de Becher, Min. Besch. Oranien — iSassauischen Lande paru en 1789.

En 1814 Ullmann décrit sous le nom de pyrrhosidérite (mppdç couleur de feu et cfpoç fer) les paillettes rouges rubis (rubinrothe Eisenglimmer) qu'il confondit d'ailleurs avec l'oligiste micacé et sous le nom de lépidocrocite (Xsiît; écaille et xpo/i? fibre) des masses concrétionnées. Mais déjà en 1806 Lenz avait nommé le rubinglimmer goethite en l'honneur de Goethe.

En 1823 Breithaupt désigna sous le nom de Nadeleisenerz des variétés cristallisées en longues aiguilles « comme celles qu'on trouve à Wojna en Bohême et à Oberkirchen près d'Oberstein » ainsi que les cristaux mesurés par Phillips (1832).

En 1834, Kobell montre que la goethite, la lépidocrocite, le Nadeleisenerz, avaient la même composition chimique

$Fe_2O_3 \cdot H_2O$ différente de celle de la limonite $2 Fe_2O_3 \cdot 3H_2O$, aussi a-t-il proposé de grouper tous ces minéraux sous la désignation de goethite. [9]

En 1901, M. A. Lacroix, en étudiant les différentes « goethites » trouva qu'elles n'avaient pas toujours les mêmes propriétés, en particulier dans le cas du rubin-glimmer et des « écailles rouges en groupes palmés appelées lepidocrocite », aussi a-t-il réuni ces minéraux en une espèce distincte la lépidocrocite. M. A. Lacroix reconnaît bien que : « l'application stricte des règles de nomenclature conduirait à réserver le nom de goethite pour ces minéraux, car c'est pour la variété rubinglimmer d'Eisfeld que Lenz en 1806 a créé le nom de goethite, mais celui-ci est si universellement adopté aujourd'hui par tout le monde pour désigner le composé $Fe_2O_3 \cdot H_2O$ dont les cristaux de Cornwall présentent les propriétés caractéristiques, qu'il me semble préférable de ne pas le détourner de son sens actuel. »

Néanmoins, quelques auteurs ont continué à désigner le rubinglimmer sous le nom de goethite.

Un certain nombre d'autres espèces ont été décrites comme ayant une composition chimique différente :

Hydrohématite $2 Fe_2O_3 \cdot H_2O$

Xanthosidérite $Fe_2O_3 \cdot 2 H_2O$

Hydrogœthite. 3 FeC.ŕTO

De sorte que, il y a une quinzaine d'années, les minéralogistes décrivaient les espèces ou variétés suivantes :

Goethite. — Fe₂O₃.H₂O var. Nadeleisenerz, Onegite, Pribramite.

Lépidocrocite. — Fe₂O₃. H₂O var. Rubinglimmer, Pyrrho-sidérite.

Twrgite, — FeO₃.2H₂O

HydroHémaiiiie. — 2 FeO₃.H₂O.

Hydrogœthite. — 3 FeO₃. 4 HO. [9]

II.3. Détermination de l'oxyde de fer (Fe₂O₃) :

II.3.1.L'oxyde de fer:

Fer hydratés ceux qui formaient réellement des espèces distinctes répondant à une composition Il existe plusieurs hydrates d'oxyde de fer (III). Lorsqu'un alcali est ajouté à des solutions de sels solubles de Fe (III), un précipité gélatineux rouge-brun se forme. Ce n'est *pas* Fe (OH)₃, mais Fe₂O₃ · H₂O (également écrit Fe (O) OH). Plusieurs formes de l'oxyde hydraté de Fe (III) existent également. La *lépidocrocite* rouge γ-Fe (O) OH, se trouve à l'extérieur des rusticles, et la *goethite* orange, qui se produit à l'intérieur dans les rusticles. Lorsque Fe₂O₃ · H₂O est chauffé, il perd son eau d'hydratation. Un chauffage supplémentaire à 1670 K convertit Fe₂O₃ en Fe₃O₄ noir (Fe^{II}Fe^{III}₂O₄), connu sous le nom de *magnétite* minérale . Fe (O) OH est soluble dans les acides, ce qui donne [Fe (H₂O)].

Dans un alcali aqueux concentré, Fe₂O₃ donne [Fe (OH)]

-Les oxydes de fer et leurs hydrates ont fait l'objet de nombreux travaux de la part des minéralogistes, des chimistes et des physiciens. Les minéralogistes cherchaient à reconnaître parmi les nombreux composés naturels d'oxydes de chimie définie.

Les chimistes et les physiciens s'attachaient plus particulièrement à l'étude d'une variété magnétique de sesquioxyde de fer Fe₂O₃ ayant même composition que le sesquioxyde ordinaire ou oligiste, mais dont les propriétés magnétiques et la structure sont voisines de celles de la magnétite ou oxyde salin Fe₃O₄. C'est pour la première fois qu'on rencontre deux corps de même composition chimique qui, dans les mêmes conditions extérieures, ont des propriétés magnétiques si différentes.

Le monohydrate de sesquioxyde de fer, seul hydroxyde ferrique reconnu, présente un dimorphisme qui est à rapprocher de celui du sesquioxyde. En effet, l'une des variétés

polymorphes du monohydrate, la goethite, en se déshydratant donne le sesquioxyde ordinaire, tandis que l'autre, la lépidocrocite, donne le sesquioxyde magnétique.

J'ai pensé que la connaissance de la structure cristalline de ces différents corps est essentielle pour résoudre les différents problèmes physico-chimiques qui les concernent.

La structure des oxydes anhydres étant déterminée, je me suis proposé de rechercher les structures des deux variétés polymorphes de l'hydroxyde ferrique.

La recherche d'une structure exige, en général, des cristaux bien formés, de dimension suffisante (1-2 mm.). La goethite se rencontre quelquefois en cristaux atteignant 1 ou 2 centimètres. Mais ils sont souvent altérés et donnent aux rayons X des diagrammes inutilisables. Néanmoins j'ai réussi à trouver quelques petits cristaux provenant de Cornwall qui m'ont donné des résultats satisfaisants permettant de déterminer la structure.

