



جامعة محمد بوضياف - المسيلة
Université Mohamed Boudiaf - M'sila

Ministère de l'Enseignement Supérieur
et de la Recherche Scientifique

Université Mohamed Boudiaf - M'sila

Faculté de Technologie



جامعة محمد بوضياف - المسيلة
Université Mohamed Boudiaf - M'sila

Département de GENIE CIVIL

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de
MASTER

FILIERE : Génie Civil

SPECIALITE : Matériaux

THEME

*Effet de l'association laitier-calcaire sur
les caractéristiques physico-chimiques et
mécaniques de ciments*

Dirigé par :

Pr. BEDDAR Miloud

Dr. MEDDAH Abdelaziz

Présenté par :

DAHMANI Salah

Promotion: 2015/2016.

DEDICACES

Je dédie ce modeste travail :

A mon père, et ma mère

A mes frères et sœurs :Mohamed et Omar.

A mes tantes et oncles

A ma famille

A mes très chers amis

A tout qui se donne à fond à la recherche scientifique

Et enfin à toute la promotion 2015/2016

Master Matériaux

DAHMANI SALAH

REMERCIEMENT

Au mon dieu le Clément et Miséricordieux

Je remercie avant tout mon dieu C'est grâce à lui seul que j'ai pu achevé ce modeste travail.

Je remercie ainsi : Pr. BEDDAR Miloud et Dr. MEDDAH Abdelaziz.

Je remercie : Mr. DAHMANI Bachir et BOUBKRI Mohamed : des ingénieurs de laboratoire physique (Lafarge M'sila), Mr. BOUDRAA Mohamed et RABAH Sailaa : des ingénieurs de laboratoire de Contrôle qualité (Lafarge M'sila), Mon camarade Mohamed Dhalsi, et Pour leurs aides jusqu'à l'aboutissement de ce travail.

- Messieurs les membres de jury pour avoir accepté d'examiner ce Mémoire, Mes enseignants(es) du département de génie civil et les responsables du laboratoire, Tous les employés de CCR Lafarge (M'sila).

- Tout les gens qui nous ont aidé de près au de loin dans la réalisation de ce modeste travail.

Sommaire

Introduction générale	1
CHAPITRE I : généralité sur le ciment	
I-1- Introduction	3
I-2-Historique	3
I-3- Matières premières et ajouts.....	4
I-4- Classification des ciments	7
I-5- Procédés de fabrication :	9
I-5-1- Principes et méthodes de fabrication :	9
I-5-2- Processus de fabrication de ciment	10
I-6-Méthodes de fabrication du ciment	15
I-7- Chimie du ciment	19
I-7-1- Notations chimiques cimentières	19
I-7-2- Le clinker	20
I-7-3- Hydratation et prise du ciment Portland (CPA)	21
I-7-3-1 Hydratation du silicate tricalcique C_3S	22
I-7-3-2 Hydratation du silicate bi calcique C_2S	23
I-7-3-3 Hydratation de l'aluminate tricalcique C_3A	23
I-7-3-4 Hydratation de l'aluminoferrite tétracalcique C_4AF	23
I-8- Les caractéristiques du ciment portland	24
I-8-1 La prise (NA230 NF EN 196-3).....	24
I-8-2 Le durcissement.....	26
I-8-3 La Finesse de Mouture	28
I-8-4- Le Retrait	30
I-8-5 Chaleur d'hydratation	31
I-8-6 Résistance à la compression	32
I-9-Conclusion.....	33
CAPITRE II : Les ajouts minéraux	
II-1- Introduction.....	34
II-2-Classification des ajouts minéraux.....	34
II-2-1 Principaux ajouts minéraux inertes	34
II-2-2-Les ajouts minéraux actifs	35
II-3- Action des additions minérales sur les matériaux cimentaires	36
II-4-L'intérêt de l'utilisation des ajouts minéraux dans le génie civil.....	37

II-5- Hydratation des liants composés avec laitiers	38
II-6- Influence sur les caractéristiques des bétons frais	42
II-7- Comportement mécanique des ciments au laitier	42
II-8- Influence de la composition chimique	43
II-9- Influence de la porosité de la pâte du ciment.....	43
II-10- Influence de la finesse de mouture (surface spécifique)	43
II-11- Influence de la concentration de l'activant.....	44
II-12- Influence de la température de cure	44

CHAPITRE III : Caractéristique des matériaux et les essais utilisé

III-1 Matières Premières.....	45
III-1-1- Laitier	45
III-1-2- Le clinker.....	45
III-1-3 Le gypse.....	47
III.1.4. Le calcaire	47
III-2 - Formulation des Ciments.....	48
III-3 Formulation des mortiers normalisés.....	50
III-4- Mesures expérimentales	50
III-4-1 Essai sur ciment anhydre	50
III-4-2 Essais sur ciment hydraté (pâtes de ciment)	55
III-4-3 Essai sur Mortier	59
III-4-3-1 Mortier normalisé	59
III-4-3-2 Préparation des éprouvettes et déroulement des essais mécaniques.....	60
III-4-3-3 Mesure du Retrait sur éprouvette de mortier normal.....	62
III-4-3-4 Mesure de La Maniabilité de Mortier.....	64

CHAPITRE IV : Résultats et interprétation

IV-1- Introduction :	73
IV -2- Influence du Taux d'ajout laitier et de calcaire Sur le Poids Spécifique du Ciment :	73
III-3- Influence du Taux d'ajout Sur la Surface Spécifique du Ciment.....	74
IV-4- Influence du Taux d'ajout laitier et calcaire Sur la Pâte de Ciment	75
IV-5- Influence du Taux d'ajout laitier et calcaire Sur Le Mortier à base de sable Normalisé.....	79
IV-6 Effet du Taux d'ajout laitier et calcaire (effet chimique) Sur Le Retrait et Le Gonflement .	80
IV-7 Effet du Taux d'ajout Laitier et calcaire (effet chimique) Sur La Chaleur d'hydratation	82
IV-8- Analyse Granulométrique.....	85
IV-9- conclusion.....	87
Conclusion générale.....	88

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I-1 : Désignation des différents types de ciment en fonction de leur composition.....	8
Tableau I-2 : Spécification et valeurs garanties en fonction de la classe.	9
Tableau I-3 : Notations chimiques cimentières	19
Tableau I-4 : Le Comportement et le dégagement de chaleur des constituants du clinker.....	32
Tableau II-1 : Composition chimique type de laitiers de haut fourneau	36
Tableau II-2 : utilisation des ajouts dans les cimenteries algériennes	38
Tableau II-3 : Composition moyenne des laitiers et de clinker français	39
Tableau II-4 : Stœchiométrie des C-S-H formés par l'hydratation du Laitier.....	42
Tableau III-1 Composition chimique de laitier	45
Tableau III-2 -Principaux constituants du cru de clinker.	46
Tableau III-3 Composition chimique et minéralogique du clinker	46
Tableau III-4- Modules caractéristiques du clinker.....	46
Tableau III-5 -Composition chimique du gypse.....	47
Tableau III-6- Composition chimique du calcaire.....	48
Tableau III-7- Compositions pondérales des Cinq (05) ciments préparés.....	48
Tableau III-8- Composition chimique des ciments préparés.....	49
Tableau III-9- Masse volumique absolue des ciments.	51
Tableau III-10- SSB de déficient ciment préparé.	53
Tableau III-11- Caractéristiques de la granulométrie (Refus 45& 90µm) des différents ciments.	55
Tableau III-12- Composition des mortiers	60
Tableau IV-1- Poids spécifique des ciments préparés.....	73
Tableau IV-2 -Surface spécifique des ciments préparés.	74
Tableau IV-3- Propriétés physiques des ciments préparés (consistance normale).....	76
Tableau IV-4- Propriétés physiques des ciments préparés (Temps de Prise).....	77
Tableau IV-5- Propriétés physiques des ciments préparés (Expansion de Chatelier).	78
Tableau IV-6- Evolution des Résistances à la Compression du Mortier en fonction du taux d'ajout laitier-calcaire (sable normalisé).....	79
Tableau IV-7- Retrait du Mortier normal en fonction du taux d'ajout (laitier et calcaire).	81
Tableau IV-8- Gonflement du mortier normal en fonction du taux d'ajout (laitier et calcaire).	81
Tableau IV-9 Effet du Taux d'ajout Laitier et calcaire Sur La Chaleur d'hydratation :.....	83
Tableau IV-10 -Début de prise en fonction de la chaleur d'hydratation.....	84
Tableau IV-11. Analyse granulométrique de ciment préparé (ALPINE).....	85
Tableau IV-12- Analyse granulométrique avec la SSB de ciment préparé.....	86

LISTE DES FIGURES

Figure I-1 : Grains de pouzzolane	6
Figure I-2 : Grain de gypse	7
Figure I-3 : Schéma représentatif des étapes de fabrication du ciment	9
Figure I-4 : Carrière d'extraction d'argile et de calcaire	10
Figure I-5 : concasseur situé au niveau de la carrière	11
Figure I-6 : Hall de préhomogénéisation	12
Figure I-7 : Broyeur	13
Figure I-8 : Le four rotatif.....	14
Figure I-9 : Le schéma de la fabrication du ciment	16
Figure I-10 : Fabrication du ciment par voie sèche.....	19
Figure I-11 : Microscopie optique en lumière réfléchie sur section polie d'un clinker	21
Figure I-12 : C-S-H fibreux avec Cristal de Portlandite (X).....	22
Figure I-13. Microscopie Electronique à Balayage, étrangeté aciculaire.....	23
Figure I-14 : Détermination du temps de début de prise.....	24
Figure I-15 : Détermination du temps de fin de prise.....	24
Figure I-16 : Evolution du temps de prise en fonction de la température.....	25
Figure I-17 : Influence de la température sur la prise des ciments.	26
Figure I-18 : Influence de l'E/C sur le temps de prise.	26
Figure I-19 : Le développement des résistances dans le temps des constituants purs du CPA. ...	27
Figure I-20. L'évolution physico-chimique de la pâte de ciment.....	28
Figure I-21 : Influence de la surface spécifique sur la résistance à la compression.	29
Figure I-22 : Principe de fonctionnement de Perméabilité de Blaine.	29
Figure I-24 : Chaleur dégagée lors de l'hydratation du CPA	32
Figure II-1: Diagramme de diffraction des rayons X du laitier granulé.....	39
Figure II-2 : Diagramme ternaire	40
Figure III-1 Distillateur (Lafarge laboratoire).....	50
Figure III-2- Flasque Le Chatelier.	51
Figure III-3 Le Densimètre de Le Chatelier.....	52
Figure III-4 Tamiseuse Alpine (Laboratoire de Lafarge M'sila).....	53
Figure III-5- Appareil de Vicat manuel.....	56
Figure III-6- L'appareil de Vicat.....	57

Figure III-7 les Aiguillé de Chatelier	59
Figure III-8- Le bouilloire de Chatelier.....	59
Figure III-9-Malaxeur de mortier	60
Figure III-13 -La Chambre d'humidité	61
Figure III-14 -Bains d'eau (laboratoire de Lafarge M'sila)	62
Figure III-15 -Machine de Compression	62
Figure III-16- Moules (4x4x16) cm ³ Équipés de plots de Retrait	63
Figure III-17 -Comparateur de Retrait	64
Figure III-18- Maniabilité à Mortier (Laboratoire de Lafarge M'sila).	65
Figure III-19- Calorimètre Lang avant (Laboratoire de Lafarge M'sila.....	71
Figure III-20-courbe Sable Normalisé (Laboratoire de Lafarge M'sila).....	71
Figure III-21- analyse granulométrique de sable normalisé.....	71
Figure III-22-Caractéristiques du calorimètre (Laboratoire de Lafarge M'sila).	72
Figure IV-1 -Variation du poids spécifique de ciment en fonction de taux d'ajout (laitier, calcaire).	74
Figure IV-2- Variation de la surface spécifique de ciment en fonction de taux d'ajout (laitier et	75
Figure IV-3- Variation du Rapport E/C (Consistance normale) en fonction du taux d'ajout (laitier	76
FigureIV-4- Variation des Temps de prises en fonction de taux d'ajout (laitier et calcaire).....	77
Figure IV-5- Effet du taux d'ajout laitier-calcaire sur l'expansion du ciment.	78
Figure IV-6- Effet du Taux d'ajout laitier et calcaire sur la Résistance à la Compression	80
Figure IV-7- Evolution du Retrait du mortier en fonction du taux d'ajout laitier et calcaire.....	81
Figure IV-8 -Evolution du gonflement du mortier en fonction du taux d'ajout (laitier	82
Figure IV-9- Effet du taux d'ajout laitier et calcaire sur la chaleur d'hydratation.....	83
FigureIV-10- Courbe de chaleur d'hydratation et d'échauffement.....	84
Figure IV-11- Effet chaleur d'hydratation en fonction du début de prise	85
Figure IV-12- Analyse granulométrique de ciment préparé (ALPINE).	86
Figure IV -13- La Relation entre la surface spécifique et les analyses granulométriques	87

RESUME

Les ciments aux ajouts minéraux (C.P.J-C.E.M II) sont de plus en plus utilisés pour la Confection des matériaux cimentaires (mortier et béton) pour plusieurs raisons, soit écologiques, soit économiques, soit pour améliorer certaines propriétés à l'état frais ou durci.

Ce type de ciment (C.P.J-C.E.M II) se distingue par un durcissement ralenti à sa Période initiale en comparaison avec un ciment ordinaire sans ajout minéral (C.P.A-C.E.M I). Cette propriété latente (prise et durcissement) du C.P.J-C.E.M II, nécessite l'emploi d'une bonne activation (chimique, thermique ou mécanique).

L'objectif de cette étude expérimentale consiste à étudier l'influence du pourcentage des ajouts (laitier, calcaire) et la finesse (surface spécifique) des ajouts minéraux sur les propriétés Physique et mécanique d'un ciment et mortier qui étudier Ce travail pour améliorer :

Les propriétés physiques des ciments (C.P.J-C.E.M II) activés mécaniquement à l'état anhydre et à l'état hydraté (consistance des pâtes de ciments et délais de prise) ainsi que les Caractéristiques des mortiers confectionnés à leurs bases, telles que, le retrait, les réponses mécaniques ont été étudiées.

D'après les résultats expérimentaux obtenus, il ressort que l'augmentation de pourcentage des ajouts influé sur les propriétés physique de ciment compose ainsi que surface spécifique et la composition (chimique et minéralogique) des ciments aux ajouts minéraux sont les principaux responsables à l'amélioration de la réactivité latente des additions minérales et de l'accroissement.

Mots-clés :

Ajouts minéraux, laitier, calcaire, finesse (surface spécifique), ciment, mortier, réponse mécanique.

ABSTRACT

Cements with mineral additives (CPJ-CEM II) are increasingly used for manufacture of cement-based materials (mortar and concrete) for several reasons, either ecological or economic or to improve certain properties to fresh or hardened.

This type of cement (CPJ-CEM II) is characterized by a slow hardening its initial Period in comparison with ordinary cement without mineral addition (CPA-CEM I).

This property latent (setting and hardening) of the CPJ-CEM II, requires the use of a good activation (chemical, thermal or mechanical).

The aim of this experimental study is to examine the influence of the percentage of additives (slag, limestone) and fine (surface area) of mineral additives on the physical and mechanical properties of cement and mortar work for this study improve :

The physical properties of cement (CPJ-CEM II) mechanically activated state anhydrous and hydrated state (consistency of cement pastes and time taken) and the characteristics of mortars made their bases, such as the withdrawal, the mechanical responses were studied.

From the experimental results, it appears that increasing percentage of additions affect the physical properties of cement and made specific surface and composition (chemical and mineralogical) cements with mineral additives are primarily responsible for improving the responsiveness of latent.

Keywords : mineral additions, slag, limestone, fineness (surface area), cement, mortar, response, mechanics.

ملخص

لقد أصبح الاسمنت المركب أي الاسمنت ذات الاضافات المعدنية (CPJ-CEMII) أكثر استعمالاً في تحضر المواد الإسمنتية وهذا لعدة أسباب منها البيئية , او لتحسين بعض الخصائص في الحالة المرنة او الصلابة.

يتميز هذا النوع بتصلد بطيء خلال المرحلة الابتدائية مقارنة مع الاسمنت البورتلاندي العادي المصنوع بدون اضافة معدنية (CPJ-CEMI) ان هذه الخاصية البطيئة خلال مرحلة الشك والتصلد للاسمنت (CPJ-CEMII) تتطلب استعمال منشط فعال (كيميائي حراري او ميكانيكي)

الهدف الرئيسي من هذا العمل التجريبي هو دراسة مدى تأثير نسبة الاضافات المعدنية (خبث، كلسيت) والنعومة (المساحة السطحية) للإضافات المعدنية على الخصائص الفيزيائية والميكانيكية لعجينة الاسمنت والمونة , ان الخصائص الفيزيائية للاسمنت (CPJ-CEMII) ميكانيكية في الحالة الجافة والمبللة (القوام القياسي للعجينة وزمن الشك) وايضا الخصائص الميكانيكية للمونة المحضرة من نفس انواع الاسمنت منها التقلص واستجابة الميكانيكية. تم تحديدهم خلال هذا العمل التجريبي.

من خلال النتائج المحصل عليها نستنتج ان الزيادة في نسبة الاضافات المعدنية تؤثر على الخصائص الفيزيائية للاسمنت المركب وايضا المساحة السطحية والتركيب الكيميائي والمعدني للاسمنت ذات الاضافات المعدنية يمثلان السبب الرئيسي في تحسين التفاعل البطيء.

مفاتيح

الاضافات المعدنية (خبث ,كلسيت) , النعومة (المساحة السطحية) , الاسمنت, المونة, الاستجابة الميكانيكية.

INTRODUCTION

GENERAL

INTRODUCTIO N GENERALE

1- Contexte

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 et durcit par suite de réactions et processus d'hydratation et qui, après durcissement, conserve sa résistance et sa stabilité, même sous l'eau.

Les ajouts minéraux sont largement utilisés dans la fabrication des ciments avec additions minérales dans le monde. Du point de vue économique, ils présentent un facteur très important dans la production du ciment Portland composé (C.P.J-C.E.M II), du moment que la consommation en clinker baisse en fonction du taux d'ajout utilisé.

La substitution du clinker par des additions minérales peut modifier la nature et la texture des hydrates formés. Ces additions peuvent exister sous forme de produits naturels comme la pouzzolane et le calcaire ou résultent de processus industriels sous forme de déchets comme le laitier granulé.

Les additions minérales fournissent une possibilité économique de production dans l'industrie du ciment et améliorent les propriétés mécaniques.

La contribution des additions minérales à l'activité liante du ciment résulte essentiellement de deux effets : physico-chimique et mécanique.

Ces deux effets agissent simultanément et de manière complémentaire sur les performances finales des matériaux durcis.

Le ciment portland composé (C.P.J-C.E.M II) avec ajout minéral se distingue par un durcissement ralenti à sa période initiale en comparaison avec un ciment Portland ordinaire sans ajout, c'est-à-dire sans constituant secondaire (C.P.A-C.E.M I).

2- Problématique

Pour améliorer certaines propriétés des ciments, plusieurs études ont optées pour l'introduction des ajouts minéraux actifs ou inertes dans leur fabrication. L'intérêt technologique de l'utilisation des ajouts réside dans le fait qu'ils permettent l'obtention d'un ciment dans les performances sont aussi bonnes que celles du CPA et de même classe de résistance, sauf aux courts termes, ce qui limite leur utilisation en préfabrication. En second lieu, les ciments composés (exemple : CPJ) présentent, par rapport aux autres types de ciments une meilleure résistance à l'agressivité des eaux douces. La sensibilité à ces agressions a pour origine la solubilité de la portlandite au contact de l'agent agressif.

L'intérêt économique de l'addition des constituants secondaires aux ciments et de diminuer son prix de revient du fait que le coût énergétique de ces ajouts est pratiquement nul.

Dans ce contexte, ce travail consiste à optimiser le taux des ajouts (calcaires, laitier) en ajoutant un pourcentage de deux types d'ajouts avec déférente surface spécifique dans la composition du CPJ et en essayant d'étudier l'effet de la surface spécifique sur les propriétés notamment les résistances mécaniques (résistances à la flexion, et à la Compression) ainsi que le retrait.

3-Objectifs de l'étude : Cette recherche a pour but d'étudier :

1. L'influence de la surface spécifique des ajouts sur les propriétés physiques d'une pâte de ciment Composé (CPJ), ternaire à base de deux ajouts laitier-calcaire (10%,20%,25%,35%) à savoir :

- ✓ La consistance de la pâte de ciment.
- ✓ Le temps de prise (début ; fin).
- ✓ Le retrait.
- ✓ Le gonflement

2. L'influence de surface spécifique des ajoutes sur les propriétés mécaniques du mortier, notamment la résistance à la compression qui présente l'élément qui caractérise le ciment.

4-Structuration du mémoire : Ce mémoire contient quatre chapitres :

Le premier chapitre : Ce chapitre présente une étude bibliographique sur le ciment ainsi que des notions générales sur le ciment portland et le processus de fabrication.

Le deuxième chapitre : Dans ce chapitre une revue général sur les ajouts minéraux a été bien de taillé afin de montre le différent ajout qui peuvent être incorporés dans le processus de fabrication de ciment.

Le troisième chapitre : Ce chapitre consiste à étudier les différentes caractéristique des matériaux utilisé dans nos essais selon le programme élaboré pour réalise ce travail.

Tous les essais ont été réalisé selon les normes européenne (EN)

Le quatrième chapitre : Dans ce chapitre, on a rapporté tous les résultats obtenus qui sont représentés par des figures

Afin de discuter l'effet des ajouts utilisés sur le comportement de ciment élaboré.

L'interprétation des résultats obtenus ont été rapportées dans ce chapitre qui termine par une conclusion générale basée sur les observations dans le comportement de ce nouveau produit ainsi que l'interprétation des résultats.

CHAPITRE I
GENERALITE SUR
LE CIMIENT

Chapitre I : généralité sur le ciment

I-1- Introduction

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 [1].

Dans le langage courant, le terme de ciment peut être source de confusion lorsqu'il est utilisé pour désigner à la fois : [2]

- ✓ 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 : [2]

- ✓ 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 solide.

I-2-Historique

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 pouzzolanique (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 XVIIIe siècle pour aboutir vers 1840, à la fabrication des ciments modernes. Elle concernait le 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 Aspine 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 1450 °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].

I-3- 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 les laitiers de hauts fourneaux ou les cendres des centrales thermiques [5].

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-3-1 -Calcaire

Les calcaires peuvent être de pureté et de dureté variable, ils proviennent du dépôt de CaCO_3 contenu dans les eaux de mer ou des lacs, dépôts provoqués par précipitation chimique ou réalisé par l'intermédiaire d'organisme vivant (mollusques, algues). 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-3-1-1- 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-3-1-2-la magnésie

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.

I-3-1-3- le fer

Le fer 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].

I-3-1-4- les alcalis

Tels que soude et potasse sont volatilisés au moment de la clinkerisation 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-3-2- Elément 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].

I-3-3 –Argiles

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

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

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 : séricine).
- 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 clinkerisation [5].

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

I-3-4- La pouzzolane

La pouzzolane est une roche naturelle (fig. I.1) 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.

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 certain ciment.



Figure I-1 : Grains de pouzzolane [6].

I-3-5- Le 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 H une roche. La Mine de Naica permet de voir des cristaux géants de ce minéral dépassant 11 mètre de long (Fig. : I-2) Le gypse est le minerai qui permet de fabriquer le plâtre [6].



Figure I-2 : Grain de gypse [6]

I-3-6- Le minerai de fer

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 comme indiqué dans le tableau I.1 ; sachant également que l'isomorphisme, presque toujours présent dans les minéraux naturels, réduit la teneur théorique.

I-3-7- Le tuf

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

- Le tuf volcanique, qui provient des t'épuras de petite taille emprisonnant parfois des fragments plus gros s'accumulent 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].

I-4- Classification des ciments

Les ciments peuvent être classés en fonction de leur composition et de leur résistance normale [8].

I-4-1- Classification des ciments en fonction de leur composition

Les ciments constitués de clinker et des constituants secondaires sont classés en fonction de leur composition, en cinq types principaux par la norme NF P15-301.

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

- CEM I : Ciment portland (CPA - dans la notation française),
- CEM II : Ciment portland composé (CPJ),
- CEM III : Ciment de haut fourneau (CHF),
- CEM IV : Ciment pouzzolanique (CPZ),
- CEM V : Ciment au laitier et aux cendres (CLC).

La proportion (en masse) des différents constituants est indiquée dans le tableau I.1. Les constituants marqués d'une étoile (*) sont considérés comme constituants secondaires pour le type de ciment concerné ; leur total ne doit pas dépasser 5%. (Les fillers sont considérés comme des constituants secondaires) [8].

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

Tableau I-1 : Désignation des différents types de ciment en fonction de leur composition [8].

I-4-2-Classification des ciments en fonction de leur résistance normale

Trois classes sont définies en fonction de la résistance normale à 28 jours ; des sous classes "R" sont associées à ces trois classes principales pour désigner des ciments dont les résistances au jeune âge sont élevées. Ces classes sont notées, classe 32,5, classe 42,5, classe 52,5. Elles doivent respecter les spécifications et les valeurs garanties selon le tableau I.3. Les valeurs entre parenthèses sont les valeurs garanties lorsqu'elles peuvent être inférieures aux valeurs spécifiées [8].

Classe	Résistance à la compression (MPa) EN 196-1				Retrait à 28 jours P 15-433 ($\mu\text{m}/\text{m}$)	Début de prise EN 196-3 (min)	Stabilité EN 196-3 (min)
	au jeune âge		à 28 jours				
	2 jours	7 jours	mini.	maxi.			
32,5		(17,5)	/32,5 (30)	$\leq 52,5$	≤ 800	/90	≤ 10
32,5 R	/13,5 (12)	/	/32,5 (30)	$\leq 52,5$	$\leq 1\ 000$	/90	≤ 10
42,5	/12,5 (10)		/42,5 (40)	$\leq 62,5$	$\leq 1\ 000$	/60	≤ 10
42,5 R	/20 (18)		/42,5 (40)	$\leq 62,5$	$\leq 1\ 000$	/60	≤ 10
52,5	/20 (18)		/52,5 (50)			/60	≤ 10
52,5 R	/30 (28)		/52,5 (50)			/60	≤ 10

Tableau I-2 : Spécification et valeurs garanties en fonction de la classe [8]

I-5- Procédés de fabrication :

I-5-1- Principes et méthodes de fabrication :

La fabrication de ciment se réduit schématiquement aux trois opérations suivantes :

- Préparation du cru
- Cuisson
- broyage et conditionnement

Comme présenté dans la figure I.3 :

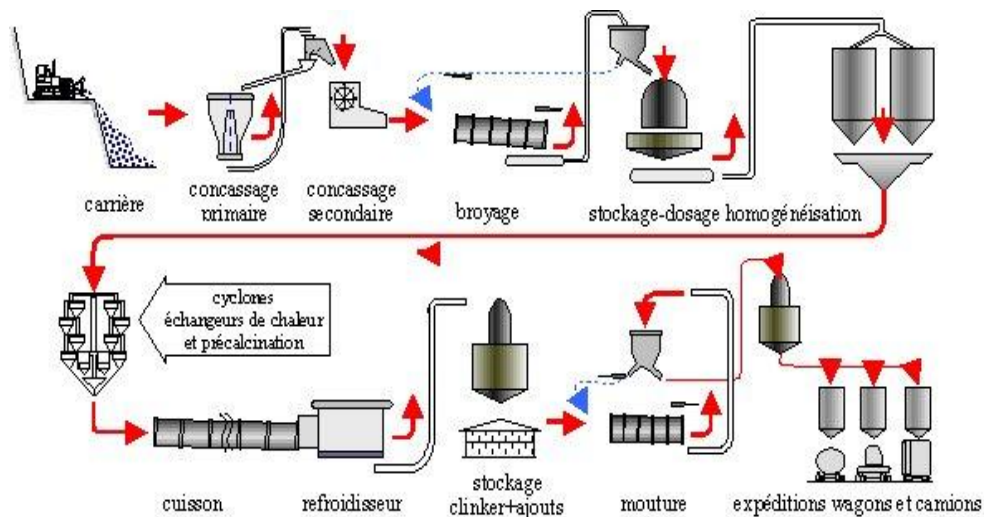


Figure I-3 : Schéma représentatif des étapes de fabrication du ciment [8].

