

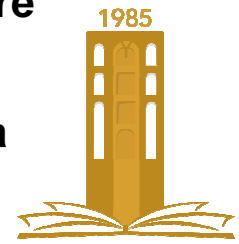


جامعة محمد بوضياف - المسيلة  
Université Mohamed Boudiaf - M'sila

Ministère de l'Enseignement Supérieure  
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

**Optimisation de la teneur en gypse  
dans Le ciment portland CEM I**

Dirigé par :  
Mr. Siline Mohammed

Présenté par :  
Rouabah Zohra

Promotion : 2015/2016.

# REMERCIEMENTS

La présente étude a été réalisée au sein du département de Génie Civil de l'Université «Mohamed BOUDIAF» de M'sila.

Nous tenons à remercier :

Monsieur **le Dr. Siline Mohamed** Professeur à l'Université de M'sila, qui a encadré ce travail, pour sa disponibilité, pour son écoute, pour ses grandes qualités pédagogiques, ainsi que pour sa rigueur scientifique, qu'il a su me communiquer pour mener au mieux ce travail de recherche.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à :

Monsieur Bibi Mekki .

Monsieur Chikouche Hamina Makhloufi.

Monsieur Rahmouni Zineabidine.

Monsieur M'hamdi Ablekarim.

Monsieur Ben yahia Abbelsalem.

Monsieur Belagraa Arbi.

Monsieur Nacéri Abdalhgani.

Monsieur Maza Mekki.

Monsieur Chikouche Mohamed Aziz.

Monsieur Baali Alaid.

Monsieur Hamitouch Ammar.

Monsieur Belouahri Ibrahim .

Monsieur Khaled Hakem Manager qualité de la cimenterie Lafargeholcim M'sila .

Monsieur Haddad Naoui chargé Essais Physiques de la cimenterie Lafarge M'sila .

Monsieur Boubakri Mohamed, Responsable laboratoire des essais physiques de la cimenterie Lafarge M'sila .

Ainsi que tous les personnes du laboratoire de l'Usine Lafarge M'sila.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude à toutes les personnes ayant contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

# Sommaire

ملخص

RESUME

ABSTRACT

Introduction générale.....	01
Contexte générale de l'étude.....	02
Objectifs de l'étude .....	02

## Chapitre I : Fabrication du Ciment Portland

<b>Introduction</b> .....	03
<b>1. le ciment</b> .....	03
1.1 Constituants de base.....	04
1.1.1 Le clinker .....	04
1.1.2 Gypse .....	06
1.1.2.1 ETAPES D'EXTRACTION DU GYPSE.....	06
➤ La foration.....	06
➤ Tir de mine.....	06
➤ Le Chargement .....	07
➤ Le transport .....	07
➤ Le concassage .....	07
<b>2. Fabrication du ciment</b> .....	08
2.1 Les étapes de fabrication du ciment .....	08
2.1.1 L'extraction et la préparation des matières première .....	09
2.1.2 Le séchage et le broyage .....	11
2.1.3 La cuisson .....	11
2.1.4 Le broyage du clinker .....	13
2.1.5 Le stockage et l'expédition des ciments .....	13
2.2 Méthode de fabrication du ciment .....	14
2.2.1 Fabrication par Voie sèche .....	15
<b>3. Composition du ciment</b> .....	18
3.1. Composition du clinker .....	18
3.1.1. Composition chimique .....	18
3.1.2 Composition minéralogique .....	18
3.2. Les caractéristiques du ciment portland .....	19
3.2.1-Prise (Norme EN 196-3) .....	19
3.2.2-Durcissement .....	20
3.2.3-Finesse de mouture (Norme EN 196-6) .....	20
3.2.4-Retrait Norme (NF P15-433).....	20
3.2.5-Chaleur d'hydratation Norme (NF EN 196-9) .....	21
3.2.6-Gonflement (Norme NF P15-433).....	22

3.2.7-La consistance (Norme EN 196-3) .....	22
3.2.8-Résistance à la compression (EN 196-1) .....	22
<b>4. Industrie cimentaire en Algérie</b> .....	23
4.1. Présentation du groupe Lafargeholcim .....	23
4.2. Le Groupe industriel des ciments d'Algérie (GICA) .....	25
<b>5. Différent cimenterie en Algérie</b> .....	27

