

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE SAAD DAHLAB DE BLIDA 1

Faculté de Technologie

Département de Génie des Procédés

Mémoire

En vue de l'obtention du diplôme de

Spécialité : Génie des Matériaux

Intitulé du mémoire

**Développement des ajouts pour
économiser du clinker et ciment**

Présenté par :

Mohamed Arfi

Encadré par :

Omar Bouras

Année universitaire 2020/2021

Remerciements

En premier lieu, Je remercie Dieu « الله » Le Tout puissant de m'avoir donné le courage, la santé et la volonté pour accomplir ce modeste travail.

*Je remercie vivement mon promoteur **Pr. OMAR BOURAS** pour la qualité de son encadrement exceptionnel, pour son patience, ses précieux conseils et orientations, sa rigueur et sa disponibilité durant la préparation de ce mémoire.*

*Je voudrais remercier aussi mon **Pr. DJAMEL TOUIL** pour l'aide précieuse qu'il m'a toujours apporté, sa disponibilité et pour son soutien.*

*Dr. **Amele AGGOUN** pour avoir examiné mon travail*

*Le merveilleux enseignant **M. CHANANE KAMEL** il 'était un professeur exceptionnel avec une haute moralité. Il est un modèle pour chaque professeur au travail. Je lui souhaite un avenir plein de réalisations. Qu'il trouve ici l'expression de ma sincère reconnaissance.*

Une pensée pleine de reconnaissance à tous les enseignants qui ont contribué à ma formation pendant toute la durée de mes études, afin d'accomplir ce modeste travail.

*Et je n'oublie pas de mentionner chef département contrôle qualité **Hamid Derradji, Tarek Fenich, Sadik, chef service Farid Tommi, Djamel***

Nombreuses sont les personnes qui m'ont apporté leur aide et leur soutien, je tiens à citer mes camarades qui m'ont beaucoup aidé dans mon travail sans mentionner leurs noms, je tiens à leurs présenter mes remerciements les plus sincères.

Enfin, je remercie mes parents de m'avoir élevé, instruit, pour tous leurs sacrifices, ... les mots s'épuisent sans doute, mais vous comprendrez que tout un univers de paroles ne pourrait suffire pour vous dire merci, et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à ma réussite.

MERCI

Dédicace

Je dédie le fruit de mes études:

*À mon exemple éternel, mon soutien moral et source de joie et de bonheur, celui qui s'est toujours sacrifié pour me voir réussir. à vous mon père **"ARFI HAMID"**.*

*À la lumière de mes jours, la source de mes efforts, la flamme de mon cœur, ma vie et mon bonheur; à vous ma mère **"AMROUCH RACHIDA"** que dieu te garde dans son vaste paradis.*

*À mon cher frère et à mes chères sœurs qui m'ont encouragés toujours à suivre le chemin du savoir Surtout à ma chère sœur **Louisa et Amina** et les jeunes enfants **Fatima Al-Zahra, Adam, Abdel-Bari Ahmed, Abdel-Samad, Tasnim, Serein et Lubna***

*À toute ma famille paternelle " **ARFI** " et maternelle " **AMROUCH** "*

*À mes amis **Billel Berkane, Sedrati Mohammed, Lagha Mohamed Ali, Oussama Bgheri ,Moukhtari , Aymen, Oussama Bentama** je vous remercie pour votre soutien moral, votre patience et votre dévouement.*

À mes amis et mes camarades de promotion Génie Des Procédés 2021.

LISTE DES FIGURES

Figure	Titre	Page
Figure I.1	Photographies numériques montrant la société des ciments de la Mitidja	6
Figure I.2	Photographie numérique montrant le site de la société des ciments de la Mitidja	7
Figure I.3	Type de ciment fabriqué par la SCMI CEM II/ A42, 5 N	7
Figure I.4	Procédé de fabrication de ciment par voie sèche [4]	8
Figure I.5	Photographie numérique montrant la carrière calcaire zone 6	13
Figure I.6	Photographies numériques montrant atelier de concassage	14
Figure I.7	Photographies numériques montrant le stockage et la pré homogénéisation du calcaire et ajouts dans les halls de stockage.	14
Figure I.8	Photographies numériques montrant les carrières de calcaire et d'argile de la Cimenterie	15
Figure I.9	Photographies numériques montrant l'extraction des matières premières de leurs carrières.	15
Figure I.10	Photographies numériques montrant atelier de concassage	16
Figure I.11	Etapes de Fabrication du Ciment	16
Figure I.12	Organigramme montrant le procédé de fabrication du ciment par voie sèche	20
Figure I.13	Schéma montrant les voies de fabrication du ciment.	21
Figure I-14	Exemple d'une ligne de cuisson par voie sèche	22
Figure I-15	Schéma montrant la préparation de cru et du procédé de cuisson	23
Figure I-16	Schéma montrant les étapes de cheminement du ciment dans le. Four	24
Figure I-17	Vue microscopique d'une lame mince de clinker	25
Figure I-18	Circuit fermé de broyage du clinker [18]	27

Figure I-19	Photographie numérique montrant l'atelier du broyage de ciment	28
Figure I-20	Evolution de la finesse Blaine de ciment CEMI en fonction du temps de broyage.	28
Figure I.21	Photographie numérique montrant l'atelier des expéditions	30
Figure II.1	le schiste avant calciné	31
Figure II.2	le schiste après calciné	31
Figure II.3	Photographies numériques montrant de four de calcination	32
Figure II.4	Photographies numériques montrant de Broyeur à boulet	33
Figure II.5	Photographies numériques montrant l'appareil Blaine	34
Figure II.6	Photographies numériques montrant l'appareil refus par tamisage ALPINE	35
Figure II.8	Photographies numériques montrant l'appareil de Malaxage	37
Figure II.9	Photographies numériques montrant l'appareil de chaud	38
Figure II.10	Photographies numériques montrant l'appareil de Vicat	40
Figure II.11	Photographies numériques montrant l'appareil de perles	41
Figure II.12	Photographies numériques montrant l'appareil de spectromètre de FX	41
Figure III.1	surface spécifique de Blaine en fonction de temps	43
Figure III.2	pourcentage d'ajout en fonction de pourcentage de refus	44
Figure III.3	variation le temps de début de prise et pourcentage de SO3 en fonction de pourcentage de schiste	49
Figure III.4	variation de résistance (2 jours et 28 jours) et SSB en fonction de pourcentage de schiste	50
Figure III.5	variation de début de prise et surface spécifique de blaine en fonction de pourcentage de schiste	52
Figure III.6	la variation de résistance à 28 jours et refus en fonction de	53

	pourcentage de schiste	
--	------------------------	--

LISTE DES TABLEAU

Tableau	Titre	Page
Tableau I.1	Composition des oxydes du gypse	9
Tableau I.2	classement des roches	10
Tableau I.3	Influence des éléments mineurs sur la qualité du ciment	12
Tableau I.4	Teneurs des oxydes dans le cru.	17
Tableau I.5	Composants secondaires d'une farine crue.	18
Tableau I.6	Réactions mises en jeu dans la cuisson du clinker.	23
Tableau I.7	Différentes phases du clinker [17].	26
Tableau III.1	la composition granulométrique de sable par tamisage	45
Tableau III.2	calcule la perte de feu de ciment	45
Tableau III.3	Pourcentage d'ajout (schiste) en fonction le volume d'acide HCL (ml)	46
Tableau III.4	Résultats des essais chimiques	46
Tableau III.5	Résultats des essais minéralogiques	47
Tableau III.6	La composition chimique de clinker	47
Tableau III-7	la composition chimique de gypse	48
Tableau III-8	la composition minéralogique de clinker	48
Tableau III-9	ciment conformité évaluation	48

NOMENCLATURE

<i>symbole</i>	<i>signification</i>
CaO	<i>Chaux libre</i>
SiO_2	<i>silice</i>
Al_2O_3	<i>alumine</i>
Fe_2O_3	<i>hématite</i>
C_3S	<i>(CaO) 3 (SiO₂) ou Alite</i>
C_2S	<i>CaO)2(SiO₂) ; Belite</i>
$CaCO_3$	<i>Calcaire</i>
C_4AF	<i>(CaO)4(Al₂O₃)(Fe₂O₃), Ferrite ou aluminoferrite, on (CaO)2FeAlO₃</i>
$CaSO_4 \cdot 2(H_2O)$	<i>Gypse</i>

Résumé

Les ajouts cimentaires font actuellement partie des développements les plus récents dans la production du ciment, car leurs utilisations apportent une amélioration des propriétés mécaniques des matériaux cimentaires (mortier)

D'autre part leurs utilisations ont pour objectif de réduire la consommation de clinker, en contribuant de manière simple et économique à résoudre les problèmes liés à l'environnement.

Ce travail expérimental étudie les avantages et la possibilité de substitution partielle du ciment par les ajouts pouzzolaniques et leur influence sur l'activité pouzzolanique des mortiers.

Cette étude expérimentale consiste à préparer un ciment avec addition minérale en remplaçant un certain pourcentage de clinker par les ajouts pouzzolaniques

L'ajout pouzzolanique substitue à divers pourcentages (0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25% et 30%)

Dans cette étude, nous avons fait varier le pourcentage des ajouts pouzzolaniques dans le ciment par la méthode de substitution afin d'étudier leur effet sur les propriétés physiques et le comportement mécanique du mortier

Les caractéristiques des mortiers préparés, telles que, l'absorption, le comportement mécanique (résistance mécanique à la compression) ont été étudiées. D'après les résultats expérimentaux obtenus, il ressort que la quantité d'ajout pouzzolanique, sa composition chimique et la composition chimique de ciment confectionné sont les principaux paramètres qui influent sur la variation des résistances mécaniques et la vitesse de la réaction pouzzolanique

ملخص

تعتبر إضافات الأسمنت حالياً من أحدث التطورات في إنتاج الأسمنت ، لأن استخدامها يحسن الخواص الميكانيكية للمواد الأسمنتية (الملاط)

من ناحية أخرى ، تهدف استخداماتها إلى تقليل استهلاك الكلنكر ، مما يساهم بطريقة بسيطة واقتصادية في حل المشكلات البيئية.

يدرس هذا العمل التجريبي مزايا وإمكانية الاستبدال الجزئي للأسمنت بإضافات البوزولانية وتأثيرها على النشاط البوزولاني للملاط.

تتكون هذه الدراسة التجريبية من تحضير أسمنت مع إضافة معدنية عن طريق استبدال نسبة معينة من الكلنكر بإضافات بدائل الإضافة البوزولانية بنسب مختلفة (0% ، 5% ، 10% ، 15% ، 20% ، 25% و 30%). البوزولاني

في هذه الدراسة ، قمنا بتغيير نسبة الإضافات البوزولانية في الأسمنت بطريقة الاستبدال من أجل دراسة تأثيرها على الخواص الفيزيائية والسلوك الميكانيكي للمرونة وخصائص الملاط المحضر ، مثل الامتصاص ، والملاط الميكانيكي. تمت دراسة السلوك (المقاومة الميكانيكية للضغط) وفقاً للنتائج التجريبية التي تم الحصول عليها ، حيث تبين أن كمية الإضافة البوزولانية وتركيبها الكيميائي والتركيبي الكيميائي للأسمنت المحضر هي العوامل الرئيسية التي تؤثر على المقاومة الميكانيكية المتغيرة وبطء رد فعل البوزولاني

ABSTRACT

Cement additions are currently one of the most recent developments in cement production, because their uses improve the mechanical properties of cementations materials (mortar).

On the other hand, their uses aim to reduce the consumption of clinker, contributing in a simple and economical way to solve environmental problems.

This experimental work studies the advantages and the possibility of partial substitution of cement by pozzolanic additions and their influence on pozzolanic activity of mortars.

This experimental study consists in preparing cement with mineral addition by replacing a certain percentage of clinker by pozzolanic additions.

The pozzolanic addition substitutes at various percentages (0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25% and 30%)

In this study, we varied the percentage of pozzolanic additions in the cement by the substitution method in order to study their effect on the physical properties and the mechanical behavior of the mortar and the characteristics of the prepared mortars, such as, absorption, the mechanical behavior (mechanical resistance to compression) were studied according to the experimental results obtained, it appears that the quantity of pozzolanic addition, its chemical composition and the chemical composition of the prepared cement are the main parameters which influence the variation mechanical resistance and the slowness of the pozzolanic reaction

Sommaire

Remerciement
Dédicace.....
LISTE DES FIGURES
LISTE DES TABLEAUX.....
NOMENCLATURE.....

Introduction

Introduction générale :1
--------------------------------------	---------------

Chapitre I : Généralités sur la production de ciment

I.1 Introduction:	4
I. 2 Définition du ciment Portland :	5
I. 3 Présentation de la cimenterie de Meftah :.....	5
I.4 Procédé de fabrication du ciment :	8
I.4.1 Principaux composants de la matière première	8
I.4.1.1 Calcaire (L, LL) :.....	8
I.4.1.2 Le gypse	9
I.4.1.3 Argile	9
I. 4.1.4 Le sable	9

I. 4.1.5 Le minerai de fer	10
I.4.1.6Lamarne	10
I.4.2.1. Composants secondaires.....	10
I.4.2.2 Oxyde de Magnésium (MgO)	10
: I.4.2.3 Les Alcalis (K ₂ O et Na ₂ O)	11
I.4.2.4 Le soufre	11
I.4.2.5 Les chlorures (Cl) :	11
I.4.2.6 Les phosphores (P ₂ O ₅)	11
I.5 Extraction des matières premières	12
I.5.1 Concassage et broyage	13
I.6 Réception et contrôle des matières premières	15
I.7 Préparation de la farine crue.....	17
I.7 .1 Composition chimique de la farine crue.....	17
I.7.2 Concassage et broyage.....	18
I.8 Dosage et homogénéisation	18
I.9. Les correctifs.....	19

I.10	Les	matériaux	
correctifs			
.....19			
I.11	Finesse	de	la
crue			farine
..19			
I.12	Description du procédé par voie sèche.....		20
I.13	Séchage et broyage.....		20
I.14	Cuisson du clinker		21
1.15	Cheminement dans le four.....		23
1.15.1	Déshydratation ou Séchage (100 à 500 °C):		23
1.15.2	Décarbonatation Calcination (800 à 1100 °C)		23
1.15.3	Clinkérisation. Fusion partielle (1200 à 1500 °C)		24
:1.16	Composition minéralogique du clinker		24
I.17	Broyage du clinker et production du ciment		26
I.18	Co-broyage du clinker.....		27
I.19	Rôle de la granulométrie de l'ajout.....		
29			
I.20	Désignations et classification des adjuvants		29
I.21	Finesse du ciment		29

Chapitre II : Matériels et Méthodes

II.1 Introduction	31
II-2 Matériaux utilisés :	31
II.3 Méthodologie expérimentale:.....	31
II.3.1 : Calcination du schiste :	31
II.3.2 La perte au feu de schiste :	32
II.3.3 Concassage du clinker :	32
II.3.4 Broyage (broyeur à boulet) :	32
II.4 Détermination de la surface spécifique de Blaine:.....	33
II.5 Mesure des refus par tamisage ALPINE :	34
II.6 Détermination de la chaux libre par acidimétrie:	35
II.7 Préparation des éprouvettes 4×4×16cm ³	36
II.7.1 Pesée des constituants:	36
II.7.2 Malaxage:	36
II.7.3 Moulage	37
II.7.4. Conservation des éprouvettes dans l'eau :	37
II.8 Essais d'expansion :	38
II.8.1: Vérification initiale des aiguilles le chatelier	38
II.8.2 Préparation des éprouvettes et mise en place dans le bain définitif :	38
II.8.3: Essais d'expansion à chaud	38
II.8.4 Détermination du temps de prise :	39
II.8.5 Préparation de la pâte normale :	39
II.8.6 Vérification de la consistance normale :	39
II.8.7 Détermination du début de prise :	39
II.8.8 Détermination de fin de prise :	40
II.9 Préparation des échantillons pour analyser par spectromètre de FX:	40
II.9.1: Utilisation du broyeur HERZOG (Marche automatique)	40
II.9.2 Préparation des pastilles :	41

II.9.3 Préparation des perles :	41
II.10 Détermination de la perte au feu :	42
II.10.1 Mode opératoire:.....	42

Chapitre III : Résultats et discussion

III. 1. Surfaces spécifiques des échantillons préparés.....	43
III. 2. Effet du pourcentage d'ajout sur le pourcentage de refus	44
III. 3. Composition granulométrique de sable par tamisage	45
III. 4. Détermination de la chaux libre	46
III.5. Résultats des essais chimiques	46
III.6. Résultats des essais minéralogiques.....	47
III.7. Résultats des essais mécaniques	49

Introduction Générale

Introduction générale

Le ciment est un liant hydraulique obtenu par la combinaison chimique à très haute température du calcaire et d'argile. Le clinker est ensuite broyé avec des ajouts, dans des proportions précises, qui donneront au ciment des caractéristiques spécifiques. La production de ciment en 2017 de l'entreprise publique GICA (Groupement Industriel des Ciments Algériens) atteint 13.950.660 tonnes soit une augmentation de 11% par rapport à la production de 2016. Les prévisions que se fixe le GICA pour 2020 sont d'atteindre une production de 20.000.000 de tonnes

La consommation nationale de ciment a évolué de façon exponentielle, elle a enregistré ces dernières années une dynamique particulière tirée par les investissements publics en équipement et en logements.