La préparation du cru au cours de laquelle on réalise le mélange homogène du calcaire, d'argile de sable et de minerai de fer, peut être réalisée suivant quatre procédés différents : la voie sèche, semi - sèche, semi - humide et humide.

Dans la voie sèche, les matières premières broyées et séchées forment le cru ou farine qui a l'aspect d'une poudre fluide. Le cru est ensuite introduit dans le préchauffeur ou le précalcinateur du four.

Dans la voie semi-sèche, la farine mélangée à de l'eau forme des granulats qui sont introduits dans un préchauffeur à grilles situé en amont du four ou dans un four long équipé de croisillons.

Dans la voie semi-humide, la pâte est d'abord débarrassée de son eau dans des filtres presses.

Le gâteau de filtre-pressé est ensuite extrudé sous forme de granulats et introduit dans un préchauffeur à grilles ou directement dans un sécheur pour la fabrication du cru.

Dans la voie humide, les matières premières (dont la teneur en humidité est souvent élevée) sont broyées dans l'eau pour former une pâte pouvant être pompée. Elle est ensuite introduite directement dans le four où peut passer auparavant dans un sécheur [5].

I-5-2- Processus de fabrication de ciment

I-5-2-1- Extraction

L'extraction consiste à extraire les matières premières vierges comme le calcaire (75 à 80%) et l'argile (20 à 25%) à partir de carrières naturelles à ciel ouvert (fig. : I-4). Ces matières premières sont extraites des parois rocheuses par abattage à l'explosif ou à la pelle mécanique. La roche est acheminée par des tombereaux (dumpers) ou des bandes transporteuses vers un atelier de concassage. Les matières premières doivent être échantillonnées, dosées et mélangées de façon à obtenir une composition régulière dans le temps. La prise d'échantillons en continu permet de déterminer la quantité des différents ajouts nécessaires (oxyde de fer, alumine et silice) [3,4].



Figure I-4 : Carrière d'extraction d'argile et de calcaire [5].

I-5-2-2- Concassage

Les pierres arrivent généralement à l'usine en gros blocs et avec leur humidité de carrière, et il faut d'abord les concasser, puis les sécher, ou au contraire les délayer, avant de les passer au broyeur. Pour choisir le type et les dimensions des machines, on tiendra compte de la nature et de la grosseur de la pierre, du degré de finesse désiré, et du rendement escompté.

Généralement le concassage est utilisé pour concasser les roches du calcaire qui ont une dureté importante par rapport à la roche d'argile.

Les principaux types de concasseurs utilisés en cimenteries sont :

- ✓ Le concasseur à mâchoires qui convient bien aux matériaux durs même abrasif mais non collants. Le rapport de réduction (le rapport entre la dimension des plus gros éléments existant avant et après la réduction) peut être de 8 à 10 dans les meilleurs cas.
- ✓ Le concasseur giratoire.
- ✓ Le concasseur à cylindres dentés pour les matériaux humides très collants (rapport de réduction de 4 à 5).
- ✓ Le concasseur à marteaux pour les matériaux friable à mi-durs mais non abrasifs (teneur en silice inférieure à 5%). Le rapport de réduction peut être de 10 à 20) [5].
- ✓ Le concassage dans la cimenterie de est réalisé par un concasseur a battoirs qui est placé justes près de la carrière (fig-I-5), ce concasseur est constitué deux rotors primaire et secondaire.

Ce concasseur comporte aussi une chaudière pour chauffer les écrans de chocs et les parois du concasseur afin d'éviter le colmatage [9].



Figure I-5 : concasseur situé au niveau de la carrière [10].

I-5-2-3- Préparation du cru

On utilise trois constituants en générale pour la préparation du cru qui sont le calcaire, l'argile brune, l'argile rouge pour la fabrication du CPA325, CPA400, CPJ450.

Après le concassage de ces trois constituants de base on obtient une granulométrie de 0 à 25 mm et on fait une prise d'échantillon pour effectuer les analyses afin de déterminer la composition, les constituants sont acheminés vers l'usine par des transporteurs couvert puis ce mélange est stocké dans un hall de préhomogénéisation (fig. : I.6).

Le stackeur forme deux tas l'un en constitution, l'autre en reprise. Une seconde correction est prévue juste avant le broyage cru, cette correction se fait pour ajouter le calcaire et le minerai de fer, après correction du cru, le mélange est acheminé à l'aide de transporteurs à bandes vers un concasseur sécheur qui réduira la granulométrie de 0 à 7 mm [9].



Figure I-6 : Hall de préhomogénéisation [10].

I-5-2-4- Broyage du cru

Les matières premières préhomogénéisées doivent être finement broyées pour être chimiquement plus réactives au cours de leur cuisson dans le four. Les réactions chimiques et les échanges thermiques sont en effet d'autant plus intenses que les surfaces des particules sont plus grandes. Les meilleurs clinkers sont obtenus à partir de la mouture plus fine. Dans les installations récentes, on sèche le cru presque uniquement dans le groupe broyeur, en même temps que s'effectue le broyage. Ces installations fonctionnent avec séparateurs à air et broyeurs - sècheurs.

Le broyage - séchage est très avantageux au point de vue calorifique, car les gaz chauds enveloppent complètement les particules fines, et leur transmettent rapidement leur chaleur. Le degré d'humidité de la matière et la température du gaz ; déterminent la quantité de gaz chaud qu'il faut apporter à l'installation pour éliminer l'eau du cru.

La vapeur d'eau produite est évacuée du groupe – broyeur par élimination d'une quantité voulue du mélange air- vapeur d'eau produit. Cette quantité doit être suffisamment abondante pour éviter toute condensation.

Les broyeurs a cru assurent le séchage des matériaux et leur broyage jusqu'à l'obtention d'une farine cru ayant un refus au tamis de 160 μm de l'ordre de (1 – 1.5%) (Fig. : I.7) [5].



Figure I-7 : Broyeur [10]

I-5-2-5- Séparation

Cette phase consiste, suivant le type de séparateur utilisé, à envoyer au broyeur les particules insuffisamment broyées et à récupérer les particules fines contenues dans les gaz [5].

I-5-2-6- Homogénéisation

C'est au cours de cette phase, que grâce à un brassage pneumatique ou mécanique vigoureux, qu'on peut obtenir un produit, parfaitement homogène de caractéristiques chimiques uniformes, apte à être cuit [5].

I-5-2-7- Zone de cuisson

- ❖ La ligne de cuisson est constituée par :
- ❖ Un préchauffeur
- ❖ Un four rotatif
- ❖ Un refroidisseur (voir fig. : I-8)

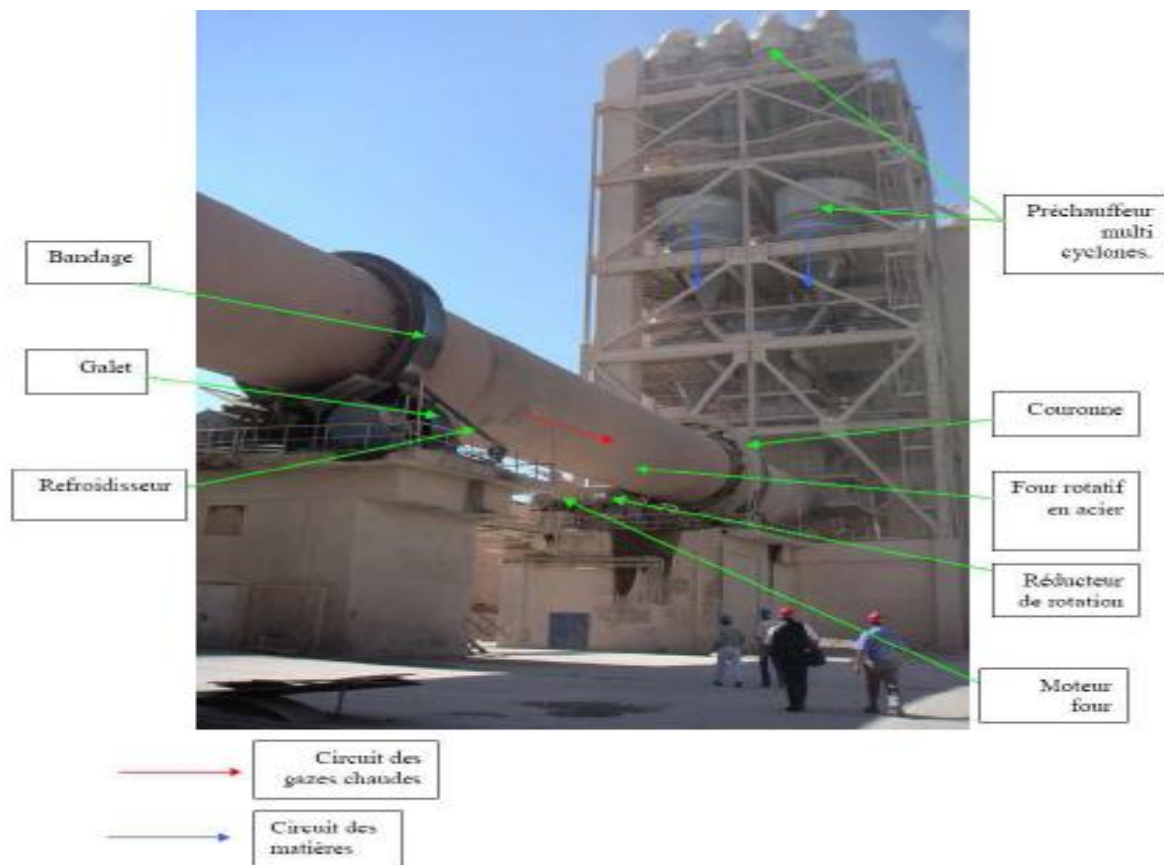


Figure I-8 : Le four rotatif [9].

- Préchauffeur ou cyclones

Les gaz réchauffent la poudre crue qui circule dans les cyclones en sens inverse, par gravité. La poudre s'échauffe ainsi jusqu'à 800 °C environ et perd donc son gaz carbonique (CO₂) et son eau.

C'est un échangeur à contre-courant destiné à préchauffer la farine avant son entrée dans le four, en récupérant la chaleur des gaz sortant du four environ égale à 100°C, par le fait que l'argile et le calcaire ont la même densité (2,70 g/cm³), un exhausteur monté sur les cyclones aspire les gaz de combustions et le mélange carrière, faisant une tornade qui garantit que tous les grains du crue subit la chaleur des gazes [9].

Four rotatif

Le four constitué par une virole cylindrique de 90m de long et de 5.6m de diamètre protégé par de la brique réfractaire, incliné selon un angle de 1 à 4 degrés par rapport à l'horizontale. Le calcaire est chargé à l'extrémité supérieure, le combustible et l'air comburant étant brûlé à l'extrémité inférieure [9].

Refroidisseur

Le refroidisseur a pour rôle d'abaisser la température du clinker tombant du four à une température d'environ 1135°C jusqu'à 80-100°C. Il est équipé d'une batterie de ventilateurs fournissant l'air de refroidissement [9].

I-5-2-8- Broyage clinker

Il est réalisé en continu dans des broyeurs alimentés à partir des stocks de clinker et des différents constituants et ajouts. Le broyage a pour objectif, d'une part de réduire les granulats de clinker en poudre, d'autre part, de procéder à l'ajout du gypse (dont le rôle est de réguler le phénomène de prise), ainsi qu'à celui des éventuels autres constituants (laitier, cendres...), ce qui permet d'obtenir les différents types de ciments normalisés [5].

I-5-2-9- Stockage, ensachage et expédition

A la sortie du broyeur, le ciment est transporté vers des silos de stockage, pour être soit ensaché soit expédié en vrac. L'ensachage, qui dans les pays industrialisés ne représente qu'environ 30% de la production de ciment, s'effectue dans des sacs en papier kraft à l'aide de machines capables de remplir de 2000 à 4000 sacs par heure. La livraison en vrac est assurée par camions, wagons ou péniches [5].

I-5-2-10- Les transporteurs

Le déplacement de la matière d'une installation à l'autre s'effectue à l'aide des transporteurs spécifiques, chacun a son propre rôle. On peut distinguer :

Les transporteurs mécaniques, les transporteurs à bandes, les transporteurs à vis sans fin, les élévateurs à godés, et les transporteurs pneumatiques [5]

I-6-Méthodes de fabrication du ciment

Il existe 4 méthodes de fabrication du ciment (voir figure I.9) qui dépendent essentiellement du matériau :

- ❖ 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).

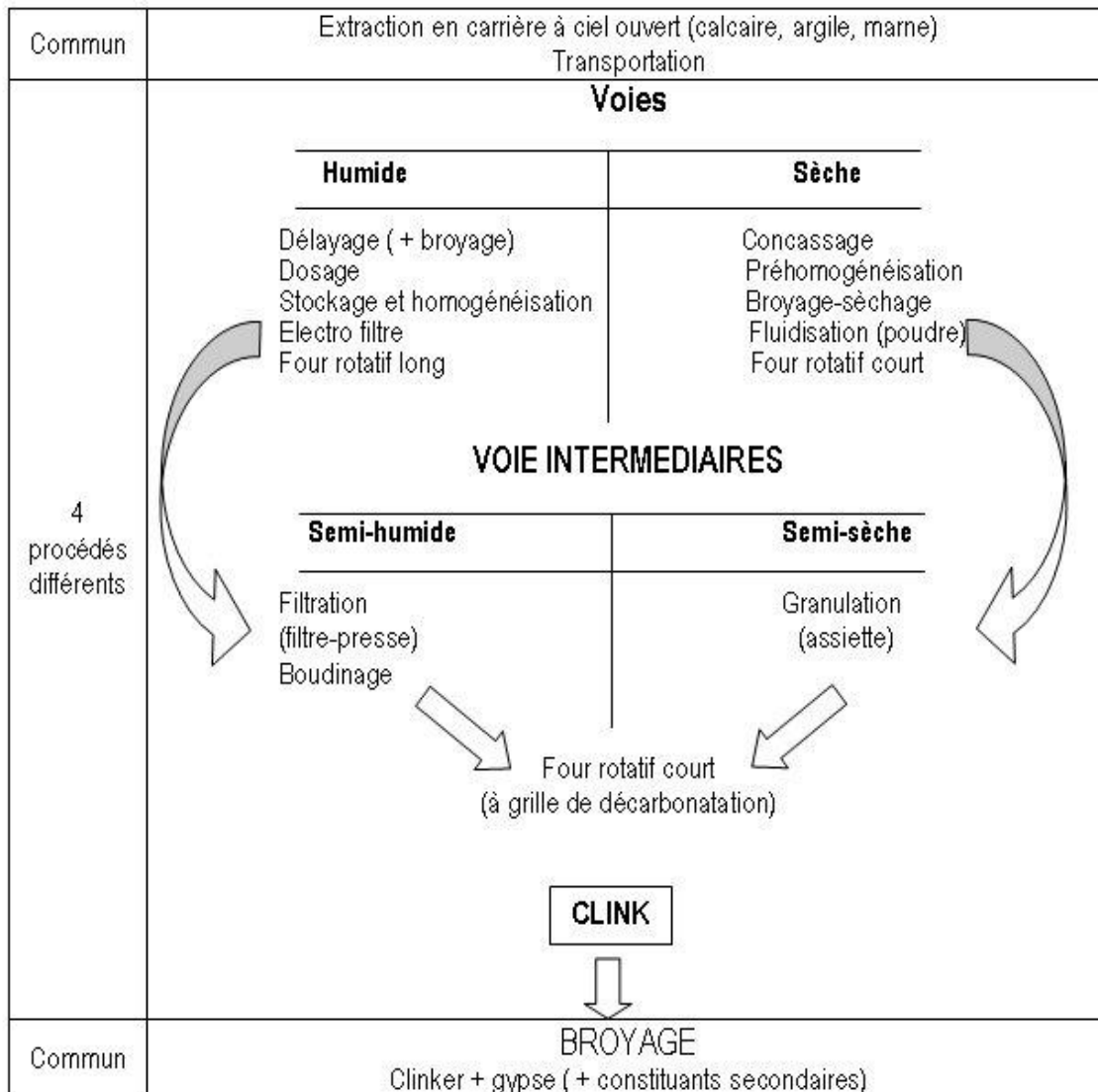


Figure 1-9 : Le schéma de la fabrication du ciment [9].

On distingue deux types de la fabrication

I-6-1 Fabrication par voie humide

Cette voie est utilisée depuis longtemps. C’est le procédé le plus ancien, le plus simple mais qui demande le plus d’énergie. Dans ce procédé, le calcaire et l’argile sont mélangés et broyés finement avec l’eau de façon, à constituer une pâte assez liquide (28 à 42% d’eau). On brasse énergiquement cette pâte dans de grands bassins de 8 à 10 m de diamètre, dans lesquels tourne un manège de herse.

La pâte est ensuite stockée dans de grands bassins de plusieurs milliers de mètres cubes, où elle est continuellement malaxée et donc homogénéisée. Ce mélange est appelé le cru. Les analyses chimiques permettent de contrôler la composition de cette pâte, et d’apporter les corrections nécessaires avant sa cuisson.

La pâte est ensuite envoyée à l'entrée d'un four tournant, chauffé à son extrémité par une flamme intérieure. Un four rotatif légèrement incliné est constitué d'un cylindre d'acier dont la longueur peut atteindre 200 mètres. On distingue à l'intérieure du four plusieurs zones, dont les 3 zones principales sont :

- Zone de séchage.
- Zone de décarbonatation.
- Zone de clinkerisation.

Les parois de la partie supérieure du four (zone de séchage - environ 20% de la longueur du four) sont garnies de chaînes marines afin d'augmenter les échanges caloriques entre la pâte et les parties chaudes du four.

Le clinker à la sortie du four, passe dans des refroidisseurs (trempe du clinker) dont il existe plusieurs types (refroidisseur à grille, à ballonnets). La vitesse de trempe a une influence sur les propriétés du clinker (phase vitreuse).

De toute façon, quel que soit la méthode de fabrication, à la sortie du four, on a un même clinker qui est encore chaud d'environ 600-1200 °C. Il faut broyer celui-ci très finement et très régulièrement avec environ 5% de gypse CaSO_4 afin de «régulariser» la prise.

Le broyage est une opération délicate et coûteuse, non seulement parce que le clinker est un matériau dur, mais aussi parce que même les meilleurs broyeurs ont des rendements énergétiques déplorables.

Les broyeurs à boulets sont de grands cylindres disposés presque horizontalement, remplis à moitié de boulets d'acier et que l'on fait tourner rapidement autour de leur axe (20 t/mn) et le ciment atteint une température élevée (160°C), ce qui nécessite l'arrosage extérieur des broyeurs. On introduit le clinker avec un certain pourcentage de gypse en partie haute et on récupère la poudre en partie basse.

Dans le broyage à circuit ouvert, le clinker ne passe qu'une fois dans le broyage.

Dans le broyage en circuit fermé, le clinker passe rapidement dans le broyeur puis à la sortie, est trié dans un cyclone. Le broyage a pour but, d'une part de réduire les grains du clinker en poudre, d'autre part de procéder à l'ajout du gypse (environ 4%) pour réguler quelques propriétés du ciment portland (le temps de prise et de durcissement).

A la sortie du broyeur, le ciment à une température environ de 160 °C et avant d'être transporter vers des silos de stockages, il doit passer au refroidisseur à force centrifuge pour que la température de ciment reste à environ 65 °C

I-6-2 Fabrication par Voie sèche :

Les ciments usuels sont fabriqués à partir d'un mélange de calcaire (CaCO_3) environ de 80% et d'argile ($\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$) environ de 20%. Selon l'origine des matières premières, ce mélange peut être corrigé par apport de bauxite, oxyde de fer ou autres matériaux fournissant le complément d'alumine et de silice requis.

Après avoir finement broyé, la poudre est transportée depuis le silo homogénéisateur jusqu'au four, soit par pompe, soit par aérogليسeur. Les fours sont constitués de deux parties :

- ❖ Un four vertical fixe, préchauffeur (cyclones échangeurs de chaleur).
- ❖ Un four rotatif.

Les gaz réchauffent la poudre crue qui circule dans les cyclones en sens inverse, par gravité. La poudre s'échauffe ainsi jusqu'à 800 °C environ et perd donc son gaz carbonique (CO₂) et son eau. La poudre pénètre ensuite dans un four rotatif analogue à celui utilisé dans la voie humide, mais beaucoup plus court.

La méthode de fabrication par voie sèche pose aux fabricants d'importants problèmes techniques :

La ségrégation possible entre argile et calcaire dans les préchauffeurs. En effet, le système utilisé semble être néfaste et en fait, est utilisé ailleurs, pour trier des particules. Dans le cas de la fabrication des ciments, il n'en est rien. La poudre reste homogène et ceci peut s'expliquer par le fait que l'argile et le calcaire ont la même densité (2,70). De plus, le matériel a été conçu dans cet esprit et toutes les précautions ont été prises.

Le problème des poussières. Ce problème est rendu d'autant plus aigu, que les pouvoirs publics, très sensibilisés par les problèmes de nuisance, imposent des conditions draconiennes. Ceci oblige les fabricants à installer des dépoussiéreurs, ce qui augmente considérablement les investissements de la cimenterie.

Les dépoussiéreurs sont constitués de grilles de fils métalliques portés à haute tension et sur lesquels viennent se fixer des grains de poussière ionisée. Ces grains de poussière s'agglomèrent et sous l'action de vibreurs qui agitent les fils retombent au fond du dépoussiéreur où ils sont récupérés et renvoyés dans le four. En dehors des panes, ces appareils ont des rendements de l'ordre de 99%, mais absorbent une part importante du capital d'équipement de la cimenterie.

Le problème de l'homogénéité du cru est délicat. Nous avons vu comment il pouvait être résolu au moyen d'un pré homogénéisation puis d'une homogénéisation.

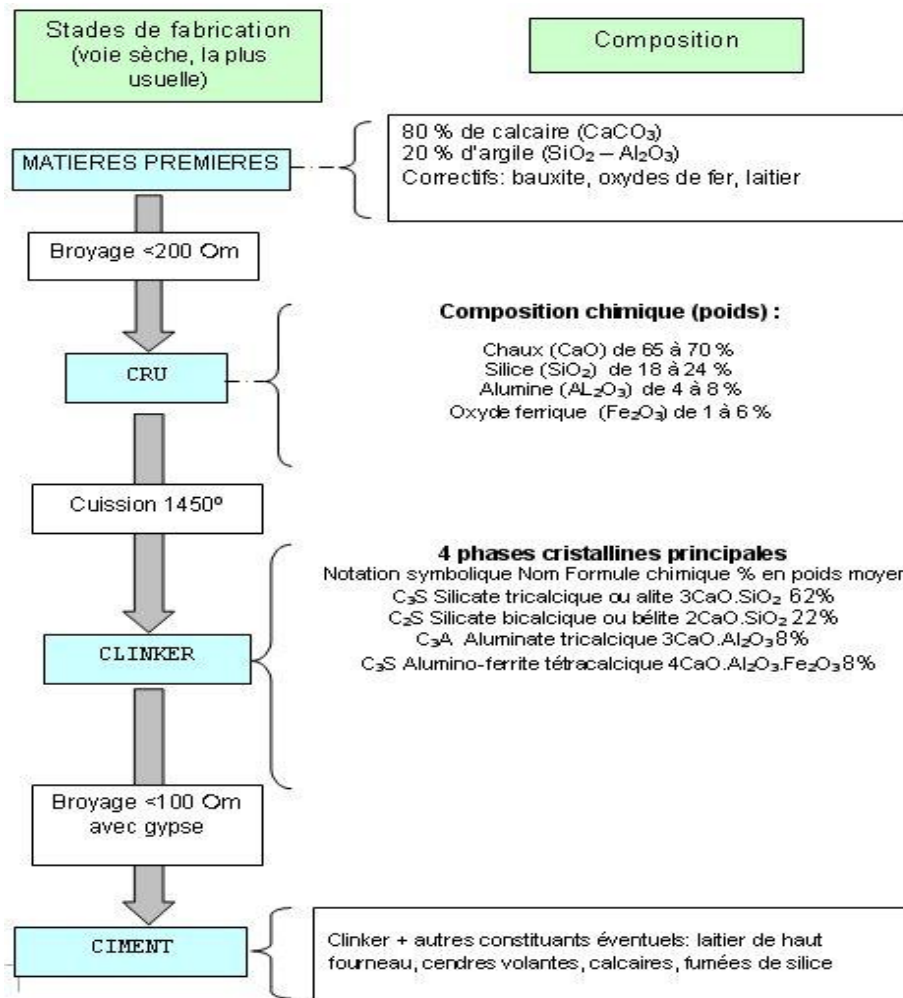


Figure 1-10 : Fabrication du ciment par voie sèche [9].

I-7- Chimie du ciment

I-7-1- Notations chimiques cimentières

Les notations chimiques cimentières communément utilisées dans la chimie du ciment sont regroupées dans le tableau I.4 [11] :

Composé	Formule chimique	Nomenclature
La silice	SiO_2	S
L'alumine	Al_2O_3	A
La ferrite	Fe_2O_3	F
L'eau	H_2O	H
Le trioxyde de soufre	SO_3	Š
La magnésie	MgO	M
Potassium	K_2O	K
Sodium	Na_2O	N
D'oxyde de carbone	CO_2	Č
La chaux	CaO	C

Tableau I-3 : Notations chimiques cimentières [11].

I-7-2- Le clinker

I-7-2-1- Composition chimique du clinker

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

Le clinker portland comprend les oxydes suivant : CaO, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, MgO, TiO₂, Na₂O, K₂O, MnO₂.

-CaO : Il est lié avec SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, à l'état libre il provoque une inégalité de changement de volume du ciment lors de l'hydratation (expansion). $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca(OH)}_2$.

La résistance du ciment augmente en cas d'augmentation du pourcentage de CaO lié, cependant, la stabilité chimique diminue en milieu agressif. La teneur de CaO est de 63% à 67% dans le clinker.

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

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

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

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

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

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

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

-Na₂O et K₂O : Une partie des alcalis se volatilise lors de la cuisson, sa composition est de 0,5 à 1%.

Les alcalis provoquent la diminution de la résistance du ciment, parce qu'ils ralentissent l'hydratation des principaux minéraux. La silice, l'alumine et le fer donnent à la cuisson un caractère acide, contrairement à la chaux qui est plutôt basique. Ces proportions permettent de prévoir les qualités ultérieures du ciment. Les oxydes dans le clinker doivent être liés en composés définis appelés minéraux [5].

I-7-2-2- Composition minéralogique du clinker

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

Le « C₃S » se trouve en très grande proportion dans le « CPA ». C'est l'élément actif du ciment artificiel. Il confère au ciment les résistances initiales à 28 jours de durcissement. Au microscope, il apparaît dans le clinker sous forme de grains de mêmes dimensions, à couleur bien marquée [5].

❖ **Silicate bicalcique : Bélite « C₂S » : 8 à 35%.**

Il confère au ciment des résistances moins élevées que le « C₃S » ; mais développe les résistances à long terme. Son aptitude au broyage est moins bonne que celle de « C₃S », car sa dureté est plus grande. Au microscope, il apparaît sous forme de grains arrondis [5].

❖ **Aluminate tricalcique : Céélite : « C₃A » : 1 à 13%.**

Il confère au ciment une très bonne résistance initiale à 1 ou 2 jours de durcissement. Mais par la suite, il influe très peu sur cette dernière. Il est sensible aux eaux de mer à cause des sulfates qu'il contient. Il forme avec les sulfoaluminates de chaux, les sels de Candlot, souvent très expansifs. La réaction d'hydratation est fortement exothermique [5].

❖ **Aluminate tétra calcique : Féélite, C₄AF : 3 à 14%.**

Il est appelé aussi la féélite. Il confère au ciment des résistances faibles et peu précises. On peut dire qu'il est inactif sur le plan hydraulique, et il constitue un fondant pendant la cuisson avec « C₃A » [5].