Par contre, la lépidocrocite se rencontre en lamelles de 1 à 2 millimètres mais si minces que la détermination de leur structure est pratiquement impossible. Aussi-ai-je essayé de préparer des cristaux de lépidocrocite artificielle, mais si j'ai pu préparer la lépidocrocite synthétique à l'état de très petits cristaux, je ne suis point parvenu à reproduire des cristaux plus gros que ceux qu'on trouve dans la nature.

Devant cet échec, j'ai pensé que la connaissance des structures des corps voisins de la lépidocrocite pourrait me faciliter la recherche de la structure de cette dernière. J'ai été ainsi amené à déterminer la structure du ferrite de sodium et de l'oxychlorure de fer. C'est l'étude de ce dernier corps, dont la structure est très voisine de celle de la lépidocrocite, qui m'a permis de résoudre le problème et trouver l'arrangement des atomes dans la lépidocrocite.[9]

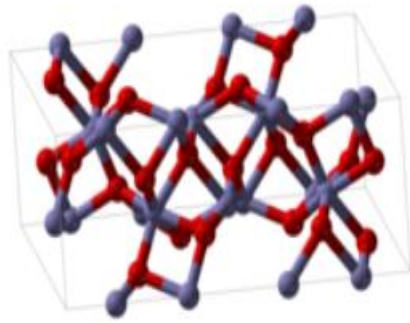


Figure II.3: Structure de fer **Figure II.4:** Minerai de fer en poudre

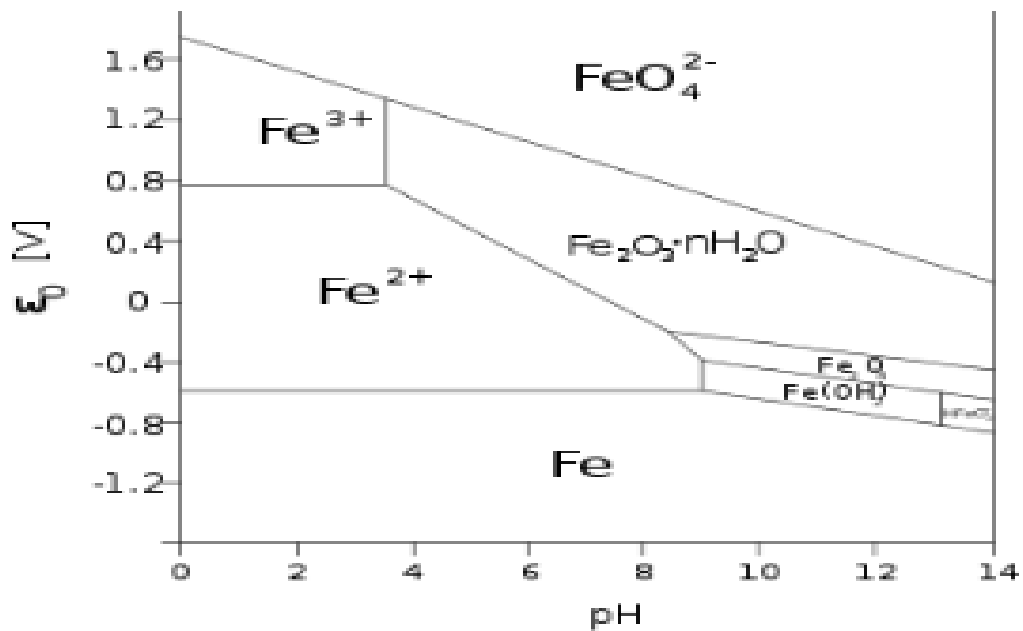


Figure II.5: Diagramme du PH en fonction des phases et charges Standards du Fer

II.3.2. Structure:

Fe_2O_3 peut être obtenu dans divers polymorphes. Dans le principal, α , le fer adopte une géométrie de coordination octaédrique. Autrement dit, chaque centre Fe est lié à six ligands oxygène. Dans le polymorphe γ , une partie du Fe repose sur des sites tétraédriques, avec quatre ligands oxygène.

II.3.3.Phase alpha:

α -Fe₂O₃ a la structure rhomboédrique, corindon (α -Al₂O₃) et est la forme la plus courante. Il se produit naturellement sous forme d'hématite minérale qui est exploitée comme principal minerai de fer. Il est antiferromagnétique en dessous de ~ 260 K (température de transition Morin), et présente un ferromagnétisme faible entre 260 K et la température de Néel, 950 K. ^[10] Il est facile à préparer en utilisant à la fois la décomposition thermique et la précipitation en phase liquide. Ses propriétés magnétiques dépendent de nombreux facteurs, par exemple la pression, la taille des particules et l'intensité du champ magnétique.

II.3.4.Autres phases solides:

Plusieurs autres phases ont été identifiées ou revendiquées. La phase β est centrée sur le corps cubique (groupe spatial Ia3), métastable et à des températures supérieures à 500 ° C (930 ° F) se transforme en phase alpha. Il peut être préparé par réduction de l'hématite par du carbonepyrolyse d'une solution de chlorure de fer (III) ou décomposition thermique du sulfate de fer (III).

La phase epsilon (ϵ) est rhombique et présente des propriétés intermédiaires entre alpha et gamma, et peut avoir des propriétés magnétiques utiles applicables à des fins telles que les supports d'enregistrement haute densité pour le stockage de données volumineuses. ^[11]

La préparation de la phase pure epsilon s'est avérée très difficile. Un matériau à forte proportion de phase epsilon peut être préparé par transformation thermique de la phase gamma. La phase epsilon est également métastable, se transformant en phase alpha entre 500 et 750 ° C (930 et 1380 ° F). Il peut également être préparé par oxydation du fer dans un arc électrique ou par précipitation sol-gel à partir de nitrate de fer (III) recherche a révélé l'oxyde de fer (III) d'epsilon dans les émaux chinois antiques de céramique de Jian , qui peut fournir un aperçu des manières de produire cette forme dans le laboratoire.

CHAPITRE III



Préparation du clinker pour la
fabrication du ciment

III.1 Préparation d'un échantillon de ciment:

III.1.1. Objet et domaine d'application :

La présente norme spécifie pour les ciments, la méthode de détermination de la perte au feu NA 235 [1].

III.1.2. Préparation d'un échantillon de ciment:

Avant l'analyse chimique, la norme NA 254 [2] est respectée pour préparer des échantillons représentatifs à partir des prélèvements de ciments initiaux. L'essai effectué se fait conformément à la norme NA 5042 [3].