L'utilisation des ajouts dans la production des ciments Portland a résolu en grande partie le problème d'autosuffisance nationale, ainsi que celui du coût énergétique, et réduire le coût de production du clinker, qui est un matériau semi-fini dans l'industrie du ciment Portland, et également protéger l'environnement en réduisant les émissions de carbone.

En faisant varier les pourcentages d'ajouts, on pourrait obtenir en fonction des domaines d'utilisation, différents types de ciments avec les propriétés physico-mécaniques de mandées

Les ajouts minéraux sont largement utilisés dans la production des ciments à travers le monde l'utilisation des ajouts actifs minéraux dans l'industrie cimentière présente plus d'avantages par rapport aux ajouts inertes. Les tufs sont des ajouts actifs minéraux d'origine volcanique, de la famille des pouzzolanes, les cendres, les pierres ponce, les trass et les vitrophires

Les ajouts inertes sont moins connus dans la pratique de l'industrie cimentière, ils sont habituellement utilisés lorsque la cimenterie ne dispose pas de source de minéraux actifs ainsi, pour le secteur cimentier national, le calcaire est essentiellement utilisé comme ajout inerte à cause de sa disponibilité à proximité des installations cimentières

Il serait souhaitable pour ce secteur industriel de rechercher et développer d'autres ajouts actifs afin de préserver le gisement du calcaire (matière première principale de ce secteur) aux générations futures

Chapitre I: Généralités sur la Production Industrielle du Ciment

En raison de notre objectif de développement des ajouts pour économiser le clinker et le ciment en vue de réduire le coût, l'étude s'articule autour des points suivants:

- ✓ Le premier chapitre consiste à faire une présentation générale de la cimenterie de Meftah

ainsi que les étapes de Procédé de fabrication du ciment portland.

- ✓ Le deuxième chapitre est consacré particulièrement aux matériels et méthodes dédiés à la mesure de la résistance, chaux libre etc. (les propriétés physiques et mécaniques)

- ✓ Ensuite, dans le troisième chapitre nous avons fait une étude des différences de pourcentage de schiste sur les performances des résistances de chaque type de mortier

Nous terminons notre étude par une conclusion générale dans laquelle sont regroupés les principaux résultats qui au cours de le travail fera la synthèse des principaux acquis de ce travail

Chapitre I :

Généralités sur la Production Industrielle du Ciment

Chapitre I : Généralités sur la Production Industrielle du Ciment

I.1 Introduction

En leur temps, les romains furent les premiers à fabriquer un liant hydraulique capable de faire prise sous l'eau en mélangeant de la chaux à des cendres volcaniques.

Bien que connues depuis l'antiquité, les propriétés d'hydraulicité de ce mélange sont restées inexplicables pendant des siècles.

Ce n'est qu'en 1817 que Louis Vicat a établi la théorie et révéla les principes de fabrication du ciment artificiel que nous utilisons encore aujourd'hui.

En 1824, l'écossais Aspdin [1] a augmenté la température de cuisson du ciment jusqu'au début de fusion des matériaux de base et a qualifié le ciment par le nom de « Portland » en référence à la pierre de cette région dont les propriétés étaient comparables



Louis Vicat (1786-1816)

I.2 Définition du ciment Portland

Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire un matériau minéral finement moulu qui, gâché avec de l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit par suite de réactions et de processus d'hydratation et qui, après durcissement, conservera la résistance et sa stabilité même sous l'eau.

Le ciment conforme à la présente norme, appelé ciment CEM, mélangé avec des granulats et gâché avec de l'eau de façon appropriée, doit être capable de produire un mortier ou un béton qui conserve son ouvrabilité pendant un temps suffisamment long et doit, après des périodes déterminées, atteindre des niveaux de résistance prescrits et aussi présenter une stabilité de volume à long terme.

Le durcissement hydraulique du ciment CEM est principalement dû à l'hydratation des silicates de calcium, mais d'autres composés chimiques peuvent également intervenir dans le processus de durcissement, tels que, par exemple, les aluminates.

Dans les ciments CEM, la somme des quantités relatives d'oxyde de calcium (CaO) et de dioxyde de silicium (SiO₂) réactifs doit représenter une proportion au moins égale à 50 % en masse, lorsqu'elles sont déterminées selon le Norme Nationale 196-2.

Les ciments CEM sont constitués de différents matériaux et sont de composition statistiquement homogène du fait d'une assurance qualité couvrant les processus de production et de manutention.

Le lien entre ces processus de production et de manutention et la conformité du ciment à la présente norme est défini dans le Norme Nationale 197-2 [2].

I.3 Présentation de la cimenterie de Meftah

La société des ciments de la Mitidja (S.C.MI) est une entreprise algérienne filiale de groupe industriel des ciments d'Algérie GICA

En partenariat avec Lafarge, depuis juin 2008, la SCMI a enregistré d'ailleurs une production historique de 500 000 tonnes ciment durant l'année 2011.

La cimenterie est implantée dans la commune de Meftah, DAIRA de Meftah, wilaya de Blida.

L'unité est située à 27 kilomètres d'Alger, localisée à proximité de la route nationale n°29 reliant la commune de Meftah à celle de KHEMIS -EL-KHECHNA à l'Est et l'Araba à l'ouest.



Figure I.1 : Photographies numériques montrant la société des ciments de la Mitidja

Dates Clés liées à la société des ciments de la Mitidja

- 1975 Entrée en production
- 1998 Filialisation du groupe ERCC (Société des ciments de la Mitidja)
- 2008 Partenariat avec Lafarge (prise de participation de 35%) avec un contrat de management.
- 2010/2017 Remplacement de deux électro filtres par des filtres a manches
- 2013 Automatisation de la ligne de production
- 2018 Raccord de Production 1390 KT de ciment.
- 2018 Fin de contrat de management avec Lafar geHolcim.
- 2018 Certification Management Qualité ISO 9001V2015



Figure I.2 : Photographie numérique montrant le site de la société des ciments de la Mitidja

Type de ciment fabriqué par la SCMI
CEM II/A 42,5 N

Familles de ciments :
 CEM I : ciment Portland
 CEM II : ciment Portland composé
 CEM III : ciment de haut fourneau
 CEM IV : ciment pouzzolanique
 CEM V : ciment au laitier et aux cendres

Quantité de constituants principaux autres que le clinker (en % d'ajout)
 Pour CEM II :
 A : de 6 à 20%
 B : de 21 à 35 %
 Pour CEM III (% de laitier) :
 A : de 36 à 65%
 B : de 66 à 80 %
 C : de 81 à 95 %

Classes de résistance (résistance caractéristique minimum à 28 jours exprimée en MPa) :
 32,5 ou 42,5 ou 52,5

Sous-classes de résistance (résistance caractéristique minimum à 2 jours exprimée en MPa).
 N : Normal
 R : Rapide

Dans le cadre de la nouvelle politique commerciale du GICA, la SCMI s'est lancée dans la diversification des produits à usage spécifique à savoir:
 -La classe **52.5**
 -**CRS**: Ciment résistant aux sulfates.

Figure I.3 : Type de ciment fabriqué par la SCMI CEM II/ A42, 5 N

I.4. Procédé de fabrication du ciment

Les procédés de fabrication du ciment, par voie sèche, constituent à ce jour les modes d'élaboration du ciment les plus modernes et les plus performants.

La fabrication du ciment Portland par voie sèche passe par différentes étapes de transformations physico-chimiques, sous l'action d'importantes quantités d'énergie tel qu'illustré en figure I.4. Elle s'effectue en deux étapes principales [1]:

-La production d'un semi-produit désigné sous le nom de clinker par cuisson de matières premières (calcaire, argile, alumine et oxyde de fer), préalablement broyés finement et mélangés dans les proportions bien définies.

-La fabrication du ciment par Co-broyage du clinker avec du gypse (régulateur de prise) et éventuellement un ajout minéral.

Plusieurs types de ciments sont fabriqués [3] :

- Les ciments «Portland CEMI» (ciment pur sans ajout, constitué de clinker et de gypse)

- les ciments «Portland composite CEMII» (ciments avec ajouts).

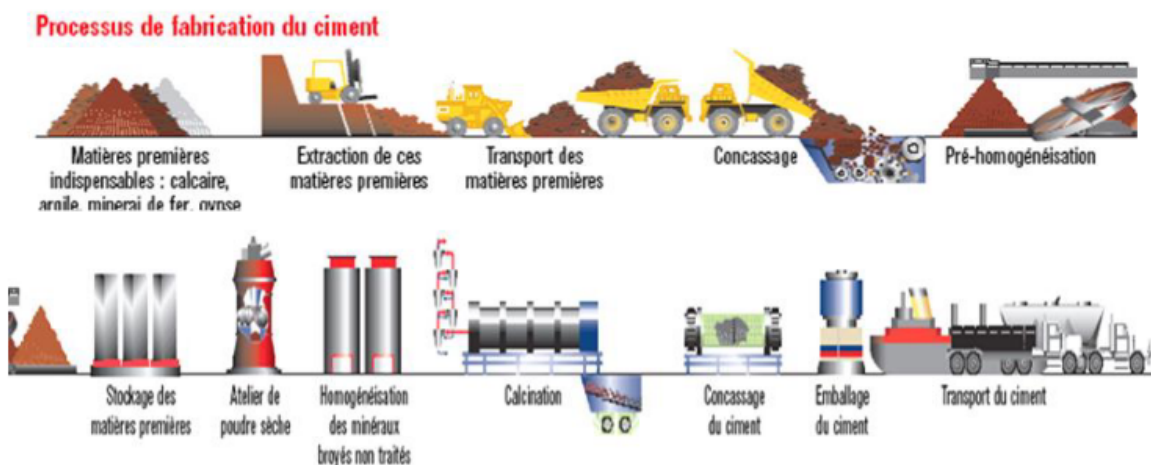


Figure I. 4 : Procédé de fabrication de ciment par voie sèche [4]

I.4.1 Principaux composants de la matière première

I.4.1.1 Calcaire (L, LL) :

Il existe deux types de calcaire :

- LL : inférieure à 0,20 % en masse.
- L : inférieure à 0,50 % en masse.

Le calcaire doit satisfaire aux exigences suivantes :

a) la teneur en carbonate de calcium (CaCO_3) calculée à partir de la teneur d'oxyde de calcium doit être supérieure ou égale à 75 % en masse ;

b) la teneur en argile déterminée par l'essai au bleu de méthylène conformément à l'EN 933-9 ne doit pas être supérieure à 1,20 g/100 g. Cet essai implique que le calcaire soit broyé à une finesse d'environ 5 000 cm²/g déterminée en termes d'aire massique, conformément à l'EN 196-6 ;

c) la teneur en carbone organique total (TOC) doit, lorsqu'elle est déterminée selon la norme prEN 13639, être conforme à l'un des critères suivants :

I.4.1.2 Le gypse

Le gypse est fourni par la même société la coupe granulométrique [1,6 -1,12] mm est isolée par tamisage et séchée a une température de 45 °C.

Le dosage du gypse naturel a été maintenu constant à 5% .dans la préparation de tous les ciments, pour deux raisons, réguler la prise et ne pas masquer l'influence de la teneur en ajouts sur les propriétés mécaniques du ciment

Tableau I.1 : Composition des oxydes du gypse

Oxyde	%
SiO ₂	8,08
Al ₂ O ₃	2,50
Fe ₂ O ₃	1,12
CaO	27,01
MgO	4,70
SO ₃	31,56
K ₂ O	0,37

Le rôle principal de gypse est multiple :

Contribution à la résistance à 02 jours.

Régulateur de prise.

Facilite le broyage de ciment.

I.4.1.3 Argile

L'argile riche en alumine (Al₂O₃) occupe la deuxième place dans la composition du clinker après le calcaire (17%).

Les argiles sont formées essentiellement de silice, d'alumine et de fer dont les teneurs varient d'une argile à une autre. Les argiles utilisées les plus répandues sont généralement celles constituées de plusieurs minéraux en proportions variables :

la montmorillonite ($\text{Al}_2\text{O}_3, 4\text{SiO}_2, \text{H}_2\text{O}, n\text{H}_2\text{O}$) ; l'illite ($[\text{K}_2\text{O}, \text{H}_2\text{O}], 3\text{Al}_2\text{O}_3, 6\text{SiO}_2$, la kaolinite ($\text{Al}_2\text{O}_3, 2\text{SiO}_2, 2\text{H}_2\text{O}$) et chlorite ($10[\text{Mg,Fe}]\text{O}, 2\text{Al}_2\text{O}_3, 6\text{SiO}_2, 8\text{H}_2\text{O}$).

I. 4.1.4 Le sable

Le sable (2%) est très riche en silice est ajouté généralement dans le cas où la teneur en silice du mélange n'est pas suffisante

Dans la préparation du clinker, ce composant est nécessaire en tenant en compte les proportions présentes déjà dans les argiles.

I. 4.1.5 Le minerai de fer

On l'ajoute en faible proportion (1 %) dans le cas de manque de l'oxyde fer Fe_2O_3

I. 4.1.6 La marne

La marne renferme dans sa structure le calcaire, la silice, les substances argileuses et l'oxyde de fer.

Sa couleur varie du jaune au gris-noir en fonction des proportions des composés carbonatés et argileux, on peut classer les roches de la manière suivante [7]

Tableau I.2 : classement des roches

ROCHES	% du CaCO_3
Calcaire	96-100
Calcaire Marneux	90-96
Marne Calcaire	75-90
Marne	40-75
Marne Argileuse	10-40
Argile Marneux	4-10
Argile	0-4

I.4.2.1. Composants secondaires

Ce sont des composants dont la teneur est limitée par les normes en vigueur.

I.4.2.2 Oxyde de Magnésium (MgO)

Sa teneur est d'environ 2% et se trouve en liaison avec les phases principales du clinker à l'état libre sous forme de Pré-calse. Ce dernier donne avec l'eau l'hydroxyde de magnésium $\text{Mg}(\text{OH})_2$.

I.4.2.3 Les Alcalis (K_2O et Na_2O)

Ils sont mélangés avec les argiles et les marnes.

Durant la cuisson du ciment dans les fours rotatifs une partie des alcalis se volatilise dans la zone de clinkérisation.

I.4.2.4 Le soufre

Dans la zone de cuisson, le soufre se transforme en gaz sulfureux (SO_2), qui en réagissant avec les alcalis volatilisés et l'oxygène, forme des vapeurs de sulfate des métaux alcalins.

Les sulfates se condensent dans la zone de préchauffage et retournent dans la zone de cuisson.

L'excès de SO_2 dans la zone de préchauffage réagit avec les carbonates $CaCO_3$ en formant du $CaSO_4$.

Dans la zone de cuisson, les sulfates $CaSO_4$ se décomposent en augmentant la concentration de SO_2 dans les gaz de circulation.

I.4.2.5 Les chlorures (Cl) :

Les mélanges des matières premières contiennent souvent de 0,01 à 0,1% de chlorures (Cl) et dans les cas exceptionnels plus de 0,3%.