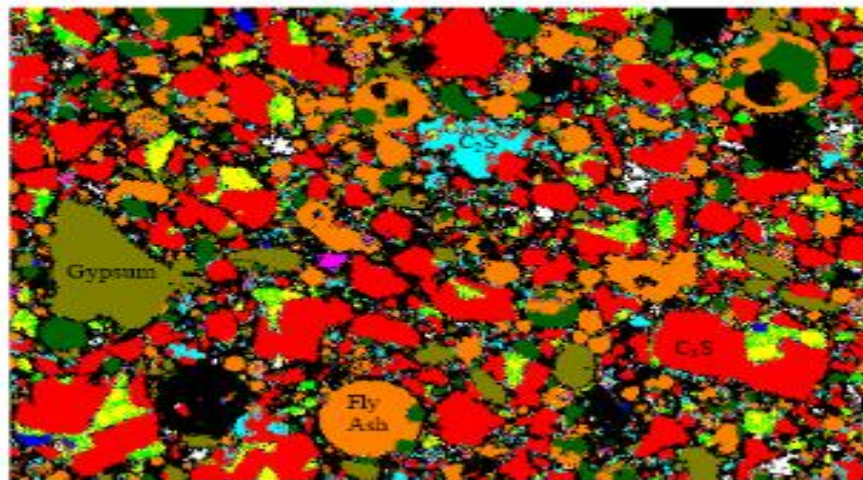


Figure I-11 : Microscopie optique en lumière réfléchie sur section polie d'un clinker [12].

I-7-3- Hydratation et prise du ciment Portland (CPA) [13]

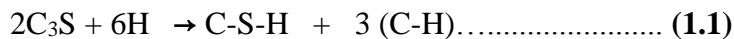
Le contact du ciment avec l'eau déclenche un mécanisme d'hydratation complexe qui a été étudié pour la première fois par Henri Le Chatelier (1887). Schématiquement, le Chatelier a décrit trois étapes relatives à la prise du ciment :

1. L'adsorption physique et chimique de l'eau par les grains de ciment,
2. La dissolution ou solvatation, des grains de ciment ou phases anhydres, en présence d'eau,
3. La précipitation des phases hydratées.

Pour décrire l'hydratation du ciment, différents travaux ont été publiés concernant des phases pures comme l'alite, C_3S [15,16], la bélite, C_2S , l'aluminate tricalcique, C_3A , ou encore la phase alumino-ferritique, C_4AF .

I-7-3-1 Hydratation du silicate tricalcique C_3S

L'hydratation des silicates produit des gels de silicate de calcium hydraté et l'hydroxyde calcium, La réaction du C_3S avec de l'eau est la suivante :



Où C-S-H représente le $3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O$ (Silicate de calcium hydraté) et (C-H) représente le $Ca(OH)_2$ (Portlandite).

Les hydrates ainsi obtenus au cours de l'hydratation du C_3S (figure 1.6) sont :

les silicates de calcium hydratés (C-S-H) qui occupent entre 60 et 70% du volume de solide d'une pâte de ciment complètement hydratée. Ils ont une structure en feuillets formés de cristaux très petits et mal cristallisés.

La surface spécifique est très élevée (100 - 700 m^2/g).

La cohésion des feuillets de C-S-H est due aux forces de Van Der Walls entre leurs parties colloïdales.

L'autre composant principal dans l'hydratation des silicates tricalciques est l'hydroxyde de calcium C-H (ou Portlandite) qui occupe entre 20 à 25% du volume des solides de la pâte de ciment complètement hydratée.

La Portlandite a une morphologie hexagonale prismatique. Elle participe peu au développement de la résistance. En fait, la présence de la portlandite peut être un risque, parce qu'elle est fortement soluble et susceptible à l'attaque d'acide et de sulfate [14].

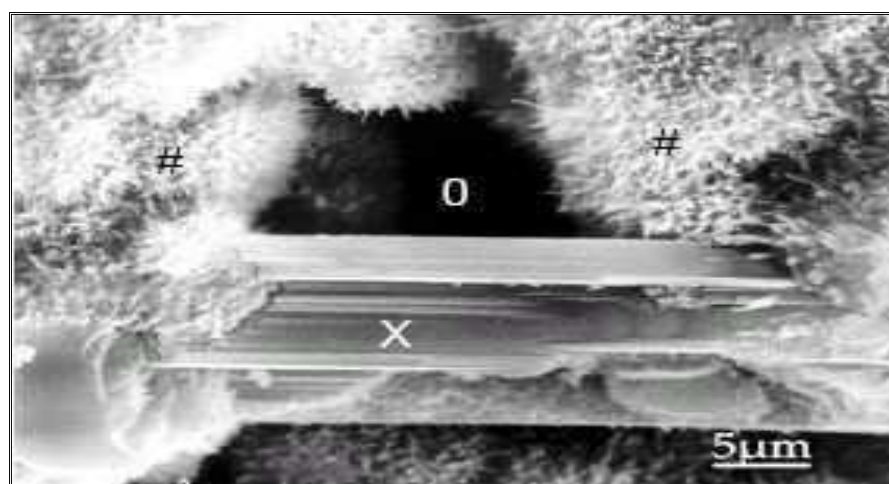


Figure 1-12 : C-S-H fibreux avec Cristal de Portlandite (X)[8]

I-7-3-2 Hydratation du silicate bi calcique C₂S

Une fois hydraté, C₂S donne aussi des C-S-H. La réaction est donnée par :



Les études calorimétriques ont montré des résultats semblables à ceux de l'hydratation de C₃S mais avec moins d'évolution de la chaleur. Selon des calculs de stœchiométrie, l'hydratation de C₃S produirait 61% de gel de C-S-H et 39% de CH alors que l'hydratation de C₂S produirait 82% de gel de C-S-H et seulement 18% de CH, donc une quantité plus élevée de C₂S dans le ciment aurait comme Conséquence plus de résistance. Pour la résistance au jeune âge, cependant, plus de C₃S est nécessaire, parce que sa vitesse de réaction est plus élevée.

I-7-3-3 Hydratation de l'aluminate tricalcique C₃A

L'hydratation des aluminates est considérablement influencée par la présence du gypse (CaSO₄ 2H₂O). En l'absence du gypse, la réaction de C₃A avec de l'eau est très violente et mène au raidissement immédiat de la pâte, connu sous le nom de prise rapide. En présence du gypse, les C₃A réagissent d'abord pour former le trisulfoaluminate hydraté (Étrangéité) qui se cristallise en aiguilles à base Hexagonale (figure 1.7). La réaction est donnée par :

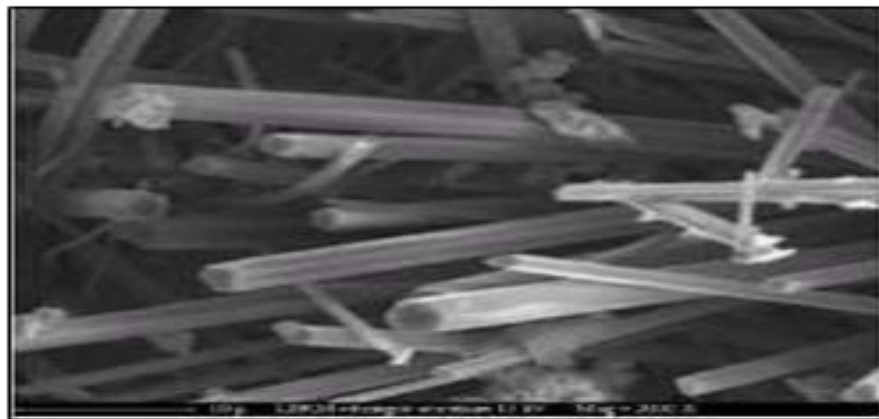
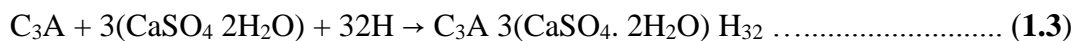


Figure I.13. Microscopie Electronique à Balayage, étrangéité aciculaire[8]

I-7-3-4 Hydratation de l'aluminoferrite tétracalcique C₄AF

Le C₄AF réagit avec le gypse avec un mode semblable que celui de C₃A, mais dans ce cas, la réaction est beaucoup plus lente.

Dans la première étape de la réaction, le C₄AF produit une forme élevée de sulfoaluminate de calcium qui réagit avec l'excès de C₄AF pour donner une basse forme de sulfoaluminate.

Ces sulfoaluminates occupent environ 15-20% du volume de solides dans la pâte, La réaction du C₄AF dégage peu de chaleur et participe peu au développement de la résistance [14].

L'hydratation des aluminates est de grande importance pratique parce qu'ils affectent les propriétés de prise du ciment.

I-8 Les caractéristiques du ciment portland

I-8-1 La prise (NA230 NF EN 196-3)

Dès que le ciment anhydre a été mélangé avec de l'eau, l'hydratation commence et les propriétés de la pâte ainsi obtenue sont évolutives dans le temps. Tant que cette hydratation n'est pas trop avancée la pâte reste plus ou moins malléable, ce qui permet de lui faire épouser par moulage la forme désirée. Mais au bout d'un certain temps, les cristaux d'hydrates prenant de plus en plus d'importance, le mélange a changé de viscosité et se raidit, on dit qu'il se fait priser.



Figure I-14 : Détermination du temps de début de prise.

Le début de prise correspond au moment où l'on observe une augmentation de la viscosité, ou raidissement de la pâte, ce qui, dans la pratique, se mesure au moyen de l'aiguille normalisée (appareil de Vicat) et correspond au temps écoulé depuis le gâchage de la pâte jusqu'au moment où l'aiguille s'arrête à une distance ($d = 6 \text{ mm} \pm 3 \text{ mm}$) du fond de l'anneau de 40 mm de hauteur remplie de pâte pure de ciment (voir figure I-14).

De même, la fin de prise correspond au moment où l'aiguille ne s'enfonce plus dans l'anneau (voir figure I-15).

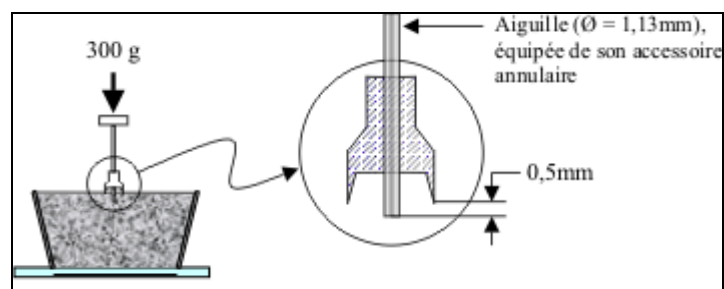


Figure I-15 : Détermination du temps de fin de prise.

Le phénomène de prise du ciment est lié à de nombreux paramètres tels :

la nature du ciment, la finesse de mouture du ciment ; plus son broyage a été poussé, plus le temps de prise est court, la température ; alors qu'à zéro degré la prise est stoppée, plus la température ambiante est élevée plus la prise est rapide, pour un ciment donné le début de prise sera de 18 heures à 2 °C, de 5 heures à 10 °C, de 3h 30 à 20 °C et de 30 min à 35 °C (figure I-16), la présence de matières organiques dans l'eau ou dans l'un des autres constituants du béton qui ralentit la prise, L'excès d'eau de gâchage qui a, entre autres inconvénients, une action retardatrice sur la prise (figure I.18).

En fonction de leur classe de résistance, les normes spécifient un temps de prise minimum qui est, à la température de 20 °C, de :

1 h 30 pour les ciments de classes 35 et 45.

1 h pour les ciments des classes 55 et HP.

Il est à noter que pratiquement tous les ciments ont des temps de prise largement supérieurs à ces valeurs minimales, l'ordre de grandeur étant de 2 h 30 à 3 h pour la majorité des ciments.

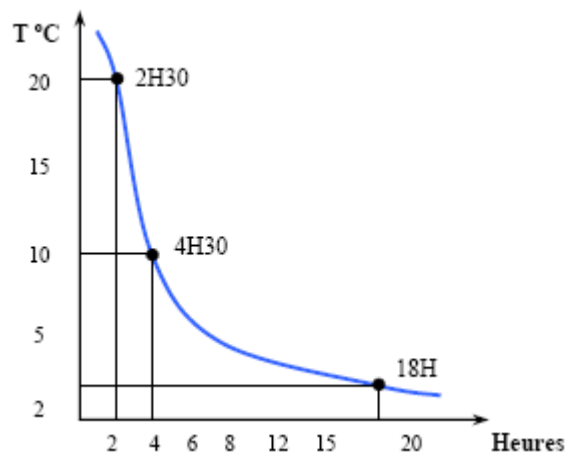


Figure I-16 : Evolution du temps de prise en fonction de la température.

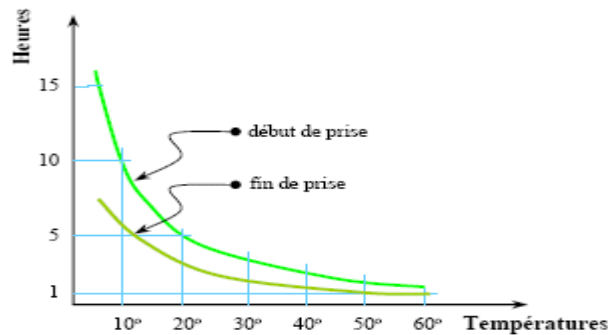


Figure I-17 : Influence de la température sur la prise des ciments.

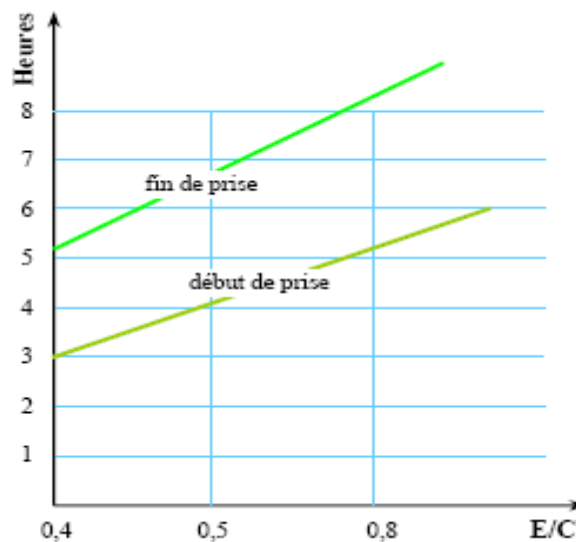


Figure I-18 : Influence de l'E/C sur le temps de prise.

I-8-2 Le durcissement

C'est la période qui suit la prise et pendant laquelle se poursuit l'hydratation du ciment, Sa durée se prolonge pendant des mois au cours desquels les résistances mécaniques continuent à augmenter.

Comme le phénomène de prise, le durcissement est sensible à la température, ce qui conduit notamment en préfabrication, à chauffer les pièces pour lesquelles on désire avoir des résistances élevées au bout de quelques heures.

La prise et durcissement des constituants du clinker :

Pour mieux comprendre les propriétés des ciments portland, il est intéressant d'étudier comment réagit en présence d'eau chacun des constituants anhydres du ciment pris isolément.

Le graphique ci-dessous montre le développement des résistances dans le temps des constituants purs du ciment portland.

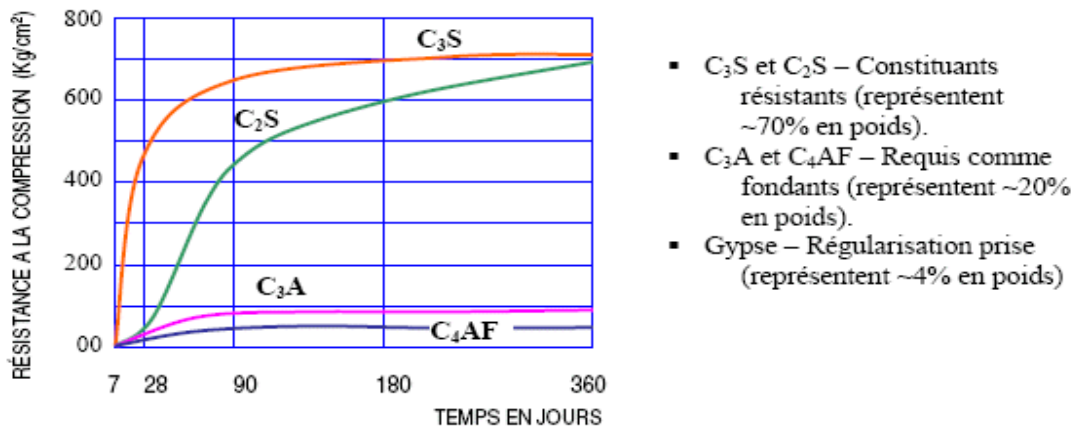


Figure I-19 : Le développement des résistances dans le temps des constituants purs du CPA.

Dans une poudre de ciment portland en contact avec l'eau, l'aluminate tricalcique (C₃A) réagit en premier, se dissout et se recristallise. Vient ensuite la réaction d'hydrolyse, de l'alite-Silicate tricalcique (C₃S) forme autour des grains une pellicule de gel et met en même temps des ions Ca²⁺ en solution. L'hydrolyse et la recristallisation de (C₃A) sont rapides.

En gâchant le ciment avec l'eau, on obtient une pâte dans laquelle l'eau entoure chaque grain de ciment en formant un réseau capillaire (voir fig. I.20) Les composés anhydres du ciment sont alors attaqués en surface par l'eau pour produire des composés hydratés.

Dans le cas des silicates de calcium C₃S et C₂S, la chaux hydratée se dissout et il se dépose des cristaux de Ca(OH)₂ en plaquettes hexagones alors que les silicates de calcium hydratés forment un gel composé de fines aiguilles à la surface du ciment. Ces aiguilles se développent en dimension et en nombre tout en réduisant les interstices capillaires entre les grains. Quand les aiguilles entre les grains de ciment se rapprochent, la pâte devient plus raide. Cette rigidité est au début faible et peut encore être facilement détruite mécaniquement. C'est le début de la prise. Après quelques heures, les interstices capillaires sont partiellement comblés par le gel.

La pâte de ciment acquiert une certaine résistance. C'est le durcissement qui commence.

La résistance continue à croître à mesure que le gel devient plus compact, d'une part, parce qu'il y a un accroissement de la cohésion entre les aiguilles et accroissement du feutrage des aiguilles, d'autre part, parce qu'il se formerait des joints de soudure entre les aiguilles de tobermolite des divers grains de ciment.

Dans les pâtes de ciment durcies, il reste de ce fait toujours des grains de ciment non hydratés. L'hydratation des grains de ciment continue non seulement des mois, mais des années durant, pour autant que le gel soit entouré d'eau, car le gel de tobermolite ne peut se former qu'en présence d'eau.

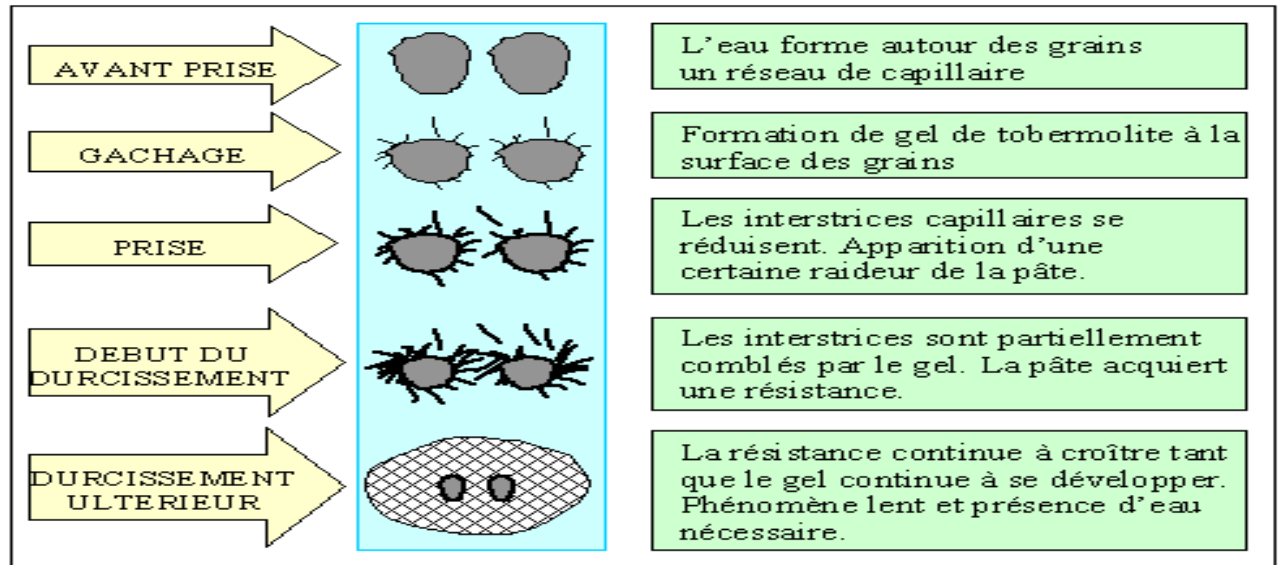
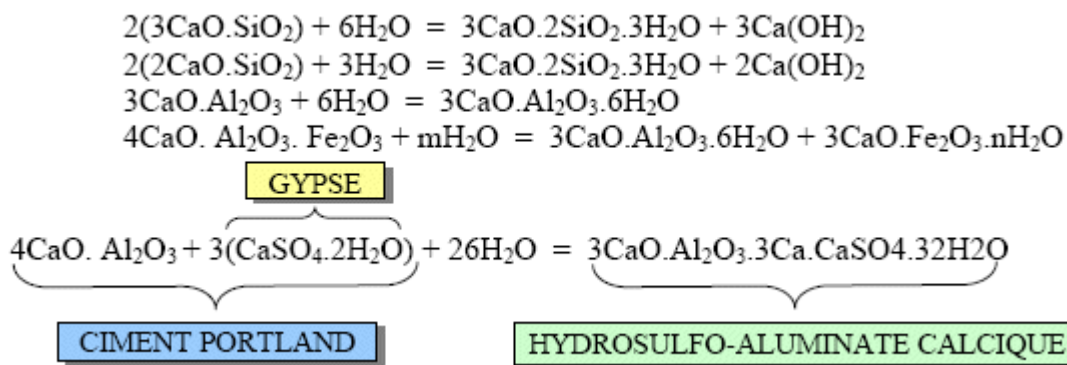


Figure I-20. L'évolution physico-chimique de la pâte de ciment.

Quelques réactions chimiques importantes



Les réactions d'hydratation du ciment Portland sont très complexes. Nous ne considérons que les quelques-unes utiles à connaître pour mieux comprendre les propriétés des ciments portlands.

I-8-3 La Finesse de Mouture (finesse de Blaine - NA231 NF EN196-6)

Elle est caractérisée par la surface spécifique des grains de ciment, exprimée en (cm²/g).

Dans les cas courants, elle est de l'ordre de 3000 à 3500 cm²/g.

Plus la finesse de mouture est grande, plus la vitesse des réactions d'hydratation est élevée et plus ces résistances mécaniques à un âge jeune sont grandes (voir figure 1-15), par contre plus le ciment est sensible à l'éventuellement et plus le retrait est important. En outre, la finesse de mouture influence la plasticité et la cohésion de la pâte de ciment à l'état frais, ainsi que son pouvoir de rétention d'eau et la ressuée.

La surface massique de ciment étudié n'est pas mesurée directement, mais par comparaison avec un ciment de référence dont la surface massique est connue. Il s'agit de faire passer un volume d'air connu au travers d'une poudre de ciment. Toutes choses étant égales par ailleurs, plus la surface massique de cette poudre est importante et plus le temps t mis par l'air pour traverser la poudre est longue, Dans les conditions normalisées décrites, la surface est proportionnelle à \sqrt{t} .

L'appareil utilisé pour déterminer la finesse de mouture de ciment est appelé «Perméabilimètre de Blaine». Cet appareil est schématisé sur figure (I.22).

Il se compose pour l'essentiel d'une cellule dans laquelle est placé le ciment à tester et d'un manomètre constitué d'un tube en verre en forme de U rempli, jusqu'à son repère inférieur (N° 4) d'une huile légère. La cellule est équipée d'une grille en sa partie inférieure.

Un piston sert à tasser le ciment dans la cellule sous un volume V défini.

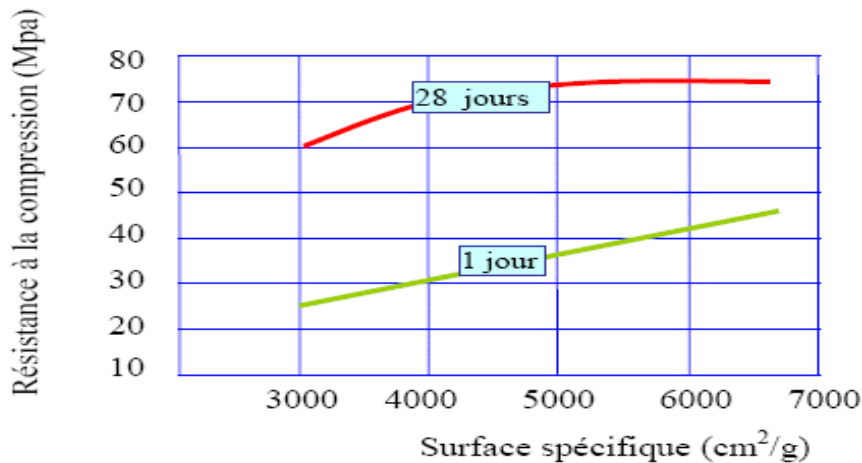


Figure I-21 : Influence de la surface spécifique sur la résistance à la compression.

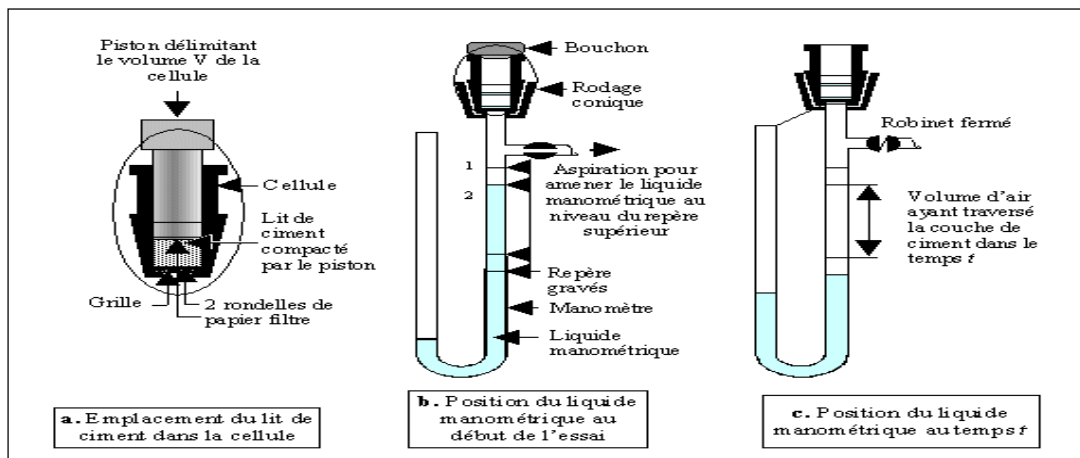


Figure I-22 : Principe de fonctionnement de Perméabilité de Blaine.

I-8-4- Le Retrait (NA440 NF P15 433)

La pâte de ciment se rétracte dans l'air sec (alors qu'au contraire elle gonfle dans l'eau), ce phénomène se poursuivant dans le temps et ceci pendant des durées d'autant plus longues que les pièces sont massives.

C'est le retrait qui est cause des fissures que l'on observe dans des pièces en béton.

En fait il existe plusieurs types de retrait :

Le retrait avant prise dû essentiellement à la perte prématurée d'une partie de l'eau de gâchage par évaporation et dont l'amplitude est dix fois celle du retrait hydraulique classique. Ce retrait qui provoque des contraintes de traction supérieures à la résistance du béton à la traction, qui est alors pratiquement nulle, se traduit par l'apparition, à la surface du béton encore plastique, de grosses crevasses peu profondes, pouvant être refermées par talochage.

Le retrait hydraulique, qui découle d'une part de la contraction Le Chatelier (le volume des hydrates est inférieur au volume des constituants de départ) et d'autre part du retrait de dessiccation (contraction au séchage), est de l'ordre de 0,2 à 0,4 mm/m pour les bétons. Dans le cas de béton à faible rapport E/C, la dessiccation d'origine "endogène" (consommation de l'eau de gâchage pour hydratation) peut être prépondérante sur la dessiccation par échange avec le milieu externe.