III.1.3 Principe :

La perte au feu est déterminée en atmosphère oxydante (air). Par calcination à l'air à $(975 \pm 25) ^\circ\text{C}$, le gaz carbonique et l'eau sont chassés et les éléments oxydables éventuellement présents sont oxydés. Une correction de l'influence de cette oxydation sur la perte au feu est indiquée.

III.1.4 Mode opératoire :

Peser dans un creuset en platine préalablement calciné et taré, $(1 \pm 0,05)$ g de ciment.

On a placé le creuset couvert dans le four électrique dont la température est stabilisée à $975 \pm 25 ^\circ\text{C}$. Après 5 min de chauffage, retirer le couvercle et laisser dans le four pendant 10min supplémentaires. Refroidir le creuset dans le dessiccateur à la température ambiante.



Figure III.1: balance électronique.



Figure III.2:Four électrique

Peser jusqu'à avoir une masse constante, elle sera considérée comme étant la masse après calcination



Figure III.3: creuset.

III.1.4 Expression des résultats :

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

$$\text{Perte au feu brute} = [(m_1 - m_2) / m_1] \times 100$$

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

m_2 : La masse de la prise d'essai calcinée, en grammes.

III.2. TECHNOLOGIE DE PRODUCTION DU CIMENT

III.2.1 PROCEDURE DE FABRICATION :

Dans cette étude, nous avons suivi la fabrication de clinker avec du minerai de fer dans une cimenterie en remarquant la variation des analyses chimiques et leur influence sur la composition minéralogie de clinker .L'atelier de cuisson se compose de silo d'homogénéisation, dont le diamètre est de 22 m et la hauteur est de 65.2 m avec une capacité de 15,000 tonnes. Une tour de préchauffeur de 5 étages avec un précalcinateur de type NSF et un four rotatif de 4.3x64m sont utilisés pour la cuisson de la matière. La capacité de four est 3200 t/j (figure 2). La farine est préchauffée dans la tour et precalcinée dans le précalcinateur, où elle est décarbonatée à 92~95% .Un refroidisseur clinker du type pendulaire avec une surface de 80 m2 est installé à la sortie du four pour baisser la température du clinker à 65 °C au dessus de la température ambiante.

les analyses chimiques de clinker a été faite au niveau du laboratoire de la cimenterie utilisant rayon X (figureIII.4)



Figure III.4 :Clinker

Produire du ciment : le procédé décomposé en 12 étapes clés ciment

La carrière de cimenterie

-La pré-homogénéisation des matières premières

-Le broyage du cru

- L'homogénéisation du cru
- Le préchauffage du cru
- La cuisson
- Le refroidissement du clinker
- Le stockage du clinker
- Le broyage du ciment
- Le stockage du ciment
- Le contrôle qualité du ciment
- Conditionnement et expédition du ciment

III.2.1.La carrière de cimentrie:

Les **matières premières** nécessaires à la fabrication du ciment, le **calcaire et l'argile**, le **minerai de fer** sont extraites de carrières à ciel ouvert, à proximité de la cimenterie ou plus loin.

Le calcaire du cimentier est abattu par tirs de mines et les blocs de roches, sont transportés par dumper vers le **hall de concassage**.

Les blocs de roches sont alors réduits par le **concasseur** à une taille maximum de 80 mm, puis, sont acheminés par un **convoyeur à bande** vers le **hall de pré-homogénéisation**.

Dans le respect de leur site d'implantation, chaque carrière fait l'objet d'un **plan de réhabilitation**, et la . Biodiversité sur site, d'une attention particulière.

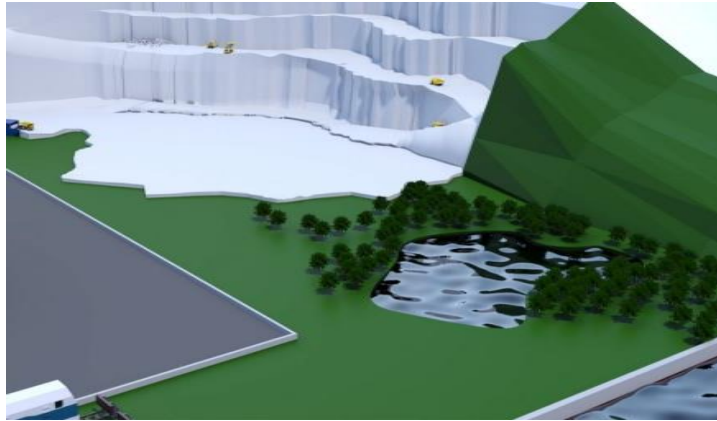


Figure III.5 :Exemple de carrière de cimentrie

III.2.2. La pré-homgéisation des matières premières:

Les roches extraites de la carrière sont concassées et acheminées jusqu'à la cimenterie, puis stockées dans le hall de pré-homogénéisation. Dans ce hall, la méthode de remplissage circulaire, par couches de roches superposées, et leur récupération transversale au moyen d'un **gratteur**, a été spécialement conçue pour obtenir une plus grande **régularité de la composition chimique du mélange minéral**, malgré la diversité des veines géologiques de la carrière .

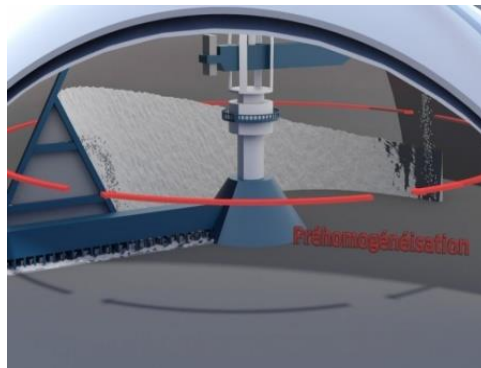


Figure III.6 :La pré-homgéisation des matières premières

III.2.3.Le broyage du cru :

Le mélange de roches minérales, préparé dans le hall de pré-homogénéisation, est dosé, séché et broyé afin de réduire la roche en une poudre très fine, de taille micrométrique, c'est-à-dire au maximum quelques dizaines de microns.