Dans les fours, les chlorures réagissent avec les alcalis en formant les chlorures des métaux alcalins, qui seront transportés par les gaz et viendront se déposer dans la zone de préchauffage, puis ils retournent dans la zone de cuisson dans laquelle ils se volatilisent.

Il se produit alors une circulation continue entre la zone de cuisson et la zone de préchauffage qui peut causer l'arrêt du four.

Les chlorures provoquent la corrosion de l'acier et présente donc, un danger pour les armatures du béton.

I.4.2.6 Les phosphores (P_2O_5)

La teneur des phosphores dans la plupart des crus est très faible (moins de 0,25%). Une teneur en P_2O_5 dépassant 0,5% peut provoquer la diminution de la résistance initiale du ciment. Le tableau I.3 présente l'influence des éléments mineurs sur la qualité du ciment

Tableau I.3 : Influence des éléments mineurs sur la qualité du ciment

Eléments Mineurs	Concentration dans le ciment (%)	Influence
Magnésium	0,5-1,2	Expansion si > 5%
sulfate	0,2-0,6	Développement de la résistance et évolution de la prise
Alcalins	0,05-0,2	Résistance aux jeunes âges
phosphates	0,02-0,05	Retard dans la prise si > 1%
Manganèse	1,0-3,0	Teinte du ciment
Chlorure	3,0-4,0	Corrosion si > 0,1%et évolution de la prise

I.5 Extraction des matières premières

Les matières premières utilisées en cimenterie sont extraites du sol par l'intermédiaire de carrières.

Ces carrières sont généralement à ciel ouvert, car l'exploitation en est plus facile. Quelques rares usines qui exploitent certains bancs de composition particulièrement avantageuse sont obligées de travailler en carrière souterraine.

Les méthodes d'extraction sont différentes suivant que l'on doit extraire un matériau tendre ou un matériau dur.

Elles sont toujours mécanisées du fait de productions journalières rarement inférieures à 500 tonnes. Dans le cas des matériaux tendres, l'enlèvement de la matière peut se faire à l'aide de:

- Un excavateur à godets, se mouvant le long du front de taille
- Un ou plusieurs pelles mécaniques attaquant directement la roche Quant aux matériaux mi-durs ou durs, l'extraction s'effectue en deux temps:
 - Forage de trous destinés à recevoir l'explosif
 - Abattage de la roche

I.5.1 Concassage et broyage

Les matières premières doivent être réduites en poudres et séchés simultanément. En effet, une poudre dont les grains ne dépassant pas $200\ \mu\text{m}$ ne peut se manipuler facilement que si sa teneur en eau est inférieure à 1 ou 2%.

Les matières premières utilisées en voie sèche contiennent généralement moins de 15% d'eau. Dans la plus part des cas, il suffit d'introduire les gaz chauds au moment du broyage. Les broyeurs à boulets fonctionnent le plus souvent en circuit fermé.

Les broyeurs doivent sécher le cru dans la majorité des cas. Ils sont alors munis d'un foyer axillaire dont l'effet peut être renforcé par un apport de gaz chauds issus du refroidisseur ou du four [5].



Figure I.5 : Photographie numérique montrant la carrière calcaire zone 6



Figure I.6 : Photographie numériques montrant les opérations d'abattage calcaire extraction d'argile et concassage



Figure I.7 : Photographies numériques montrant le stockage et le pré homogénéisation du calcaire et ajouts dans les halls de stockage

I.6 Réception et contrôle des matières premières

Les matières premières principales entrant dans la fabrication des ciments portlands sont constituées de calcaire, d'argiles, de sables, et de minerais de fer (Figure I.5)

Les contrôles de réception des matières premières acceptées sont souvent limités à la détermination d'une ou plusieurs caractéristiques de base du matériau (titre en carbonate d'un calcaire, etc..).

Les matières premières sont extraites des parois rocheuses d'une carrière à ciel ouvert, les carrières de calcaire et d'argile se situent respectivement à 1 km et 4 km de la cimenterie. Comme le montre la Figure I.6, l'extraction de ces matières premières () se fait par abattage à 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



Figure I.8 : Photographies numériques montrant les carrières de calcaire et d'argile de la Cimenterie



Figure I.9: Photographies numériques montrant l'extraction des matières premières de leurs carrières.

Le calcaire abattu à l'explosif subit deux opérations de concassage (Figure I.10).

Un concassage primaire qui permet de réduire la granulométrie de 1000 mm à l'entrée jusqu'à la taille de 100 mm à la sortie et un second concassage qui permet de réduire la granulométrie jusqu'à la taille de 30 mm.



Figure I.10 : Photographies numériques montrant atelier de concassage

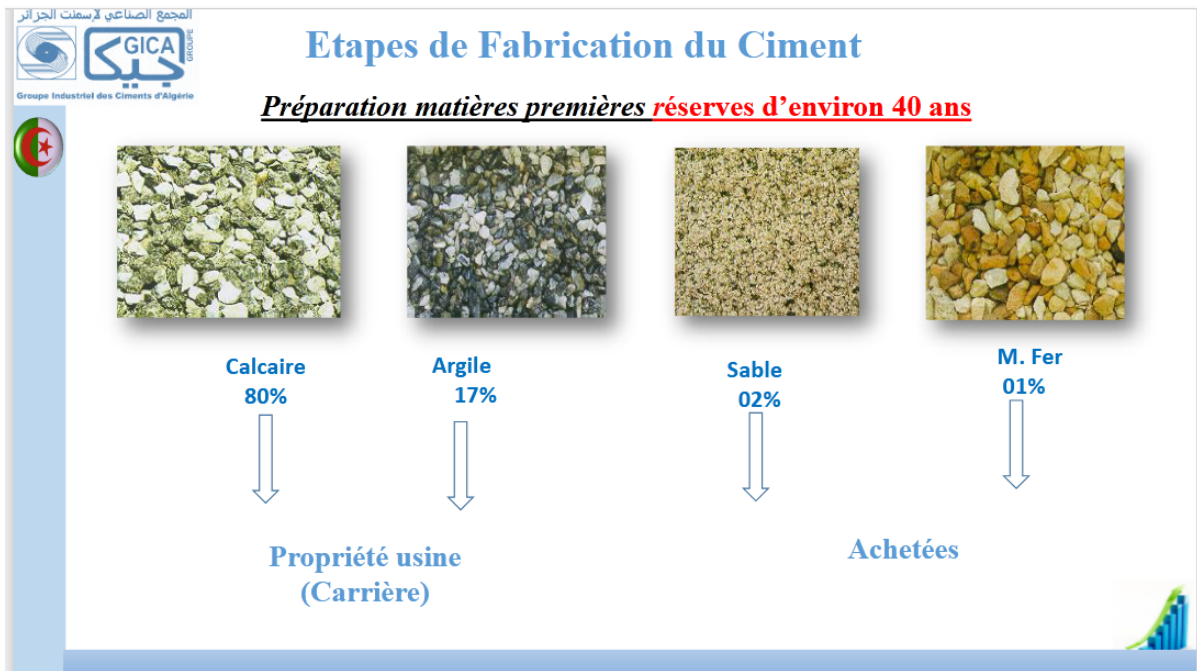


Figure I.11 : Etapes de Fabrication du Ciment

I.7 Préparation de la farine crue

La préparation de la matière première destinée à passer dans le four constitue une étape forte importante de la fabrication du ciment.

La finesse et la composition chimique du produit issu du broyage des matières premières jouent un rôle important dans la cuisson du clinker.

I.7 .1 Composition chimique de la farine crue

La préparation du cru consiste à réaliser un mélange homogène de calcaire, d'argile et éventuellement de matériaux complémentaires dans les proportions permettant d'obtenir un clinker dont la composition chimique respecte les limites précisées par le tableau I.4.

Ce tableau indique les valeurs usuelles dans lesquelles s'inscrivent les compositions des crus de cimenteries dans leur ensemble.

En fait, une usine donnée ne peut se permettre que des variations très réduites par rapport à une composition optimale propre. Il faut donc élaborer des mélanges des matières de base de calcaire, d'argile ou argilo-calcaire (marnes), de façon à obtenir la composition chimique voulue [9].

Tableau I.4: Teneurs des oxydes dans le cru.

Teneur %	Oxyde						
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O, Na ₂ O	SO ₃
Limite	60-69	18-24	4-8	1-8	<5	<2	<3
Moyenne	65	21	6	3	2	1	1

Il est très souvent nécessaire d'affiner cette composition par l'ajout d'autres produits de carrière ou de sous produits industriels tels que :

Les cendres volantes, (résidu de la composition du charbon).

Les cendres de pyrite, (résidu de grillage de ce minerai).

La bauxite, (minerai naturel d'aluminium, qui apporte les compléments d'alumine).

Le sable, (silice à peu près pure)

.Les laitiers de haut fourneau, (sous produit de la fabrication de la fonte).

Les schistes, (issus du métamorphisme des argiles)

Actuellement, un plusieurs méthodes d'analyse physique permettent de connaître en continu, la teneur en composants de base de chacun des constituants de la matière crue.

Toute indication de variation de cette teneur est conduite à une calculatrice qui modifie les débits en conséquence et maintient automatiquement la constance de composition chimique de la matière crue tout au long de sa préparation.

La qualité de la constitution de ce mélange cru peut être caractérisée par différents indices ou " modules " tels que: le standard de chaux et les modules silicique et alumino-ferrique.

Les composants secondaires de la farine crue peuvent influencer la qualité du clinker, leur dosage ne doit pas être négligé.

De ce fait, les normes de qualité de clinker imposent une limite supérieure de ces constituants. Des exemples de teneurs moyennes d'une farine crue industrielle sont cités dans le tableau I.5

Tableau I.5 : Composants secondaires d'une farine crue.

oxyde	K ₂ O	Na ₂ O	Cl ⁻	SO ₃	MgO
Teneur moyenne %	0,5-1,3	0,05-0,5	0,001-0,02%	0,1-0,5	<2

I.7.2 Concassage et broyage

Les grains dont la taille ne dépassant pas 200 µm ne peut se manipuler facilement que si sa teneur en eau est inférieure à 1 ou 2 %. Comme les matières premières utilisées en voie sèche contiennent généralement moins de 15% d'eau, les gaz chauds sont introduits généralement au moment du broyage.

Les broyeurs à boulets fonctionnent le plus souvent en circuit fermé et doivent sécher le cru dans la majorité des cas. Pour cela, ils sont alors munis d'un foyer auxillaire dont l'effet peut être renforcé par un apport de gaz chauds issus du refroidisseur ou du four.

I.8 Dosage et homogénéisation

Lorsque les matières premières sont de qualité régulière, on effectue immédiatement après le concassage un dosage approximatif qui permet de s'approcher de la composition cherchée.

Il ne reste plus ensuite qu'à mélanger les contenus de différents titres variés dans les proportions cherchées.

En pratique on s'aperçoit qu'une farine est plus difficile à homogénéiser qu'une pâte. En effet, une farine nécessite des contrôles plus fréquents et des manipulations plus nombreuses. Elle exige généralement la disposition d'une importante batterie de silos

Comme l'établissement d'un circuit de dosage dépend de la nature des matières premières, on devrait choisir parmi tous les schémas possibles, celui qui entraînera le moins d'investissements tout en produisant une farine de qualité convenable. A noter que l'homogénéisation d'un silo peut être mécanique ou pneumatique [9].

I.9. Les correctifs

Ils obéissent aux conditions suivantes :

Les matériaux correctifs sont ajoutés au cru pour ajuster les teneurs en certains oxydes comme SiO_2 , Al_2O_3 et Fe_2O_3 .

Les régulateurs de prises du ciment.

Les minéralisateurs.

D'autres ajouts comme les fluidifiants et les entraîneurs d'air

I.10 Les matériaux correctifs

Ce sont généralement :

Les correctifs siliceux. : le sable et le grès.

Les correctifs alumineux comme la Bauxite.

Les correctifs ferrugineux : Minerai de fer, pyrite grillée. [10]

I.11 Finesse de la farine crue

La finesse optimale de broyage des crus se détermine expérimentalement, en fonction des matériaux particuliers utilisés par chaque usine et compte tenu du coût des opérations de broyage, il convient cependant de noter que les meilleurs clinkers sont obtenus à partir de crus très fins.

Lorsque les matériaux sont naturellement homogènes, comme le sont les marnes par exemple, il n'est pas besoin de recherché une finesse extrême.

Quand ils sont hétérogènes au départ, et que le cru résulte de mélanges artificiels, il est par contre nécessaire de rechercher une grande finesse pour rendre les matériaux homogènes à l'échelle microscopique, et ainsi faciliter les réactions chimiques au cours de la cuisson.

A l'échelle industrielle, la finesse de la farine crue se caractérise par un refus au tamis $90\mu\text{m}$ de l'ordre de 5 à 20 % [11].

I.12 Description du procédé par voie sèche

La fabrication et la mise en œuvre du ciment Portland par voie sèche passent par différentes étapes de transformations physico-chimiques sous l'action d'importantes quantités d'énergie mécanique et thermique tel qu'illustré en Figure I.12.

Comme son nom l'indique, ce procédé utilise une matière sèche où les étapes de séchage se déroulent à l'extérieur du dans les gaz du four et l'absence de déshydratation en font la méthode la moins vorace en consommation d'énergie thermique.

Le développement de la voie sèche a été longtemps retardé par la médiocre qualité du clinker obtenu alors que le progrès dans la mouture fine et l'homogénéisation des mélanges secs permet d'obtenir aujourd'hui des ciments Portland de qualité, ce qui fait au cours des dernières décennies, la voie sèche devient de plus en plus utilisée [12].

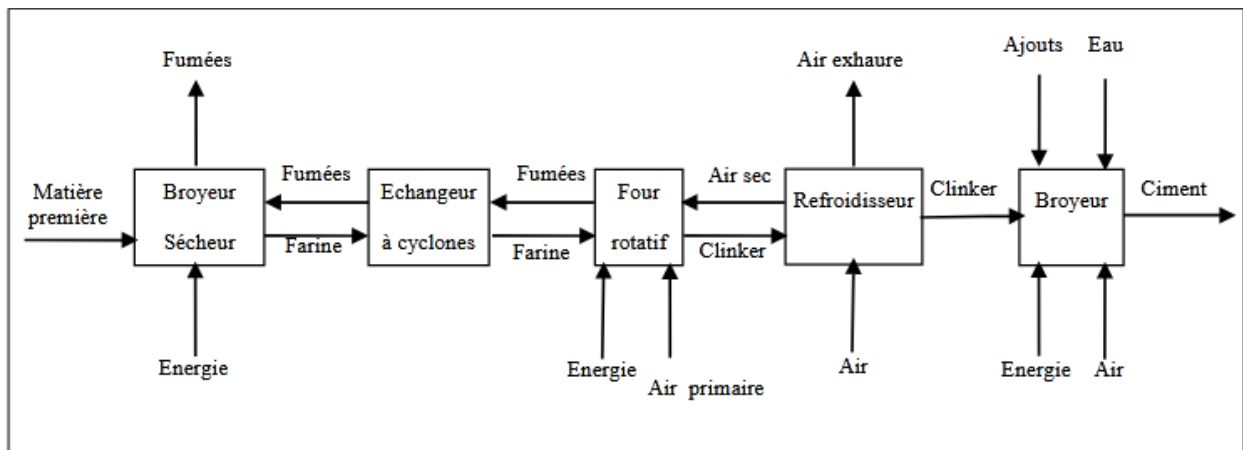


Figure I.12: Organigramme montrant le procédé de fabrication du ciment par voie sèche

I.13 Séchage et broyage

IL existe 4 méthodes de fabrication du ciment [13] :

Fabrication du ciment par voie humide (la plus ancienne).

Fabrication du ciment par voie semi-humide (en partant de la voie humide).

Fabrication du ciment par voie sèche (la plus utilisée).

Fabrication du ciment par voie semi-sèche (en partant de la voie sèche).