## Chapitre II : Hydratation du ciment Portland.

<b>Introduction</b> .....	28
<b>2.1. Mécanismes de l'hydratation</b> .....	28
2.1.2 Description du mécanisme de l'hydratation du ciment .....	28
2.2.2.1 Hydratation des silicates .....	30
2.2.2.2. Hydratation des aluminates .....	33
<b>2.2 Le rôle crucial du sulfate de calcium</b> .....	34
2.2.1. Effet des sulfates sur l'hydratation du ciment .....	35
2.2.1.1. Généralité .....	35
2.2.1.2 Effet des sulfates sur l'hydratation des aluminates .....	36
2.2.1.3 Effet des sulfates sur l'hydratation des $C_3S$ .....	37

## Chapitre III : Techniques Expérimentales

<b>Introduction</b> .....	38
<b>3.1-Matières Premières</b> .....	38
3.1.1. Le clinker .....	38
3.1.2. Le gypse .....	40
<b>3.2. Formulation des Ciments</b> .....	40
<b>3.3. Essais sur ciments anhydres</b> .....	40
3.3.1. Analyses chimiques Norme 15-467 .....	41
3.3.2. Masse volumique absolue .....	42
3.3.3 Mesure de la finesse des ciments (Norme EN 196-6) .....	43
3.3.4. Analyse granulométrique (Méthode alpine) .....	44
<b>3.4. Essais sur pâtes de ciment</b> .....	46
3.4.1. Essai de Consistance (Norme EN 196-3) .....	46
3.4.2. Essai de Prise (Norme EN 196-3) .....	47
3.4.3. Essai de stabilité .....	49
<b>3.5. Essais sur mortiers normalisés</b> .....	50
3.5.1. Formulation des mortiers .....	50
<b>3.5.2. Préparation des éprouvettes</b> .....	51
3.5.3. Essai de flexion Norme NF EN 196-1 .....	54
3.5.4. Essai de compression Norme NF EN 196-1 .....	54
3.5.5. Mesure des variations dimensionnelles (NF P15-433) .....	55
3.5.6 Chaleur d'hydratation (Méthode semi-adiabatique NF EN 196-9) .....	57
3.5.6.1 Calcule de la chaleur d'hydratation .....	59

## Chapitre IV : Résultats Expérimentaux et Interprétation

<b>4-1 Introduction</b> .....	61
<b>4-2 Influence du Taux de gypse sur ciments anhydre</b> .....	61
4-2-1 Influence du Taux de gypse sur les Teneurs en Oxydes .....	61
4-2-2 Influence du Taux de gypse sur le Poids Spécifique du Ciment (densité) .....	63
4-2-3 Influence du Taux de gypse Sur la Surface Spécifique du Ciment .....	64
4-2-4 Influence du Taux de gypse Sur l'analyse Granulométrique (Méthode Alpine) .....	65
4-2-4-1 La Relation entre la surface spécifique et les analyses granulométriques .....	66
<b>4-3 Influence du Taux de gypse sur la pâte du ciment</b> .....	66
IV-3-1 Influence du taux de gypse Sur la Consistance Normale .....	66
IV-3-2 Influence du Taux d'gypse sur le Temps de Prise .....	67
IV-3-3 Influence du Taux de gypse Sur la Stabilité du Ciment .....	68
<b>4-4 Influence du Taux d'gypse Sur Le Mortier à base de sable Normalisé</b> .....	69
IV-4-1 Résistance à la Compression .....	69
IV-4-2 Effet du Taux de gypse (effet chimique) Sur Le Retrait et Le Gonflement .....	71
IV-4-3 Effet du Taux de gypse (effet chimique) Sur La Chaleur d'hydratation .....	73
IV-4-3-1 Effet du Chaleur d'hydratation Sur le Temps de Prise (début de prise) .....	75
IV-4-3-2 Effet du Chaleur d'hydratation Sur le Temps de Prise (fin de prise) .....	76
<b>4-5 Comparaison</b> .....	77
<b>Conclusion</b> .....	78
<b>Bibliographie</b> .....	80
<b>Annexe</b>	

N° Tableaux	<b><i>Chapitre I : Fabrication du Ciment Portland</i></b>	N° Pages
Tableau I-1	Composition du cru pour la fabrication du clinker.	04
Tableau I-2	Les phases du clinker.	05
Tableau I-3	Différent type de ciment portland	17
Tableau I-4	Composition chimique du clinker.	18
Tableau I-5	Différent cimenterie en Algérie.	26