L'étape du broyage est aussi l'occasion d'intégrer **des ajouts**, encore appelés matières alternatives, qui permettent de **limiter la consommation de ressources naturelles** : par exemple, des terres issues de la décontamination d'anciens sites industriels ou des sables recyclés, ce qui limite par la même occasion la mise en décharge de ces déchets.

La poudre fine ainsi obtenue est appelée **la farine crue**.

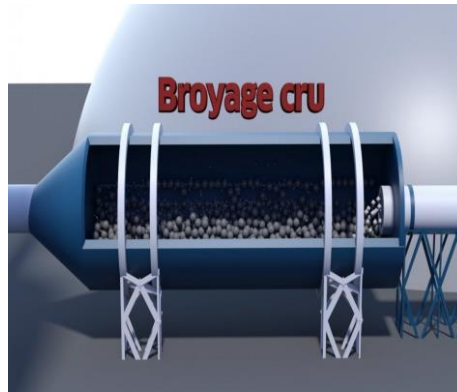


Figure III.7 :broyage du cru

III.2.4 L'homogénéisation du cru :

Après avoir été finement broyée, la farine crue est très largement brassée dans des silos d'homogénéisation, de manière à obtenir une composition chimique et physique ciblée, la plus régulière possible.

De cette régularité, dépendra la **stabilité du four** lors de la cuisson et la **qualité du clinker** obtenu.

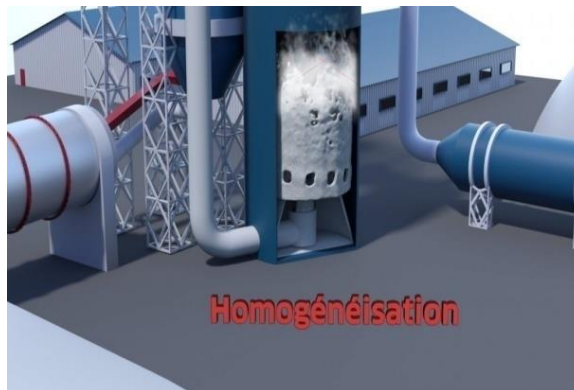


Figure III.8 :L'homogénéisation du cru

III.2.6.La cuisson :

La farine, précédemment préchauffée à 850°C, est ensuite chauffée à 1 450°C sous une flamme à 2000°C, dans un four rotatif garni de briques réfractaires, qui fonctionne 24h/24 et 7j/7 ,La flamme de cuisson est produite par une tuyère de haute technologie dans laquelle sont injectés les combustibles, qui peuvent être fossiles comme le charbon, mais qui sont de plus en plus largement remplacés par des combustibles de substitution comme la biomasse , les solides

et liquides de récupération (pneus, farines animales, boues de stations d'épuration, noyaux d'olives etc...).

Le four est le siège d'un enchaînement de réactions chimiques, qui se produisent dans la matière en fusion et qui conduisent à l'obtention des combinaisons moléculaires attendues pour obtenir le clinker

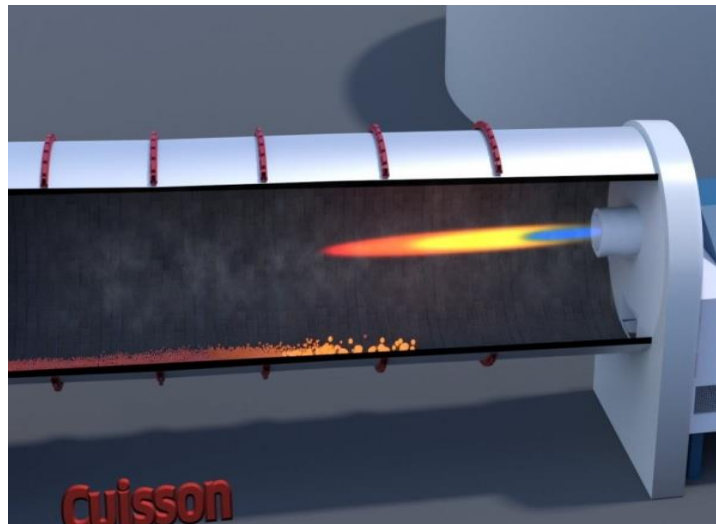


Figure III.9 :La cuisson

III.2. 5.Le préchauffage du cru :

La farine crue homogénéisée est ensuite préchauffée à 850°C dans la tour de préchauffage grâce à la réutilisation de la chaleur produite par le four a farine crue descend en tourbillons dans les cyclones successifs à contre-courant des gaz chauds.

Ce procédé permet de réduire significativement l'empreinte CO2 du matériau.

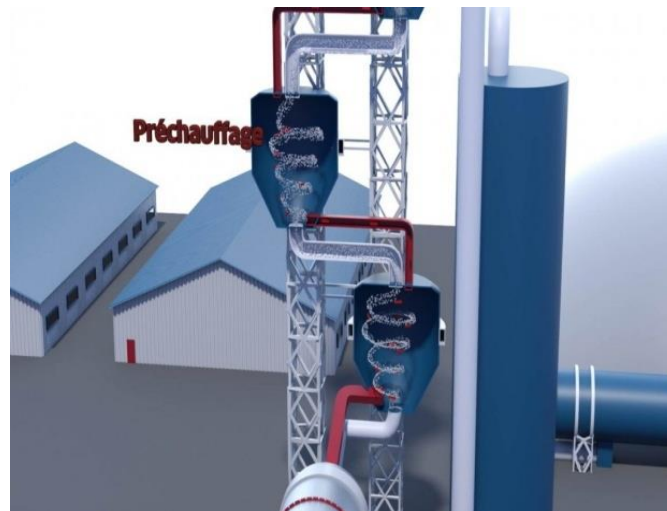


Figure III.10 : Le préchauffage du cru

III.2.7. Le refroidissement du clinker :

Le mélange en fusion est ensuite trempé (c'est-à-dire refroidi rapidement) par soufflage d'air, afin d'obtenir la chimie cristalline appropriée pour les propriétés hydrauliques du clinker.

Ainsi obtenu sous forme de granules de quelques centimètres, le clinker est finalement **refroidi jusqu'à une température de l'ordre de 100°C** et acheminé dans le **hall de stockage**.