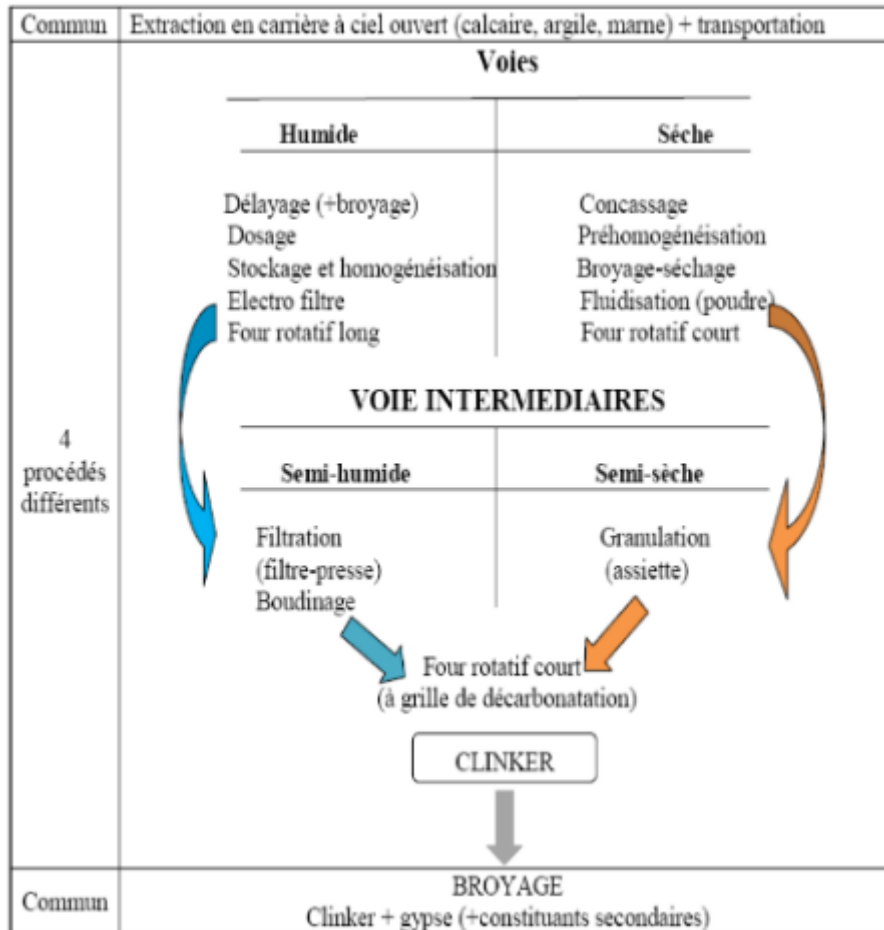


Figure I.13 : Schéma montrant les voies de fabrication du ciment.

I.14 Cuisson du clinker

La cuisson est le processus de transformation de la farine crue en clinker, par un apport thermique suffisant, pour obtenir des réactions chimiques complètes conduisant à la formation des principaux composés de ce semi-produit (clinkérisation).

Comme le montre la Figure I.14, le procédé de cuisson comporte un système de préchauffage du cru, une partie pour la décarbonatation, une partie pour la clinkérisation et un refroidisseur.

Le préchauffage de la farine crue, s'effectue dans la partie supérieure du préchauffeur à suspension (cyclones).

La décarbonatation a lieu dans la partie basse du préchauffeur et la partie amont du four rotatif.

La clinkérisation se fait toujours dans la partie aval du four rotatif. Les gaz chauds sont produits dans le four par combustion de charbon, de fuel, de gaz ou de tout produit à haut pouvoir calorifique [15].

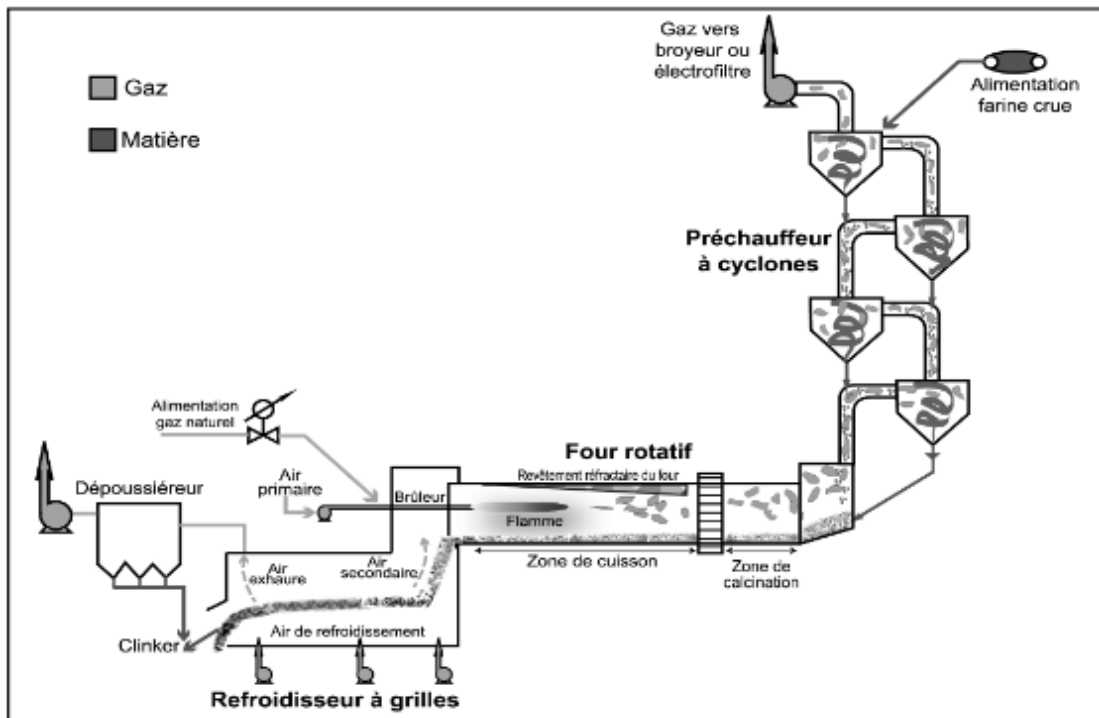


Figure I.14 Exemple d'une ligne de cuisson par voie sèche

Des ventilateurs situés après le préchauffeur et le refroidisseur véhiculent les gaz à travers ces installations.

Après passage dans le préchauffeur, la farine progresse vers l'aval sous l'effet de la rotation et la pente du four.

Au fur et à mesure de son acheminement, la matière s'échauffe jusqu'à clinkérisation vers 1400 à 1500 °C.

A la sortie du four, le clinker d'une forte hétérogénéité granulométrique (0,1 – 40 mm) tombe dans un refroidis échanges thermiques permettant une récupération de chaleur et le refroidissement du clinker.

Le Tableau I.6 récapitule les principales réactions mises en jeu lors de la cuisson du clinker.

Tableau I.6: Réactions mises en jeu dans la cuisson du clinker.

Température (°C)	Réaction chimique	Nature	H (kcal/kg)
800-1250	$\text{CaCO}_3 = \text{CaO} + \text{CO}_2$	Endothermique	+425
	$2\text{CaO} + \text{SiO}_2 = \text{C}_2\text{S}$	Exothermique	-175
	$\text{CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3 = \text{C}_3\text{A}$		-24
	$3\text{CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3 = \text{C}_3\text{A}$		-18
	$4\text{CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 = \text{C}_4\text{AF}$		-16
1250-1450	$\text{C}_2\text{S} + \text{CaO} = \text{C}_3\text{S}$	Exothermique	-118
1450-1250	Cristallisation de C_2S , C_3S , C_3A et C_4AF		

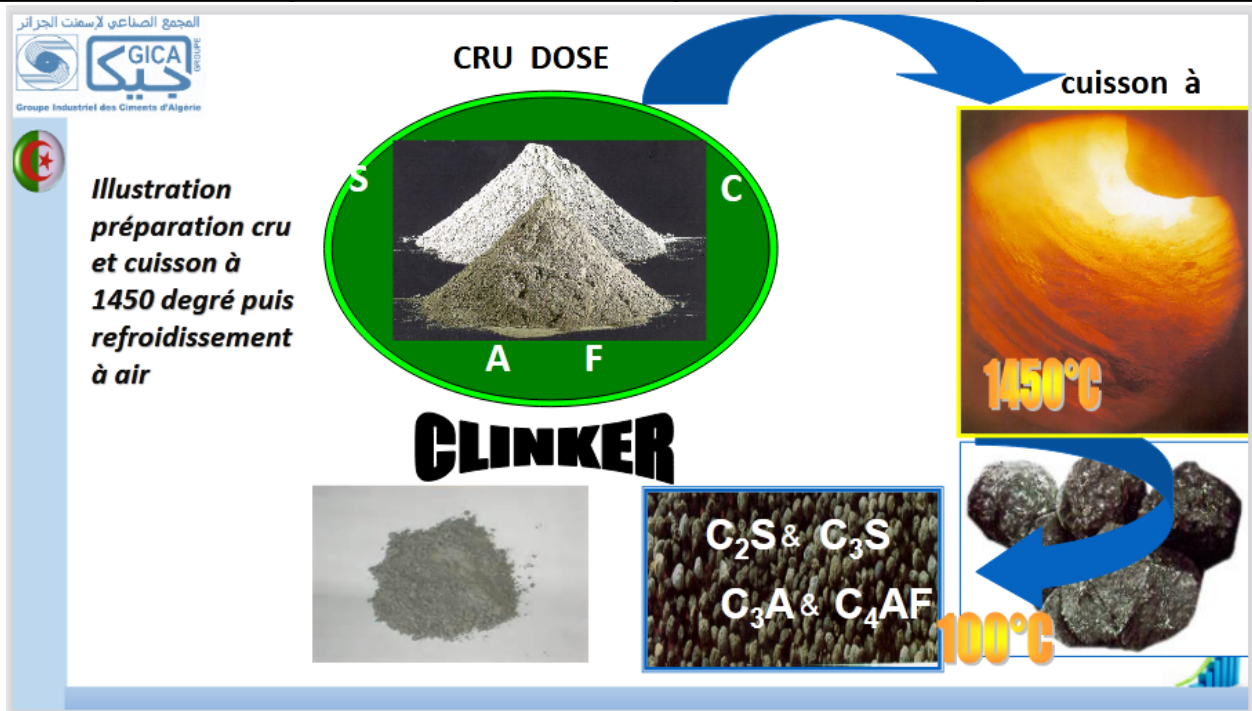


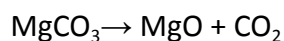
Figure I.15 : Schéma montrant la préparation de cru et du procédé de cuisson

1.15 Cheminement dans le four

1.15.1 Déshydratation ou Séchage (100 à 500 °C) :

On assiste à la déshydratation des composants argileux à la température de (100 à 500 °C) qui perd sa propriété de liant.

Les minéraux argileux se détruisent en libérant la silice et l'alumine. L'oxyde MgO perd son oxyde de carbone suivant la réaction suivante [16].



1.15.2 Décarbonatation Calcination (800 à 1100 °C) :

Les carbonates CaCO_3 se décomposent en oxyde de calcium à la température de (800 à 1100 °C) suivant la réaction suivante : $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$

1.15.3 Clinkérisation. Fusion partielle (1200 à 1500 °C)

La plus importante Clinkérisation commence vers 1220 °C jusqu'à 1400-1500 °C où se forment les phases hydrauliques du clinker :

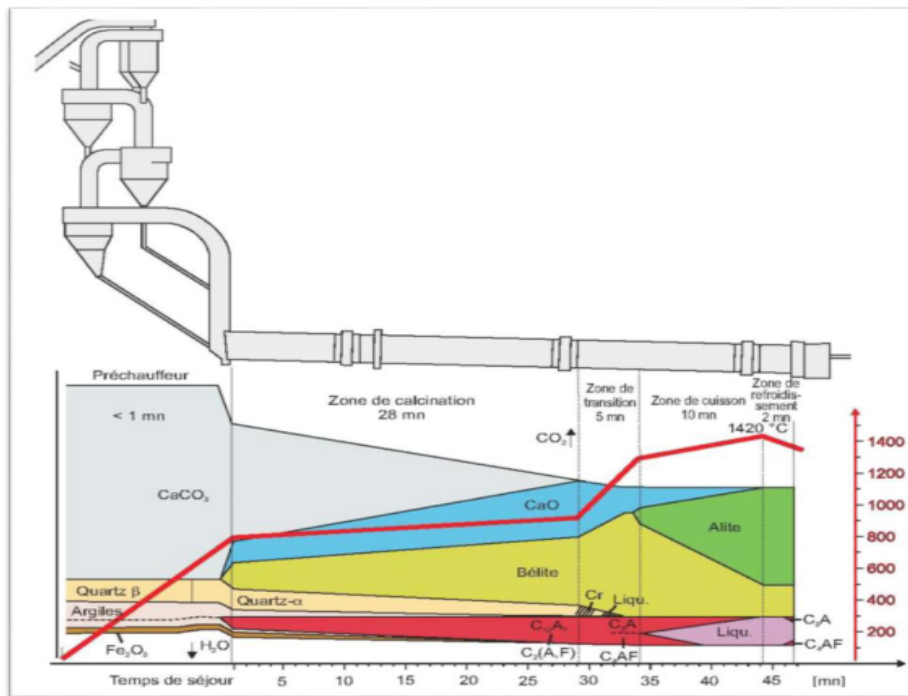
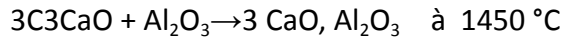
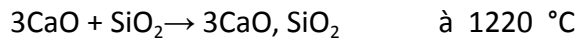


Figure I.16 : Schéma montrant les étapes de cheminement du ciment dans le four.

1.16 Composition minéralogique du clinker

Le clinker comprend essentiellement les deux silicates de calcium $3\text{CaO}.\text{SiO}_2$ et $2\text{CaO}.\text{SiO}_2$. L'aluminium et le fer passent, en majeure partie, à l'état de $3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$ et d'une solution solide de composition approximative $4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$.

Les proportions de ces éléments dépendent des carrières, du type de ciment fabriqué et du déroulement de la cuisson.

La détermination numérique de la composition des phases du clinker d'après Bogue fournit des valeurs indices pour la composition réelle des phases.

Pour un clinker de ciment portland normal, on admet que:

$$\%C_3S = 4,07 \text{ CaO} - 7,60 \text{ SiO}_2 - 6,72 \text{ Al}_2\text{O}_3 - 1,43 \text{ Fe}_2\text{O}_3$$

$$\%C_2S = 2,87 \text{ SiO}_2 - 0,75 \text{ C}_3\text{S}$$

$$\%C_3A = 2,65 \text{ Al}_2\text{O}_3 - 1,69 \text{ Fe}_2\text{O}_3$$

$$\%C_4AF = 3,04 \text{ Fe}_2\text{O}_3$$

De nombreuses tentatives pour améliorer les équations de Bogue n'ont pas pu donner jusqu'à présent des résultats décisifs.

En fait, ces formules ne sont qu'approximatives car il faut tenir compte de la réactivité des matières premières liées à leur division, leur homogénéité, leur structure, de l'état du clinker qui n'est jamais totalement cristallisé et dans lequel les impuretés, fort nombreuses, peuvent jouer un rôle important sur la formation des diverses phases.

Le clinker se compose essentiellement des 4 phases cristallines principales (Figure I.17) indiquées au tableau I.5 ci-dessous.

Ces phases représentent environ 95% de la masse du clinker et sont constituées par les quatre oxydes CaO , SiO_2 , Al_2O_3 et Fe_2O_3 [17].



Figure I.17 : Vue microscopique d'une lame mince de clinker

Tableau I.7 : Différentes phases du clinker [17].

Minéraux purs	Formules	Abréviation	Minéral présent dans le clinker	% dans le clinker
Silicate tricalcique	3CaO SiO_2	C_3S	Alite	45-65
Silicate bicalcique	2CaO SiO_2	C_2S	Bleite	10-30
Aluminate tricalcique	$3\text{CaO Al}_2\text{O}_3$	C_3A	Aluminate	5-15
Ferrite d'aluminium	$4\text{CaO Al}_2\text{O}_3 \text{Fe}_3\text{O}_4$	C_4AF	Alumino-Ferrite	5-15

Les composants secondaires du clinker sont les oxydes MgO , SO_3 (sous forme d'ion SO_4), K_2O , Na_2O , Cl^- , P_2O_5 et TiO_2 .