N° Tableaux	<b><i>Chapitre II : Hydratation du ciment Portland.</i></b>	N° Pages
Tableau II-1	Principaux hydrates formés lors de l'hydratation du ciment.	29

N° Tableaux	<b><i>Chapitre III. Techniques Expérimentale</i></b>	N° Pages
Tableau III-1	Composition chimique du clinker.	38
Tableau III-2	Composition minéralogique du clinker	39
Tableau III -3	Modules caractéristiques du clinker.	39
Tableau III -4	Composition chimique du gypse.	40
Tableau III -5	caractéristiques physique de gypse.	40
Tableau III -6	Les formulations choisies pour le ciment.	40

N° Tableaux	<b><i>Chapitre IV : Résultats Expérimentaux et Interprétation</i></b>	N° Pages
Tableau IV -1	Analyses chimiques par XRF des ciments préparés (les oxydes).	60
Tableau IV -2	Poids spécifique des ciments préparés.	62
Tableau IV -3	Surface spécifique des ciments préparés.	63
Tableau IV -4	Analyse granulométrique de ciment préparé (ALPINE).	64
Tableau IV -5	Propriétés physiques des ciments préparés (consistance normale).	65
Tableau IV -6	Propriétés physiques des ciments préparés (Temps de Prise).	66
Tableau IV -7	Propriétés physiques des ciments préparés (Expansion de Chatelier).	68

Tableau IV -8	Evolution des Résistances à la Compression du Mortier en fonction de taux du gypse (sable normalisé).	69
Tableau IV -9	Retrait du Mortier normal en fonction du taux de gypse.	70
Tableau IV -10	Gonflement du mortier normal en fonction du taux de gypse.	71
Tableau IV -11	La chaleur d'hydratation de mortier normal en fonction du taux de gypse.	73
Tableau IV -12	Chaleur d'hydratation en fonction du temps de prise (début de prise et fin de prise).	74
Tableau IV -13	Chaleur d'hydratation en fonction du temps de prise (fin de prise).	75
Tableau IV -14	Comparaison (CEM 06 (5.8% de gypse) Vs CPA Lafargeholcim (M'sila))	76

N° Figures	<b>CHAPITRE I : FABRICATION DU CIMENT PORTLAND</b>	N° pages
Figure I -1	les différents explosifs utilisés pour abattre le gypse	07
Figure I -2	Le processus de fabrication du ciment Portland	08
Figure I -3	Carrière d'extraction de calcaire et d'argile	09
Figure I -4	Concassage des matières premières au niveau de la carrière	10
Figure I -5	Transport par tapis et par dumper	10
Figure I -6	Hall de pré-homogénéisation	10
Figure I -7	Broyeur cru	11
Figure I -8	Préchauffeur	12
Figure I -9	Four rotatif	12
Figure I -10	Silos de stockage de ciment	13
Figure I -11	Expédition	14
Figure I -12	Le schéma de la fabrication du ciment	14
Figure I -13	Fabrication du ciment par voie sèche	16
Figure I -14	Evolution du temps de prise en fonction de la température	19
Figure I -15	Influence de la température sur la prise des ciments	19
Figure I -16	Influence de la surface spécifique sur la résistance à la compression	20
Figure I -17	Influence de l'E/C sur le retrait plastique des mortiers	21
Figure I -18	Chaleur dégagée lors de l'hydratation du CPA	21
Figure I -19	Résistance du mortier normale	22
Figure I -20	Organigramme de l'entreprise	23
Figure I-21	Lafargeholcim hammam Dalâa M'sila	24

N° Figures	<b>Chapitre II : Hydratation du ciment Portland</b>	N° pages
Figure II.1	Micrographe en lumière réfléchie d'une section polie de clinker de ciment portland	28
Figure II.2	CSH fibreux avec Cristal de Portlandite (X) entre des CSH (#)	30
Figure II.3	Microscopie Electronique à Balayage de C-S-H et portlandite	30
Figure II.4	Evolution du dégagement de chaleur et de la conductivité électrique lors de l'hydratation d'une pâte de C <sub>3</sub> S	32
Figure II.5	MEB Ettringite aciculaire (aiguille)	33