Le retrait thermique, qui est dû à la contraction du béton lors de son refroidissement.

L'importance du retrait hydraulique, en dehors du facteur de temps, est fonction de nombreux paramètres parmi lesquels :

- ✓ la nature du ciment.
- ✓ le dosage en eau (figure I-23).
- ✓ la propreté des sables.
- ✓ la forme et la dimension des granulats.

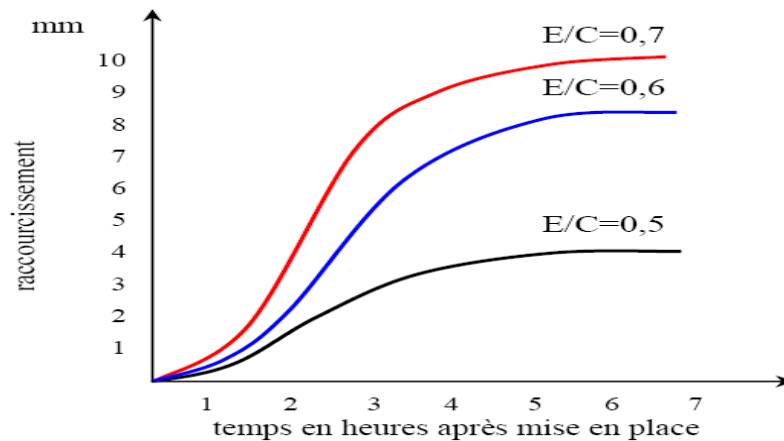


Figure I-23 : Influence de l'E/C sur le retrait plastique des mortiers.

I-8-5 Chaleur d'hydratation (EN196-9 NF P15-436)

Domaine d'application

La présente Norme européenne décrit une méthode de mesure de la chaleur d'hydratation des ciments par calorimétrie semi-adiabatique, dite méthode de Langavant. L'essai a pour but de mesurer en continu la chaleur d'hydratation du ciment au cours des tout premiers jours.

La chaleur d'hydratation est exprimée en joules par gramme de ciment.

Principe

La méthode semi-adiabatique consiste à introduire un échantillon de mortier fraîchement préparé, dans un calorimètre afin de déterminer, d'après l'évolution de la température, la quantité de chaleur dégagée. À une échéance donnée, la chaleur d'hydratation du ciment contenu dans l'échantillon est égale à la somme de la chaleur accumulée dans le calorimètre et de la chaleur dissipée vers le milieu ambiant pendant toute la durée de l'essai.

L'échauffement du mortier est comparé à la température d'un échantillon inerte dans un calorimètre de référence. L'échauffement qui dépend principalement des caractéristiques du ciment est généralement compris entre 10 K et 50 K.

Le phénomène de prise du ciment s'accompagne d'une réaction exothermique dont l'importance dépend de différents paramètres, en particulier :

- la finesse de mouture : plus le ciment est broyé fin, plus la chaleur d'hydratation est élevée.
- la nature des constituants : les ciments CPA comportant presque exclusivement du clinker dégagent plus de chaleur que des ciments avec constituants secondaires.
- la nature minéralogique du clinker : plus les teneurs en aluminat tricalcique (C_3A) et silicate tricalcique (C_3A et C_3S) sont élevées, plus la chaleur d'hydratation est forte la température extérieure (voir tableau 1-4).

N ^o	CONSTITUANTS	COMPORTEMENT DES CONSTITUANTS PURS	CHALEUR DEGAGEE
1	C ₃ S	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Fait prise et durcit rapidement. ▪ Haute résistance atteinte à <i>court terme</i> 	120 cal / gr
2	C ₂ S	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Réagit lentement ▪ Haute résistance atteinte à <i>long terme</i> 	62 cal / gr
3	C ₃ A	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Prise de façon très désordonnée et rapide ▪ Faible résistance <p style="text-align: center;"><i>(Pour régulariser la prise du C₃A, il faut ajouter du gypse)</i></p>	207 cal / gr
4	C ₄ AF	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Faible résistance 	100 cal / gr

Tableau 1-4 : Le Comportement et le dégagement de chaleur des constituants du clinker.

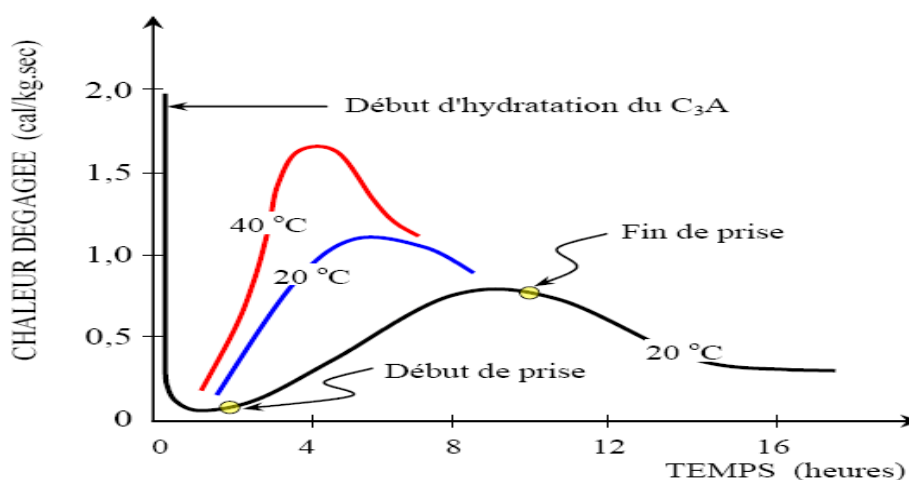


Figure I-24 : Chaleur dégagée lors de l'hydratation du CPA

I-8-6 Résistance à la compression (NA 234 EN 196-1)

Les résistances mécaniques des ciments sont déterminées par les essais sur mortier dit "normal", à 28 jours d'âges en traction et en compression des éprouvettes (4 x 4 x 16) cm³.

La résistance du mortier est alors considérée comme significative de la résistance du ciment. Elle dépend de la classe de ciment et est exprimée en MPa (voir Figure 1-25).

Le mortier utilisé est réalisé conformément à la Norme EN 196-1.

Le sable utilisé est un sable appelé "sable normaliser CEN EN 196-1". Pour chaque type de ciment, il existe effectivement plusieurs classes de résistances pour lesquelles les fabricants garantissent des valeurs minimales et maximales.

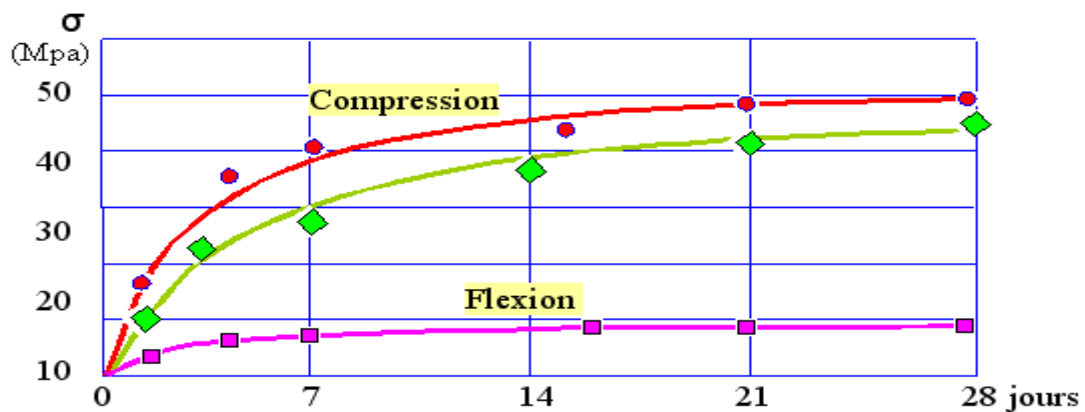


Figure I-25 : Résistance du mortier normal

I-9-Conclusion

Ce premier chapitre bibliographique nous a permis de rappeler la définition et l'histoire de ciment portland, ainsi que les principaux constituants, ensuite de présenter les principes de base des mécanismes d'hydratation des matériaux à matrice cimentaire. C'est une étape indispensable pour la bonne compréhension de tous les phénomènes associés à l'hydratation. Enfin nous avons présenté les caractéristiques d'un ciment portland.

CHAPITRE III
LES AJOUTS
MINÉRIEAUX

Chapitre II : Les ajouts minéraux

II-1- Introduction

L'utilisation des ajouts minéraux en remplacement du linker est très bénéfique, car en plus des économies d'énergie et de la diminution du con. Les ajouts peuvent améliorer les propriétés du béton, en augmentant changeant sa micro sa compacité et en structure.

Les ajouts minéraux sont largement utilisés au remplacement du ciment portland à travers le monde. Le laitier du haut fourneau, les gendres volantes, la fumée de silice la...etc. sont les matériaux les plus fiables pour leur qualité ou réaction pouzzolanique améliore la résistance des bétons aussi que leurs durabilité [28]

II-2-Classification des ajouts minéraux

Selon la ENV 2006 paragraphe 3.1.5, les ajouts minéraux dans le ciment sont classés norme en actifs et inertes. On distingue quatre classes d'ajouts minéraux :

II-2-1 Principaux ajouts minéraux inertes

Selon certains chercheurs, les dimensions supérieure à 60 µm ne particules de clinker de subissent pas une hydratation complète même au cours du durcissement à long terme, pour cette même raison les particules de clinker de telle dimension pourraient être remplacées par celles de matériaux inertes (NF P 18- 305).

En outre, les plus fin d'un ajout inerte servent à remplir les pores de la pâte de particules les ciments, ils jouent le rôle de micro agrégats. Synthétiques spécialement Ce sont des matériaux quasiment inertes, organiques naturels ou physiques du sélectionnés qui, par leur composition granulométrique améliorent les propriétés ciment Portland (ouvrabilité, pouvoir de rétention d'eau, Parmi ces additifs on distingue les fillers calcaires et la poussière.

II- 2-1-1 Fillers calcaires

Des poudres fines a Les produits désignés dans le commerce comme fillers sont granulométrie contrôlée, dont les plus gros grains ne dépassent pas 80 microns obtenus par broyage ou par pulvérisation de certaines roches (calcaires, basalte, bentonite, cendres volantes.....).

II-2-1-2- La poussière

La poussière est une matière à particules fines, récupérée à la sortie du four, lors de son passage avec la fumée, sa finesse est comprise entre 7000 et 9000 cm²/ g. le ciment composé avec la poussière a des caractéristiques mécaniques et une résistance au gel-dégel comparable à celle du ciment sans ajouts. Le temps de prise, le nuage et le retrait augmente avec l'augmentation du pourcentage d'ajout.

II-2-2-Les ajouts minéraux actifs

II-2-2-1-La pouzzolane

Les pouzzolanes sont des matériaux, naturels ou artificiels, capables de réagir présence d'eau avec l'hydroxyde de chaux pour donner naissance à des composés nouveaux, stables, peu solubles dans l'eau et possédant des propriétés liantes [17].

Les normes françaises donnent les définitions suivantes des pouzzolanes entrant dans fabrication des ciments :

➤ **Pouzzolane naturelle**

Est produit d'origine volcanique essentiellement composé de silice, d'alumine et d'oxyde de fer ayant naturellement des propriétés pouzzolanique.

➤ **Pouzzolane artificielle**

C'est une matière essentiellement composée de silice, d'alumine et d'oxyde de fer ayant subi un traitement thermique pour lui assurer des propriétés po Les roches traitées thermiquement: argiles, schistes, latérite, bauxite et moler.

II-2-2-2 la fumée de silice

La fumée de silice est un sous-produit de la fabrication du silicium, d'alliages de ferrosilicium ou de zircon. Le silicium et les alliages de silicium sont produits dans des fours à arc électrique où le quartz est réduit en présence de charbon (et de fer pour la production de ferrosilicium), Durant la réduction de la silice dans l'arc électrique un composé gazeux. Sion se forme [11] et s'échappe vers la partie supérieure du four. Il se refroidit, se condense et s'oxyde sous forme de particules ultrafines de silice SiO_2 , ces particules sont récupérées dans un système de dépoussiérage.

II-2-2-3 Le laitier de haut fourneau

Le laitier de haut fourneau, ou le laitier broyé comme il voudrait peut être mieux l'appeler est un sous-produit de fonte brusquement refroidi par aspersion la fabrication de la d'eau, c'est un matériau hydraulique lorsqu'il se présente sous forme de nodules est activé. Il dont la composition chimique comporte de l'oxyde de calcium l'ordre dans des proportions de de 40 à 50 de la silice entre 25 à 35%, de l'alumine entre 12 à 30% ainsi que la magnésie et d'autres oxydes en très faibles quantités, tous ces éléments les mêmes étant pratiquement que ceux du clinker.

D'un point de vue chimique (tableau II.1), les laitiers ont une composition relativement constante à laquelle le métallurgiste porte une certaine attention puis que tout écart par rapport à cette composition chimique optimale se traduit par une augmentation des couts énergétiques assez importants et donc à des coûts de production plus élevés pour la fabrication de la fonte.

Le laitier est fondu à une densité beaucoup plus faible(de l'ordre de 2.8) que celle de la fonte(qui est supérieure à 7.0) de telle sorte que le laitier fondu flotte au-dessus de la fonte fondue au bas du haut fourneau si bien que l'on peut soutirer ces deux liquides séparément.

Oxydes	Laitier français	Laitier Nord U .S .A	Laitier algérien
SiO ₂	29 à 36	33 à 42	38 à 42
Al ₂ O ₃	13 à 19	10 à 16	8 à 12
CaO	40 à 43	36 à 45	48 à 52
Fe ₂ O ₃	4%	0.3 à 20	2.0
MgO	6%	3 à 12	4.7
S	1.5%	-	0.15

Tableau II-1 : Composition chimique type de laitiers de haut fourneau [19]

Le laitier peut être mélangé avec du ciment après avoir été séparé ou après avoir été corroyé avec le clinker. Le laitier retient moins bien l'eau de gâchage que le ciment Portland et craint donc d'avantage la dessiccation. Par contre il résiste normalement mieux à l'action destructrice des sulfates, à la dissolution de chaux par les eaux pures ainsi que par celles contenant du gaz carbonique.

❖ **La réactivité du laitier peut être augmentée de trois façons :**

- Broyage poussé.
- Chaleur (étuvage, autoclavage).
- Produits chimiques (la chaux, la soude (Na OH) ou des sels de soude, le sulfate de calcium (gypse)).

II-2-2-4- Les cendres volantes

Les cendres volantes sont des particules très fines récupérées par les systèmes de dépoussiérages des gaz des chaudières des centrales thermiques. Les cendres volantes peuvent avoir différentes compositions chimiques et différentes compositions de phase parce que celles-ci sont reliées exclusivement au type d'impuretés qui sont contenues dans le charbon que l'on brûle dans la centrale thermique. Des charbons provenant de la même source et utilisés dans la même centrale thermique produisent des cendres volantes très semblables.

II-3- Action des additions minérales sur les matériaux cimentaires

La norme européenne EN206-1(NF P 18-325) de février 2002 définit les additions comme des matériaux minéraux finement divisés utilisés dans le béton afin d'améliorer certaines de ses propriétés ou pour lui conférer des propriétés particulières.

L'action des additions concerne aussi bien l'état frais que l'état durci du béton. En premier lieu, à l'état frais, la présence des additions modifie la structure du squelette granulaire du matériau et les frictions entre les composants de la suspension solide dans la phase liquide. En second lieu, au cours de la prise et du durcissement, les particules des additions interagissent dans le processus d'hydratation du ciment et peuvent modifier la structure des produits hydratés.

En troisième lieu, certaines additions ont la capacité de réagir chimiquement en milieu cimentaire pour former de nouveaux produits hydrauliques qui présentent un caractère liant additionnel à celui résultant de l'hydratation du ciment et que les anglo-saxons précisent sous le terme de supplementary cementations matériels.

II-4-L'intérêt de l'utilisation des ajouts minéraux dans le génie civil

II-4-1 Intérêt du point de vue économique

L'introduction des ajouts dans la confection du ciment benenque présente un factea la consommation en clinker baisse en fonction des taux d'ajouts En effet, le clinker an obtenu par transformation de la crue (argile+ calcaire) nécessite une depenae d'énergie très importante pouvant atre réduite par l'introduction de cet ajout [18]

La reaction pouzzolanique étant à base de produits de faible coût et la durabilité est garantie puisque les romains utilisaient déjà ce mécanisme chimique dans leurs ciments pour la confection d'ouvrages quai ont fait leur preuve depuis de nombreux siecles [29].

Des sous-produits industriels tels que les cendres volantes silice condensées et fumées de sont de plus en plus utilisées dans les pays industrialisés déchets d'usine. Parce qu'ils sont des Contraire mentaux pouzzolanes naturelles, il n'est pas nécessaire de les pulvériser ou de les soumettre à un traitement thermique avant de s'en servir. Plusieurs pays comme la Chine. La Grèce, l'Italie, l'inde et le Mexique, utilisent encore des millions de tonnes de pouzzolanes naturelles pour fabriquer des ciments Portland composés. Pour des raisons d'épargne d'énergie, il y a tout lieu de croire que l'utilisation de ces matériaux se poursuivra et se développera de plus en plus.

II-4-2- Intérêt du point de vue technique :

L'intérêt technique des ajouts réside en premier lieu dans le fait qui 'ils permettent l'obtention d'un ciment dont les performances sont aussi bonnes que celles d'un CPA (ciment Portland) de même classe de résistance. Parfois la chute de résistance court terme limite leur utilisation en préfabrication. En second ciments composes (CPA ajouts souvent l'avantage sur le CPA, d'une meilleure résistance aux agressions chimiques.

Le remplissage des vides est lui-même aussi responsable de la durabilité du mortier ou béton obtenu. En effet, les actions chimiques sont réduites quand la est moins abondante, soit qu'elle est diluée (ciment au laitier). Soit qu'elle est consommée (ciment au cendre ou à la pouzzolane naturelle) La réduction de la teneur en clinker s'accompagne par ailleurs d'une réduction proportionnelle du taux de C3A du mélange et par conséquent du risque de dégradation sulfatique.

Les ciments composés seront toujours recommandés chaque fois que les bétons seront exposés aux agents agressifs (ouvrages à la mer ou bien exposés aux produits chimiques).

II.4.3 L'utilisation des ajouts en Algérie

L'industrie cimentaire est d'importance primordiale pour l'Algérie comme tous pays en voie de développement, cependant, parmi les moyens efficaces qui existent pour augmenter la production du ciment est celui d'utiliser des ajouts qui sont très peu couteux et disponibles en grandes quantités en Algérie, comme le laitier d' El -Hadjar, le calcaire et pouzzolane naturelle de Beni-saf. Le tableau(II.2) donne une idée sur les ajouts utilisés dans les cimenteries algériennes.

Entreprise	Cimenterie	Ajouts Utilisés
ERCE	Ain Touta	Pouzzolane
	Ain El Kebira	
	Hammam Bouziane	
	H'djar Essaoud	Laitier
	Tebessa	
ERCC	Meftah	Tuf / Calcaire
	Raiss Hamidou	Poussière
	Sour EL Ghozlane	Calcaire / Tuf
ECDE	Chlef	Calcaire
ERCO	Beni Saf	Pouzzolane
	Zahana	
	Saida	

Tableau II-2 : utilisation des ajouts dans les cimenteries algériennes [20]

II-5- Hydratation des liants composés avec laitiers

Le laitier de haut fourneau est un produit de plus en plus utilisé dans la construction des ouvrages de Génie Civil, Il peut être utilise comme granulats sous sa forme cristallisée ou comme liant sous sa forme vitreuse .on s'intéresse essentiellement a l'utilisation du laitier vitrifié comme liant dans la fabrication du béton. Malgré les nombreux travaux de recherche qui ont été consacrés à l'hydratation du laitier, les mécanismes en jeu demeurent ma connusse la chimie du laitier n'est pas encore complètement élucidée à l'heure actuelle.

II-5-1 Fabrication du laitier de haut fourneau

Le laitier de haut fourneau est un sous-produit de l'industrie sidérurgique Il est obtenu par la fusion du minerai de fer, du coke et éventuellement du fondant en vide de l'élaboration de la fonte. Le laitier est recueilli du haut fourneau i une température qui varie de 1300°C 1600°C.

Il est alors soumis à un traitement (appelé granulation) qui consiste déverser le de laitier liquide dans un bassin rempli d'eau. Le refroidissement ainsi créé est suffisamment rapide pour qu'il y ait trempé des particules solides que forme le laitier liquide mis brutalement au contact de l'eau. Ces particules acquièrent ainsi une structure vitrifiée qui correspond, à la température ambiante, à ce qu'était leur structure liquide à haute température Ainsi, leu révolution normale

vers une structure organisée qui est celle du laitier cristallisé, a été stoppée. Le laitier ainsi obtenu est dit vitrifié (voir diagramme DRX suivant).

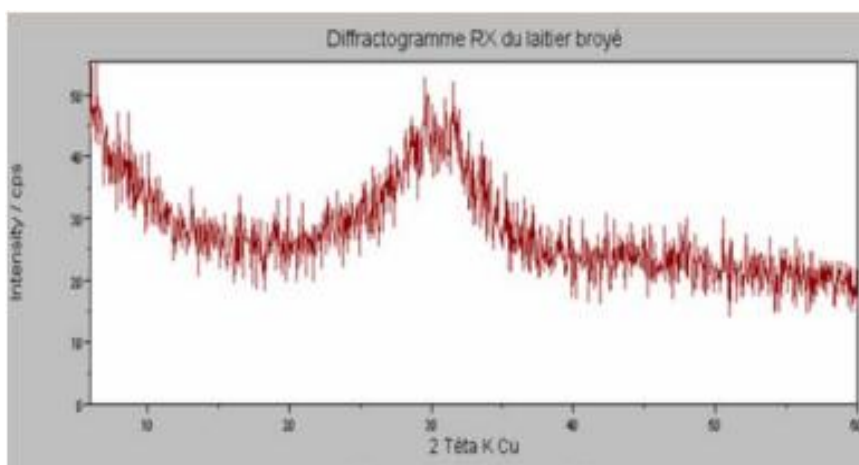


Figure II-1: Diagramme de diffraction des rayons X du laitier granulé [16].

Le laitier vitrifié présente une structure vitreuse, désordonnée et par conséquent riche en énergie. La forme vitreuse est une forme instable et le laitier vitrine est doué d'une hydraulicité latente, c'est-à-dire qu'il est susceptible, sous certaines conditions, d'évoluer vers une forme cristallisée stable, en développant des résistances mécaniques comme le ferait un ciment. Le laitier vitrifié est donc un liant hydraulique, c'est à cette hydraulicité et à ce pouvoir liant que l'on fait appel lorsqu'on l'utilise comme constituant de ciments composés.

Ainsi on s'intéresse essentiellement dans le présent document au pouvoir hydraulique des laitiers vitrifiés ou granulés de haut fourneau GHF) utilisés dans la fabrication du béton.

Les constituants chimiques principaux du LGHF sont les oxydes de calcium (CaO, de silicium(SiO₂), d'aluminium(Al₂O₃) et de magnésium(MgO). On y trouve aussi, des teneurs de l'ordre du pour cent, des oxydes de fer et des sulfures La proportion des di constituants est fonction de la composition chimique des minerais La composition moyenne des laitiers français varie dans les plages indiquées dans le Tableau II-3

Composition chimique	Laitier	Clinker
CaO	38à46	60à70
SiO ₂	31à36	19à25
Al ₂ O ₃	9à18	2à9
MgO	4à10	0à3

Tableau II-3 : Composition moyenne des laitiers et de clinker français [22]

On peut caractériser la composition du laitier et du ciment portland par une représentation du système CaO , SiO_2 et Al_2O_3 (voir figure suivante).

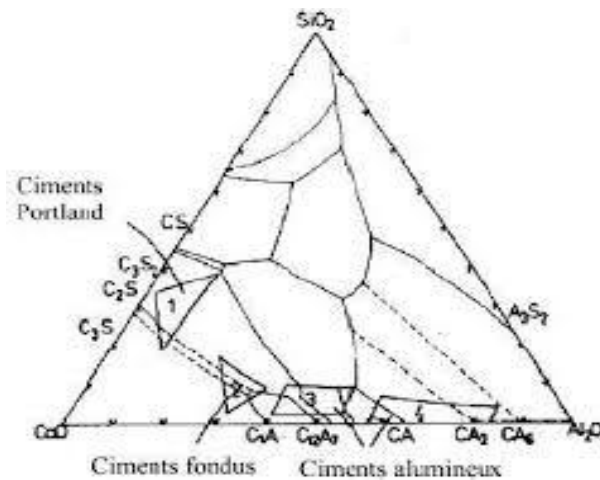


Figure II-2 : Diagramme ternaire [29]

Ce diagramme montre que le c portland et le LGHF se trouvent dans le même domaine général, bien que le ciment portland se trouve essentiellement dans le domaine du C_3S ors que le LGHF se trouve entre le domaine du C_2S et celui du C_1S . C'est la raison pour laquelle les mécanismes d'hydratation du LGHF sont différents de ceux du ciment portland [22].

II-5-2- Hydratation du laitier pur

D'après [CHEN, 2007][18], les activant chimiques pure les plus couramment du laitier utilisés sont les sulfates, le silicate de sodium, l'hydroxyde de calcium, et, dans de rares cas. de la de caustique. Une grande partie de ces activateurs contient des alcalins (Na, K, Li) et ils sont donc appelés activateurs alcalins. On peut citer à titre d'exemple dans la littérature scientifique récente les travaux de [PUERTAS et al ,2004] ; [BEN HABA et al. 2011][15] qui ont activé l'hydratation du laitier pur avec de l'hydroxyde de sodium et du sodium de méta silicate hydrate IZIVICA, 2007[20] a aussi étudié l'influence de l'hydroxyde de sodium, du carbonate de sodium et du silicate de sodium comme activateurs de réaction du laitier. Ces études ont montré que la cinétique d'hydratation ainsi que le C-SH formé dépendent du type d'activant utilisé pour activer l'hydratation du laitier.

Plusieurs travaux ont consacrés dans la littérature à l'identification des produits hydratation du laitier. Le principal produit d'hydratation du laitier est le c du laitier, de la produits peuvent également se former en fonction de la composition chimique les différents durée de cure, de l'influence de température et de l'activant(18) a recensé la produits identifiés dans la littérature.

Il s'agit entre autres des hydrates suivants :

Réactions du laitier en présence de clinker

Dans la pratique la plus courante, le laitier est mélangé au clinker pour lors de ciment composés de type CEM III. Le mélange peut également être réalisé d'activant fabrication du béton (CEMI+ laitier). Dans ce type de liant le clinker joue le rôle pour le laitier.

La vitesse de réaction du laitier est un élément important dans la modélisation de l'hydratation du laitier en présence du clinker. La réactivité du laitier a fait l'objet de beaucoup de travaux [122, 25, 18] et elle n'est pas encore totalement comprise aujourd'hui. Plusieurs facteurs contribuent à la réactivité du laitier (voir Figure 3.4) tels que sa composition chimique, son taux de vitrification, la température, le taux finesse, d'alcalinisation de la solution interstitielle,.....

Durant l'hydratation du laitier en présence du clinker, on retrouve les mêmes types de produits que ceux obtenus par l'hydratation du laitier activé par les alcalins. La principale différence réside dans le type d'Afin et la stœchiométrie des C-S-H formés. D'après [22]. Parmi les Afm, seul le CAH_{1.5} se forme lors de l'hydratation du laitier car la présence du C₂ASH₈ est incompatible avec celle de la Portlandite produite par l'hydratation du clinker.

Caractéristiques des hydrates formés en présence de clinker

Plusieurs travaux ont montré que la quantité de portlandite contenue dans les pâtes de ciment à base de laitier diminue avec l'augmentation de la proportion de laitier dans le liant.

Pour des taux de substitutions très élevés, on ne retrouve aucune quantité de portlandite disponible dans la pâte et cela indique une consommation du portlandite par l'hydratation du laitier. Des mesures de rapports CS et A/S, des C-S-H formés par l'hydratation du laitier sont consignés dans le Tableau II.4. Ces mesures ont été réalisées par [17] sur des pâtes de ciment conservées 20°C jusqu'à une échéance de 14 mois.