Les abréviations C_3S , C_2S , C_3A et C_4AF correspondent réellement à des phases pures qui n'existent pas dans le clinker industriel.

Chacune des combinaisons citées forme des solutions solides avec d'autres oxydes.

I.17 Broyage du clinker et production du ciment

Le clinker est un semi-produit, impropre à la vente, il doit être transformé en ciment. Le ciment est obtenu par broyage des granulés de clinker, avec addition d'un faible pourcentage de gypse (4 –5%) comme régulateur de prise et éventuellement un ou deux constituants secondaires.

Les opérations dites de broyage du ciment ont pour but d'accroître la réactivité du clinker, par augmentation de sa surface spécifique et par création de défauts de cristaux en surface de grains.

Ce traitement développe les propriétés hydrauliques du ciment et lui confère ses propriétés rhéologiques. Le broyage du clinker est généralement réalisé en circuit fermé (Figure I.18).

Le refus des particules grossières quittant le séparateur est recyclé en amont du circuit de broyage afin de subir à nouveau la fragmentation dans le broyeur à boulets.

Afin d'éviter le sur broyage des particules, le broyeur est traversé par un courant d'air dont le rôle est d'emporter les fines particules au fur et à mesure de leur formation.

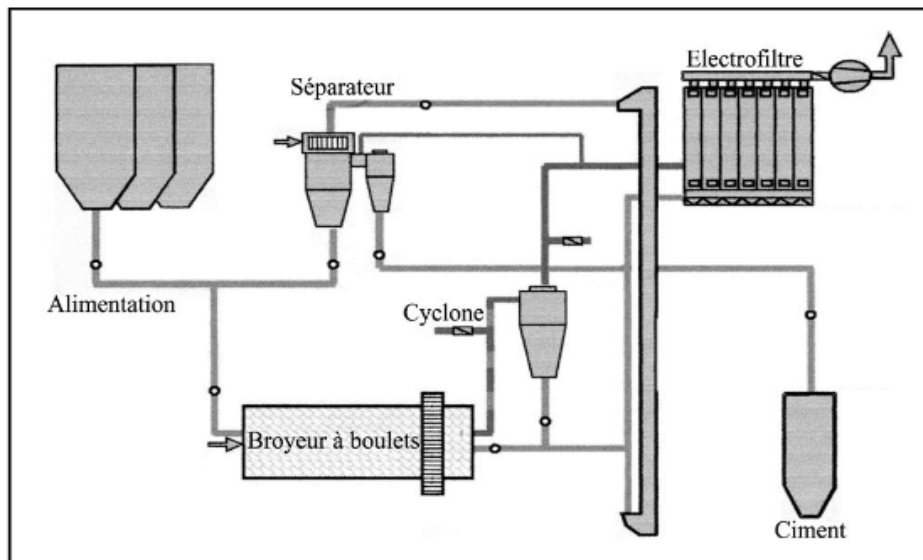


Figure I.18 : Circuit fermé de broyage du clinker [18]

I.18 Co-broyage du clinker

La broyabilité d'un mélange de clinker avec des ajouts minéraux est généralement meilleure que celle du clinker broyé seul.

Par exemple, le mélange de clinker avec du laitier de haut fourneau a une meilleure broyabilité que le clinker seul, ce qui est lié à l'effet abrasif des grains de laitier sur les grains de clinker, qui conduit à la production d'une grande fraction de grains très fins.

Les classes de particules les plus grosses sont d'ailleurs les plus efficaces pour augmenter la production de fines particules du clinker co-broyé avec du laitier. Par conséquent, la broyabilité d'un mélange de matières minérales n'est pas simplement obtenue par la moyenne des broyabilités de chaque.

En fait, le type d'interaction entre les différentes natures de particules dans le broyeur a un rôle majeur dans la modification de la broyabilité globale du mélange.

Ainsi dans des conditions favorables, le Co-broyage de clinker avec des ajouts minéraux pour fabriquer les différents types de ciments, participe à l'amélioration du rendement énergétique du broyage.

En se basant sur le broyage d'un lot de clinker hétérogène, Sohoni et al. [24] ont montré que le broyage du clinker, avec l'addition de 4,3% de gypse, est très favorable par rapport au broyage du clinker seul.

En effet, après 6 heures de broyage, l'addition du gypse fait augmenter la surface spécifique Blaine de 22% par rapport au clinker seul, pour atteindre la valeur de $594 \text{ m}^2/\text{kg}$ [19].



Figure I.19 : Photographie numérique montrant l'atelier du broyage de ciment

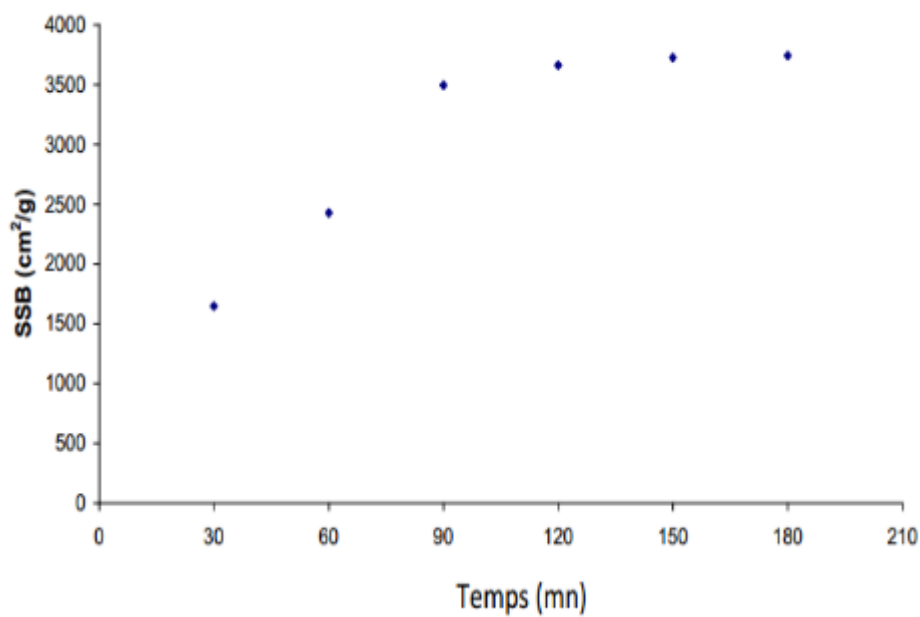


Figure I.20 : Evolution de la finesse Blaine de ciment CEMI en fonction du temps de broyage.

I.19 Rôle de la granulométrie de l'ajout

Les ajouts cimentaires finement broyés comblent les interstices granulaires inaccessibles aux grains de ciment et rendent le mélange plus fluide ce qui permet de diminuer la quantité de l'eau.

Le rôle propre du super plastifiant est essentiellement la défloculation (grâce à sa propriété dispersante), ce qui engendre des grappes ultrafines qui se forment lors du gâchage et leur permet ainsi de jouer leur rôle granulaire [21].

I.20 Désignations et classification des adjuvants

Les adjuvants sont désignés dans l'ordre par la mention de la fonction principale, la ou les fonctions secondaires et l'indication de la norme si l'adjuvant bénéficie du droit d'usage [22].

I.21 Finesse du ciment

La finesse du ciment lors du broyage du clinker est exprimée en termes de surface spécifique (cm^2/g), mesurée par le test de Blaine, et parfois par la courbe granulométrique.

La surface spécifique Blaine est la surface totale des grains contenus dans l'unité de masse de l'ensemble des particules.

Pour le ciment portland ordinaire, la surface spécifique Blaine est de l'ordre de $3000 \text{ cm}^2/\text{g}$ [23].

Dans l'industrie du ciment, cette valeur reste une condition de première satisfaction dans la préparation du béton.

Plus les particules du ciment seront fines, plus la surface mouillable sera grande et plus les performances du ciment seront élevées.



Figure I.21 : Photographie numérique montrant l'atelier des expéditions

II.1 Introduction

Ce chapitre décrit les caractéristiques des matériaux utilisés lors de l'étude ainsi que le plan expérimental adopté pour la réalisation des différents essais expérimentaux.

Le broyage est utilisé pour produire la finesse désirée des ciments étudiés. Les différentes techniques de caractérisation des matériaux sont l'analyse granulométrique par diffraction laser, analyse par microscopie électronique à balayage et la mesure de la surface spécifique Blaine.

Enfin, les processus d'hydratation et de durcissement de ces ciments sont suivis par microcalorimétrie différentielle à balayage (DSC) pour pouvoir identifier le comportement et les propriétés physiques de ces liants hydrauliques.

II .2 Matériaux utilisés

Les différents matériaux de base utilisés sont le clinker, le gypse et le schiste

Méthodologie expérimentale

Calcination du schiste

La méthode consiste à effectuer les opérations suivantes :

- Mise de la poudre de schiste dans le four à une température allant jusqu'à 1000 °C pendant 2h
- Séchage du gypse à une température de 45 °C pendant 1h



Figure II.1 : le schiste avant calcination



Figure II.2 : le schiste après calcination



Figure II.3 : Photographies numériques montrant le four de calcination.

II .3.2 La perte au feu de schiste

$$\boxed{PAF\% = \frac{m_0 - m_f}{m_0} \times 100} \quad \text{Eq 2.1}$$

m_0 : représente la masse initiale

m_f : la masse finale

II.3.3 Concassage du clinker

Le clinker sortant du refroidisseur à 100 °C est soumis à un concassage afin de faciliter le processus de broyage .

II.3.4 Broyage (broyeur à boulet) :

Une fois le processus de séchage est terminé, les trois composants(clinker + gypse + schiste) ; sont mélangés ensemble dans la préparation du ciment le processus de préparation consiste à :

- mélanger 95% clinker et 5% gypse à l'intérieur du grilloir pendant 4h. Des prélèvements d'échantillons sont effectués toutes les demie- heures afin de connaître le temps nécessaire du broyage.

- mélanger 90% clinker avec 5% gypse et 5% schiste. Dans chaque échantillon , le pourcentage de clinker à atteindre et réduit de 5% à chaque étape jusqu'à atteindre 65% et le pourcentage de schiste est augmente de 5% jusqu'à 30%



Figure II. 4 : Photographie numérique montrant le Broyeur à boulet .

II .4 Détermination de la surface spécifique de Blaine

Comme le montre la Figure II.5 ci-dessous, ce procédé décrit le mode de détermination de la Surface Spécifique de Blaine grâce à l'appareil « BLAINE » .

La surface spécifique de Blaine est déterminée en effectuant les opérations suivantes :

- Introduction du liant dans la cellule en utilisant un entonnoir.
- Secouer la cellule pour niveler la couche supérieure du liant
- Tasser avec précaution au moyen du piston afin d'éviter la remontée de la poudre au-dessus du papier filtre jusqu'à ce que le collier vienne buter contre le haut de la cellule
- Retirer le piston lentement
- Vérifier le niveau du liquide du manomètre qui doit affleurer au trait inférieur
- Aspirer l'air lentement au moyen de la poire du tube jusqu'à ce que le niveau du liquide atteigne le trait .
- Fermer le robinet.
- Mettre en marche un chronomètre sensible au cinquième de seconde quand le niveau du liquide atteint le deuxième trait



Figure II.5 : Photographie numérique montrant l'appareil Blaine

II.5 Mesure des refus par tamisage ALPINE :

Ce mode opératoire a pour but de décrire la démarche à suivre pour déterminer les refus par tamisage ALPINE .

II .5.1 Mode opératoire :

m_2 et m_1 :

une masse $m_1 = 25 \pm 0,5$ g du produit à tamiser tamisée pendant 3 min (2000Pa)

la fin de d'opération , enlever délicatement à l'aide d'on pinceau tout le matériau fian adhérait

la quantité de refus obtenue après le tamisage , est pesse (m_2).

II.5.2 Expression des résultats :

Le pourcentage de refus est calculée

$$\% \text{Refus} = (m_2 / m_1) * 100$$



Figure II.6 : Photographies numériques montrant l'appareil refus par tamisage ALPINE

II.6 Détermination de la chaux libre par acidimétrie. :

Peser 1 ± 0.1 g de l'échantillon séché à $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ d'après Introduire la quantité pesée dans un Erlenmeyer de 250 mL et mettre en place dans cet Erlen 50 ml d'éthylène glycol (99%, Sigma Aldrich) et agiter fortement et mettre dans bain marie pour chauffage à une température de $80\text{ }^{\circ}\text{C}$. puis on filtre jusqu'à filtration et étalonner le filtrat avec une solution de HCl 0. 1 N ((acide Chlorhydrique 36%, Biochem) en présence du bleu de Bromothymol (Biochem).

$$\% \text{ CaO (I)} = F. V (\text{HCl})$$

F : facteur de solution (F=0,272)

II.7 Préparation des éprouvettes 4x4x16 cm³

Ce mode opératoire a pour but de décrire les étapes à suivre pour préparer les éprouvettes 4x4x16 cm³.

II.7.1 Pesée des constituants :

Le mortier normal se compose d'une partie du liant à essayer, de trois parties de sable normal et d'une demi - partie d'eau (règle E/C = 0.5). Les constituants sont pesés avec une précision de 0.5%.

Dans le cas de préparation de trois éprouvettes 4*4*16 les quantités sont respectivement les suivantes :

Composition de mortier

Sable	Ciment	L'eau
450 ±2 grammes	450 ±2 grammes	225± 1 ml

II.7.2 Malaxage :

Le malaxeur étant en position de fonctionnement verser l'eau dans le récipient mettre le malaxeur en marche à la vitesse lente pendant une minute (1min), dans le ajouter le sable dans le 30 min dernières secondes

Malaxer le sable 2 minutes supplémentaires à la vitesse rapide arrêter le mouvement pendant 90 secondes avec le batteur démonté de son axe racler les parois et le fond du récipient de façon qu'aucune partie du mortier n'échappe au malaxage

Reprendre le malaxage pendant 2 mn à vitesse rapide .



Figure II.8 : Photographies numériques montrant l'appareil de Malaxage.

II.7.3 Moulage :

Les éprouvettes sont moulées au moyen de l'appareil à chocs Le malaxage du mélange – mortier - étant terminé, disposer celui - ci sur une plaque non réactive au liant et non absorbante; former une galette approximativement rectangulaire

- Mettre la machine en marche pour 60 chocs
- Recommencer les mêmes opérations pour la deuxième couche. Après 60 nouveaux chocs le moule et la hausse sur une faible hauteur sont remplis de mortier
- Le moule étant retiré de la machine et débarrassé de sa hausse graser le mortier avec l'arête d'une règle métallique plate maintenue verticale par un mouvement de scie de faible amplitude et perpendiculaire à la longueur des éprouvettes

II.7.4 Conservation des éprouvettes dans l'eau :

Une fois démoulées et marquées et éventuellement pesées, les éprouvettes sont conservées entièrement immergées dans l'eau :

La température de l'eau servant à la conservation des éprouvettes doit être $20\text{ °C} \pm 1\text{ °}$

II.8 Essais d'expansion

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

II.8.1 Vérification initiale des aiguilles le chatelier :

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

II.8.2 Préparation des éprouvettes et mise en place dans le bain définitif :

Nous mettons les moules sur des plaques de verre, les emplir de pâte pure et je fais chacun d'eux d'une autre plaque de verre légèrement lestée, les immerger aussitôt dans l'eau à $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$

Au moins 24 heures après le gâchage et en tout cas dans un délai n'excédant pas 24 heures après l'époque où un échantillon de la même pâte conservé dans la même eau peut supporter sans déformation une pression du pouce, nous faisons les plaques de verre avec précaution et mesurer l'écartement des pointes des aiguilles et placer les moules, verticales dans leur bain définitif.

II.8.3 Essais d'expansion à chaud :

.