N° Figures	<i>Chapitre III. Techniques Expérimentales</i>	N° pages
Figure III -1	L'appareil FRX	41
Figure III -2	Flasque Le Chatelier	42
Figure III -3	Le Densimètre de Le Chatelier	44
Figure III -4	Tamiseuse Alpine	44
Figure III -5	Appareil de Vicat manuel	47
Figure III -6	L'appareil de Vicat	47
Figure III -7	L'appareil de Vicat	48
Figure III -8	les Aiguillé de Chatelier	49
Figure III -9	sable normalisé	50
Figure III -10	Distillateur	51
Figure III -11	Eprouvette Prismatique de mortier (4x4x16) cm <sup>3</sup>	51
Figure III -12	Malaxeur semi-automatique de mortier	51
Figure III -13	Table Vibrante	52
Figure III -14	Eprouvette Prismatique de mortier (4x4x16) cm <sup>3</sup>	52
Figure III -15	La Chambre d'humidité	53
Figure III -16	Bains d'eau	53
Figure III -17	Machine de Compression	55
Figure III -18	Moules (4x4x16) cm <sup>3</sup> Équipés de plots de Retrait	56
Figure III -19	Comparateur de Retrait	56
Figure III -20	Sable Normalisé	59
Figure III-21	Calorimètre Langavant60	59

N° Figures	<i>Chapitre IV : Résultats Expérimentaux et Interprétation</i>	N° pages
Figure IV -1	Variation de la teneur des oxydes en fonction du taux de gypse (CaO-SiO <sub>2</sub> )	61
Figure IV -2	Variation de la teneur des oxydes en fonction du taux de gypse (MgO-SO <sub>3</sub> -K <sub>2</sub> O)	61
Figure IV -3	Variation de la perte au feu en fonction du taux de gypse (PAF)	61
Figure IV -4	Variation du poids spécifique de ciment en fonction de taux du gypse	62

Figure IV-5	Variation de la surface spécifique de ciment en fonction de taux du gypse	63
Figure IV-6	Analyse granulométriques de ciment préparé (ALPINE)	64
Figure IV-7	Effet de la surface spécifique en fonction de l'analyse granulométrique	65
Figure IV-8	Variation du Rapport E/C (Consistance normale) en fonction du taux de gypse	66
Figure IV-9	Variation des Temps de prises en fonction de taux du gypse	67
Figure IV-10	Effet du taux de gypse sur l'expansion du ciment	68
Figure IV-11	Effet du Taux de gypse sur la Résistance à la Compression	69
Figure IV-12	Evolution du Retrait du mortier en fonction du taux de gypse	71
Figure IV-13	Evolution du gonflement du mortier en fonction du taux de gypse	71
Figure IV-14	Evolution du gonflement du mortier en fonction du taux de gypse	73
Figure IV-15	Effet du taux de gypse sur la chaleur d'hydratation	74
Figure IV-16	Effet chaleur d'hydratation en fonction du temps de prise (début de prise)	75

## ملخص:

الغرض من هذا العمل التجريبي هو دراسة مزايا وإمكانية طريقة الاستبدال الجزئي لمادة الكلنكر بإضافة الجبس (زيادة معدل الجبس) في الاسمنت من أجل ملاحظة القيمة المثلى للكبريتات مع إعطاء ميزة أو خصائص فيزيائية وكيميائية وميكانيكية في الاسمنت البورتلاندي الصناعي .

تهتم هذه الدراسة التجريبية إلى تحضير اسمنت بدون إضافات معدنية باستبدال نسبة مئوية معينة من مادة الكلنكر بمادة الجبس :

( 0.5% ، 1.5% ، 3% ، 4.3% ، 5% ، 5.8% ، 6.2% ، 7.1% ، 8% ، 8.8% ) .

لقد قمنا في هذه الدراسة بتغيير نسبة مادة الكلنكر في الاسمنت باستعمال طريقة الاستبدال ( التغيير الجزئي لمادة الكلنكر بمادة الجبس ) لدراسة أثره على الخصائص الفيزيائية والكيميائية للاسمنت المحضر بمادة الجبس المضافة وكذلك المقاومة الميكانيكية للمونة من أجل تحديد نسبة الجبس المثالية ( الكبريتات ) .