Alors que pour des C-S-H formés par hydratation du laitier pur on a des rapports molaires qui sont de l'ordre de 1 les résultats obtenus par [17] indiquent clairement.

Un enrichissement en calcium des C-S-H formés par le laitier en présence du clinker provenant incontestablement de la consommation du portlandite produite par le clinker. La prise en compte de la consommation du portlandite produite par le clinker par l'hydratation du laitier est par conséquent déterminante dans la modélisation de ciments composés base de laitier,

% de Laitier dans Liant	C/S	A/S
0	1.76	0.0027
10	1.89	0.020
25	1.78	0.032
50	1.55	0.050
66,7	1.43	0.065
75	1.37	0.065
83,3	1.38	0.075
90	1.28	0.075
100	1.14	0.095

Tableau II-4 : Stoechiométrie des C-S-H formés par l'hydratation du Laitier [17]

II-6- Influence sur les caractéristiques des bétons frais

L'utilisation du laitier dans le béton permet d'améliorer par rapport à un l'ouvrabilité béton conventionnel. Manai [24] explique ce phénomène par les caractéristiques des surfaces des grains de laitiers qui permettent un meilleur glissement inter granulaire la pâte. Il dans souligne aussi le très faible taux d'adsorption d'eau par les grains de laitiers au début du malaxage, Venait [25] explique que les bétons contenant du laitier ont des temps de prise un peu plus longs que les bétons conventionnels, surtout dans le cas de bétonnage par temps froid.

Ainsi les chercheurs trouvent que l'addition du laitier favorise l'augmentation de la quantité totale et le taux de ressuage dans le béton, quel que soit le type du laitier. Ceci peut être expliqué par la faible absorptivité des particules de laitier et le retard de prise dans le béton.

II-7- Comportement mécanique des ciments au laitier

Comme tous les ciments. Comportement mécanique des ciments au laitier est le influencé par plusieurs facteurs tels chimique, la finesse de mouture, les que: la composition conditions de cure et la nature et la concentration de l'activant.

II-8- Influence de la composition chimique

Les caractéristiques physico-mécaniques des matériaux sont le reflet de la composition chimique. L'influence de cette composition sur la réactivité des ciments au laitier et par conséquent, sur leur comportement mécanique est très complexe

Les oxydes (Al_2O_3) et (CaO) augmentent l'activité hydraulique du laitier, tandis que la (SiO_2) la fait diminuer. Pour avoir une bonne hydraulité a fait que le rapport (CaO/SiO_2) soit autour de 1.3. Avec les rapports (SiO_2/Al_2O_3) et (CaO/Al_2O_3) autour de 3.

L'augmentation du (MgO) jusqu'à 18 est favorable contrairement au ciment Portland, il n'y a pas de risque de gonflement engendré par le (MgO) libre pendant l'hydratation. La teneur en (Fe_2O_3) n'a pas d'effet considérable sur la qualité du laitier; tandis que les oxydes de titane, de protoxyde et de manganèse doivent être limités.

Une faible quantité de sulfures de calcium jusqu'à 7 i accroît quelque fois la réactivité du laitier.

Une grande attention alors, a été donnée à la relation entre la composition chimique du laitier et la réactivité, et plusieurs formules sont développées afin d'obtenir une composition favorable du laitier.

II-9- Influence de la porosité de la pâte du ciment

La porosité de la pâte du ciment durcie est due essentiellement à la présence d'une quantité d'eau. Après durcissement du ciment, le reste de l'espace occupé par l'eau dans la pâte fraîche devient des pores. Ces pores sont classés en [25]:

- pores capillaires qui dépendent de la proportion de l'eau de gâchage par rapport au ciment (E/C) et du degré de l'hydratation;
- pores de gel (produits de l'hydratation).

Le volume de ces pores a un effet inverse sur la résistance mécanique du ciment: plus ce volume augmente, plus la résistance diminue. Cela est dû à la création de discontinuité dans la matière, qui engendre une concentration des contraintes dans des points singuliers et par suite la rupture de l'éprouvette ou de l'élément structurale, avant l'atteinte de la résistance mécanique réelle du ciment.

Les ciments de laitier ont une forte compacité grâce aux hydrates formés par l'hydratation du laitier, ce qui donne des pores de dimensions plus petites

II-10- Influence de la finesse de mouture (surface spécifique)

La finesse du ciment joue un rôle essentiel dans la compacité du béton est par conséquent, de sa résistance mécanique. Une finesse élevée assure dans le développement un contact grand des grains de ciment, ce qui permet une forte réactivité et donne des plus résistances mécaniques élevées à long terme [26]

D'après, (Nacéri, 2005), en augmentant de la surface spécifique du laitier de 2/g à 4800 cm²/g. l'activité du ciment au laitier augmente et par suite la résistance mécanique augmente aussi [26]

Ainsi, la faible aptitude du laitier à développer une bonne résistance au jeune âge peut être compensée par l'augmentation de finesse (activation mécanique) [27].

II-11- Influence de la concentration de l'activant

L'augmentation de la concentration des activant alcalins influe positivement sur la résistance mécanique du ciment au laitier [27], est de même pour l'activation sulfatique avec le gypse. D'après Puertas et al. (2000), dans le cas de la soude(NaOH) la résistance à la compression de la pâte de ciment (100% laitier) est plus de 35 MPa à 28 jours, pour une concentration de 2 mol/l, et supérieure à 50 MPa, pour une concentration de 10 mol/l [24]

II-12- Influence de la température de cure

Les ciments au laitier supportent bien l'étuvage(accélération de durcissement); la combinaison de l'activant et de l'étuvage(surtout pour les cycles moyens et longs) , améliore nettement la résistance mécanique ,Cependant, cette augmentation de température de cure a un effet positif sur le développement de la résistance au jeune et moyen âges ; mais à long terme, pour un ciment durci dans une température normale, la résistance est égale ou supérieure à celle qui est pour un ciment traité thermiquement[24].

CHAPITRE III
CARACTERISTIQUE
DE MATERIAUX
ET ESSAIS UTILISE

Chapitre III : Caractéristique des matériaux et les essais utilisé

Ce chapitre est consacré à la caractérisation des matières premières, la méthode de formulation des ciments et mortier et description des essais utilisés.

III-1 Matières Premières

Les Principaux composants des ciments élaborés sont :

- ❖ Laitier.
- ❖ Clinker.
- ❖ Gypse.
- ❖ Calcaire

III-1-1- Laitier

Le laitier utilisé dans notre étude expérimentale comme ajout est récolté de la société ARCELOR METALE ANNABA.

Les défèrent pourcentage de laitier utilisé (0%, 10% ,20%, 25% ,35%).

III-1-1-1 Composition chimique de laitier

La composition chimique est indiquée dans le Tableau (III-1).Elle a été déterminée par l'essai de Spectrométrie à Fluorescence aux rayons X au laboratoire de la cimenterie de Lafarge hammam dalaà.

L'analyse s'effectue sur un échantillon finement broyé, afin de déterminer sa composition chimique.

Elément	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	CL	P.F
Laitier	39,5	38,11	8,32	1,97	4,01	1,49	0,77	0	0,02	0

Tableau III-1 Composition chimique de laitier

III-1-2-Le clinker

La composition chimique en oxydes du cru détermine la composition minéralogique du clinker, donc on doit apporter un grand soin aux matières introduites dans le four pour obtenir un taux élevé de C₃S.

Les matières premières utilisées pour la fabrication du clinker de la cimenterie de Hammam Dalaà et les caractéristiques physiques sont indiquées dans le Tableau (III-2).

Clinker	Clinker de Hammam Dalaâ
Ingédient du clinker	Calcaire
	Argile
	Sable de dune (Boussaâda)
	Minerai de fer
Densité apparente	1,32
Dureté	37

Tableau III-2 -Principaux constituants du cru de clinker.

III-1-2-1 Composition chimique et minéralogique du clinker

Les compositions chimique et minéralogique du clinker utilisé sont présentées dans le Tableaux (III-3).

L'analyse chimique a été effectuée au laboratoire de la cimenterie Lafarge (Hammam Dalaâ).

Éléments (%)	Clinker	Éléments (%)	Clinker
SiO ₂	21,11	Na ₂ O	0,10
Al ₂ O ₃	5,05	Chaux libre	1,08
Fe ₂ O ₃	3,37	C ₃ S	59,18
CaO	66,15	C ₂ S	16,99
MgO	1,68	C ₃ A	6,94
SO ₃	0,85	C ₄ AF	11,58
K ₂ O	0,60		

Tableau III-3 Composition chimique et minéralogique du clinker

III-1-2-2 Modules caractéristiques du clinker

Modules caractéristiques	M _h	M _s	M _{af}	M _{sat}
Clinker Lafarge Hammam Dalaâ	2,18	2,42	1,33	0,943

Tableau III-4- Modules caractéristiques du clinker.

Module hydraulique (Mh), compris entre 1,7 et 2,3

➤ $M_h = \text{CaO} / \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3$

Module silicique (Ms), compris entre 2 et 3

➤ $M_s = \text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$

Module alumino-ferrique (Maf), compris entre 1,5 et 2,5

➤ $M_{af} = \text{Al}_2\text{O}_3 / \text{Fe}_2\text{O}_3$

Le degré de saturation en chaux (Msat), compris entre 0,90 et 0,95

➤ $M_{sat} = \text{CaO} / (2.8\text{SiO}_2 + 1.18\text{Al}_2\text{O}_3 + 0.65\text{Fe}_2\text{O}_3)$

III-1-3 Le gypse

III-1-3-1 Composition chimique

Le dosage du gypse naturel (sulfate de calcium déshydraté, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) 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.

Les compositions chimiques du gypse sont données par le tableau (III-5).

Eléments(%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	P.F	CL
Gypse de Biskra	3.26	0.82	0,39	30,66	2,99	36,4	0,13	0.00	24,10	0,01

Tableau III-5 -Composition chimique du gypse.

Le rôle principal de gypse

- ✓ Contribue la résistance à 02 jours
- ✓ Régulateur de prise.
- ✓ Aide de broyage de ciment.

III-1-4- Le calcaire

Le calcaire utilisé dans les essais est celui employé comme matière première dans la fabrication du ciment. L'analyse chimique du calcaire est donnée dans le tableau (III.6).

Les défèrent pourcentage de calcaire utilisé (0%, 10% ,20% ,25% ,35%)

III-1-4-1 Composition chimique de calcaire

Elément	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	CL	P.F
Calcaire	49.10	5.29	2.15	1.43	1.01	0.35	0.31	0.00	0.012	40.1

Tableau III-6- Composition chimique du calcaire.

III-2 - Formulation des Ciments

III-2-1 Composition pondérale des différents ciments

Les différents ingrédients (Clinker, Calcaire, laitier et Gypse) ont été concassés séparée à une dimension inférieure à 100um, Puis mélangés soigneusement différentes proportions (Tableau III-6)

On note l'identification des échantillons

- ❖ CEM 1 : CPA (Témoin)
- ❖ CEM 2 : CEM II/A-M (10% Laitier et 20% Calcaire)
- ❖ CEM 3 : CEM II/A-M (20%Laitier et 10% Calcaire)
- ❖ CEM4 : CEMII/ B-M (25%Laitier et 35% Calcaire)
- ❖ CEM5 : CEMII/ B-M (35%Laitier et 25%Calcaire)

Types de ciments	Clinker(%)	Gypse (%)	Laitier(%)	Calcaire(%)
CEM1	95	5	0	0
CEM2	65	5	10	20
CEM3	65	5	20	10
CEM4	35	5	25	35
CEM5	35	5	35	25

Tableau III-7- Compositions pondérales des Cinque (05) ciments préparés.

III-2-2 Analyses chimiques des différents ciments préparés

Les résultats de la composition chimique des sept (05) ciments préparés sont présentés dans le Tableau (III-7).

L'ajout laitier-calcaire substitué à divers pourcentages (0% ,10% ,20% ,25% ,35%). Dans cette étude, nous avons fait varier le pourcentage de l'ajout laitier et de calcaire dans le ciment par la méthode de substitution (remplacement partiel du clinker par laitier et calcaire afin d'étudier son effet sur les propriétés physico-chimiques du ciment confectionné avec l'addition minérale et le comportement mécanique du mortier.

Les propriétés physico-chimiques du ciment à l'état anhydre et l'état hydraté (composition chimique, temps de broyage, poids spécifique, finesse, distribution des particules, consistance des pâtes de ciment et temps de prise), ainsi que les caractéristiques des mortiers préparés à leurs bases, telles que, le retrait, le gonflement, le comportement mécanique (résistances mécaniques à la compression et à la flexion) et la microstructure du mortier ont été étudiées.

L'incorporation des additions laitières et de calcaire dans le clinker à différents pourcentages :

CODE	CEM 1	CEM 2	CEM 3	CEM 4	CEM 5
SiO ₂	20,24	21	20	20	22
Al ₂ O ₃	4,95	4,74	5,38	6,33	7,75
Fe ₂ O ₃	3,4	2,84	2,97	2,55	2
CaO	62,32	55,21	55	52	50,3
MgO	2,11	2,44	1,91	1,88	3,95
SO ₃	3,02	2,48	2,63	2,66	2,25
K ₂ O	0,69	0,54	0,59	0,57	0,54
Na ₂ O	0,11	0,13	0,11	0,11	0,25
Cl	0,018	0,016	0,018	0,018	0,058
LOI	1,65	9,15	14	14,33	11,05

Tableau III-8- Composition chimique des ciments préparés.

La composition chimique est un facteur déterminant de la résistance des ciments aux agents agressifs. On voit que le pourcentage en teneur d'anhydride sulfurique (SO₃) est inférieur à 4%. Ceci est conforme à la norme NF EN 197-1

III-3 Formulation des mortiers normalisés

Le mortier est constitué par le mélange suivant :

- ✓ 1350 g sable normalisé (Norme EN 196-1).
- ✓ 450 g du ciment.
- ✓ 225 g l'eau de gâchage

III-3-1 L'eau de gâchage

L'eau utilisée pour la confection des mortiers est une eau distillée préparé au laboratoire de la cimenterie (Lafarge M' sila).



Figure III-1 Distillateur (Lafarge laboratoire)

III-4- Mesures expérimentales**III-4-1 Essai sur ciment anhydre*****III-4-1-1 Masse volumique absolue***

Il s'agit de déterminer la masse volumique absolue des sept (05) types de ciments utilisés dans notre étude.

La technique expérimentale utilisée est celle de l'appareil appelé "le Densimètre de Le Chatelier". Les résultats sont présentés dans le Tableau (III-8).

Conduite de l'essai

- ✓ Peser 64 g de ciment.
- ✓ Introduire le benzène ou kérosène (liquide non réactif avec le ciment) jusqu'à la graduation inférieure trait marqué 0 soit V_0 .
- ✓ Placer le densimètre dans un bain thermostatique à température constante ($20 \pm 2^\circ\text{C}$).
- ✓ Attendre 20 minutes et corrigé le niveau si nécessaire après stabilisation de la température.
- ✓ Introduire la poudre de ciment dans le Densimètre.
- ✓ Agité doucement en faisant tourner le densimètre pour chasser l'air entraîné par la poudre.
- ✓ Remettre le densimètre dans le bain thermostatique.
- ✓ Après stabilisation du niveau lire le volume après introduction du ciment dans le densimètre soit V_1 .

Calcul de la masse volumique absolue par la relation : $\gamma_C = M / (V_1 - V_0)$

Type des ciments	CEM 1	CEM 2	CEM 3	CEM 4	CEM 5
Masse volumique (g/cm ³)	3.17	3.10	3.05	2,98	2,92

Tableau III-9- Masse volumique absolue des ciments.

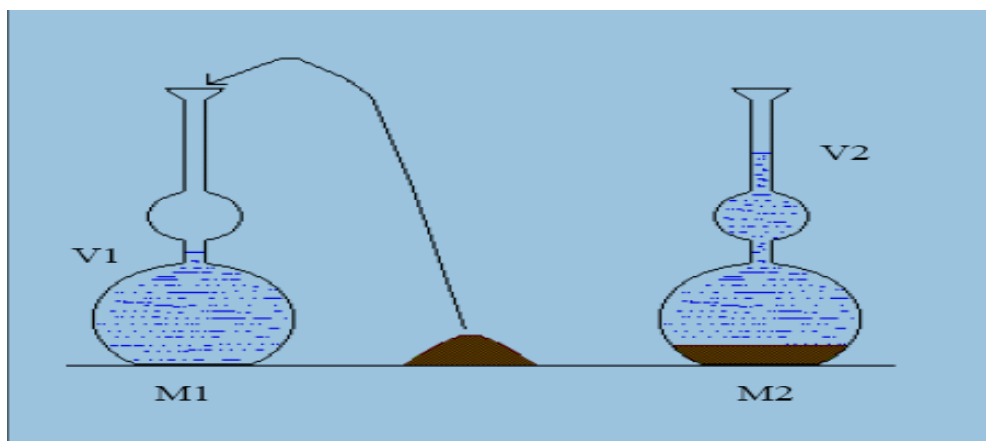


Figure III-2- Flasque Le Chatelier.

III-4-1-2 Mesure de la finesse du ciment (Norme NF P 15-442 -EN-196-6)

Principe de l'essai

Elle consiste à mesurer le temps mis par une quantité fixée d'air pour traverser un lit de ciment compacté à une dimension et une porosité spécifiées. (Figure III-6). La surface massique est proportionnelle au temps mis pour traverser la couche de ciment.

Conduite de l'essai

- ✓ Peser une quantité de ciment pour obtenir un lit de ciment de porosité $e = 0.500$. Mettre la poudre de ciment dans la cellule puis compacter à l'aide du piston. Placer la surface conique de la cellule dans le rodage conique au sommet du manomètre
 - ✓ Obturer le dessus du cylindre avec bouchon adéquat. Ouvrir le robinet d'arrêt en amenant le niveau du liquide à la première ligne.
 - ✓ Fermer le robinet d'arrêt et enlever le bouchon du cylindre.
 - ✓ Démarrer le chronomètre dès que le liquide atteint la deuxième ligne.
 - ✓ Arrêter le chronomètre dès que le liquide atteint le troisième repère.
 - ✓ Relever le temps à 0.2s près et la température à 1°C près.
- Calculer la surface spécifique du ciment par la formule.

$$SSB = \frac{k \times \sqrt{t} \times \sqrt{e^3}}{\rho \times (1 - e) \times \sqrt{0.1\eta}} \left(\frac{cm^2}{g} \right)$$

Avec :

K : constante de l'appareil (K= 2.106).

ρ : Masse volumique du ciment en g/cm^3 .

η : Viscosité de l'air à la température de l'essai en poise.

t : Temps de passage de l'air dans la couche de la poudre de ciment en seconde.

m : est la masse à introduire dans la cellule de l'appareil Blaine.

m= $\rho \cdot v \cdot e$

v = 1.848 volume de la cellule.

e = porosité du ciment dans la cellule.



Densimètre manuel



Densimètre automatique

Figure III-3 Le Densimètre de Le Chatelier.

Type de ciment	CEM1	CEM2	CEM3	CEM4	CEM5
SSB (cm ² /g)	3800	4300	4150	4380	4050

Tableau III-10- SSB de défèrent ciment préparé.

III-4-1-3 Analyse granulométrique (Méthode alpine)

L'objet

Ce mode opératoire a pour but de décrire le mode d'emploi d'utilisation de la tamiseuse ALPINE référencé M0212.

Nous allons décrire l'appareil et les étapes pour procéder à un tamisage de produits et nous préciserons les consignes à respecter.

Domaine d'application

Le tamis à air ALPINE est un appareil utilisé pour effectuer des tamisages à secs très fins, sans manipulation de la matière.



Figure III-4 Tamiseuse Alpine (Laboratoire de Lafarge M'sila)

Mode opératoire**Appareillage****Description**

Le tamis à air ALPINE fonctionne sans aucun mouvement mécanique du tamis ou des autres parties en contact avec la matière, mais simplement par courant d'air.

Il consiste dans l'utilisation contrôlée du courant d'air, pour disperser la matière, entraîner le fin (les fines) à travers les mailles du tamis, nettoyer le tamis.

L'ensemble de l'appareil comprend :

- ✓ le tamis Alpine avec manomètre en U.
- ✓ le ventilateur.
- ✓ le dépoussiéreur (filtre).
- ✓ le tambour tamisant.
- ✓ un filtre pour recueillir les fines (éventuellement)
- ✓ deux tamis : 45 μ m, 90 μ m.

Détermination du rejet en utilisant un seul tamis :

Voici les étapes à suivre :

- ✓ faire sécher la matière à tamiser si nécessaire.
- ✓ placer le tamis à utiliser sur le bâti.
- ✓ peser 10g de matière et vider sur le tamis.
- ✓ mettre en place le couvercle en plexiglas.
- ✓ brancher l'appareil en tournant vers la droite le bouton de la minuterie jusqu'à la butée fixée d'avance sur 5 min avec le bouton mollette.
- ✓ mettre en route l'aspiration.

La minuterie étant branchée, la lance fendue commence à tourner, le ventilateur et l'aspiration de poussière démarrent, le tamisage commence. A travers le plexiglas, on peut observer directement le tamisage.

Si au début de l'opération, une partie de la matière se colle au couvercle, il faut la décoller, aussi longtemps que nécessaire, en donnant toutes les 10 secondes environ quelques coups sur le bouton du couvercle avec le marteau en matière plastique.

Par la suite, la matière grossière soulevée par le courant d'air nettoie elle-même le couvercle. L'ouverture d'aspiration dans le talon du bâti du tamis doit être absolument libre. On peut tirer le couvercle pour un court instant afin d'écraser des grumeaux éventuels. Du fait de l'aspiration, il ne se produit pas de perte de matière. Lorsque les 5 minutes sont écoulées, l'appareil s'arrête automatiquement. Couper alors l'aspiration. Peser la matière restant sur le tamis. Soit **P** le poids trouvé en grammes.

Rejet = $P \times 10$ (%). (Voir Tableau III-11)

Taille (μm)	Rejet (%)				
	CEM1	CEM2	CEM3	CEM4	CEM5
45	14.5	12.5	13.5	11.20	11.50
90	1.2	1.1	1.3	1.1	1
SSB (cm^2/g)	4800	4300	4150	4380	4050

Tableau III-11- Caractéristiques de la granulométrie (Refus 45 & 90 μm) des différents ciments.

III-4-2 Essais sur ciment hydraté (pâtes de ciment)

III-4-2-1 Essai De Consistance (Norme EN 196-3 2005)

L'essai consiste à déterminer la quantité d'eau de gâchage optimale qui définit une consistance dite normalisée elle est fonction du rapport E/C.

L'essai a été réalisé avec l'appareil de Vicat selon la norme EN 196-3 (Figures III-5).

Objectif de l'essai :

La consistance de la pâte de ciment est une caractéristique qui évolue au cours du temps. Pour pouvoir apprécier cette évolution qui est fonction de la teneur en ajout (calcaire) dans le ciment et la quantité d'eau de gâchage ; il faut partir d'une consistance qui soit la même pour toutes les pâtes étudiées.

Principe de l'essai

La consistance est évaluée en mesurant l'enfoncement d'une aiguille cylindrique de ($\varnothing = 10\text{mm}$) sous l'effet d'une charge constante (300g). L'enfoncement est d'autant plus rapide et important que la consistance est plus fluide. (Figure III-5).

Conduite de l'essai

- Verser la quantité d'eau dans la cuve du malaxeur .La température dans la salle doit être
- de $20 \pm 2^\circ\text{C}$ et une humidité relative supérieure ou égale à 50%.

- Verser 500 g de ciment au centre de la cuve en un temps compris entre 5 et 10 secondes.
- La fin du versement correspond au temps 0.
- Mettre immédiatement le malaxeur en marche à vitesse lente pendant 90 s.
- Arrêt du malaxage pendant 30 s, faire le raclage de la pâte.
- Remettre le malaxeur en marche pendant 90s à vitesse lente.
- Introduire la pâte immédiatement dans le moule tronconique de hauteur 40mm et de diamètre 70 et 80 mm posé sur une plaque en verre huilée sans tassement ni vibration excessives.
- Enlever l'excès de la pâte par un mouvement de va et vient avec une truelle maintenue perpendiculairement à la surface du moule.
- Placer l'ensemble sur la platine de l'appareil de Vicat.
- La sonde de diamètre $\varnothing = 10$ mm est amenée à la surface de la pâte et lâchée sans vitesse initiale. La sonde s'enfonce dans la pâte. Quand elle s'immobilise ; ou au plus tard 30s après l'avoir relâchée.
- Mesurer la distance d entre l'extrémité de la sonde et le fond du moule, cette distance d caractérise la consistance. Si $d = 6\text{mm} \pm 2$; c'est la consistance normalisée Si d est différente de cette valeur, on refait l'essai avec un nouveau rapport E/C jusqu'à l'obtention de la valeur recherchée.

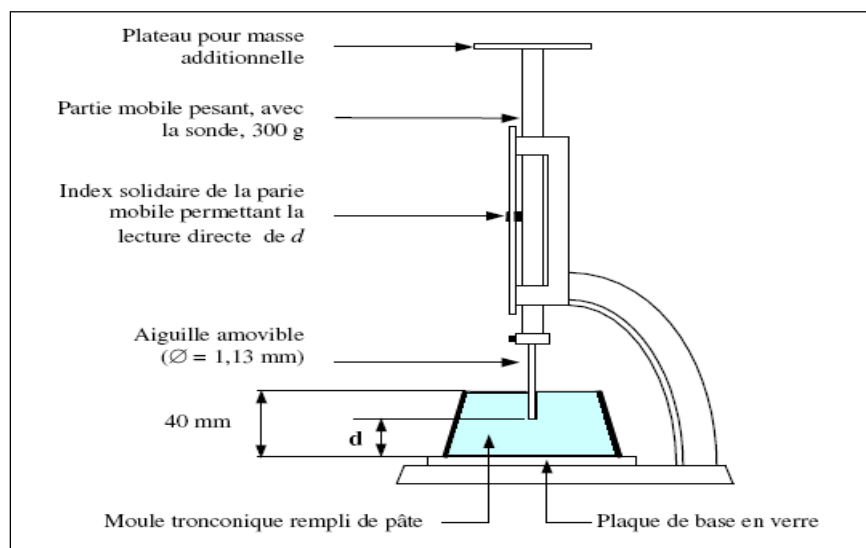


Figure III-5- Appareil de Vicat manuel.

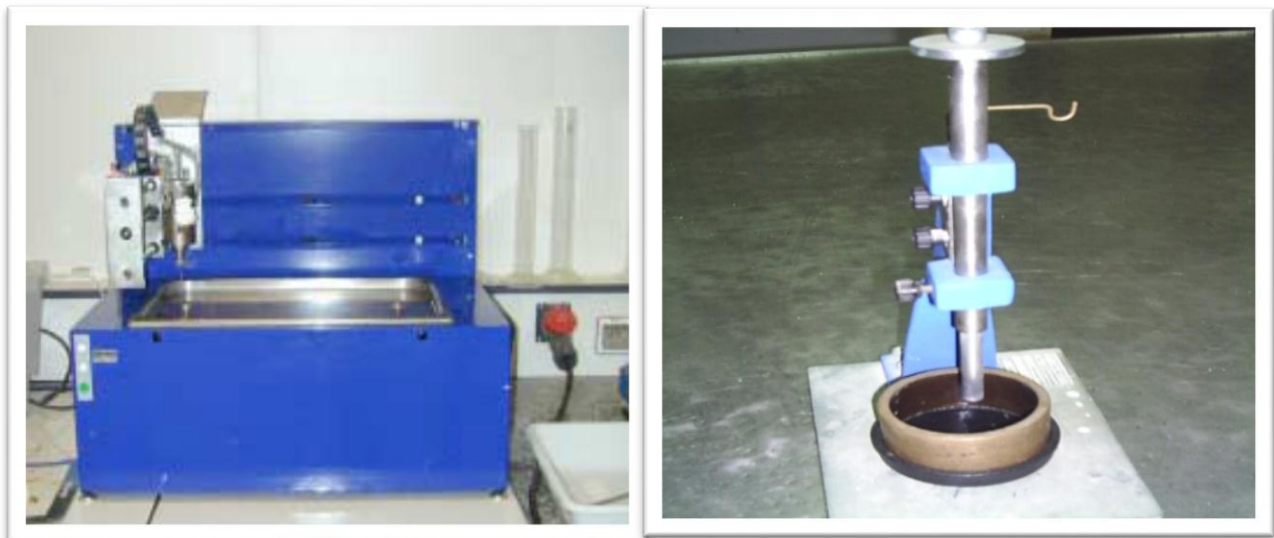
III-4-2-2 Essai de Prise

Objectif de l'essai

Il consiste à déterminer le début et la fin de prise des pâtes pures des ciments étudiées conformément à la norme EN 196-3.