- Les moules sont immergés dans l'eau que l'on porte progressivement à l'ébullition en un temps qui doit être compris entre un quart d'heure et une demi-heure.
- Après ébullition, pendant 3 heures consécutives, on mesure de nouveau l'écartement final des pointes des aiguilles sans attendre le refroidissement.
- En cas de liants contenant de la magnésie plus de 3% l'ébullition est prolongée jusqu'à ce qu'on ne constate plus en deux heures aucune augmentation de l'expansion.



Figure II.9 : Photographies numériques montrant l'appareil de chaud

II.8.4 Détermination du temps de prise :

L'essai de prise a pour but de déterminer le temps de prise c'est à dire la durée qui s'écoule entre l'instant où le liant a été mis en contact avec l'eau de gâchage et le début de prise.

II.8.5 Préparation de la pâte normale :

remplir immédiatement le moule tronconique avec la pâte ainsi préparée et aplanir la surface au moyen d'une truelle prenant appui sur le bord du moule, perpendiculaire à la surface et déplacée d'un mouvement de scie de faible amplitude.

Immerger dans l'eau le moule rempli de pâte normale ou le placer dans l'armoire humide.

II.8.6 Vérification de la consistance normale :

L'appareil de Vicat, plateau nu, ayant été muni de la sonde de consistance, le moule rempli de la pâte immédiatement dans l'axe de la sonde, laisser descendre cette dernière perpendiculairement à la surface de la pâte et l'immobiliser à son contact attendre un temps d'arrêt puis abandonner la sonde à elle-même sans vitesse initiale

On lit l'épaisseur de la pâte quand la sonde a cessé de descendre sous son propre poids

II.8.7 Détermination du début de prise :

L'aiguille de Vicat, descendue perpendiculairement à la surface de la pâte et immobilisée pendant un court arrêt quand elle entre en contact avec cette surface est abandonnée à elle-même sans vitesse initiale

L'insertion de l'aiguille doit être surveillée les observations sont renouvelées jusqu'à constatation du début de prise

Les points de mesure doivent être écartés d'au moins 1.5 cm de la paroi du moule et de 2.0 cm entre eux.

II.8.8 Détermination de fin de prise :

Elle correspond au moment où l'aiguille cesse de s'enfoncer et s'arrête à une distance inférieure à 2 mm de la face supérieure du moule tronconique rempli de la pâte normale.



Figure II.10 : Photographies numériques montrant l'appareil de Vicat

II .9 Préparation des échantillons pour analyser par spectromètre de FX

Ce mode opératoire a pour objet de décrire les étapes à suivre pour utiliser le broyeurHERZOG pour préparer les pastilles les perles et pour utiliser le spectromètre de FX.

II .9 .1Utilisation du broyeur HERZOG (Marche automatique)

1

Mettre en place l'échantillon dans le disque de broyage.

Fermer le couvercle du disque de broyage.

choisirons la durée de broyage par les touches numériques (1)

Nous faisons appuyer sur le bouton poussoir démarré (2).



2

II.9.2 Préparation des pastilles :

- Sécher la matière à analysée à $105^{\circ}\text{C} \pm 5$ (si la matière est humide).
- Peser 10 ± 0.1 g de la matière à analysée (broyer à une finesse $< 50\mu\text{m}$).
- Ajouter 0.6 g de cellulose
- choisirons le programme 120 s pour toutes les matières
- Presser la matière avec la capsule à 20T (le temps : 1 min).

II.9.3 Préparation des perles :

- D'abord les échantillons doivent être secs avant de commencer la préparation. de Lafusion dépendant de la granulométrie, celle-ci doit être inférieure à $100\mu\text{m}$

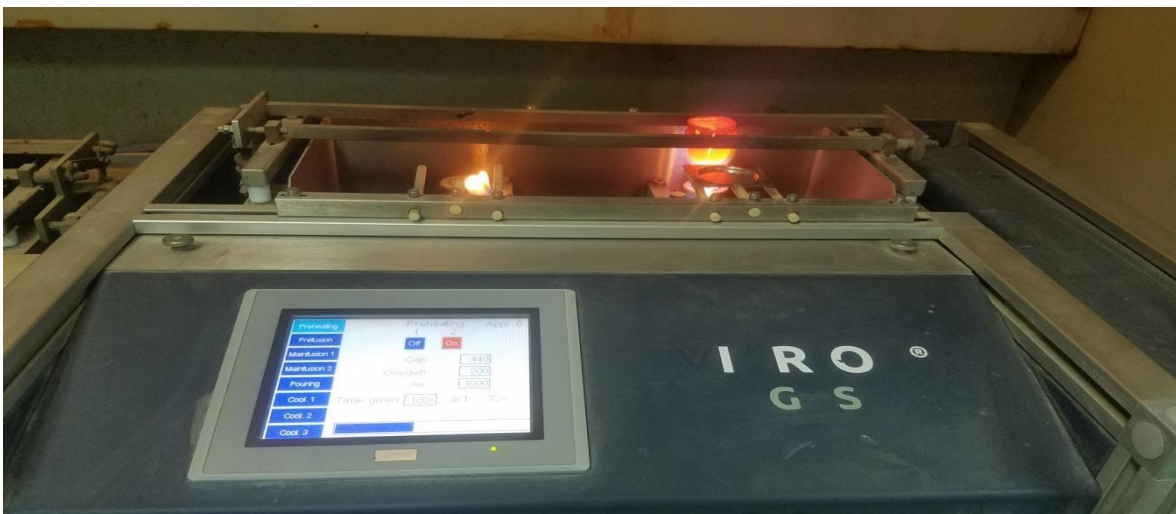


Figure II.11 : Photographies numériques montrant l'appareil de perles



Figure II.12 : Photographies numériques montrant l'appareil de spectromètre de FX

II.10 Détermination de la perte au feu :

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

II.10.1 Mode opératoire :

➤ Peser le creuset préalablement calciné et taré m_1 on ajouté 1 ± 0.05 g de matière après ça peser le creuset et son contenu soit m_2 . et porter le creuset avec le couvercle et le contenu dans un four à moufle à $950^\circ\text{C} \pm 25^\circ\text{C}$ ° pendant 5 minutes en suite ensuite nous invitent le couvercle et le laisser le creuset encore 10 min supplémentaires dans le four après écoulement des 20 min ;sortir le creuset du four nous l'exprimons avec la relation suivante :

$$\% \text{ PF} = (m_2 - m_3) * 100 / (m_2 - m_1)$$

m_1 : masse Creuset

m_2 : masse de creuset + produit

m_3 : masse de creuset +Produit après calcination

Chapitre III :

Résultats et Discussions

III. 1. Surfaces spécifiques des échantillons préparés

Pour l'étude de la finesse des échantillons préparés, nous avons mesuré la finesse en fonction du temps sur l'appareil de Blaine. Les résultats de ces analyses sont présentés sur la figure suivante.

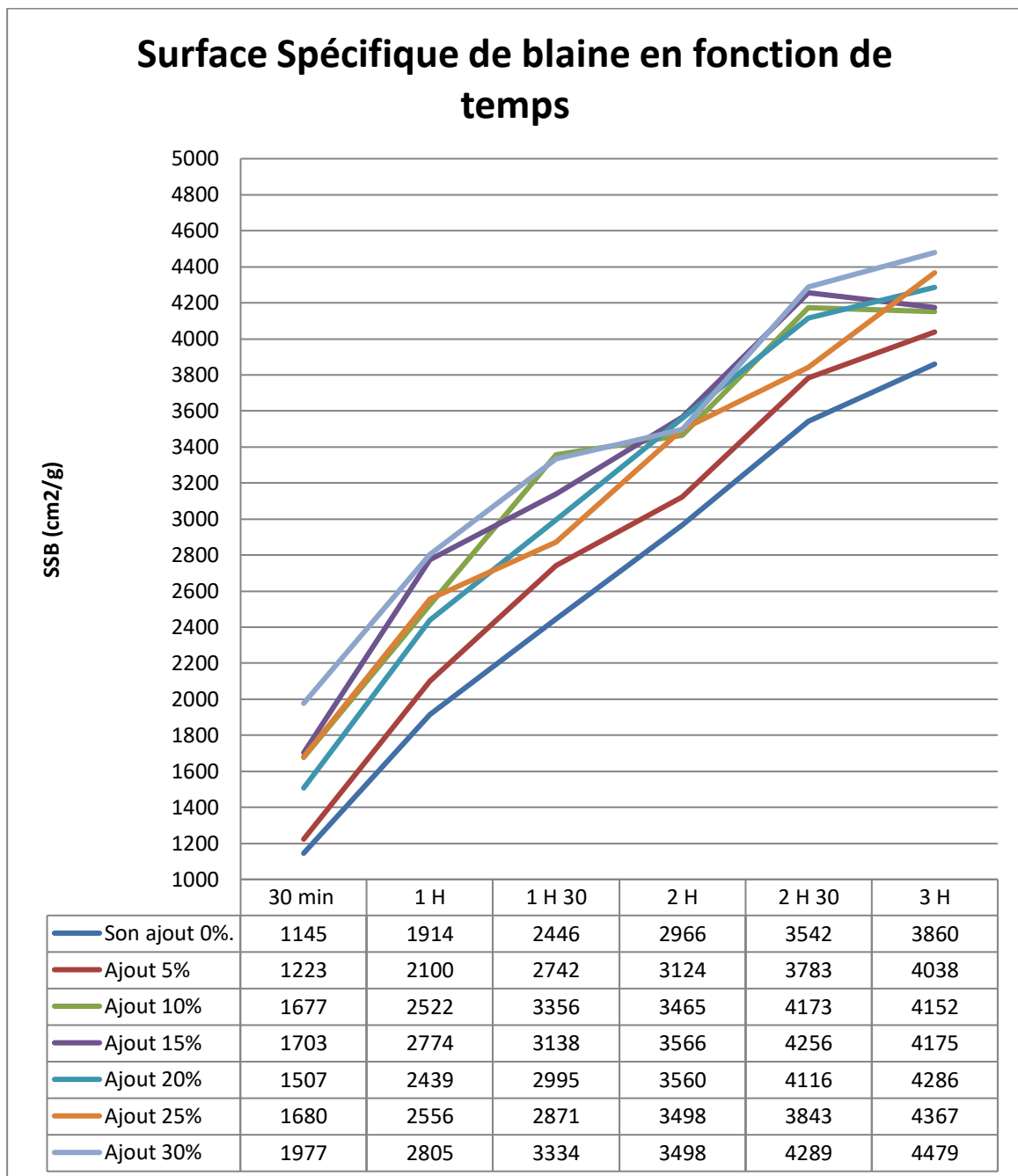


Figure III.1 : Surface spécifique de Blaine en fonction du temps.

Discussion :

Les courbes représentent la variation de la surface spécifique de Blaine en fonction de temps. On observe une augmentation progressive de la valeur de surface spécifique de Blaine et à partir de là, nous concluons qu'il existe une relation positive, plus le rapport de schiste est élevé, plus la valeur de surface spécifique de Blaine est grande. En lisant la courbe, nous déduisons que le temps le plus proche et idéal de la surface de Blaine correspond à trois heures. Ce temps vise à réduire la consommation d'énergie.

III. 2. Effet du pourcentage d'ajout sur le pourcentage de refus

La figure III.2 illustre exprime le pourcentage d'ajout du schiste sur le refus. Les pourcentages sont indiqués sur la figure suivante.

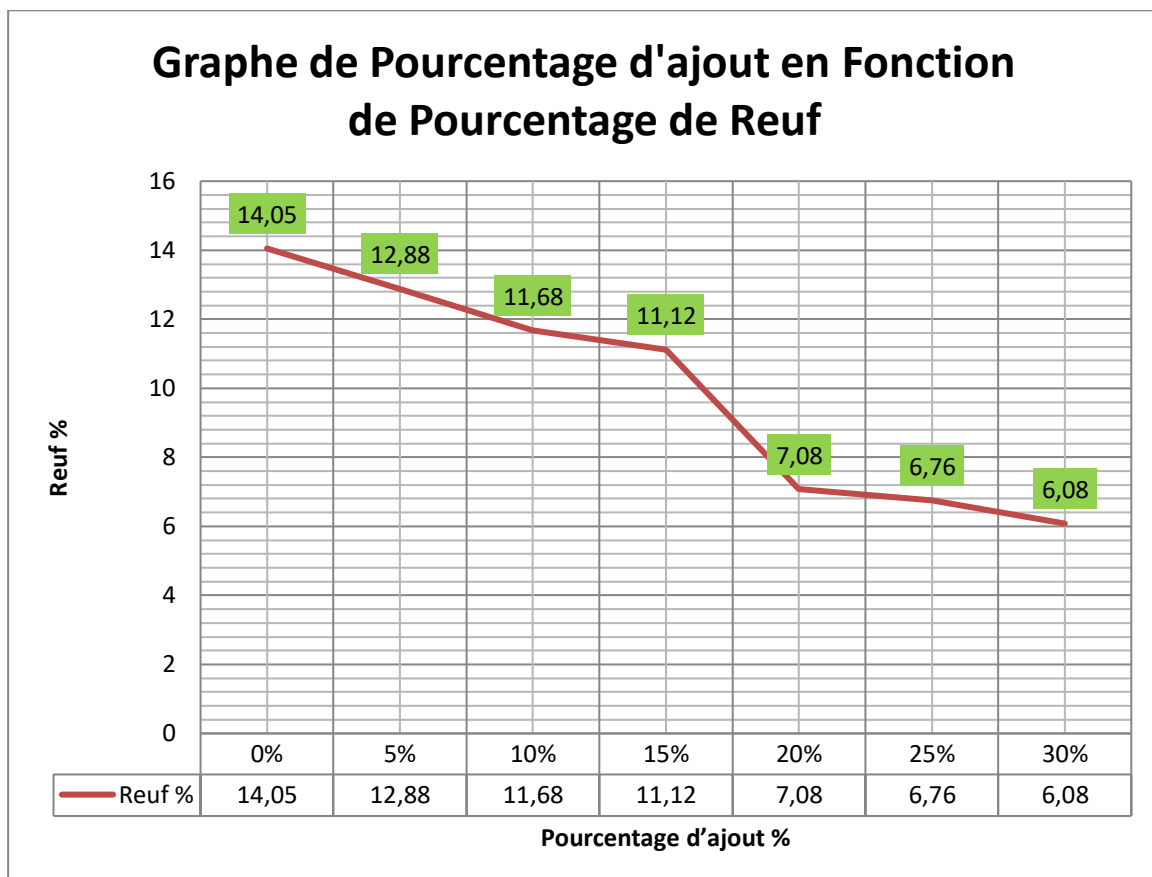


Figure III.2 : pourcentage d'ajout en fonction de pourcentage de refus

Discussion :

A partir des résultats obtenus, il ressort que il ya une diminution du pourcentage de refus avec l'augmentation du pourcentage d'ajout

A travers la tendance du pourcentage de ciment de [20%-30%], nous remarquons une forte diminution du pourcentage de refus, car le pourcentage d'ajout est élevé par rapport aux autres ratios, donc le pourcentage de refus diminue, et à partir de là nous concluons ce qui suit :

Il existe une relation inverse, plus le pourcentage d'ajout est élevé, plus le pourcentage de refus dans le ciment est faible.

III. 3. Composition granulométrique de sable par tamisage

Le sable utilisé dans la préparation des échantillons est tamisé pour étudier sa composition granulométrique.

Tableau III.1 : Composition granulométrique de sable par tamisage.

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

III. 4. Perte au feu

Les échantillons des ciments préparés sont introduits dans le four à 950°C. Les résultats sont présentés sur le tableau suivant.

Tableau III.2 : Calcul de la perte de feu de ciment.

Pourcentage d'ajout %	0%	5%	10%	15%	20%	25%	30%
M1	18,8440	18,8706	18,8600	18,9824	18,5550	18,7931	18,7576
M2	2,0008	2,0000	2,0013	2,0019	2,0014	2,0006	2,0023
M3	20,8143	20,8391	20,8266	20,9508	20,5231	20,7610	20,7258
PAF%	1,5243	1,5750	1,7338	1,6734	1,6638	1,6345	1,7030

La perte de feu de ciment :

$$PAF\% = \frac{M_1+M_2}{M_0} \times 100 \quad \text{Eq. 1.1}$$

Discussions:

On Remarque l'ajout du schiste n'influt pas sur la perte au feu puisque le schiste a été introduit dans la composition après calcinations. Il a donc perdu toute sa matière organique et son humidité. Il est donc stable.