إن الخصائص الفيزيائية والكيميائية للاسمنت المحضر بمادة الجبس المضافة في الحالة الجافة ( التركيب الكيميائي ، زمن السحق ، الوزن النوعي ، النعومة ، التوزيع الحبيبي ) والمبللة ( القوام القياسي للعجينة الإسمنتية ، وزمن الشك... )

وكذلك مميزات المونة في الحالة الصلدة ، منها التقلص الانتفاخ ، والمقاومة الميكانيكية ( مقاومة الضغط والانحناء ) ، تم تحديدهم خلال هذا العمل التجريبي .

ووفقا لنتائج التجارب التي حصل عليها ، يتبين لنا أن كمية مادة الجبس المضاف والتركيب الكيميائي للاسمنت المصنع هي العوامل الرئيسية التي تؤثر على تغيير المقاومة الميكانيكية (مقاومة الضغط والانحناء) للمونة المختبرة .

## كلمة مفتاح:

القيمة المثلى للكبريتات ، الجبس ، كبريتات الكالسيوم، إضافات معدنية ، تفاعل ، خصائص ميكانيكية

## Résumé :

Ce travail expérimental étudie les avantages et la possibilité de substitution partielle du clinker par l'ajout gypse (augmentation de taux de gypse) dans le ciment pour voir un optimum de sulfate a donné des bonnes caractéristique physico-chimique et mécanique des ciments préparer CEM I.

Cette étude expérimentale consiste à préparer un ciment avec addition de gypse en remplaçant un certain pourcentage de clinker par l'ajout de gypse pour chercher un point optimum de gypse : (0,5%, 1,5%, 3,0%, 4,3%, 5,0%, 5,8%, 6,2%, 7,1%, 8,0% et 8,8%).

Dans cette étude, nous avons fait varier le pourcentage de gypse dans le ciment par la méthode de substitution (remplacement partiel du clinker par le gypse) afin d'étudier son effet sur les propriétés physico-chimiques du ciment confectionné avec le gypse et le comportement mécanique du mortier pour choisir un taux de gypse optimal( $\text{SO}_3$ ).

Les propriétés physico-chimiques du ciment à l'état anhydre (composition chimique, po poids spécifique, finesse) et l'état hydraté (consistance des pâtes de ciment, chaleur d'hydratation 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 ont été étudiées.

D'après les résultats expérimentaux obtenus, il ressort que la quantité du gypse et la composition chimique du ciment confectionné sont les principaux paramètres qui influent sur la variation des résistances mécaniques (compression) et le temps de prise des mortiers testés.

**Mots clé :** L'ajout de gypse, optimum de sulfate, ciment CEM I et les propriétés physico-chimiques.

**Abstract:**

This experimental work exploring the benefits and the possibility of partial substitution of clinker by adding gypsum (increase of gypsum) in cement to see optimum sulfate Have a good physical and chemical characteristic and mechanical cement prepare CEM I.

This experimental study is to prepare a cement with gypsum addition, replacing a certain percentage of clinker by adding gypsum to find an optimum point of gypsum (0.5%, 1.5%, 3.0%, 4, 3%, 5.0%, 5.8%, 6.2%, 7.1%, 8.0% and 8.8%)

In this study, we varied the percentage of gypsum in cement by the substitution method (partial replacement of clinker gypsum) to study its effect on physical- and chemical properties of cement crafted with gypsum and behavior mechanical mortar and concrete to select optimum gypsum (optimum SO<sub>3</sub>).

The physical and the chemical properties of the cement in the dry state and hydrated state (chemical composition, density, smoothness, consistency of the cement paste, heat of hydration and setting time), and the characteristics of mortars prepared bases, such as, shrinkage, swelling, mechanical behavior (mechanical compressive strengths were investigated.

Based on the experimental results, it appears that the amount of gypsum and chemical composition of cement crafted are the main parameters that influence the variation in mechanical strength (compression) and the setting time of mortars tested.

**Key word:**

Optimum sulphate , gypsum ,calcium sulphate ,adding minerals ,hydration.

## INTRODUCTION

### Contexte générale de l'étude :

Le ciment Portland, largement utilisé dans le domaine de la construction, est majoritairement composé des phases silicates (silicate tricalcique  $C_3S$  et dicalcique  $C_2S$ ) et des phases aluminates (aluminates tricalcique  $C_3A$  et aluminoferrite tétracalcique  $C_4AF$ ) qui forment le clinker, on ajoute du sulfate de calcium sous forme de gypse ( $CaSO_4, 2H_2O$ ).

La contribution du gypse à l'activité liante du ciment résulte essentiellement d'un effet physico-chimique et mécanique.