Pour les refroidisseurs les plus performants, **l'énergie thermique** est ainsi restituée aux trois-quarts et **réutilisée pour le préchauffage de la farine crue**, ce qui améliore considérablement l'impact environnemental du produit

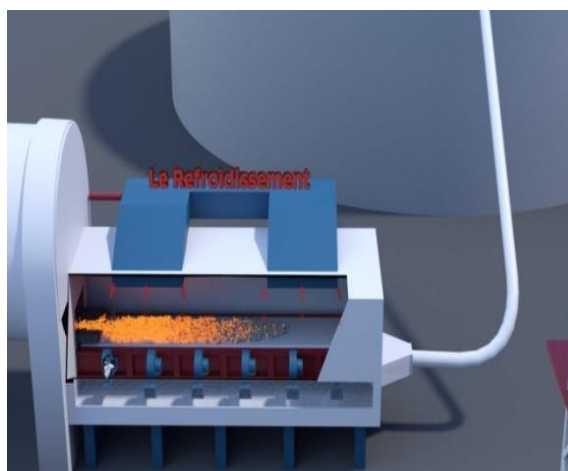


Figure III.11 :Le refroidissement du clinker

III.2.8.Le stockage du clinker:

Le clinker refroidit à 100°C est transporté et stocké dans un hall de plusieurs dizaines de milliers de tonnes, permettant ainsi d'assurer une continuité de la production du ciment, y compris lors des arrêts de la ligne de cuisson pour la maintenance annuelle, par exemple

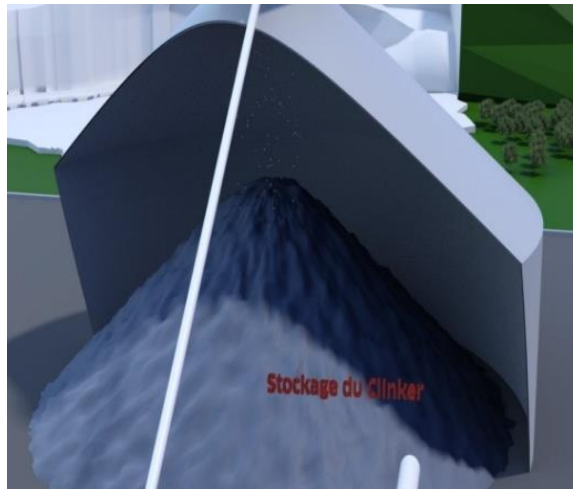


Figure III.12 :stockage du clinker

III.2.9.Le broyage du ciment :

Le Clinker est ensuite broyé avec du gypse, qui joue le rôle de régulateur de prise et un ou plusieurs constituants principaux autre que le clinker : des constituants naturels comme les fillers calcaire ou pouzzolanes, ou de valorisation industrielle, comme les laitiers de haut fourneau ou les cendres volantes.

Les dosages se font dans les proportions décrites dans la norme européenne des ciments courants, NF EN 197-1.

D'autres ajouts éventuels, préalablement séchés si besoin, peuvent être incorporés au mélange, ainsi que des agents de broyage appelés **agents de mouture**.

Le mélange broyé passe dans un **séparateur de particules** qui permet d'obtenir une poudre fine, de répartition granulaire ciblée et très régulière, appelée **le ciment**

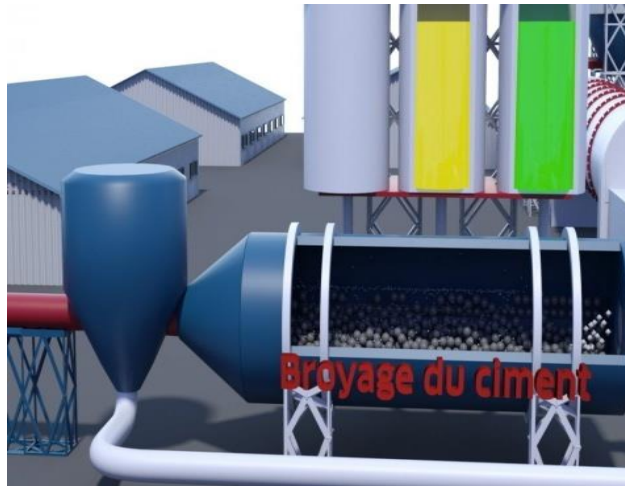


Figure III.13 :broyage du ciment

III.2.10. Le stockage du ciment :

Le ciment est stocké dans des silos d'une capacité de plusieurs milliers de tonnes, qui peuvent être parfois divisés en plusieurs compartiments, pour stocker différents types de ciment.



Figure III.14 : stockage du ciment

III.2.11.Le contrôle qualité du ciment :

Lors de son stockage, le ciment est prélevé, analysé chimiquement et physiquement et des essais de résistance sur mortiers normalisés sont réalisés, afin de garantir son niveau de qualité.

Les analyseurs du laboratoire de la cimenterie sont à la pointe des technologies d'analyse comme la Fluorescence X et la Diffraction des rayons X.

Les prélèvements d'échantillons, ainsi que leur préparation, se font maintenant de plus en plus au moyen de robots de très grande précision.

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



Figure III.15 : contrôle qualité du ciment

III.2.12. Conditionnement et expédition du ciment et béton :

Grâce à un maillage territorial homogène des différents lieux de production de la filière ciment et béton (carrières, cimenteries, centrales à béton et usines de préfabrication) les distances entre les lieux de production et les chantiers sont très faibles. Cependant, les Volumes transportés sont conséquents la réduction de l'empreinte due aux transports représente donc un enjeu non négligeable.



Figure III.16 :Conditionnement et expédition du ciment et béton

III.2.14. Le transport du ciment :

Avec une répartition homogène des cimenteries sur l'ensemble du territoire, le secteur limite l'impact des transports sur l'environnement. En vrac, le ciment est directement chargé à la base des silos, dans des camions citernes. Conditionné en sacs (ou Big-Bag) le ciment est transporté par camions sur un plateau. Certaines cimenteries optimisent le poids carbone du transport en privilégiant le transport fluvial ou ferroviaire. La distance moyenne de livraison est de 150 km.