III. 4. Détermination de la chaux libre

Les résultats sur le tableau suivant représentent la détermination de la chaux libre pour les différents échantillons étudiés.

Tableau III.3 : Pourcentage d'ajout (schiste) en fonction le volume d'acide HCL (ml)

Pourcentage d'ajout %	CaO _L	HCl(ml)
0%.	0,60	2,20
5%	0,48	1,78
10%	0,62	2,32
15%	0,46	1,69
20%	0,52	1,90
25%	0,38	1,42
30%	0,35	1,28

Discussions:

Plus la fraction de schiste augmente plus la chaux libre diminue puisque le pourcentage de clinker diminue vu qu'il est responsable de la libération de la chaux.

III.5. Résultats des essais chimiques

Tableau III.4 : Résultats des essais chimiques.

Code-éch	Teneurs %										
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	TiO ₂	PF
IN20 02 956	60,52	20,70	7,04	0,40	0,46	0,01	3,68	0,46	0,15	0,90	5,68

On calcule la perte de feu de schiste :

$$PAF = \frac{M0 - MF}{M0} \times 100$$

M0 : la masse de schiste avant calciné

MF : la masse de schiste après calciné

AN :

$$PAF = \frac{50 - 45,622}{50} \times 100$$

$$PAF = 8,735\%$$

III.6. Résultats des essais minéralogiques

L'analyse par diffraction de rayons X réalisée sur l'échantillon codifié **IN20 02956** consiste à déterminer la nature des constituants minéraux. La composition minéralogique estimative (semi quantitative) a été évaluée sur la base des résultats chimiques et elle Tableaux III.5 sur le tableau suivant :

Tableau III.5 : Résultats des essais minéralogiques

Minéraux présents	Composition minéralogique en (%)
Quartz	32
Muscovite	26
Kaolinite	26
Orthoclase	05
Albite	04
Oxyde de fer	07

Tableau III.6 : La composition chimique de clinker

composé	Valeur %
SiO ₂	21,82
Al ₂ O ₃	5,28
Fe ₂ O ₃	3,56
CaO	66,97
MgO	0,75
SO ₃	0,28
K ₂ O	0,53
Na ₂ O	0,26
LSF	96,18
Silica Ratio	2,47
Aluminium Aqt	1,49
C3S	65,46
C2S	13,14
C3A	7,98
C4AF	10,82
Liquide phase	25,39
M, SO ₃	0,36

Tableau III.7 : la composition chimique de gypse

Composé	%
SiO ₂	3,852
Al ₂ O ₃	1,177
Fe ₂ O ₃	0,612
CaO	29,163
MgO	3,862
SO ₃	34,510
K ₂ O	0,203
Na ₂ O	0,052
Total	73,430

Tableau III.8 : la composition minéralogique de clinker

Composé	C3S	C2S	C3A	C4AF
Conc %	63,94	14,34	7,98	10,82

Chaux libre de clinker : CaO_L = 0,35 %

Tableau III.9 : Ciment conformité évaluation

Dates	Type	% d'ajout	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO
02/06/2021	CEM I / 42,5	0	20,45	4,8	3,72	64,12	1,32
25/05/2021	CEM II / A 42,5 N	5	22,19	5,51	3,95	61,41	1,14
25/05/2021	CEM II / A 42,5 N	10	25,69	6,55	3,98	55,79	0,99
25/05/2021	CEM II / A 42,5 N	15	27,97	7,61	4,21	53,26	1,09
24/05/2021	CEM II / A 42,5 N	20	31,12	8,92	4,31	50,09	1,21
24/05/2021	CEM II / B 42,5 N	25	33,24	9,42	4,54	47,05	0,98
24/05/2021	CEM II / B 32,5 N	30	39,03	10,16	4,72	44,41	0,78

SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	R45 mm	SSB	D.P	F.P	Consistance	2 jours	28 jours
1,93	0,74	0,35	14,05	3860	156	166	7,00	22,9	57,9
1,77	0,99	0,33	12,88	4038	185	233	5,00	19,2	53,25
1,93	1,2	0,17	11,68	4152	189	238	5,40	19,1	51,50
1,97	1,44	0,16	11,12	4175	193	241	6,00	16,7	50,35
1,88	1,63	0,20	7,08	4286	196	245	4,00	15,6	45,6
1,86	1,86	0,19	6,76	4367	197	257	3,00	13,8	44,0
1,78	2,1	0,22	6,08	4479	220	271	3,50	12,6	39,0

III.7. Résultats des essais mécaniques

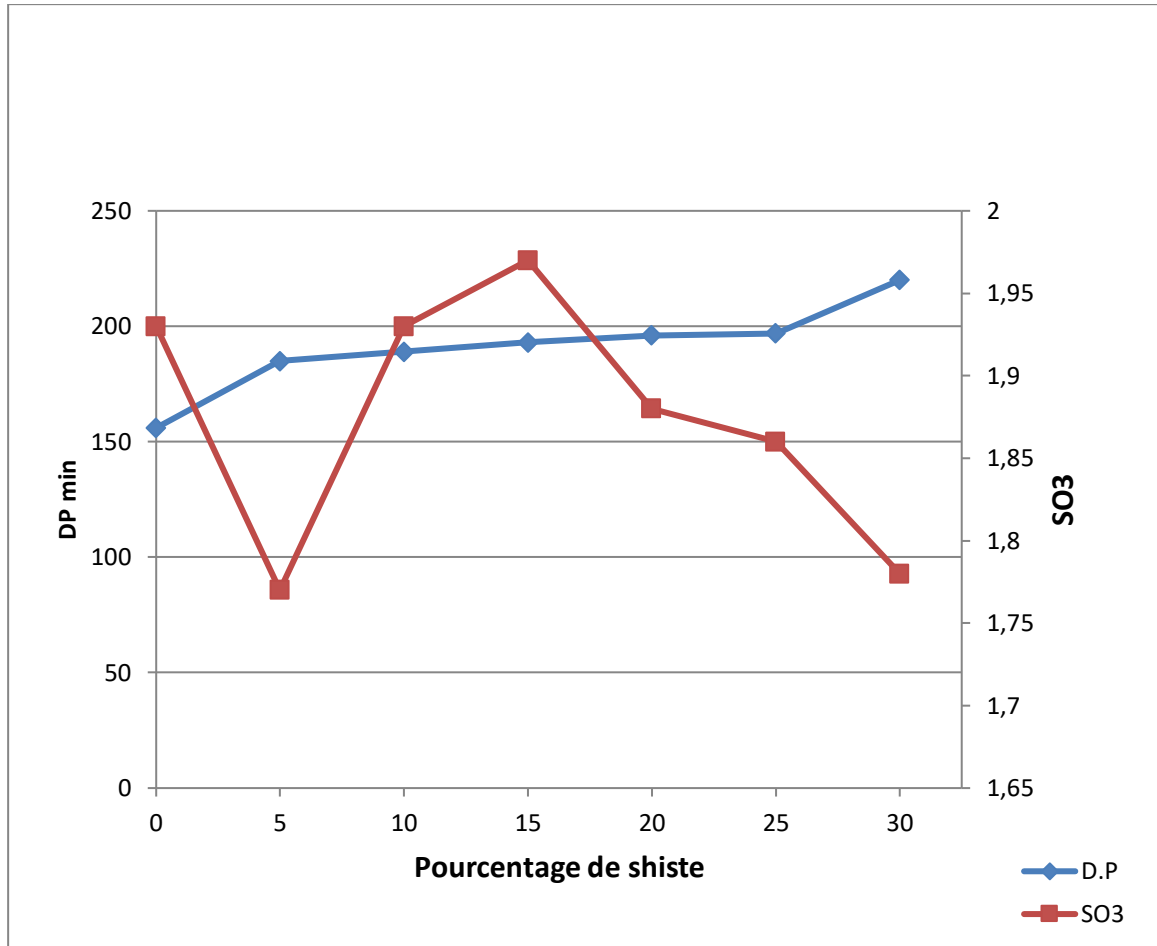


Figure III.3 : Variation le temps de début de prise et pourcentage de SO₃ en fonction pourcentage de schiste

La courbe représente des graphiques de variation le temps de début de prise et pourcentage de SO₃ en fonction de pourcentage de schiste a travers les courbes, nous observons une diminution progressive des deux D.P et SO₃ d'autre part, une augmentation du pourcentage de schiste cela est dû à composition chimique de schiste (20,70 %) de Al₂O₃ par conséquent, nous concluons que plus le pourcentage SO₃ augmente, le D.P diminue et vis versa

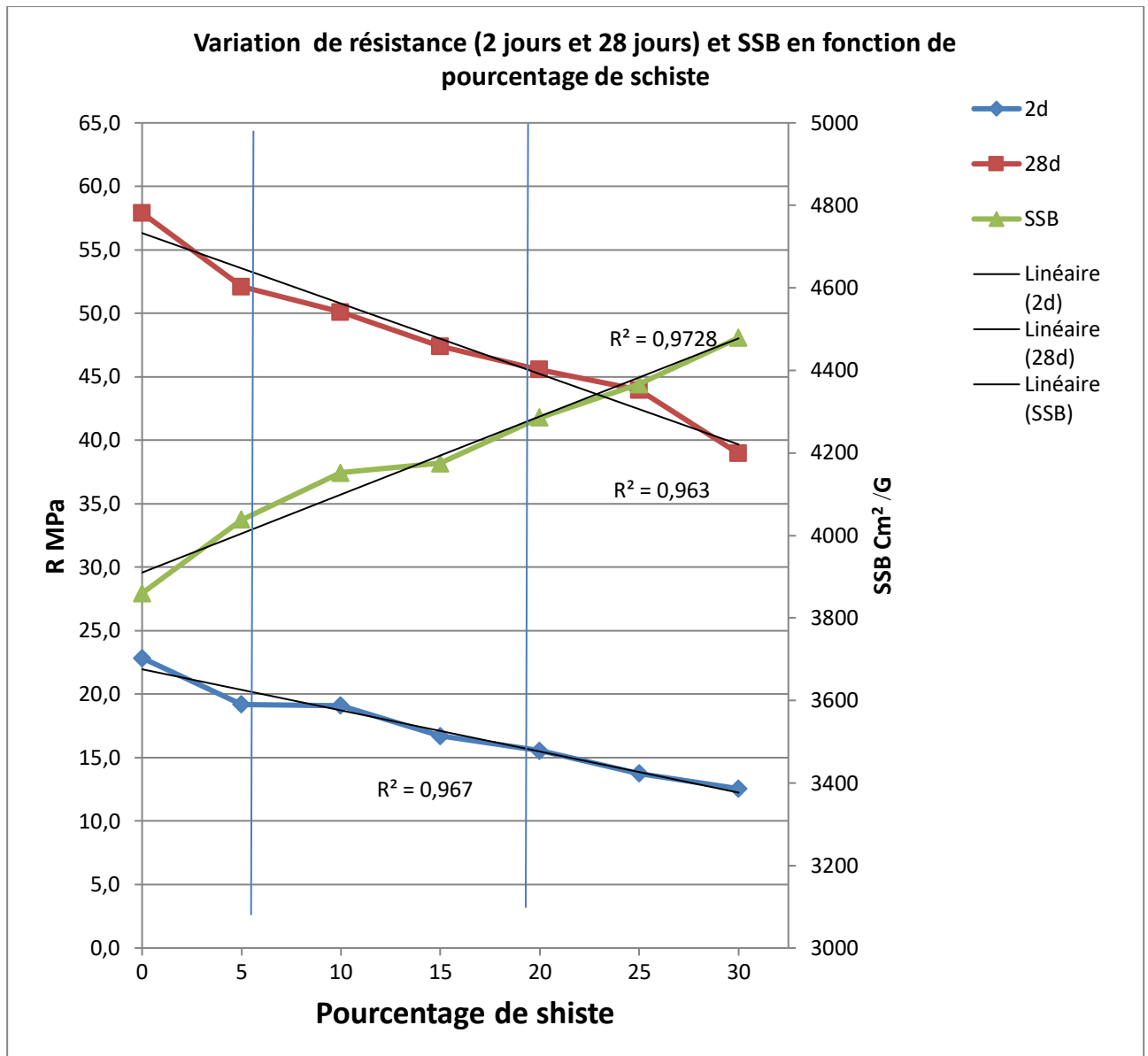


Figure III.4 : Variation de résistance (2 jours et 28 jours) et SSB en fonction de pourcentage de schiste

La courbe représente les variations de résistance (2 jours et 28 jours) et SSB en fonction de pourcentage de schiste.

À 2 jours :

Le mortier sans ajout (0%) présente la valeur maximale de la résistance (22,85 MPA) ce mortier constitue notre repère. La valeur de la résistance diminue avec l'augmentation du pourcentage de schiste.

De [6% - 20%] classe A on remarque une diminution progressive de la valeur de résistance, accompagnée d'une augmentation du pourcentage de schiste, et par conséquent, une augmentation de SSB.

De [21% - 35%] classe B on remarque une augmentation de la valeur du SSB suivi par une diminution de la valeur de la résistance

À 28 jours :

On constate la même tendance pour la résistance à 28 jours et qui reste toujours dans la norme 32,5 à 52,5 MPa (NA 442-2013) sauf pour le mortier de 30% de schiste qui présente des valeurs inférieures à la norme.

On remarque aussi que l'ajout du schiste ne modifie pas d'une façon importante la résistance. Cette ajout s'il est confirmé par d'autres essais et d'autres analyses complémentaires, réduira la quantité de clinker dans le ciment et par conséquent son coût de production. Sachant que qu'on peut aller selon cette étude jusqu'à 25% de la charge de schiste, nous avons estimé un gain de 112 da par tonne sur le clinker et un gain de 60 da sur la production du ciment par tonne.

A travers ces courbes, on remarque la présence de la même tendance dans les résultats, et cela indique l'activité du schiste.

Et à partir de là, nous concluons qu'il existe une relation directe, plus la valeur de SSB est grande, plus la valeur de la résistance est grande.