Principe de l'essai

L'essai consiste à suivre l'évolution de la viscosité de la pâte en utilisant l'appareil de Vicat manuel ou automatique. (Figure III-6)



Prisomètre (Vicat automatique).

Vicat Manuel

Figure III-6- L'appareil de Vicat

Le Vicat manuel équipée d'une aiguille de 1.13mm de diamètre ; sous l'effet d'une charge de 300g l'aiguille s'enfonce à une distance d du fond du moule. Si $d = 6\text{mm} \pm 3$ On dit que c'est le début de prise, le temps est mesuré à partir du temps 0 du début de malaxage. Si l'enfoncement de l'aiguille dans la pâte vaut $d = 0.5\text{mm}$. On dit que c'est la fin de prise, alors la pâte devient un bloc rigide.

Equipement utilisé

Une armoire climatique maintenue à $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ et une humidité relative supérieure à 90% et l'appareil de Vicat équipé d'une aiguille de 1.13mm.

Conduite de l'essai (Norme EN 196-3)

Il s'agit de confectionner une pâte de ciment normalisée comme indiqué au III-5-2-1. Le temps zéro est celui où le ciment a fini d'être ajouté à l'eau dans la cuve du malaxeur. L'aiguille est amenée à la surface de l'échantillon et relâchée sans vitesse initiale. Lorsqu'elle s'immobilise (ou après 30s d'attente).

On relève la distance d séparant l'extrémité de l'aiguille à la plaque de base.

On recommence l'opération à intervalle de temps convenablement espacés jusqu'à ce que $d = (6 \pm 3)$ mm cet instant mesuré à 5 mn près correspond au temps de début de prise.

On continue l'opération on faisant tourner le moule sur l'autre face le temps de fin de prise correspond à l'enfoncement de l'aiguille dans la pâte que de 0.5mm pour la première fois.

III-4-2-3 Essai de stabilité

Objectif de l'essai

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

Principe de l'essai

L'essai consiste à faire accélérer la réaction d'hydratation par un traitement thermique de la pâte pour pouvoir observer une expansion éventuelle des cinq types de ciment testé.

Equipement nécessaire

Une armoire humide maintenue à une température de $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ et au moins 90% d'humidité relative.

Une bouilloire dans laquelle les éprouvettes sont immergées et la température de l'eau est portée de $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ jusqu'à ébullition en $3\text{h} \pm 5\text{mn}$ Deux moules en laiton élastique appelés "appareil le Chatelier".

Ces moules sont fondus de façon à pouvoir s'ouvrir en cas d'augmentation de volume de la pâte.

Conduite de l'essai

La pâte de consistance normalisée (voir paragraphe III-5-2-1) est introduite dans les deux moules en laiton.

Conservation des moules pendant 24h dans l'armoire humide.

Au bout de ce temps on mesure à 0.5mm près l'écartement **A** des pointes des aiguilles, Le moule est entreposé dans la bouilloire pendant $3\text{h} \pm 5\text{mn}$ à une température d'ébullition. Soit **B** l'écartement au bout de ce temps des pointes des aiguilles et soit **C** l'écartement après refroidissement à 20°C La stabilité est caractérisé par la valeur C-A

Stabilité = C-A

Expansion = B-A

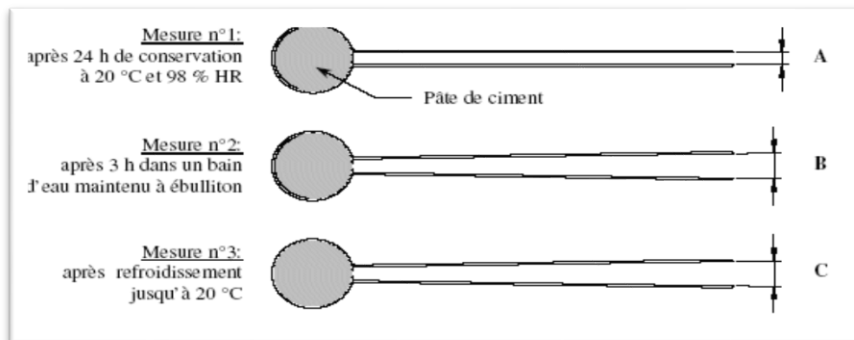
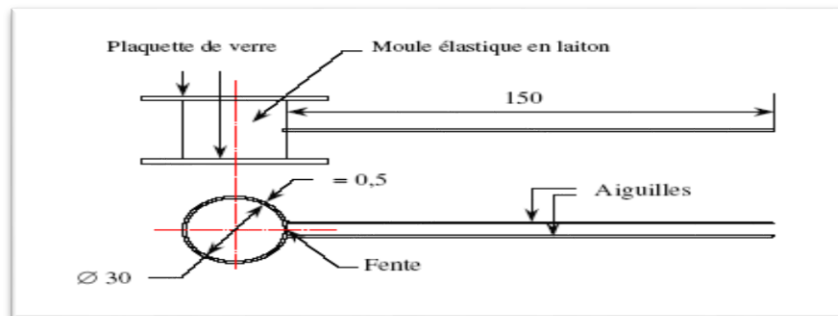


Figure III-7 les Aiguillé de Chatelier



Figure III-8- Le bouilloire de Chatelier.

III-4-3 Essai sur Mortier

III-4-3-1 Mortier normalisé

Dans le but de confirmer l'évolution des résistances mécaniques, Des éprouvettes contenant un mélange ciment Portland et calcaire ont été coulés selon la norme EN 196-3 et EN 196-1.

L'incorporation de Laitier dans les ciments permet une meilleure hydratation des anhydres. Nous avons choisi un taux de substitution du ciment Portland de (10%, 20%, 25%, 35%) selon la norme EN 196-1 NFP18-508.

Type de ciment	Constituant du Ciment (%)				Composition des mortiers		
	Clinker (%)	Gypse (%)	laitier (%)	Calcaire (%)	Ciment (g)	L'eau (ml)	Sable normalisé (g)
CEM1	95	5	0	0	450	225	1350
CEM2	65	5	10	20	450	225	1350
CEM3	65	5	20	10	450	225	1350
CEM4	35	5	25	35	450	225	1350
CEM5	35	5	35	25	450	225	1350

Tableau III-12- Composition des mortiers

III-4-3-2 Préparation des éprouvettes et déroulement des essais mécaniques

Les essais mécaniques ont été préparés des éprouvettes prismatiques de dimensions (4x4x16) cm³ selon la norme EN 196-1 dans un malaxeur semi-automatique.



Figure III-9-Malaxeur de mortier



Figure III-10-Eprouvette Prismatique (4x4x16) cm³

**Figure III-11- Table Vibrante****Figure III-12- Table à Choc**

Elles sont stockées dans leurs moules pendant 24 heures dans une chambre d'humidité de $20^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$ et une humidité de 90%.

**Figure III-13 -La Chambre d'humidité
(Laboratoire de Lafarge M'sila)**

Ensuite elles sont démoulées. Les éprouvettes prismatiques sont plongées sans retard dans des bains d'eau à régulation de température $20^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$.

**Figure III-14 -Bains d'eau (laboratoire de Lafarge M'sila)**

Avant d'effectuer les essais, les éprouvettes sont exposées à l'air libre pendant 20 minutes pour qu'elles acquièrent l'état normal d'humidité.

Les essais sont d'abord effectués en flexion sur une presse permettant d'appliquer des charges jusqu'à 10KN asservie en chargement de $50\text{N/s} \pm 10\text{N/s}$.

Les essais de compression sont effectués par une presse de type Perrier d'une charge de 200KN asservie en chargement de $2400\text{N/s} \pm 200\text{N/s}$. (Voir Figure III-15).

Les essais mécaniques ont lieu sur 4 éprouvettes et sont testés en flexion et en compression à 2,7, 28 jours.



**Figure III-15 -Machine de Compression
(Laboratoire de Lafarge M'sila)**

III-4-3-3 Mesure du Retrait sur éprouvette de mortier normal

Objectif de l'essai

L'essai consiste à suivre l'évolution des changements dimensionnels d'une éprouvette de mortier normal conservé à l'air pour le retrait et à l'eau pour le gonflement.

Donc le retrait est une réduction de longueur d'un échantillon provoqué par la dessiccation, le gonflement est une augmentation de longueur d'un échantillon provoqué par l'immersion dans l'eau. Trois prismes ($4 \times 4 \times 16\text{ cm}^3$) sont préparés pour chaque essai de retrait et de gonflement.

Principe de l'essai

Après le démoulage de l'éprouvette de dimension (4x4x16) cm³, on procède immédiatement à la mesure de sa longueur puis à 3,7 et 28 jours.

Équipement nécessaire utilisé

- ✓ Il est décrit dans la Norme NF P15-433.
- ✓ Une salle maintenue à une température de 20±2°C Un malaxeur normalisé.
- ✓ Des moules équipés de plots de retrait. (Figure III-17)



Figure III-16- Moules (4x4x16) cm³ Équipés de plots de Retrait

Les plots sont vissés au centre de chaque face carré du moule au moment de la mise en place du mortier, puis désolidarisés du moule avant le démoulage.

Un dilatomètre équipé d'un comparateur permettant de réaliser des mesures avec une précision inférieure ou égale à 5 µm.

Une tige de 160mm de longueur en invar (insensible aux variations de température pendant la manipulation) pour permettre de régler le zéro du dilatomètre.



**Figure III-17 -Comparateur de Retrait
(Laboratoire de Lafarge M'sila)**

Conduite de L'essai

Régler le comparateur à zéro juste au moment du démoulage de l'éprouvette sur la tige en invar de 160 mm de longueur, soit L_0 la mesure de l'éprouvette.

Soit $dl(t)$ la valeur lue sur le comparateur au temps t (3, 7 et 28 jours), la longueur de l'éprouvette est :

$$L(t) = L_0 + dl(t).$$

La variation de longueur au temps t (3, 7 et 28 jours) est :

$$\Delta l(t) = L(t) - L_0 = dl(t) - dl(t_0)$$

La variation relative de la longueur est :

$\varepsilon(t) = \Delta l(t)/L_0 = [dl(t) - dl(t_0)]/L_0$, $\Delta l(t)$ est la moyenne des trois éprouvettes issus de la même confection du mortier.

- Si les éprouvettes sont conservées dans l'air, $\Delta l(t)$ est négatif et on parle de retrait.
- Si les éprouvettes sont conservées dans l'eau, $\Delta l(t)$ est positif et on parle de gonflement.

III-4-3-4 Mesure de La Maniabilité de Mortier

But de l'essai

Il s'agit de déterminer le temps d'écoulement des mortiers, c'est à dire de définir la maniabilité des mortiers.

Cette mesure de maniabilité permet :

- d'apprécier la facilité de mise en place dans les ouvrages et de déterminer les quantités d'eau nécessaires.
- d'affiner les compositions de mortier en recherchant la maniabilité maximale pour des teneurs en eau et en ciment données.
- d'évaluer l'efficacité de certains adjuvants, plastifiants réducteurs d'eau en particulier.

- de vérifier sur chantier que la valeur limite définie pour le béton lors de l'étude est bien respectée.

Matériel

La maniabilité existe en appareil type B : pour $D \leq 12,5$ mm.

Le moule : Il repose sur le sol par 4 amortisseurs caoutchoucs.

La cloison amovible : Elle sépare le moule en deux parties. Elle coulisse verticalement dans des glissières fixées sur la face externe du moule.

Le vibreur Electrique : à moteur asynchrone, fixé sur la face extérieure du moule.
La tige de piquage : Métallique, de 6 mm de diamètre, pesant 200 g, terminée par

Une calotte hémisphérique. Elle est utilisée lors du remplissage du moule.

Mode opératoire

- Prélever 1 litre de mortier.
- Remplir le grand compartiment en 4 couches et piquer chaque couche de 6 coups de la tige de piquage, la tige étant tenue parallèlement à la paroi inclinée de la cloison amovible.
- Araser la surface libre à la règle.

Expression des résultats :

- Le temps réel entre la fin du malaxage et le début de l'écoulement sous vibration doit être de 2,50 min.
- Enlever la cloison amovible (le vibreur se met en marche) et déclencher le chronomètre.
- Arrêter le chronomètre lorsque le niveau du mortier atteint le trait - repère de l'appareil.
- Le résultat de la mesure est le temps t mis par le mortier pour arriver au trait – repère.



Figure III-18- Maniabilité à Mortier (Laboratoire de Lafarge M'sila).

III-4-3-5 La Chaleur d'hydratation (La méthode semi-adiabatique)**- Principe**

La méthode semi-adiabatique consiste à introduire un échantillon de mortier fraîchement préparé, dans un calorimètre afin de déterminer, d'après l'évolution de la température, la quantité de chaleur dégagée. À une échéance donnée, la chaleur d'hydratation du ciment contenu dans l'échantillon est égale à la somme de la chaleur accumulée dans le calorimètre et de la chaleur dissipée vers le milieu ambiant pendant toute la durée de l'essai.

L'échauffement du mortier est comparé à la température d'un échantillon inerte dans un calorimètre de référence.

L'échauffement qui dépend principalement des caractéristiques du ciment est généralement compris entre 10 K et 50 K.

- Appareillage**1- Calorimètre**

Constitué d'un vase isotherme fermé par un bouchon isolant et placé dans une enveloppe rigide qui lui sert de support.

La construction et les caractéristiques du calorimètre utilisé pour l'essai et de celui utilisé comme référence doivent être les suivantes :

a) un vase isotherme

- ✓ (Par exemple un vase Dewar), fait en verre borosilicate plaqué à l'argent ; de forme cylindrique avec un fond hémisphérique.
- ✓ Ses dimensions intérieures doivent être d'environ 95 mm de diamètre et 280 mm de profondeur ; avec un diamètre extérieur de 120 mm environ.
- ✓ Un disque de caoutchouc d'environ 85 mm de diamètre et 20 mm d'épaisseur, doit être placé au fond du vase afin de servir d'appui au récipient contenant l'échantillon et de répartir uniformément la charge sur la paroi du vase.

b) une enveloppe très rigide

- ✓ Dont la base est suffisamment large pour assurer une bonne stabilité à l'ensemble (en duralumin de 3 mm d'épaisseur, par exemple).
- ✓ Le vase doit être séparé de la paroi latérale de l'enveloppe par un espace d'air de 5 mm environ et doit reposer sur un appui de 40 mm à 50 mm d'épaisseur, en matériau de faible conductibilité thermique (polystyrène expansé, par exemple).
- ✓ Le bord supérieur du vase doit être protégé par un joint de caoutchouc placé à son contact.
- ✓ Ce joint doit être un anneau, épais d'au moins 5 mm, en matériau de faible conductibilité thermique, fixé à l'enveloppe du calorimètre.

- ✓ L'anneau doit servir à positionner le vase et à fournir une surface d'appui sur le bouchon afin d'assurer l'étanchéité du dispositif de fermeture.

c) Un bouchon isolant

Constitué de trois parties :

- la partie inférieure,

Plongeant dans le vase et dont le rôle est de limiter au maximum les pertes de chaleur vers le milieu extérieur. Elle doit être de forme cylindrique, de diamètre égal au diamètre intérieur du vase et d'une épaisseur de 50 mm environ. Elle doit être réalisée en polystyrène expansé (classe 20 kg/m³ environ) ou en un autre matériau de caractéristiques thermiques similaires. Sa base peut être protégée par une plaque de plastique (par exemple, en polyméthylméthacrylate), de 2 mm d'épaisseur environ.

- la partie centrale, qui sert à assurer l'étanchéité du calorimètre tout en contribuant à la réduction des pertes de chaleur, doit être composée d'un disque de caoutchouc mousse de 120 mm de diamètre.

- la partie supérieure, qui a pour but d'assurer la mise en place correcte et constante du bouchon sur le vase Dewar doit être constituée d'une enveloppe rigide contenant un dispositif de fermeture rapide de manière à comprimer la partie centrale en caoutchouc mousse pour assurer l'étanchéité du bouchon.

d) caractéristiques de performance

Le coefficient de déperdition thermique totale du calorimètre ne doit pas dépasser 100 J.h-1.K-1 pour un échauffement de 20 K.

Le ré-étalonnage est nécessaire :

- au moins tous les quatre ans ou après 200 essais ;
- en cas de détérioration du calorimètre ou d'un composant isolant.

Afin d'éviter de dégrader l'isolation du calorimètre, la température du mortier soumis à l'essai ne doit pas dépasser 75 °C.

2- Calorimètre de référence

- De même construction et caractéristiques que le calorimètre d'essai.
- Il doit comporter une boîte à mortier contenant un échantillon de mortier gâché au moins 12 mois auparavant (et considéré comme inerte).

3. Thermomètres à résistance de platine

Pour le calorimètre de référence et chaque calorimètre d'essai, dont la graduation doit couvrir, au moins, l'échelle de 19 °C à 75 °C. Si les conducteurs de la résistance électrique

Sont en cuivre, ils ne doivent pas avoir, dans la partie qui traverse le bouchon, une section supérieure à 0,25 mm².

S'ils sont en un autre métal, la résistance thermique totale par centimètre de conducteur doit être supérieure à 0,10 K.mW⁻¹ (résistance thermique équivalant à celle d'un conducteur en cuivre de 0,25 mm² de section et de 1 cm de longueur).

La puissance calorifique dissipée par le thermomètre ne doit pas dépasser 3 MW. L'alimentation en courant continu, qui constitue un apport d'énergie, doit être évitée si la puissance calorifique dissipée excède 0,2 mW. Il est recommandé de s'assurer de la précision de l'ensemble du dispositif de mesure et d'enregistrement de la température.

La température de l'échantillon d'essai doit être mesurée avec une précision de ± 0,3 °C. Lorsque le calorimètre est étalonné *in situ* avec les conducteurs utilisés pour les essais de chaleur d'hydratation, la section totale des conducteurs sera au maximum de 0,80 mm² (quatre fils de 0,5 mm de diamètre), mais doit être telle que le coefficient de déperdition thermique du calorimètre soit inférieur à 100 J.h⁻¹.K⁻¹ pour un échauffement de 20 K.

La gaine de protection de ces conducteurs doit être fabriquée en matériau de faible conductibilité thermique.

4. Boîte à mortier

Consistant en un récipient cylindrique muni d'un couvercle, d'un volume d'environ 800 cm³, conçu pour contenir l'échantillon de mortier à essayer.

La boîte à mortier, perdue après chaque essai, doit être étanche à la vapeur d'eau. Ceci doit être vérifié pendant l'utilisation en pesant la boîte à mortier après chaque essai.

Elle doit être en fer-blanc contre-coude électriquement et avoir une épaisseur nominale de 0,3 mm, un diamètre d'environ 80 mm et une hauteur d'environ 165 mm. Sa hauteur doit réserver un espace libre d'environ 10 mm entre le sommet de la boîte à mortier et le bouchon.

Le couvercle de la boîte à mortier doit être muni, en son centre, d'un étui pour thermomètre en forme de tube cylindrique fermé à sa base.

Le diamètre intérieur de l'étui doit être légèrement supérieur à celui du thermomètre. Sa longueur doit être comprise entre 100 mm et 120 mm environ afin de lui permettre d'atteindre le cœur de l'échantillon.

5. Appareil d'enregistrement de la température

Capable d'enregistrer les mesures prises par chaque thermomètre.

6. Malaxeur à mortier :_Conforme à l'EN 196-1.**Détermination de la chaleur d'hydratation****Laboratoire**

La température du laboratoire où le mortier est gâché doit être maintenue à (20 ± 2) °C.

La salle d'essais où la calorimétrie a lieu doit être maintenue à une température de $(20,0 \pm 1,0)$ °C.

La température affichée par le calorimètre de référence doit être considérée comme étant la température ambiante et doit être maintenue à $\pm 0,5$ °C.

La distance entre chacun des calorimètres doit être d'environ 12 cm. La vitesse de l'air de ventilation autour des calorimètres doit être inférieure à 0,5 m.s-1.

Lorsque plusieurs essais sont effectués simultanément, on doit compter au moins un calorimètre de référence pour six calorimètres d'essai ; lorsque plusieurs calorimètres d'essai sont utilisés avec un calorimètre de référence, un agencement hexagonal doit être organisé avec le calorimètre de référence au centre.

Mode opératoire**a- Composition du mortier**

La composition du mortier doit être conforme à l'EN 196-1 et l'échantillon pour essai doit avoir une masse totale de $(1\ 575 \pm 1)$ g.

Chaque gâchée de mortier doit être constituée de $(360,0 \pm 0,5)$ g de ciment ; $(1\ 080 \pm 1)$ g de sable normalisé CEN conforme aux exigences de l'EN 196-1 et $(180,0 \pm 0,5)$ g d'eau distillée.

Comme il n'est pas possible de récupérer la totalité des matériaux versés dans le récipient du malaxeur, il convient que la gâchée de mortier soit légèrement supérieure à 1 575 g, les proportions en masse des divers constituants étant maintenues

b- Malaxage

Conserver le ciment, l'eau, le sable, la boîte à mortier, le récipient du malaxeur et les autres instruments en contact avec le mortier dans la salle d'essais.

Le malaxeur étant dans sa position de fonctionnement, verser le sable et ensuite le ciment dans le récipient du malaxeur ; homogénéiser le mélange de sable et de ciment pendant 30 s à petite vitesse ; verser l'eau, consigner le temps, et malaxer immédiatement à petite vitesse pendant 60 s ; régler le malaxeur sur la grande vitesse et malaxer à nouveau 60 s. Afin d'éviter les déperditions thermiques, il est recommandé d'exécuter le malaxage dans un temps relativement court.

C'est pour cette raison que le temps de malaxage prescrit dans l'EN 196-1 a été raccourci.

c-Mise en place de l'échantillon d'essai

Aussitôt après le malaxage, peser ($1\,575 \pm 1$) g de mortier dans la boîte qui a été pesée au préalable, avec son couvercle, à $\pm 0,5$ g.

Mettre en place le couvercle en s'assurant qu'il assure l'étanchéité.

Remplir l'étui pour thermomètre de ($2,5 \pm 0,5$) cm³ d'huile (par exemple de l'huile minérale fluide), afin d'améliorer le contact thermique entre l'échantillon d'essai et le thermomètre.

Peser la boîte à mortier à $\pm 0,5$ g pour pouvoir contrôler, en fin d'essai, toute perte de vapeur d'eau éventuelle. Aussitôt après, l'introduire dans le calorimètre d'essai et le refermer immédiatement avec le bouchon. Mettre aussitôt le thermomètre en place dans l'étui pour thermomètre de manière à ce qu'il soit approximativement au cœur de l'échantillon d'essai. Sceller l'orifice de passage à travers le bouchon au moyen d'un dispositif de fermeture.

Le bouchon peut être également obturé au moyen d'un matériau d'étanchéité, malléable, ou de mastic. Le malaxage et la mise en place de l'échantillon d'essai ne doivent pas prendre plus de 6min. En fin d'essai, peser à nouveau la boîte à mortier à $\pm 0,5$ g. En cas de réduction de masse supérieure à 2 g, l'essai n'est pas valable et doit être recommencé.

d- Mesure de l'échauffement

Prendre le moment où l'on verse de l'eau comme origine des temps. La mesure de l'échauffement consiste à relever, à des instants déterminés, la température de l'échantillon d'essai et celle de l'échantillon inerte placé dans le calorimètre de référence. Faire au moins un relevé au cours des 30 premières minutes, suivi par des relevés effectués au moins toutes les :

- ✓ 1 h pendant les premières 24 h.
- ✓ 4 h au cours du deuxième jour.
- ✓ 6 h jusqu'à la fin de la période d'essai.

La fréquence de ces mesures peut être accrue en fonction des caractéristiques du ciment étudié. Consigner l'instant de chaque relevé de température en heures et minutes. A chaque relevé de température déterminer l'échauffement de l'échantillon d'essai, ht , comme la différence entre la température de l'échantillon d'essai, T_s , et celle de l'échantillon inerte, Tr_0 , placé dans le calorimètre de référence.



Figure III-19- Calorimètre Lang avant (Laboratoire de Lafarge M'sila).

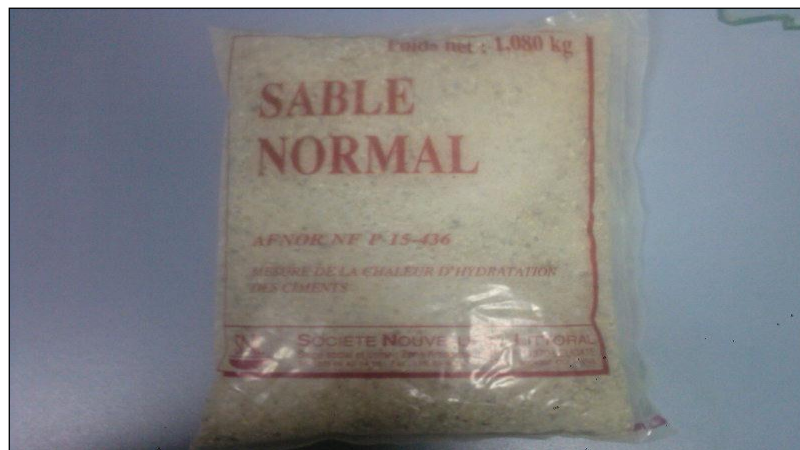


Figure III-20- Sable Normalisé (Laboratoire de Lafarge M'sila).

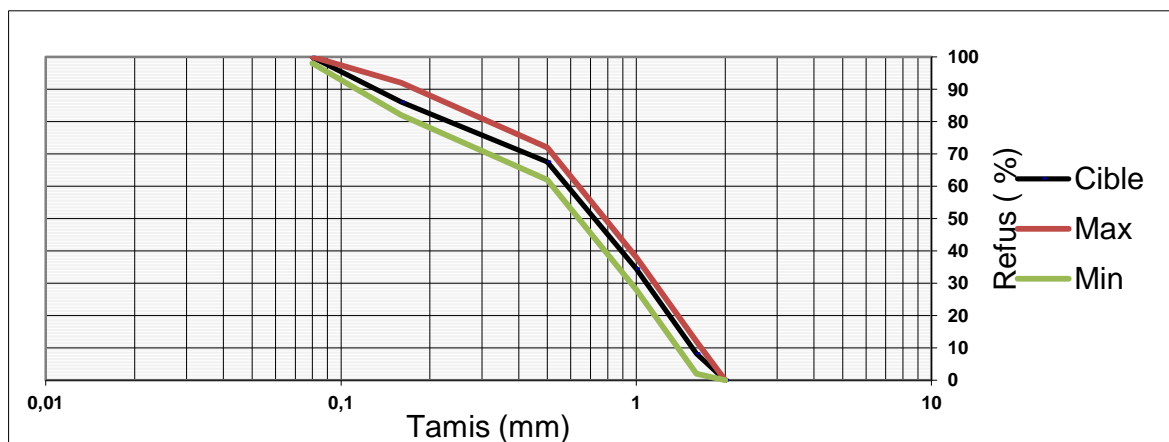


Figure III-21-courbe analyse granulométrique de sable normalisé

Le phénomène de prise du ciment s'accompagne d'une réaction exothermique dont l'importance dépend de différents paramètres, en particulier :

- La finesse de mouture : plus le ciment est broyé fin, plus la chaleur d'hydratation est élevée.
- La nature des constituants : les ciments CPA comportant presque exclusivement du clinker dégagent plus de chaleur que des ciments avec constituants secondaires.
- La nature minéralogique du clinker : plus les teneurs en aluminat tricalcique (C_3A) et silicate tricalcique (C_3A et C_3S) sont élevées, plus la chaleur d'hydratation est forte.
- La température extérieure.