- le gypse est susceptible de modifier le processus d'hydratation du ciment ainsi que la structuration des produits hydratés

Cet effet agit simultanément et de manière complémentaire sur les performances finales des matériaux durcis.

Le ciment Portland avec gypse (CEM I) Sans ajout minéral se distingue par un durcissement rapide à sa période initiale en comparaison avec un ciment Portland composé avec ajout, c'est-à-dire avec constituant secondaire (CEM III).

Cette propriété rapide du ciment sans ajout minéral (CEM I), nécessite l'emploi d'un bon activant, chimique (utilisation de gypse avec un taux optimum étudié expérimentalement et utilisation des solutions alcalines qui modifient la prise et le durcissement), mécanique (broyage poussé du liant hydraulique) ou thermique (ralentir des réactions chimiques par l'élévation de la température).

Les ciments Portland sans ajouts minéraux (CEM I) ont des temps de prise un peu plus rapides que les ciments Portlands composés avec ajout minéraux (CEM II), surtout dans le cas de bétonnage par temps chaud.

L'ajout (addition) gypse exploités pour la fabrication des ciments Portlands sans ajouts. Du point de vue hydratation, ils présentent un facteur très important dans les hydratations du ciment sans ajout minéral (CEM I) du moment que la consommation en clinker baisse en fonction du taux du gypse utilisé.

L'utilisation de gypse avec un taux optimum étudié expérimentalement dans la fabrication du ciment sans ajout minérale (CEM I) présente les avantages suivants :

- Amélioration les caractéristiques physico-chimique et mécanique de ciment CEM I.
- Amélioration des propriétés des matériaux cimentaires (mortier).

### **Objectifs de l'étude :**

La stratégie de cette étude est basée sur l'étude des effets du gypse (variation du taux de gypse) sur les propriétés physico-chimiques et mécaniques du ciment afin de pouvoir les améliorer pour obtenir un ciment ayant un optimum de gypse ( $\text{SO}_3$ ). L'objectif de notre étude est d'évaluer expérimentalement l'influence de taux d'addition gypse (0,5%, 1,5%, 3,0%, 4,3%, 5,0%, 5,8%, 6,2%, 7,1%, 8,0% et 8,8%) sur ces propriétés physico-chimiques et mécaniques de mortier. L'étude vise à atteindre les objectifs principaux suivants :

- 1- Etude des effets de l'incorporation d'ajouts gypse sur les propriétés physico-chimiques et mécaniques et la durabilité des mortiers confectionnés à base de ciments CEM I.
- 2- Sélection le dosage optimum de gypse sur les ciments Portlands artificielle (CEM I) les plus performants du point de vue Résistance mécanique ; temps de prise ; consistance normale (E/C) ; retrait et gonflement, chaleur d'hydratation....etc.

Pour se faire ; le mémoire sera composé de quatre chapitre

### **Le premier chapitre :**

Le premier chapitre est destiné à l'étude bibliographique des connaissances sur la fabrication du ciment Portland et leurs constituants de base.

### **Le deuxième chapitre :**

Dans cette partie nous avons exposé l'hydratation des ciments, le rôle et l'effet d'optimisation l'addition gypse destiné à réguler l'hydratation du ciment.

### **Le troisième chapitre :**

Le troisième chapitre est consacré à l'expérimentation. Nous présentons dans cette partie les caractéristiques (propriété physique et chimique) des matériaux utilisés (clinker, gypse) et les méthodes d'essais (description des modes opératoire employés) à base de ciment contenant avec une variation des pourcentages de gypse.

### **Le quatrième chapitre :**

Présente les résultats expérimentaux obtenus et les discussions tirées lors de cette étude.

## Chapitre I : Fabrication du Ciment Portland

### Introduction :

Les romains furent les premiers à fabriquer un liant hydraulique capable de faire prise sous l'eau en mélangeant de la chaux à des cendres volcaniques. Bien que connues depuis l'Antiquité, les propriétés hydrauliques de ce mélange sont restées inexplicables pendant des siècles. Ce n'est qu'en 1817 que Louis Vicat en établit la théorie et révéla les principes de fabrication du ciment artificiel que nous utilisons encore aujourd'hui.