Et à partir de là, nous concluons qu'il existe une relation inverse, à mesure que le pourcentage de schiste augmente, la valeur de la résistance diminue

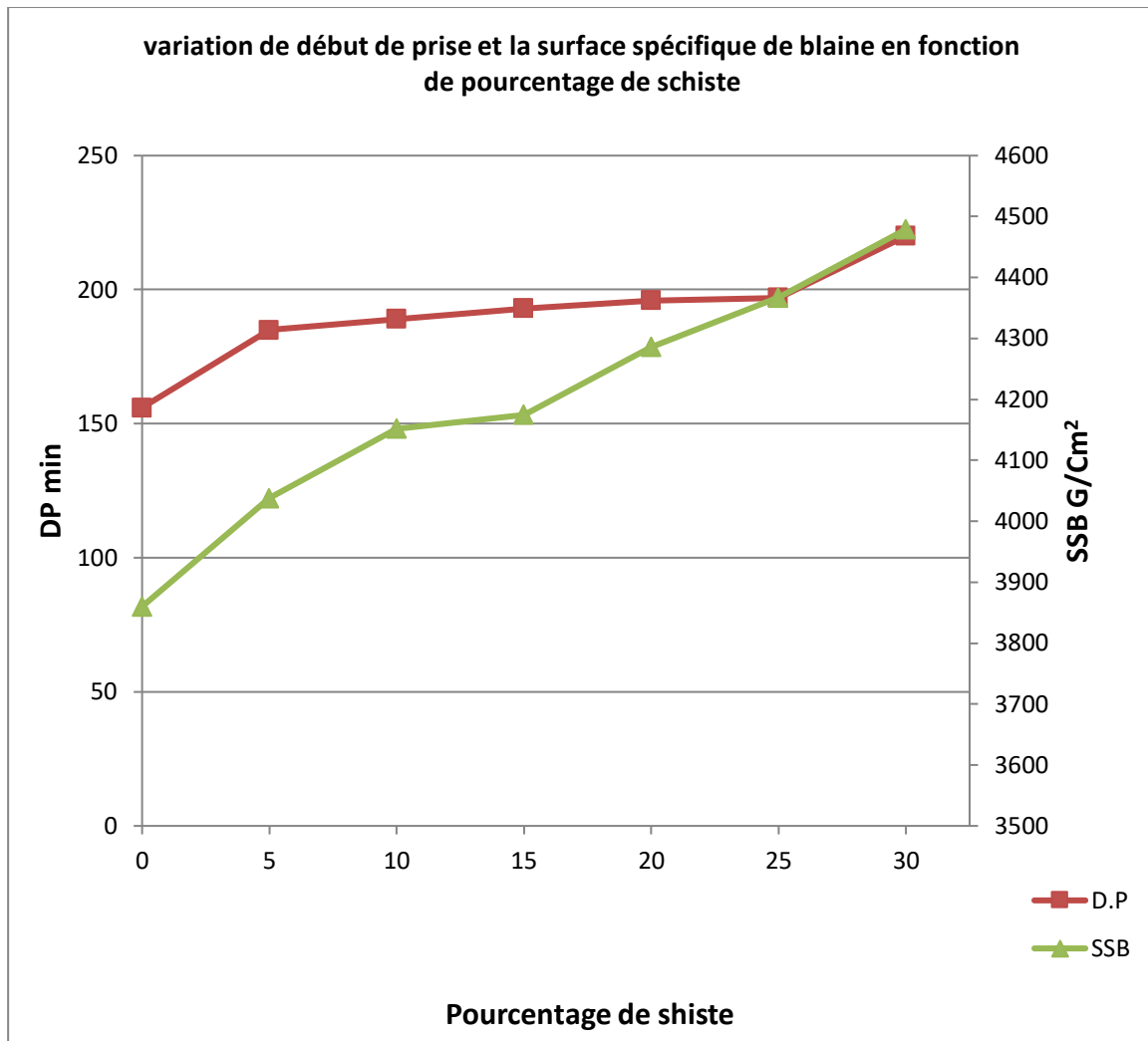


Figure III.5 : variation de début de prise et la surface spécifique de Blaine en fonction de pourcentage de schiste

La courbe représente la variation de début de prise et la surface spécifique de Blaine en fonction de pourcentage de schiste a travers notre lecture de la courbe, on remarque une corrélation entre (D.P et SSB et pourcentage de schiste) par conséquent, nous concluons qu'il existe une relation directe, plus le pourcentage de schiste augmente la valeur de SSB augmente, ainsi que le début de prise.

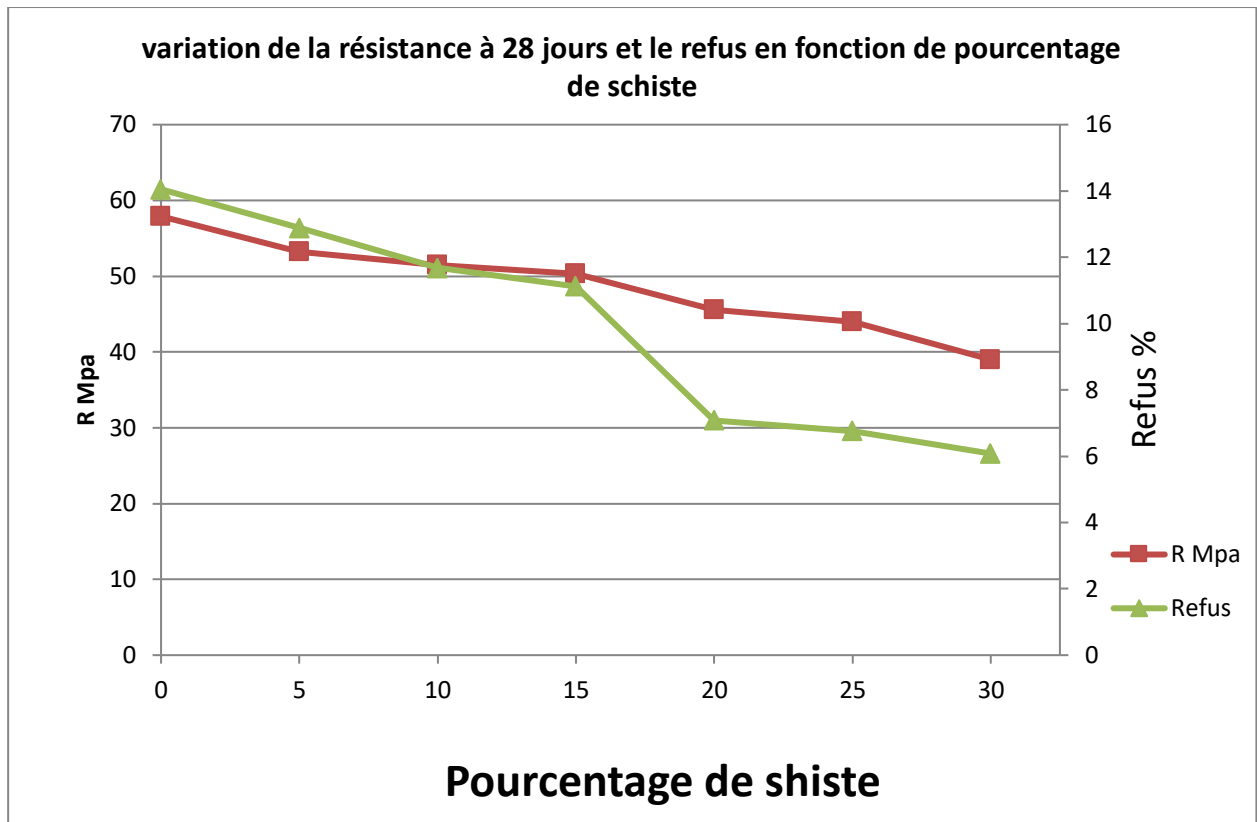


Figure III.6 : variation de résistance à 28 jours et le refus en fonction de pourcentage de schiste

Cette courbe représente la variation de la résistance à 28 jours et le refus en fonction de pourcentage de schiste. on remarque une diminution progressive de la valeur de résistance et pourcentage de refus, et en retour, une augmentation du pourcentage de schiste et à partir de là, nous concluons des résultats obtenus qu'il existe une relation de corrélation chaque fois que le pourcentage de schiste augmente plus le pourcentage de refus est faible, plus la teneur en eau est élevée, et donc la diminution de la valeur de résistance.

Conclusion Générale

L'industrie du ciment est importante pour le développement économique et social, car c'est un indicateur important de la croissance dans la plupart des économies industrielles émergentes.

La demande des consommateurs pour le ciment en termes de quantité et de qualité, ce qui nous amène à accorder une grande importance aux sources de matières premières qui constituent la ressource naturelle et de base de ce matériau et trouver des sources pour réduire les émissions de carbone dans l'environnement et réduire les coûts de production

La visite à la cimenterie de Meftah a été une excellente opportunité pour apprendre des étapes de la production de ciment

L'utilisation de données bibliographiques nous a permis d'identifier les différentes étapes du processus de broyage afin d'obtenir un meilleur temps de broyage (moins de consommation d'énergie) et exprimé dans les limites de 3h

Nous avons essayé de prendre en compte la température et l'humidité qui peuvent affecter l'efficacité de la résistance

Une modification du pourcentage de schiste entraîne une modification de la valeur de résistance et du pourcentage de refus et début de prise et pourcentage de SO_3 et en SSB Ceci est dû à une carence C_3S et à la composition chimique du schiste

Nos attentes ont donné des résultats acceptables, ce qui nous permet de dire que le schiste est un ajouts actif et rentable dans la production, offrant des alternatives et des solutions futures pour les projets de construction.

ANNEXE

I.26 Différents types de ciments

En fonction de leur composition et selon les normes NF P 15-301 et ENV 197-1, les ciments sont regroupés en cinq types principaux.

Ils sont notés CEM et numérotés de 1 à 5 en chiffres romains dans leur notation européenne (la notation française est indiquée entre parenthèse).

CEM I: Ciment , Portland (CPA);

CEM II: Ciment Portland composé (CPJ)

CEM III : Ciment de haut fourneau (CHF)

CEM IV : Ciment pouzzolanique (CPZ)

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

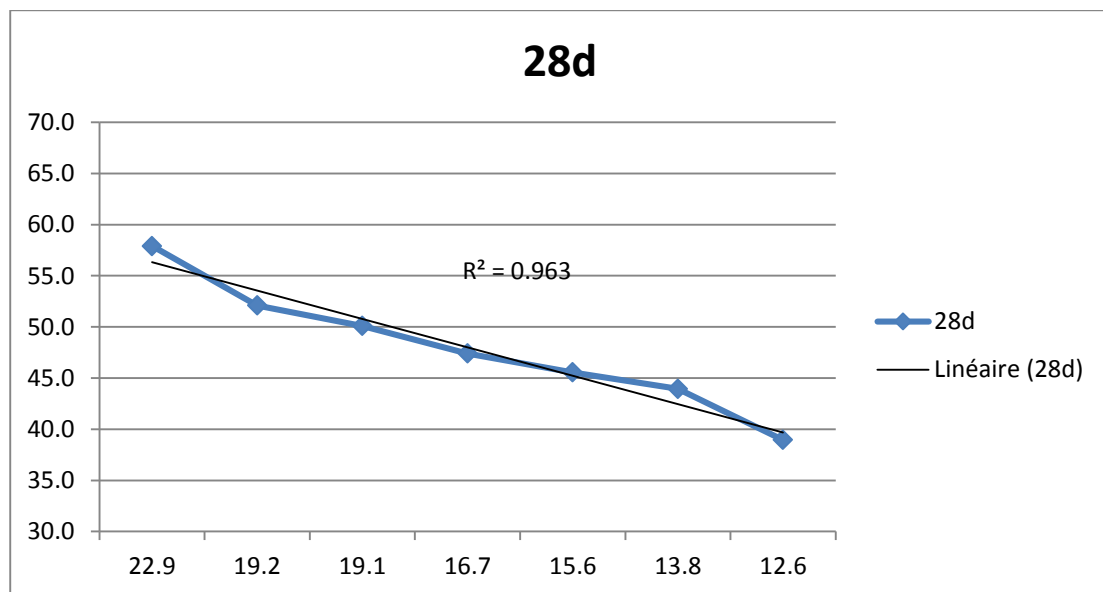


Figure III.7 : La tolérance entre la résistance 2 jours et 28 jours

R45 mm	SSB	D.P	D.F	Consistance	2d	28d
R45 mm						1

SSB	-0,851	1			
D.P	-0,648	0,854	1		
D.F	-0,748	0,895	0,951	1	
Consistance	0,923	-	-	-	1
2d	0,880	0,884	0,797	0,863	0,885
28d	0,832	0,982	0,828	0,888	0,985
		-	-	-	0,844
		0,991	0,866	0,894	

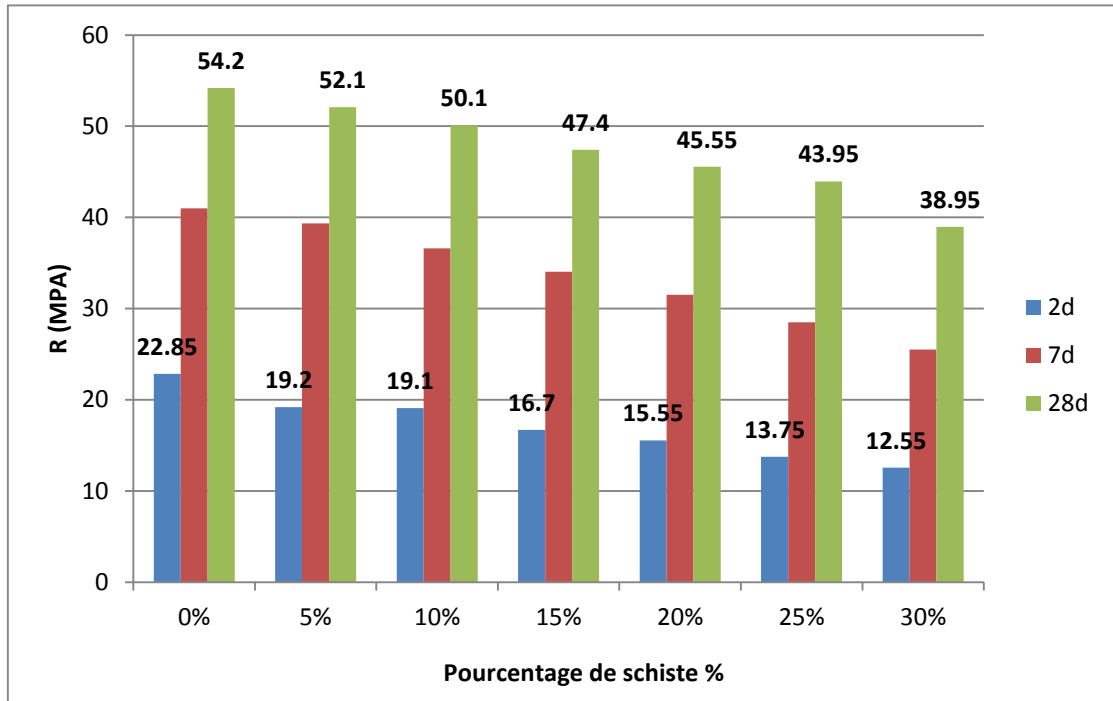


Figure III.8 : variation de pourcentage de schiste en fonction de la résistance

Références bibliographiques

- [1] Mm. Vénuat, "LA PRATIQUE DES CIMENTS ET DES BETONS," 1 vol. (220 p.) ,1976,
- [3] Seidel G., Huckauf H., Jochen S., Technologie des ciments, chaux, plâtre: Processus et installations de cuisson, Septima, PDF Paris (1980) .
- [4] D. Touil, Modélisation des dégradations d'énergie dans l'industrie du ciment, Thèse de doctorat d'Etat, USTHB, Février 2006 .
- [5] G. Dreux and J. Festa, Nouveau guide du béton et de ses constituants. Ed. Eyrolles, 1995.
- [7] L. Pliskin and G. Berard-Bergery, La Fabrication du ciment: ciments français. Ed. Eyrolles, 1993.
- [9] Seidel G., Huckauf H., Jochen S., Technologie des ciments, chaux, plâtre: Processus et installations de cuisson, Septima, Paris (1980)
- [10] N. Guillaume and J. Mondestin, "Technique de construction ", PDF,2003/2004
- [11] Papadakis M et Venuat M., Industrie de la chaux du ciment et du plâtre, Ed. Dunod, Paris (1970).
- [12] Pillard J-P., Le diagnostic énergétique d'une cimenterie, Fiche technique Prisme n° 1, Institut de l'énergie et de l'environnement de la francophonie-IEPF (2003) 1-8.
- [13] R. Chaid, R. Jauberthie, and A. Boukhaled, "Effet de l'ajout calcaire sur la durabilité des bétons," Lebanese Science Journal, vol. 11, no. 01, pp. 91-103, 2010 2010
- [15] Pliskin L., la fabrication du ciment, ciment français, Edition Eyrolles, Paris (1993)
- [16] J. ABDO, "Ciments," Techniques de l'ingénieur. Construction, no. C920, 2008
- [17] H.F.W Taylor, The chemistry of Cements, Academic Press, London, (1983)
- [18] Bentaieb, N. Analyse des Cinétiques de broyage et d'hydratation des ciments composés, These de Doctorat, USTHB, Janvier 2014
- [19] Elodie Romilliat , étude des modes d'agent de mouture sur le broyage du clinker, Mines de Saint-Etienne, 2006
- [21] K. ARROUDJ, "Influence des Ajouts sur la Prise et le Durcissement des Bétons Magister " Magister USTHB, Nov. 2001
- [22] Phillip. A Alsop: Plant Operations Hand Book for dry Process Plant, Third Edition, 2001, Trad Ship Publications Ltd.

Références Bibliographiques

[23] Austin L.G., Luckie P.T., Seebach H.M.V., Optimization of cement Milling circuit with respect to particle size distribution and strength development, by simulation models, Dechema. Monograph. Zerkleinern, 79, (1976 b) 519-537.

[24] Elodie Romilliat, étude des modes d'agent de mouture sur le broyage du clinker, Mines de Saint-Etienne, 2006