Détermination de la chaleur d'hydratation : CEM III/A 42,5 -01

Caractéristiques du calorimètre :

The screenshot shows a software window titled "Paramètres de l'essai" with a close button (X) in the top right corner. The window is divided into several sections:

- Paramètres de l'essai:**
 - Nom de l'essai: CHF 40%
 - Date de l'essai: 23/05/12
 - Numéro de l'essai: [empty]
 - Voie d'essais: 2
 - Temp. de référence (°): 19.70
- Observations:** A text area with four horizontal lines for notes.
- Caractéristiques du calorimètre:**
 - Numéro: 16
 - Coefficient de déperdition thermique (J/h.°C): 67.30 + T (°C) x 0.162
 - Capacité thermique à vide (J): 663.00
 - Capacité thermique totale (J): 2 487.20
- Caractéristiques de l'éprouvette:**
 - Nature du ciment: 0
 - Masse du ciment (g): 360.00
 - Masse de l'eau (g): 180.00
 - Masse du sable (g): 1 080.00
 - Masse de la boîte (g): 134.80
 - Masse des accessoires (g): 44.60
 - Température de gâchage (°C): 22.00
- Echelles du 705:**
 - Maximum voie: 100.00
 - Unités: >C

At the bottom of the window, there are two buttons: "Annuler" (green) and "OK" (yellow).

Figure III-22-Caractéristiques du calorimètre (Laboratoire de Lafarge M'sila).

CHAPITRE IV
RESULTATS
ET
INTERPRETATION

Chapitre IV : Résultats et interprétation

IV-1 Introduction :

Ce chapitre contient tous les résultats obtenus à partir de programme d'essais proposé afin de réaliser ce travail qui consiste bien à voir l'effet de l'addition de deux ajouts minéraux on même temps et avec différent pourcentage, sur le comportement physico-chimique et mécanique d'un ciment élaboré. Le travail est axé sur l'étude C PA(CEMI) qui représente le témoin après l'ajout de :

10% Laitier et 20% Calcaire → **CEM2**

20% Laitier et 10% Calcaire → **CEM3**

25% Laitier et 35% Calcaire → **CEM4**

35% Laitier et 25% Calcaire → **CEM5**

IV -2- Influence du Taux d'ajout laitier et de calcaire Sur le Poids Spécifique du Ciment :

Les résultats obtenus qui présentent l'effet de l'addition de laitier et de calcaire sur la densité de ciment préparé sont donnés dans le tableau (IV-1) et représentés par la figure (IV-1).

D'après cette figure, on constate que la densité de ciment préparé diminue avec l'augmentation des taux d'ajouts (laitier et calcaire).

La densité de ciment témoin (CEMI) est de 3.17 t/m³ mais avec l'ajout de 35% de laitier et 25% de calcaire simultanément, la densité de ce nouveau ciment à 2.92 t/m³ ce qui vaut dire une diminution remarquable de 8%. Ceci attribuée à la présence de 35% de laitier qui a une densité égale 1.20 t/m³.

Type de ciment	Taux d'ajout laitier (%)	Taux d'ajout calcaire (%)	Poids spécifique (t/m ³)
CEM1	0	0	3.17
CEM2	10	20	3.10
CEM3	20	10	3.05
CEM4	25	35	2.98
CEM5	35	25	2.92

Tableau IV-1- Poids spécifique des ciments préparés

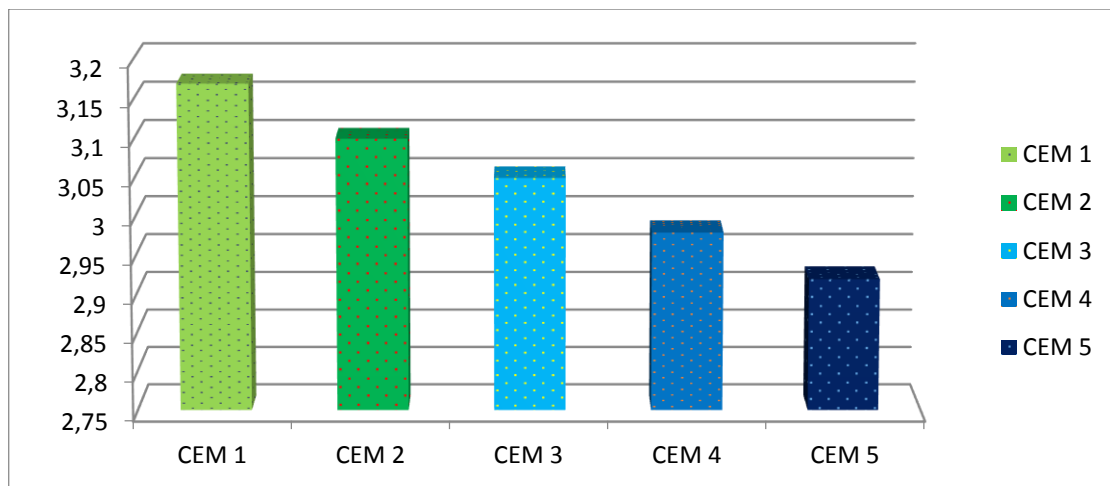


Figure IV-1 -Variation du poids spécifique de ciment en fonction de taux d'ajout (laitier calcaire).

IV-3 Influence du Taux d'ajout Sur la Surface Spécifique du Ciment :

Les résultats du Tableau (IV-2) et la Figure (IV-2) présentent l'effet de l'addition du laitier et du calcaire sur la surface spécifique du ciment.

On note que l'augmentation de la quantité du laitier et calcaire incorporé dans le ciment a un effet significatif sur la surface spécifique de Blaine du ciment. Une augmentation de la surface spécifique avec l'augmentation du pourcentage de ces ajouts, a été envisagée. D'après les résultats obtenus, nous avons constaté que le calcaire a un effet plus grand sur la surface

spécifique que le laitier, on peut noter que le calcaire a une surface spécifique de Blaine égale 7000 g/cm². Alors que celle de laitier est 2400 g/cm². Ce qui veut dire que l'effet de calcaire est prépondérant par rapport au deuxième ajout.

Type de ciment	Taux d'ajout laitier (%)	Taux d'ajout calcaire (%)	SSB (g/cm²)
CEM 1	0	0	3800
CEM 2	10	20	4300
CEM 3	20	10	4150
CEM 4	25	35	4380
CEM 5	35	25	4050

Tableau IV-2 -Surface spécifique des ciments préparés.

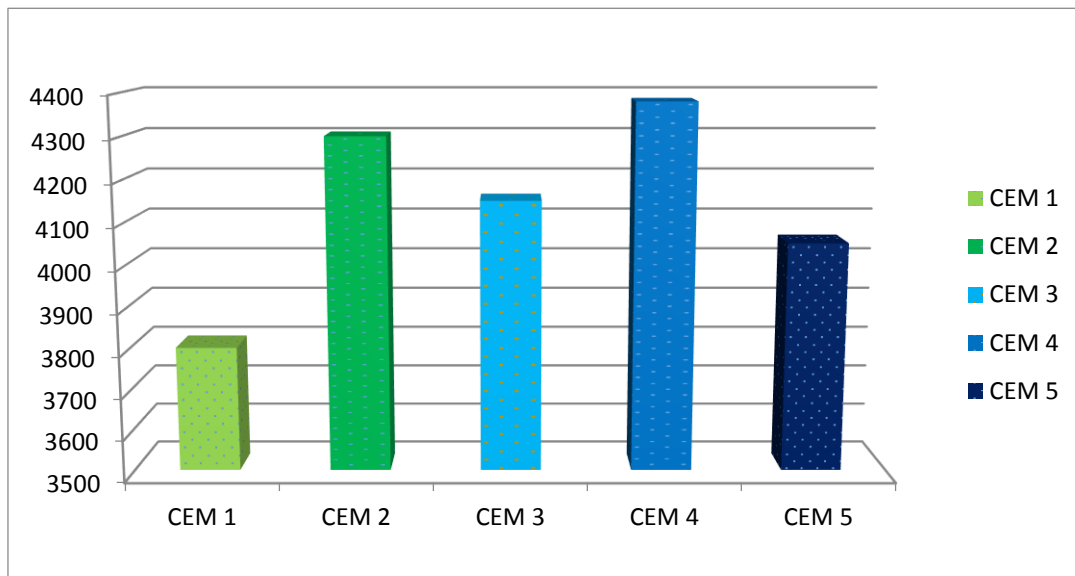


Figure IV-2- Variation de la surface spécifique de ciment en fonction de taux d'ajout (Laitier et calcaire).

IV-4 Influence du Taux d'ajout laitier et calcaire Sur la Pâte de Ciment :

IV-4-1 Influence du taux d'ajout laitier et calcaire Sur la Consistance Normale :

Les résultats obtenus sont rapportés dans le tableau (IV-3), et présentés par la figure (IV-3) D'après la figure ci-dessus, on remarque que l'ajout des différents pourcentages d'ajout (laitier-calcaire), influe sur la consistance normale de la pâte de ciment préparé.

L'ajout de (10,20), (25,35) de calcaire et laitier simultanément puis d'une façon réversible (20,10) et (35,25) sur la consistance normale est remarquable. Plus qu'au augmente le pourcentage de calcaire, plus que SSB augment, ce qui demande une quantité de plus d'eau. La présence de cette quantité d'eau qui plus que suffisante amélioré la rhéologie des grains de ciment et joue le rôle d'un facteur labri fret.

Type de ciment	Laitier(%)	Calcaire(%)	Consistance Normale(%)
CEM1	0	0	25.5
CEM2	10	20	26.7
CEM3	20	10	26.2
CEM4	25	35	27.5
CEM5	35	25	27

Tableau IV-3- Propriétés physiques des ciments préparés (consistance normale).

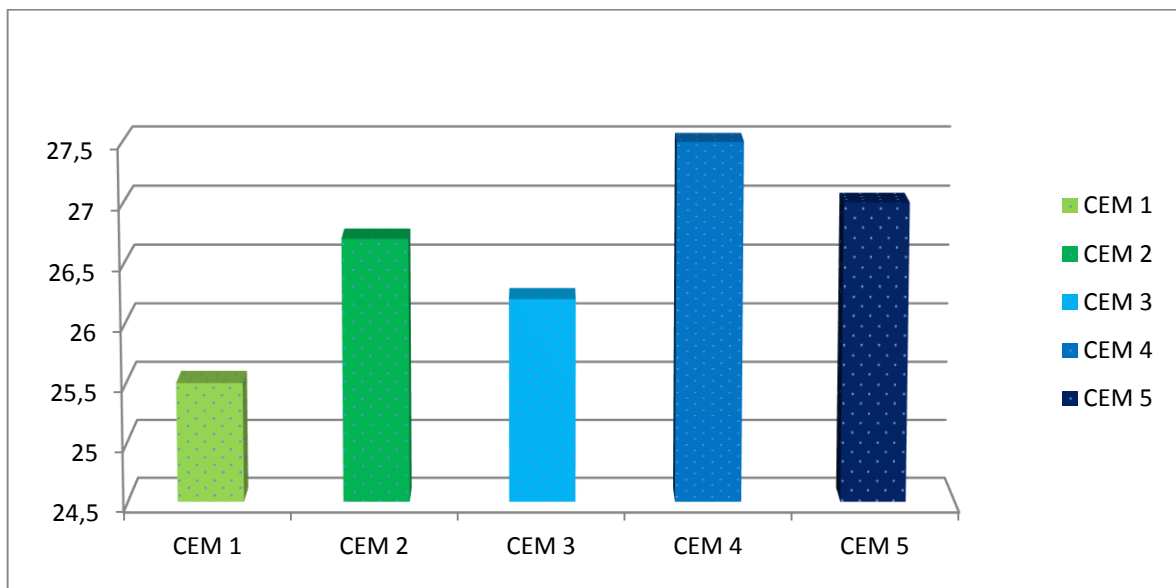


Figure IV-3- Variation du Rapport E/C (Consistance normale) en fonction du taux d'ajout (Laitier et calcaire).

IV-4-2 Influence du Taux d'ajout laitier et calcaire sur le Temps de Prise :

Les résultats expérimentaux obtenus (Tableau IV-4 et Figures IV -4) présentent l'effet de l'addition du laitier et du calcaire sur le temps de prise de la pâte de ciment.

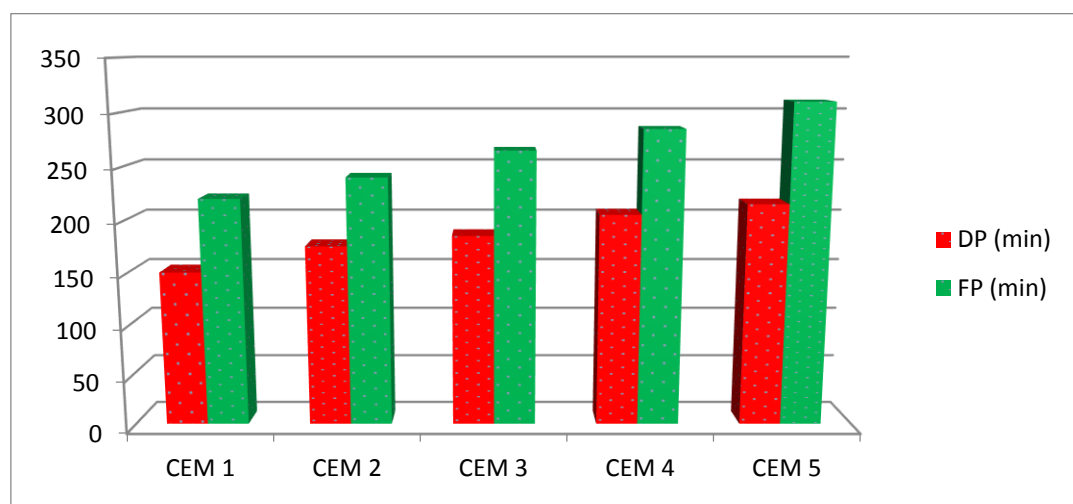
L'essai consiste à suivre l'évolution de la viscosité de la pâte en utilisant l'appareil de Vicat automatique.

Selon les résultats obtenus (Figures IV-5), on note que l'augmentation du pourcentage de l'ajout (laitier et calcaire) incorporé dans le ciment a l'effet suivant :

- Augmentation des temps de début et fin de prise.
- Les deux ajouts minéraux sont inertes, la présence de 60%(35%de laitier et 25% de calcaire) des éléments inertes ralentit l'hydratation de ciment ce qui donne un début de prise de 215 minutes, alors que la fin de prise est de 310 minute.

Type de ciment	Laitier (%)	Calcaire (%)	Début de prise (min)	Fin de prise (min)
CEM 1	0	0	150	220
CEM 2	10	20	175	240
CEM 3	20	10	185	265
CEM 4	25	35	205	285
CEM 5	35	25	215	310

Tableau IV-4- Propriétés physiques des ciments préparés (Temps de Prise).



FigureIV-4- Variation des Temps de prises en fonction de taux d'ajout (laitier et calcaire).

IV-4-3 Influence du Taux d'ajout laitier et calcaire Sur la Stabilité du Ciment :

L'expansion de ciment présent un facteur important dans la technologie de béton, surtout avec le béton de masse donc, les études visent toujours à vérifier que ce paramètre est toujours accepté dans notre travail, les résultats obtenus de nos cinq ciments sont regroupés dans le tableau(IV-5) et représentés par la figure (IV-5) d'après cette figure que l'expansion à chaud (hydratation accéléré par traitement thermique à 100c°) augmente avec la croisement de l'ajout de calcaire da façon progressivement , n'a pas d'effet significatif sur la stabilité du ciment et reste inférieure à la limite maximale imposée par la norme EN 196-3 qui est de 10 mm.

Cette augmentation de l'expansion peut être expliquée par la présence d'impuretés ainsi que d'autres éléments tels que le MgO qui sont préjudiciables au ciment et qui donnent généralement une expansion plus élevée.

Type de ciment	Laitier(%)	Calcaire(%)	Expansion(mm)
CEM1	0	0	2
CEM2	10	20	2.5
CEM3	20	10	2
CEM4	25	35	3
CEM5	35	25	2.5

Tableau IV-5- Propriétés physiques des ciments préparés (Expansion de Chatelier).

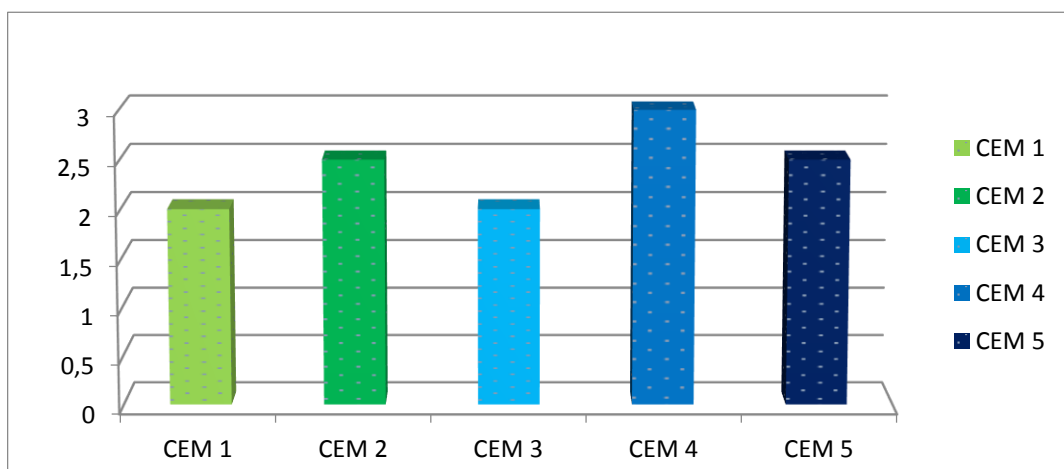


Figure IV-5- Effet du taux d'ajout laitier-calcaire sur l'expansion du ciment.

IV-5 Influence du Taux d'ajout laitier et calcaire Sur Le Mortier à base de sable Normalisé

IV-5-1 Résistance à la Compression :

Les résultats expérimentaux obtenus (Tableau IV-6 et FiguresIV-6) présentent l'effet de l'addition du laitier et du calcaire sur la résistance à la compression.

On remarque que les résistances de tous les mortiers diminué régulièrement (02 j ; 07j ; 14j ; 28j).

Cette diminution de la résistance est due au fait que la réaction chimique n'est pas prédominante aux jeunes âges, ceci mène à une hydratation du minerai C_3S et C_2S moins intense aux jeunes âges en induisant de faibles résistances. Et pour la diminution de la résistance à 28j Vs le taux d'ajout laitier et calcaire (la cause principale (substitué de clinker par le calcaire)) le clinker c'est le premier responsable (alite) sur le développement des résistances.

Type de ciment	Laitier (%)	Calcaire (%)	Rc02j (Mpa)	Rc07j (Mpa)	Rc14j (Mpa)	Rc28j (Mpa)
CEM1	0	0	27.50	43.80	49.20	59.10
CEM2	10	20	16.00	28.60	37.50	46.20
CEM3	20	10	14.80	27.10	35.50	47.50
CEM4	25	35	11.20	24.60	36.50	44.30
CEM5	35	25	9.00	25.40	37.50	46.80

Tableau IV-6- Evolution des Résistances à la Compression du Mortier en fonction du taux d'ajout laitier-calcaire (sable normalisé).

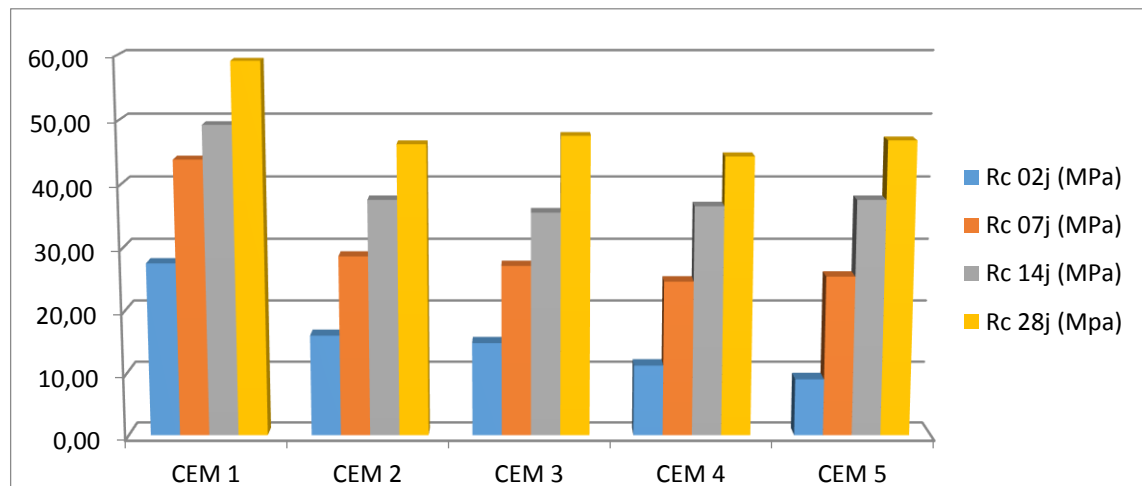


Figure IV-6- Effet du Taux d'ajout laitier et calcaire sur la Résistance à la Compression

IV-6 Effet du Taux d'ajout laitier et calcaire (effet chimique) Sur Le Retrait et Le Gonflement

Les résultats expérimentaux obtenus (Tableau IV-7 et IV-8) et Figure (IV-7 et IV-8) présentent l'effet de l'addition du laitier et du calcaire sur le retrait et gonflement du mortier normal.

D'après les résultats obtenus, on peut affirmer que tous les ciments étudiés provoquent un faible retrait et gonflement sur les mortiers étudiés (conforme par rapport à la norme).

On remarque aussi que les retraits à 28 jours sont inférieurs aux valeurs fixées par la norme NF P 15-433 et NA 440 qui sont pour les ciments CPA – CEM I et CHF-CEM III

- ≤ 800 μm/m pour la classe 32,5

- ≤ 1000 μm/m pour la classe 42,5

Les principales remarques relatives au retrait et gonflements observés pour les différents ciments étudiés sont :

- Le Retrait augmente avec l'âge du mortier, ceci est dû à l'hydratation du ciment qui génère un fin réseau des pores capillaires des amas d'hydrates formés et à la dessiccation.
- Les Retraits des ciments avec ajouts de laitier sont supérieurs à ceux du ciment Portland (sans ajout).

Ceci peut s'expliquer par la diminution du nombre et du diamètre des pores de la pâte du ciment hydraté, ainsi qu'à la formation d'un C-S-H secondaire.

La Figure (IV-7) illustre la variation des déformations de retrait des ciments ; on remarque que la vitesse de retrait est lente jusqu'à 7 jours et rapide entre l'âge de 7 à 28 jours.

Cette cinétique de retrait est due à l'hydratation tardive de l'ajout laitier Le gonflement observé sur les éprouvettes contenant comme ajout de laitier est supérieur au gonflement dû au ciment Portland, ceci est dû à la consommation de la Portlandite Ca(OH)_2

La Figure (IV-8) illustre la variation des déformations du gonflement des ciments ; remarque que la vitesse de gonflement est augment.

Type de Ciment	Laitier (%)	Calcaire (%)	Retrait 03j (um/m)	Retrait 07j (um/m)	Retrait 28j (um/m)
CEM 1	0	0	152	321	665
CEM 2	10	20	159	333	669.5
CEM 3	20	10	164	342	670.2
CEM 4	25	35	177	362	678.4
CEM 5	35	25	182	374	701.2

Tableau IV-7- Retrait du Mortier normal en fonction du taux d'ajout (laitier et calcaire).

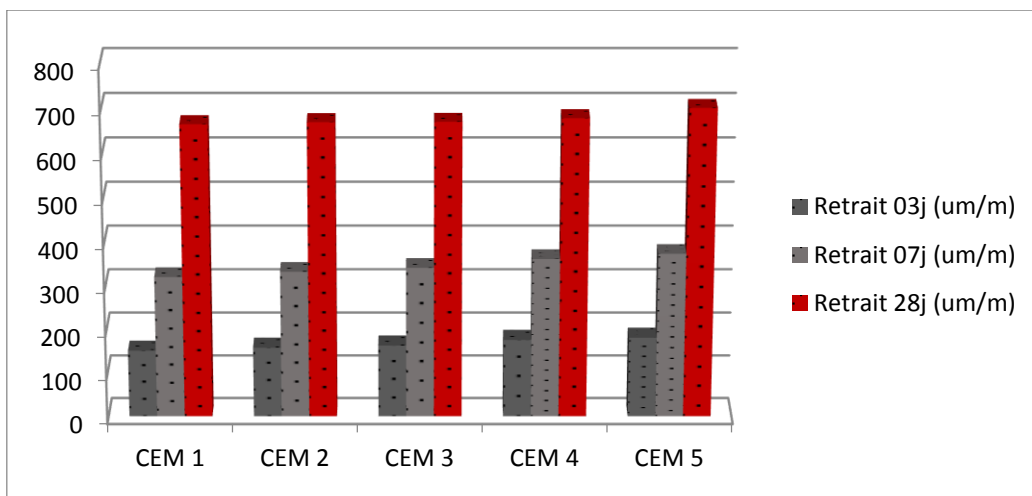


Figure IV-7- Evolution du Retrait du mortier en fonction du taux d'ajout laitier et calcaire

Type de Ciment	Laitier (%)	Calcaire (%)	Gonflement 03j (um/m)	Gonflement 07j (um/m)	Gonflement 28j (um/m)
CEM 1	0	0	22.2	35.5	97.5
CEM 2	10	20	23.2	36.5	101.2
CEM 3	20	10	25.2	40.5	112.5
CEM 4	25	35	32.3	70,2	127.5
CEM 5	35	25	41.5	78.5	135.2

Tableau IV-8- Gonflement du mortier normal en fonction du taux d'ajout (laitier et calcaire).

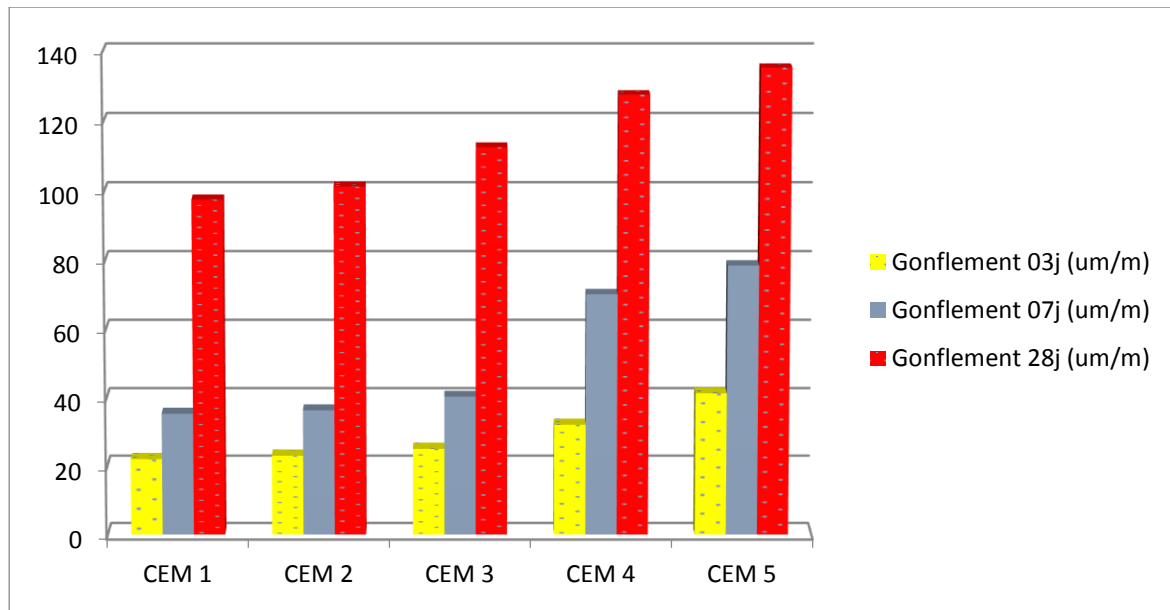


Figure IV-8 -Evolution du gonflement du mortier en fonction du taux d'ajout (laitier et calcaire)

IV-7 Effet du Taux d'ajout Laitier et calcaire (effet chimique) Sur La Chaleur d'hydratation :

Les résultats expérimentaux obtenus (Tableau IV-9 et Figure IV-9) présentent l'effet de l'addition d'ajout du laitier et du calcaire sur la chaleur d'hydratation des échantillons de mortier normalisé. L'essai consiste à suivre le dégagement de chaleur de mortier en utilisant l'appareil de langavant (semi-adiabatique).