III.3 EXEMPLE DE RESULTATS D'ANALYSE CHIMIQUE ET MINÉRALOGIQUE D'UN CLINKER

III.3.1 Le clinker :

L'analyse généralement est prélevée de la ligne de production de la cimenterie, les résultats des analyses chimiques et minéralogiques sont basés généralement sur la construction de ces dépendance entre le pourcentage de MgO et celui du C₃S

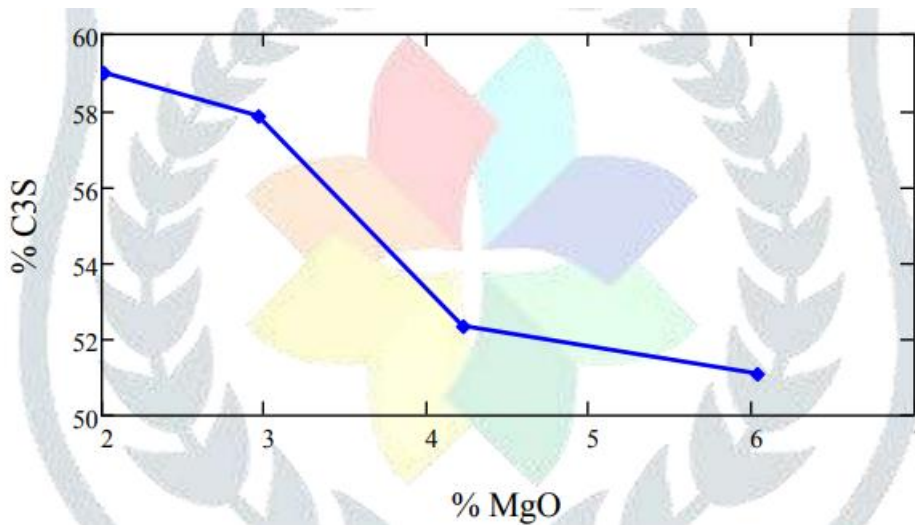


FIGURE III.17 : La courbe de variation du C₃S en fonction de MgO

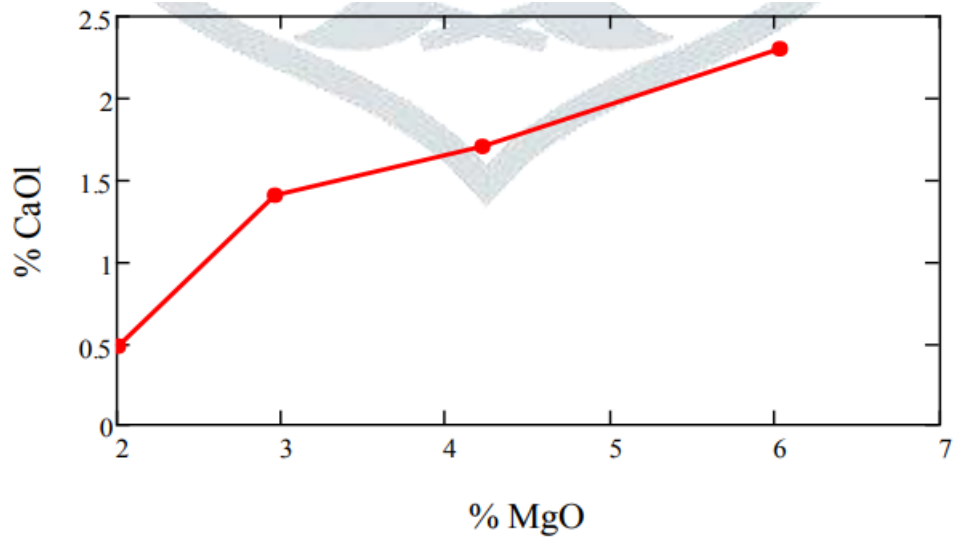


FIGURE III.18: La courbe de variation de la chaux libre en fonction de MgO

-Les valeurs de la teneur en CaO (chaux libre) et C_3S dans le clinker avec la variation de MgO sont données sur les **FIGURE III.17**. Les résultats montrent que l'augmentation de la teneur en MgO, augmente la teneur en CaO dans les clinkers et diminue le pourcentage de C_3S . Cela est dû à la diminution de la viscosité et l'augmentation de la phase liquide du clinker ce qui défavorise la formation de C_3S

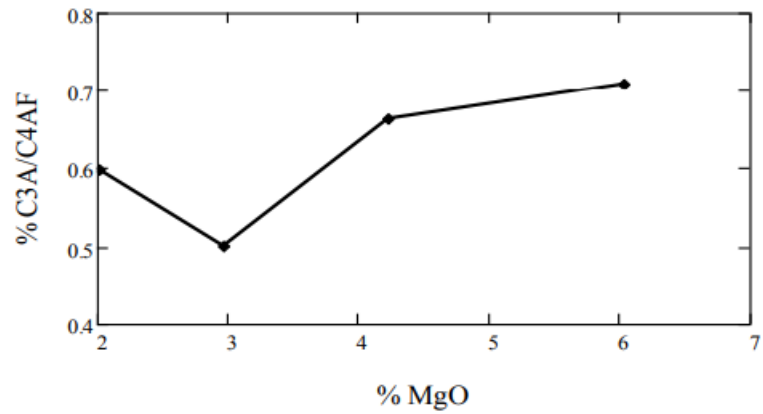


FIGURE III .19 : La courbe de variation du rapport C_3A/C_4AF en fonction de MgO

IV.Partie Expérimentale:

IV.1Principe d'essai:

Comme le refroidissement du clinker après sa calcination exigent des installations spéciales pour la diminution de température, dans le présent travail on a montrés la possibilité de son refroidissement a l'aire libre pour améliorer le facteur économique .Les essais étudue est de chauffer et de refoidir le clinker a une temperature naturele par son exposition au soleil. Les analyses et compositions chimiques et minéralogiques moyennes de la pouzzolane naturelle qui est issue du gisement de Bouhamidi, sont effectuées au laboratoire de la cimenterie de Zahaan, et le tableau. TABLEAU IV.1 nous donne exactement les éléments chimiques costituant e clinker coposé du minerai de fer quui est l'hématite Fe_2O_3 qui est égale a 4.54% .Ce clinker est caracterisé par une grande contité de CaO égale a 65.51% et de 2.77% de CaO libre

TABLEAU IV.1 :Compositin chimique du clinker

Élément	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	CaO libre (%)	P.F (%)
Clinker	21.69	4.46	4.54	65.51	1.84	0.86	0.83	1.86	2.77	0.32

IV .2Partie experimentale:

Dans cette partie on a essayé de voir le chagement de la température naturellement, de quelques classes du clinker, btenu par l'ajout du minerai de fer.