L'écossais « aspidine » prit en brevet d'invention en 1824, sur la fabrication d'un liant à partir d'un mélange de chaux et d'argile qu'il appela « ciment portland » à cause de l'aspect de ce liant durci qui rappelait celui de la pierre calcaire de la presqu'île de Portland. C'est le premier ciment, père d'une longue lignée. Ainsi, le XX<sup>e</sup> siècle a ouvert la voie aux ciments artificiels qui prendront progressivement le pas sur les chaux. L'accélération sera plus manifeste à l'issue de la deuxième guerre mondiale lorsque le secteur du bâtiment produit essentiellement des logements neufs bâtis à partir d'éléments préfabriqués, et n'utilisant plus les chaux. Est l'époque charnière où la chaux est en passe d'abandon, où son ancienneté est une marque d'archaïsme alors que les ciments améliorent les performances des liants. [1]

### I. Le ciment :

Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire capable de faire prise dans l'eau. Il se présente sous l'aspect d'une poudre très fine qui, mélangée avec de l'eau, forme une pâte faisant prise et durcit progressivement dans le temps. Ce durcissement est dû à l'hydratation de certains composés minéraux notamment des silicates et d'aluminates de calcium. La proportion de chaux et de silice réactive doit être au moins de 50% de la masse de ciment. Les ciments courants ont pour produit essentiel ; le clinker associé à d'autres constituants. Ces constituants modifient les propriétés du ciment grâce à leurs caractéristiques chimiques ou physiques. Dans la mesure où ils sont des sous-produits d'autres industries, ils contribuent à amoindrir le prix revient.

## I.1 Constituants de base :

La composition de base des ciments actuels est un mélange de silicates et d'aluminates de calcium résultant de la combinaison de la chaux (CaO) avec de la silice (SiO<sub>2</sub>), de l'alumine (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), et de l'oxyde de fer (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). La chaux nécessaire est apportée par des roches calcaires, l'alumine, la silice et l'oxyde de fer par des argiles. Les matériaux se trouvent dans la nature sous forme de calcaires, d'argiles ou marnes et contiennent, en plus des oxydes déjà mentionnés, d'autres oxydes.

### I.1.1 Le clinker (K) :

Le clinker commun à tous les ciments courants, est un mélange de 80% de calcaire (calcaire, craie) et de 20% d'argile (silice – alumine – oxyde de fer) cuit puis broyé avec un retardateur de prise (gypse) pour obtenir du ciment portland. La matière première est extraite de la carrière puis broyée avec éventuellement d'autres additifs dans les proportions désirées pour obtenir le cru. Cette chaîne de fabrication sera développée par la suite. Le tableau 1.1 donne une composition moyenne du cru.

composé	Proportion massique		
	Mini	Idéal	Max
CaO	60%	65%	69%
SiO <sub>2</sub>	18%	21%	24%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4%	6%	8%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1%	3%	8%
MgO	0%	2%	5%
Alcalis	0%	1%	2%
SO <sub>3</sub>	0%	1%	3%

**Tableau I-1 : Composition du cru pour la fabrication du clinker.**

Le clinker est composé de quatre phases cristallines principales figurant dans le tableau 1.2 ci-après :

Désignation	Notation chimique	Notation cimentière	En général
Silicate tricalcique ou Alite	$3\text{CaO}, \text{SiO}_2$	$\text{C}_3\text{S}$	45-----65%
Silicate bicalcique ou Bélite	$2\text{CaO}, \text{SiO}_2$	$\text{C}_2\text{S}$	10-----30%
Aluminate tricalcique ou Célite	$3\text{CaO}, \text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{C}_3\text{A}$	5-----15%
Aluminoferrique tétra calcique	$4\text{CaO}, \text{Al}_2\text{O}_3, \text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{C}_4\text{AF}$	5-----12%

**Tableau I-2 : Les phases du clinker.**

$\text{C}_3\text{S}$  ou l'alite : silicate tricalcique de composition chimique  $3\text{CaO}, \text{SiO}_2$  est le constituant majoritaire du clinker de ciment Portland (50 à 70 %). Il s'agit d'une forme impure (phase cristallisée, Se forme vers 1400 à 1450 °C, sa densité  $d= 3.15$ ).