On note que l'augmentation du pourcentage de l'ajout (laitier) incorporé dans le ciment a un effet :

- diminuée le taux de dégagement de chaleur d'hydratation.

Le phénomène de prise du ciment s'accompagne d'une réaction exothermique dont l'importance dépend de différents paramètres, en particulier :

- ✓ la nature et taux d'ajout utilisé dans le ciment dans notre cas le laitier et calcaire.
- ✓ la nature minéralogique du clinker : plus les teneurs en aluminat tricalcique (C_3A) et silicate tricalcique (C_3S) sont élevées, plus la chaleur d'hydratation est forte.
- ✓ La température extérieure

Type de ciment	Laitier(%)	Calcaire(%)	Chaleur d'hydratation (j/g)
CEM1	0	0	352
CEM2	10	20	285
CEM3	23	10	283
CEM4	25	35	273
CEM5	35	25	268

Tableau IV-9 Effet du Taux d'ajout Laitier et calcaire (effet chimique) Sur La Chaleur d'hydratation

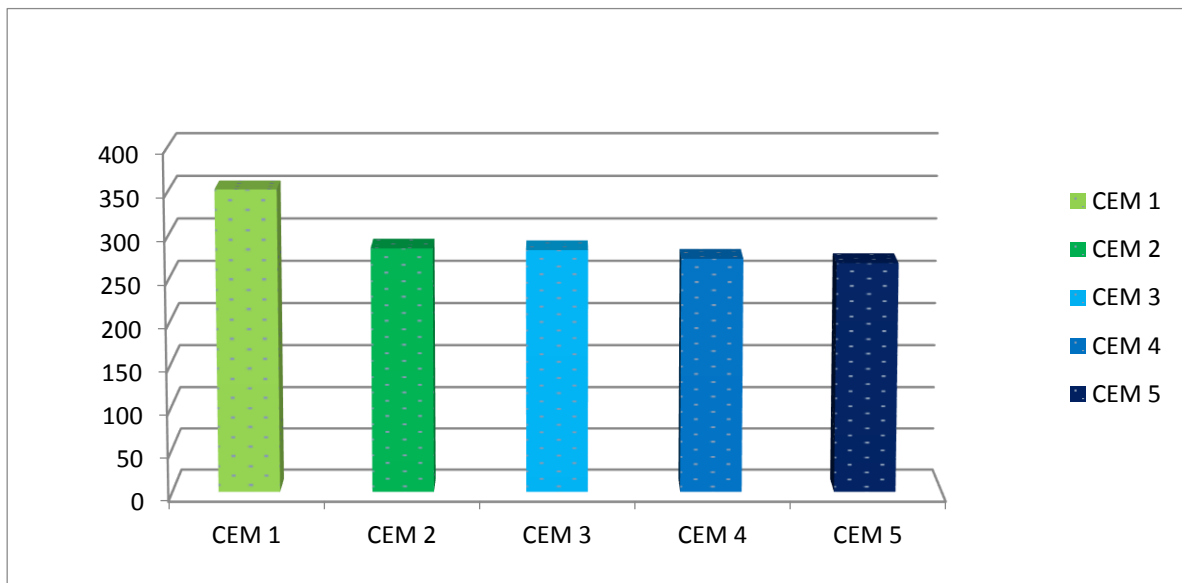
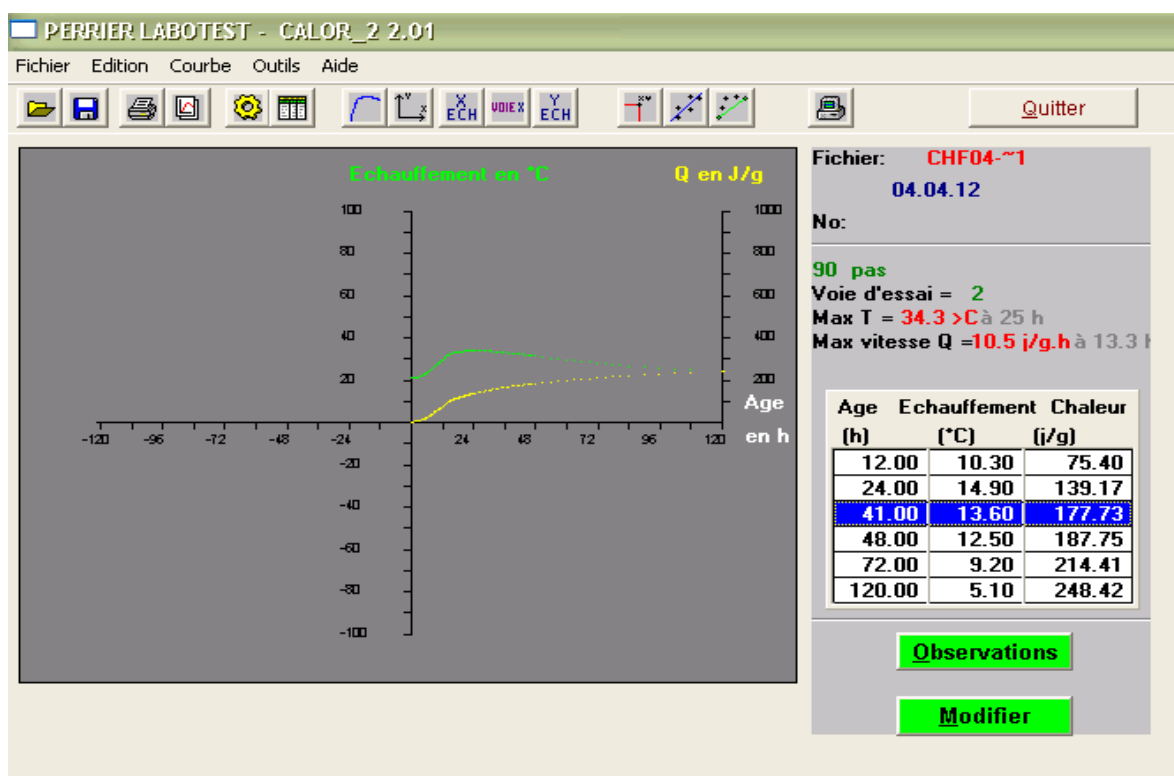


Figure IV-9- Effet du taux d'ajout laitier et calcaire sur la chaleur d'hydratation



FigureIV-10- Courbe de chaleur d'hydratation et d'échauffement.

IV-7-1 Effet du Chaleur d'hydratation Sur le Temps de Prise :

Les résultats expérimentaux obtenus (Tableau IV-11) et Figure (IV-11) présentent l'effet de la chaleur d'hydratation en fonction du début de prise.

On remarque que la chaleur d'hydratation diminue par rapport à l'augmentation du laitier et du calcaire et le temps de prise augment

Type de ciment	Laitier(%)	Calcaire(%)	Chaleur d'hydratation (j/g)	Début de prise (min)
CEM1	0	0	352	150
CEM2	10	20	285	175
CEM3	20	10	283	185
CEM4	25	35	273	205
CEM5	35	25	268	215

TableauIV-10 -Début de prise en fonction de la chaleur d'hydratation

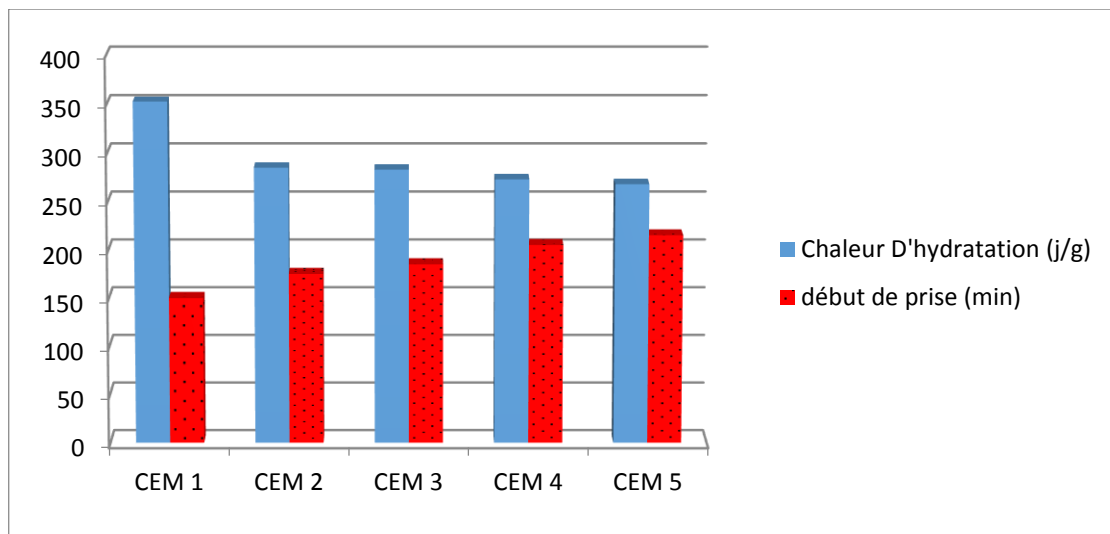


Figure IV-11- Effet chaleur d'hydratation en fonction du début de prise

IV-8- Analyse Granulométrique :

IV-8-1. Granulométrie à Méthode Alpine :

Les résultats expérimentaux obtenus (Tableau IV- 14 et Figures IV-13) présentent l'effet du taux d'ajout (laitier et calcaire) sur l'analyse granulométrique à 45 µm et 90µm.

L'augmentation de taux d'ajout laitier et calcaire dans les ciments préparé diminue la granulométrie de ciment.

Type de ciment	Laitier(%)	Calcaire(%)	Refus 45um	Refus 90um
CEM1	0	0	14.50	1.2
CEM2	10	20	12.50	1.1
CEM3	20	10	13.50	1.3
CEM4	25	35	11.20	1.1
CEM5	35	25	11.50	1

Tableau IV-11. Analyse granulométrique de ciment préparé (ALPINE).

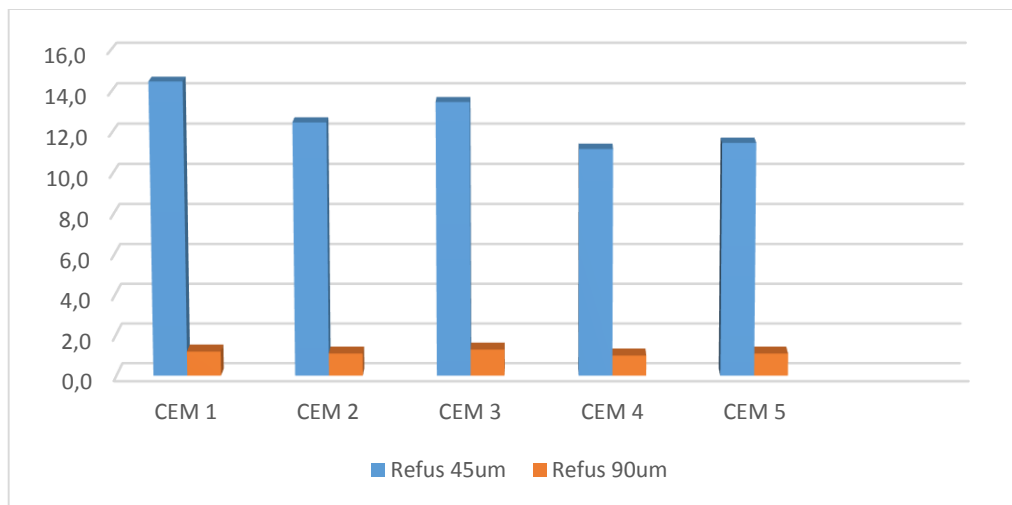


Figure IV-12- Analyse granulométrique de ciment préparé (ALPINE).

VI-8-2- La Relation entre la surface spécifique et les analyses granulométriques :

Les résultats expérimentaux obtenus (Tableau IV- 14 et FiguresIV-13) présentent l'effet du taux d'ajout (laitier et calcaire) sur l'analyse granulométrique à 45 µm et 90µm.

L'augmentation de taux d'ajout laitier et calcaire dans les ciments préparé diminue la granulométrie de ciment

Type de ciment	Laitier(%)	Calcaire(%)	Refus 45um	SSB (g/cm ²)
CEM1	0	0	14.50	3800
CEM2	10	20	12.50	4300
CEM3	20	10	13.50	4150
CEM4	25	35	11.20	4380
CEM5	35	25	11.50	4050

Tableau IV-12- Analyse granulométrique avec la SSB de ciment préparé.

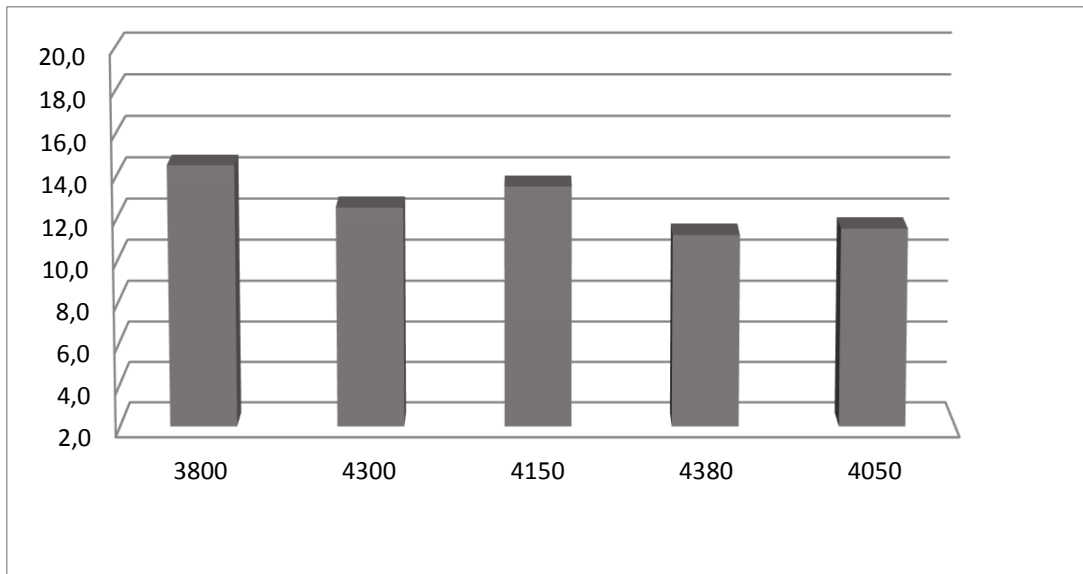


Figure IV -13- La Relation entre la surface spécifique et les analyses granulométriques

IV-9- Conclusion

Les résultats expérimentaux obtenus ont permis de faire une évaluation de la qualité du ciment CEMII(CPJ) suite à la variation de taux d'ajouts (laitier-calcaire). L'étude met en relief dépendance entre les ajouts et propriété caractéristique du ciment.

En effet les analyse physico-chimique et mécanique de ciment, ont montré que jusqu' à (20% laitier ,10% calcaire), les propriétés du ciment sont convenables et appropriées, selon les standards internationales.

CONCLUSION GENERAL

CONCLUSION GENERALE

Les ciments aux ajouts minéraux sont de plus en plus utilisés pour la confection des matériaux cimentaire pour plusieurs raisons, soit écologique, soit économique, soit pour améliorer certaines propriétés à l'état frais et durci.

L'utilisation des ajouts dans la production des ciments portland a résolu en grand partie le problème d'autosuffisance nationale, ainsi que celui de la baisse des couts énergétique. En faisant varier les pourcentages d'ajouts, on pourrait obtenir en fonction des domaines d'utilisation, différents types des de ciment avec les propriétés physico-mécanique demandées.

Ce travail est une contribution à l'amélioration des propriétés des ciments par l'incorporation des différents types des ajouts minéraux : calcaire et laitier.

Les propriétés physiques de ciments activés mécaniquement et la masse spécifique à l'état anhydre et à l'état hydraté (consistance des pâtes des ciments, les délais de prise) ainsi que les caractéristique des mortiers, confectionné à partir des ciments préparés, telles que, la résistance mécanique ont été étudiées.

Les divers résultats présentés dans cette étude précisent clairement l'influence majeure de pourcentage d'ajout et type d'ajout sur la cinétique d'hydratation des ciments (consistance et délais de prise) et les propriétés mécaniques des ciments testés.

Les résultats obtenus dans cette étude expérimentale nous permettent de tirer les conclusions suivantes :

- ✓ Une diminution du poids spécifique en fonction de l'augmentation de pourcentage d'ajout (laitier-calcaire)
- ✓ L'augmentation de pourcentage d'ajouts influe sensiblement sur le besoin en eau nécessaire pour avoir une consistance normale (consistance normal augmente).
- ✓ Les temps de début et fin de prise augment à un pourcentage varie (0%,10%,20%,25%,35%).
- ✓ Le ciment portland artificiel donne une bonne résistance à long terme que le ciment au laitier et calcaire.
- ✓ L'addition de l'ajout laitier-calcaire au ciment portland artificiel diminue la résistance due à l'effet inerte du calcaire.
- ✓ La substitution partielle du ciment portland par plusieurs ajouts minéraux locaux, naturels ou sous-produits industriel, actif ou inertes, permet de développer de nouveaux liants hydrauliques (binaires, ternaires ou quaternaires) ayant des performances mécaniques très importantes.

Les résultats expérimentaux obtenus ont permis de faire une évaluation de la qualité du ciment CEMII(CPJ) suite à la variation de taux d'ajouts (laitier-calcaire). L'étude met en relief dépendance entre les ajouts et propriété caractéristique du ciment.

En effet les analyse physico-chimique et mécanique de ciment, ont montré que jusqu' à (20% laitier ,10% calcaire), les propriétés du ciment sont convenables et appropriées, selon les standards internationales.

Conclusion générale

La conclusion finale de cette étude montre que, les ajouts naturels ou artificiels ne peuvent que contribuer à la production de nouveaux ciments économique avec des performances mécanique.

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUE

Références bibliographiques

- [1] S. Catinaud; Durabilité à long terme de matériaux cimentaire, avec ou sans fillers calcaires, en contacte avec des solutions salines; thèse du doctorat; Université de LAVAL Canada; décembre 2000.
- [2] R. Dupain, R. Lanchon, J.C. Sain-Arroman; Granulats, sols, ciment et béton; 2^{ème} Edition; Casteilla éd.; ISBN 19952713514711.
- [3] W. H. Duda; Cement data book; 3rd édition; French & European Pubns ed. ISBN 0828802041 ; décembre 1985.
- [4] C. Avenier, B. Rosier, D. Sommain; Ciment naturel; Grenoble, Glénat éd. ISBN10 : 2723461580, 176 p ; 2007.
- [5] Documentation de la cimenterie de Hamma Bouziane; Le ciment portland.
- [6] Le Centre d'information sur l'eau Paris France; <http://www.cieau.com/toutpubl/sommaire/texte/4/contenu/423.htm>, 2009.
- [7] J. Beauchamp; Mécanique des roches et des sols; Cours en ligne; Université de Picardie Jules Verne; <http://www.u-picardie.fr/~beaucham/eadaa/mecasol.htm>;septembre2003.
- [8] V. PHOUMMAVONG; Matériaux de construction; Cours en ligne; Université Nationale du Laos; <http://www.la.refer.org/materiaux/default.html>,2009.
- [9] B. Bounabe Ayache; Automatisation du stackeur et le moteur four; Rapport de stage à ERCE et SCHB; Cézanne Aix Marseille 3; [http://www .bhautomation.fr/Download/Automaticiens/Automatisation-stackeur-four-imenterie-DG.pdf](http://www.bhautomation.fr/Download/Automaticiens/Automatisation-stackeur-four-imenterie-DG.pdf),2006-2007.
- [10] Dr. F. Ghomari; Science des matériaux de construction; Université Aboubaker Belkaid, 2009..
- [11] Documentation de la cimenterie de Hamma dalaa; Hydratation de ciment Portland.
- [12] N. Rafai; Les composants de la matrice cimentaire (Rappels et interactions); Revue ciments, Bétons, Plâtre, Chaux; Paris-France, Verre Presse Services éd; N°890, pp. 60- 66; Mai 2008.
- [13] G. Seidel, H. Huckuf et J. Stark; Technologie des ciments, chaux et plâtres, processus et installations de cuisson; Paris; Septima éd; 230 p ; 1980.
- [14] Kiran Pokkuluri « Effect of admixtures, chlorides, and moisture on dielectric properties of Portland cement concrete in the low microwave frequency range» - Master thesis – Virginia University – 210p - October 1998.
- [15]- M. Regourd, H. Hornain, « Applications de la microscopie électronique à balayage »
Revue des matériaux de construction, 693 : 73–87- 1975.
- [16]-E. Guillon, « Durabilité des matériaux cimentaires –Modélisation de l'influence des équilibres physico-chimiques sur la microstructure et les propriétés mécaniques résiduelles », thèse de doctorat, ENS Cachan/ CNRS/ Université Paris 6, France-2004.
- [17] : M Venuat -La pratique des ciments , mortier et béton- Tom1 : « Caractéristiques des liants et des béton , mise en œuvre des coulis et mortiers »-édition2- Collection Moniteur. -277p-1989.
- [18] : B. C. BENI-REMOUR. , « Matériaux pouzzolanique : étude physico-chimique et mécanique des mortier et béton contenant de la pouzzolane) ,mémoire de fin d'étude ingénieur-IGCM ORAN-1993.

Bibliographies

- [19] : A. MEBROUKI « influence de la pouzzolane de Beni-Saf Sur les caractéristiques mécaniques des mortier » thèse de magister – Université Mostaganem- juin 2003.
- [20] : ALI AICHOUBRA.A., « effets des pouzzolanes naturelles sur les propriétés d'un ciment à base de calcaire) thèse de Magister , IGCM ORAN 2005.
- [21] : ONER M. (2000), 'A study of intergrading and separate grinding of blast furnace slag cement' .Cement and Concret Research,vol. 30,p.473-480.
- [22] : ALEXANDRE J. , SEBILEAU J.L. (1988),'Le laitier de haut fourneau''.C.T.P.L.,ISBN 2-950304-0-7.
- [23] : MACPHEE D. E. ,ATKINS M.,GLASSER F.P.(1989),Mat Res SocSymp proc 127 :475.
- [24] : F. Puertas, S . Martinez –Ramirez ,S.Alonso et T. Vázquez.Alkali-activated fly ash/slag cement. Strengthbehaviour and hydrationproducts. « Ciment Alkali-activé de cendres volantes/laitier. Comportement mécanique et produits d'hydrataion ». Cement and Concrete Research 30,2000.pp.1625-1632.
- [25] : M .Mellas .Quelques aspects de la qualité du béton in situ par le microscope électronique à balayage . Thèse de doctorat en génie civil .Université de Biska, 2003. 131 page.
- [26] : H.G Smolczyk. Die Hydratations produkte Huttensandreicher Zemente. « produits d'hydratation du ciment du haut fourneau ». Zement-Kalk-Gips,1965,23,No.5.238-246.
- [27] : A. Nacéri.L'influence de la teneur en laitier et sa surface spécifique sur la résistance du mortier durci.First international conference on environmental engineering.Ain Shams University,April9-11th,2005.pp.1232-2241.
- [28] : A. Nacéri et I. Messaoudene.The chemical and physical effets of the granulated blast fourneau slag on concrete compressive strength. « Les effets chimiques et physiques du laitier du haut fourneau sur la résistance à la compression du béton ». World Journal of Engineering3(3),2006.pp.45-51.
- [29] : L. Zeghichi, B. Mezghiche et A Merzougui. Etude de L'influence des solution basiques sur le ciment au laitier .11th international conference for building and construction. Cairo, Egypt ,Jun 17th-21th ,2004.pp.523-530.

ملخص

لقد أصبح الاسمنت المركب أي الاسمنت ذات الإضافات المعدنية (CPJ-CEMII) أكثر استعمالاً في تحضير المواد الإسمنتية وهذا لعدة أسباب منها البيئية , أو لتحسين بعض الخصائص في الحالة المرنة أو الصلدة .

يتميز هذا النوع بتصلد بطيء خلال المرحلة الابتدائية مقارنة مع الاسمنت البورتلاندي العادي المصنوع بدون اضافة معدنية (CPJ-CEMI) ان هذه الخاصية البطيئة خلال مرحلة الشك والتصلد للاسمنت (CPJ-CEMII) تتطلب استعمال منشط فعال (كيميائي حراري او ميكانيكي)

الهدف الرئيسي من هذا العمل التجريبي هو دراسة مدى تأثير نسبة الإضافات المعدنية (خبث، كلسيت) والنعومة (المساحة السطحية) للإضافات المعدنية على الخصائص الفيزيائية والميكانيكية لعجينة الاسمنت والمونة , إن الخصائص الفيزيائية للاسمنت (CPJ-CEMII) ميكانيكية في الحالة الجافة والمبللة (القوام القياسي للعجينة وزمن الشك) وايضا الخصائص الميكانيكية للمونة المحضرة من نفس انواع الاسمنت منها التقلص واستجابة الميكانيكية . تم تحديدهم خلال هذا العمل التجريبي .

من خلال النتائج المحصل عليها نستنتج ان الزيادة في نسبة الإضافات المعدنية تؤثر على الخصائص الفيزيائية للاسمنت المركب وايضا المساحة السطحية والتركيب الكيميائي والمعدني للاسمنت ذات الإضافات المعدنية يمثلان السبب الرئيسي في تحسين التفاعل البطيء.

مفاتيح: الإضافات المعدنية (خبث، كلسيت), النعومة (المساحة السطحية), الاسمنت, المونة, الاستجابة الميكانيكية

RESUME

Les ciments aux ajouts minéraux (C.P.J-C.E.M II) sont de plus en plus utilisés pour la Confection des matériaux cimentaires (mortier et béton) pour plusieurs raisons, soit écologiques, soit économiques, soit pour améliorer certaines propriétés à l'état frais ou durci.

Ce type de ciment (C.P.J-C.E.M II) se distingue par un durcissement ralenti à sa Période initiale en comparaison avec un ciment ordinaire sans ajout minéral (C.P.A-C.E.M I).

Cette propriété latente (prise et durcissement) du C.P.J-C.E.M II, nécessite l'emploi d'une bonne activation (chimique, thermique ou mécanique).

L'objectif de cette étude expérimentale consiste à étudier l'influence du pourcentage des ajouts (laitier, calcaire) et la finesse (surface spécifique) des ajouts minéraux sur les propriétés Physique et mécanique d'un ciment et mortier qui étudier Ce travail pour améliorer :

Les propriétés physiques des ciments (C.P.J-C.E.M II) activés mécaniquement à l'état anhydre et à l'état hydraté (consistance des pâtes de ciments et délais de prise) ainsi que les Caractéristiques des mortiers confectionnés à leurs bases, telles que, le retrait, les réponses mécaniques ont été étudiées.

D'après les résultats expérimentaux obtenus, il ressort que l'augmentation de pourcentage des ajouts influé sur les propriétés physique de ciment compose ainsi que surface spécifique et la composition (chimique et minéralogique) des ciments aux ajouts minéraux sont les principaux responsables à l'amélioration de la réactivité latente des additions minérales et de l'accroissement.

Mots-clés : Ajouts minéraux, laitier, calcaire, finesse (surface spécifique), ciment, mortier, réponse mécanique.

ABSTRACT

Cements with mineral additives (CPJ-CEM II) are increasingly used for manufacture of cement-based materials (mortar and concrete) for several reasons, either ecological or economic or to improve certain properties to fresh or hardened.

This type of cement (CPJ-CEM II) is characterized by a slow hardening its initial Period in comparison with ordinary cement without mineral addition (CPA-CEM I).

This property latent (setting and hardening) of the CPJ-CEM II, requires the use of a good activation (chemical, thermal or mechanical).

The aim of this experimental study is to examine the influence of the percentage of additives (slag, limestone) and fine (surface area) of mineral additives on the physical and mechanical properties of cement and mortar work for this study improve :

The physical properties of cement (CPJ-CEM II) mechanically activated state anhydrous and hydrated state (consistency of cement pastes and time taken) and the characteristics of mortars made their bases, such as the withdrawal, the mechanical responses were studied.

From the experimental results, it appears that increasing percentage of additions affect the physical properties of cement and made specific surface and composition (chemical and mineralogical) cements with mineral additives are primarily responsible for improving the responsiveness of latent

Keywords : mineral additions, slag, limestone, fineness (surface area), cement, mortar, response, mechanics.