Pour cela on a commencé par l'opération du broyage.

IV.2Broyage

Cette opération est réalisée au laboratoire de genie civil de notre Hall technologique, université Mohamed Boudiaf, faculté de technologie.

Le temps de broyage est pris $t_{\text{broyage}} = 10 \text{ min}$

Le broyeur est du type BROYEUR à BOULETS cylindrique

Voir (figure IV.1)



Figure IV.1:Broyeur du laboratoire du Hall technologique



Figure IV.2:Boulets utilisées pour le broyage du clinker

IV.2.Tamisage

On affectuer le tamisage après l'opération de pesage de 1 kg de clinker (avec des addition du minerai de fer) ramené de l'usine du ciment de M'sila LAFARGE .le temps de tamisage aussi est pris

$t_{\text{tamisage}} = 10 \text{ min}$

La series des tamis est composée de quelques tamis different selon l'ouverture des mails ou des classes suivantes :



Figure IV.3:Serie des tamies utilisée

Tableau IV.2: des classes choisies pour les essais en mm

-0,3 + 0	-0,5+0,3	-0,8+0,5	-1,0+0,8	-1,25+1,0
----------	----------	----------	----------	-----------

Cette serie est choisie selon les moyens trouvés dans notre laboratoire des matériaux de génie civil.



Figure IV.4: Les classes envisagées dans ce travail du clinker obtenu par ajouts du minerai de fer

TABLEAU IV.3: Relevé des valeurs de la température du clinker pendant l'échauffement naturel à l'air libre par exposition au soleil le matin de la FARGE cimenterie de Msila

Temps(h) au cours de	Temps d'exposition au soleil le matin	Classes du clinker préparé avec le minerai de fer				
		-0,3 + 0	-0,5+0,3	-0,8+0,5	-1,0+0,8	-1,25+1,0

la journée	en (min)	Température en°C				
09.00h	0	41°	41°	41°	41°	41°
09h15min	15	43°	43°	43°	43°	43°
09h30min	30	45°	45°	45°	45°	45°
09h45min	45	46°	46°	46°	46°	46°
10 .00h	60	47°	47°	47°	47°	47°
10h15min	75	49°	49°	49°	49°	49°
10h30min	90	49°	49°	49°	49°	49°
10h45min	105	49°	49°	49°	49°	49°
11 .00h	120	50°	50°	50°	50°	50°
11h15min	135	50°	50°	50°	50°	50°
11h30min	150	51°	51°	51°	51°	51°
11h45min	175	51°	51°	51°	51°	51°
12.00h	190	52°	52°	52°	52°	52°
12h.15min	205	53°	53°	53°	53°	53°

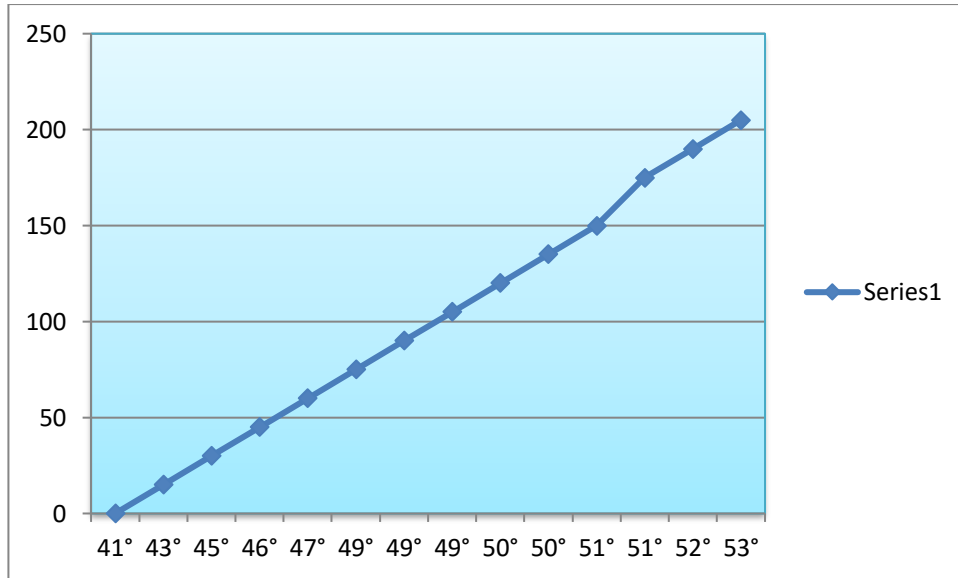


Figure IV.5: Courbe d'échauffement naturel des classes envisagées du clinker obtenu par des ajouts de minerai de fer.

TABLEAU IV.4.: Refoidissement naturel de clinker

Temps(h) au cours de la journée	Temps d'exposition au soleil l'après midi en (min)	Classes du clinker préparé avec le minerai de fer				
		-0,3 + 0	-0,5+0,3	-0,8+0,5	-1,0+0,8	-1,25+1,0
		Température en°C				
13.00h	0	53°	53°	53°	53°	53°
13h15min	15	53°	53°	53°	53°	53°
14.00h	30	52°	52°	52°	52°	52°
14h15min	45	51°	51°	51°	51°	51°
15.00h	60	50°	50°	50°	50°	50°
15.45min	75	46°	46°	46°	46°	46°
16.00h	90	37°	37°	37°	37°	37°
16h15min	105	35°	35°	35°	35°	35°

17h30min	120	33°	33°	33°	33°	33°
18h00min	135	31°	31°	31°	31°	31°
13.00h	150	53°	53°	53°	53°	53°
13h15min	175	53°	53°	53°	53°	53°
14.00h	190	52°	52°	52°	52°	52°
14h15min	205	51°	51°	51°	51°	51°

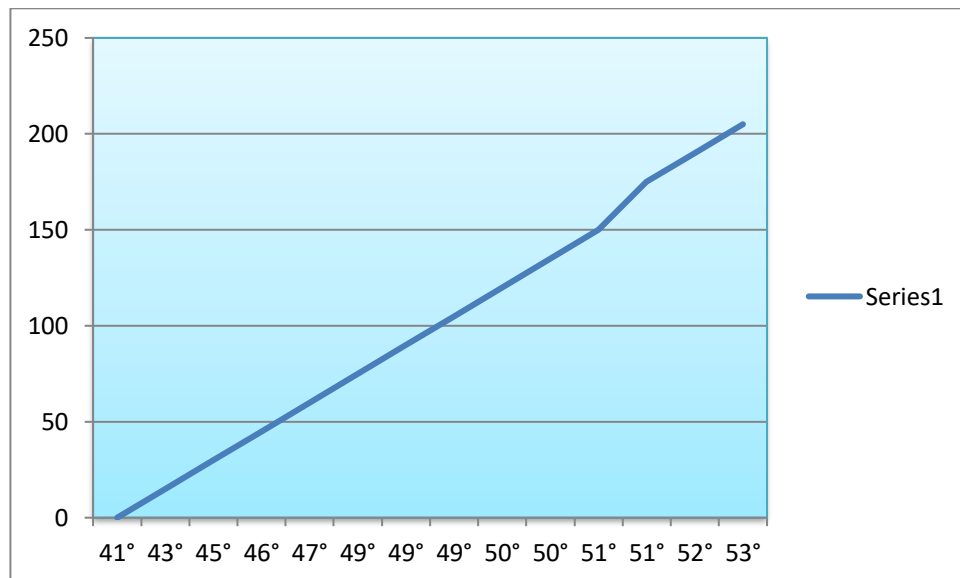


Figure IV.6: Courbe de refroidissement naturel des classes envisagées Du clinker obtenu par des ajouts de minerai de fer.

Selon les tableaux et les courbes si dessus et d'après les valeurs qu'on a relevés de températures soit pendant l'échauffement ou pendant le refroidissement pour toutes les classes de tamisage envisagées, ces classes s'échauffent ou se refroidissent selon les mêmes valeurs de températures pour chaque intervalle de temps 15 minute pour chacune. Cela s'explique par la valeur de la chaleur spécifique des classes du clinker final obtenu par des ajouts de minerai de fer avec les autres matières, peuvent êtres obtenus partiellement pour chacune.

Conclusion générale :

L'industrie cimentière est un grand consommateur d'énergie à cause de plusieurs facteurs. L'un de ces facteurs c'est les caractéristiques surtout mécanique de la matière première qui est en partie le minerai de fer ajouté comme composé du clinker. Cette consommation d'énergie provient de la non connaissance des propriétés de ces matières premières qu'on doit contrôler du départ jusqu'à la fin du procédé de préparations mécaniques de ce produit. Le recours aux ajouts minéraux comme le minerai de fer est certainement la voie la plus prometteuse à suivre afin d'assurer un développement durable à l'industrie. L'utilisation des ajouts comme le minerai de fer au clinker est très importante car en plus des économies d'énergie et on arrive à minimiser l'émission de CO₂. Cette étude nous permet d'approfondir notre connaissance dans le domaine de la fabrication des ciments par conséquent diminué le coût de revient. D'après cette étude, on peut conclure que les résultats obtenus de recherches bibliographiques nous permettent de tirer les conclusions suivantes :

- L'augmentation de pourcentages de du minerai de fer contribue favorablement à la diminution de la densité de ciment élaboré.

- Comme le refroidissement du clinker après sa calcination exige des installations spéciales pour la diminution de température, dans le présent travail on a montré la possibilité de son refroidissement à l'air libre pour améliorer le facteur économique. D'après les valeurs relevées de températures soit pendant l'échauffement ou pendant le refroidissement pour toutes les classes de tamisage envisagées, s'échauffent ou se refroidissent selon les mêmes valeurs de températures pour chaque classe.

Cela s'explique par la valeur de la chaleur spécifique des classes du clinker final obtenu par des ajouts de minerai de fer avec les autres matières, peuvent être obtenus partiellement pour chacune. Ces chaleurs spécifiques sont liées par leurs masses $Q = mc \Delta t$.

Bibliographie:

Chapiter I

[1] MEBARKI Henen, « Etude comparative des clinkers de l'ouest Algérien : Analyse Physico-chimique et Applications », Mémoire de Master, Université TLEMCEN, Algérie, 2013.

[2] GHERMAOUI Amina, « Effets de certains métaux sur les propriétés physico-chimiques des mortiers de ciment de Béni-Saf sans ou avec ajout de pouzzolane », Mémoire de Master, Université TLEMCEN, Algérie, 2015.

[3] BEN AZIZA Zouhir, AICH Naim, « Augmentation de la production du ciment de Hamma Bouziane par élaboration d'un nouveau schéma de préparation mécanique », Mémoire de Master, Université LARBI TEBESSI, Algérie, 2017.

[4] DAHMANI Salah, « Effet de l'association laitier-calcaire sur les caractéristiques physico-chimiques et mécaniques de ciments », Mémoire de Master, Université MOHAMED BOUDIAF, Algérie, 2016.

[5] BOUALI Khaled, « Elaboration et caractérisation thermomécanique des mortiers à base d'ajouts de déchets de briques réfractaires », Thèse de Magister, Université MOHAMED BOUGARA-BOUMERDES, Algérie, 2014.

[6] KADRI Mohammed Rafiq, ROUIGUEB Soumia, CHIKH Hadjer Abir, « Contribution à la réduction des émissions de CO₂ et de la consommation énergétique dans l'industrie cimentaire par l'amélioration d'un système de production : Cas de la cimenterie de Béni-Saf » Mémoire de Master, Université TLEMCEN, Algérie, 2017.

[7] Chetti Walid, « Automatisation de Système de traitement de l'Eau Usée (CILAS) », Mémoire de Master, Université MOHAMED KHIDER, Algérie, 2019.

chapiterII

[1] Norme Algérienne. (NA 235) La présente norme spécifie pour les ciments, la méthode de détermination de la perte au feu.

[2] Norme Algérienne. (NA 254) : La présente norme concerne uniquement les équipements à utiliser, les méthodes à suivre et les dispositions à respecter lors des prélèvements de ciments pour obtenir des échantillons représentatifs de lots définis et destinés aux essais de contrôle des produits prêts à être livrés.

[3] Norme Algérienne. (NA 5042) : La préparation de cet échantillon de ciment pour l'essai