La formule  $\text{C}_3\text{S}$  réagissant très rapidement avec l'eau. L'alite est la phase minérale permettant d'obtenir les principaux des propriétés mécaniques du ciment (la résistance mécanique au jeune âge)

$\text{C}_2\text{S}$  ou la Bélite : silicate bicalcique de composition chimique  $2\text{CaO}, \text{SiO}_2$  qui permet au matériau d'atteindre des résistances mécaniques plus importantes à moyen et long termes. Se forme entre 1200 à 1300 °C, sa densité  $d=3.28$ . La Bélite constitue entre 15% et 30% du clinker.

$\text{C}_3\text{A}$  ou la Célite : aluminate tricalcique de composition chimique  $3\text{CaO}, \text{Al}_2\text{O}_3$  à une densité proche de 3.04 qui participe principalement au phénomène de prise mais qui ne présente que de faibles résistances mécaniques. La Célite constitue entre 5% et 10% du clinker. L'hydratation rapide du  $\text{C}_3\text{A}$  est ralentie par l'ajout de sulfates (gypse) qui jouent le rôle de régulateur de prise.

C<sub>4</sub>AF : aluminoferrique tétracalcique de composition chimique 4CaO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Le C<sub>4</sub>AF constitue entre 5% et 10% du clinker. Le C<sub>4</sub>AF a pour rôle de réduire la température de formation du clinker, jouent un rôle peu important dans ses réactions de durcissement. Il dégage peu de chaleur et participe peu au développement de la résistance mécanique. [2]

### **I.1.2 Gypse :**

L'extraction de la roche passe par plusieurs étapes, la plus importante est le minage. Ainsi, l'abattage à l'explosif est aujourd'hui, la technique la plus utilisée et la plus répandue dans les carrières à ciel ouvert. Elle permet de fragmenter des volumes importants de roche pour la reprise et le traitement du matériel abattu.

Cependant, L'explosif est devenu la principale source d'énergie pour les travaux d'abattage, de découpage et de sautage. Son utilisation industrielle pour ces travaux perd son caractère empirique pour devenir une technique à base scientifique.

#### **I.1.2.1 ETAPES D'EXTRACTION DU GYPSE :**

La technique moderne d'extraction du gypse. Elle débute par la foration des trous de mine et se termine par le concassage du matériel abattu.

##### **➤ La foration :**

Etape fondamentale, elle se résume au creusement des trous sub-verticaux à des profondeurs variables, selon la hauteur du gradin.

##### **➤ Tir de mine :**

Chaque semaine un tir de mine pour abattre la roche. La matière explosive utilisée est surtout la Marmanit, parfois l'Anfomil et la Gélanit . La Marmanit est un explosif à base de nitrate d'ammonium (80% en masse) et d'un explosif pur (TNT), recommandé pour les roches tendres à mi-dures comme le cas du gypse.



Figure I-1: les différents explosifs utilisés pour abattre le gypse

(A : la Marmanit, B : la Gélanit, C : l'Anfomil)

➤ **Le Chargement :**

Après le tir, le matériel abattu doit être assemblé et nettoyé ensuite chargé sur des camions. Cette étape est assurée par des engins spécifiques comme les chargeurs sur pneus et les pelles hydrauliques.

➤ **Le transport :**

Une fois le matériel abattu est chargé sur les camions, ces derniers de dirigent vers le concasseur primaire. C'est une étape très importante en même temps très délicate car les engins assurant cette opération sont de nombre élevé. Leur mouvement fréquent et continu provoque une certaine densité de circulation, soit à la carrière soit au niveau d'unité de traitement. C'est pour cette raison que les dirigeants de la carrière adoptent un plan de circulation de ces engins (cycle de rotation) bien défini durant toute l'année.

➤ **Le concassage :**

Cette étape permet de réduire, de façon successive, la taille des éléments. Différents types de concasseurs assurent cette opération. L'entreprise Knauf a choisi un concasseur à mâchoires comme concasseur primaire. Il est constitué par deux mâchoires, l'une fixe et l'autre mobile.[3]

## I.2. Fabrication du ciment :

La fabrication du ciment est un procédé complexe qui exige un savoir-faire, une maîtrise des outils et des techniques de production, des contrôles rigoureux et continus de la qualité.

### I.2.1 Les étapes de fabrication du ciment :

On peut distinguer cinq étapes principales constituant le processus de fabrication du ciment.

- l'extraction de la matière dans la carrière et son homogénéisation.
- la préparation des matières première afin de constituer le cru.
- la cuisson aboutissant à la création de clinker.
- le broyage du clinker et des ajouts pour fabriquer le ciment.
- le stockage et l'expédition.

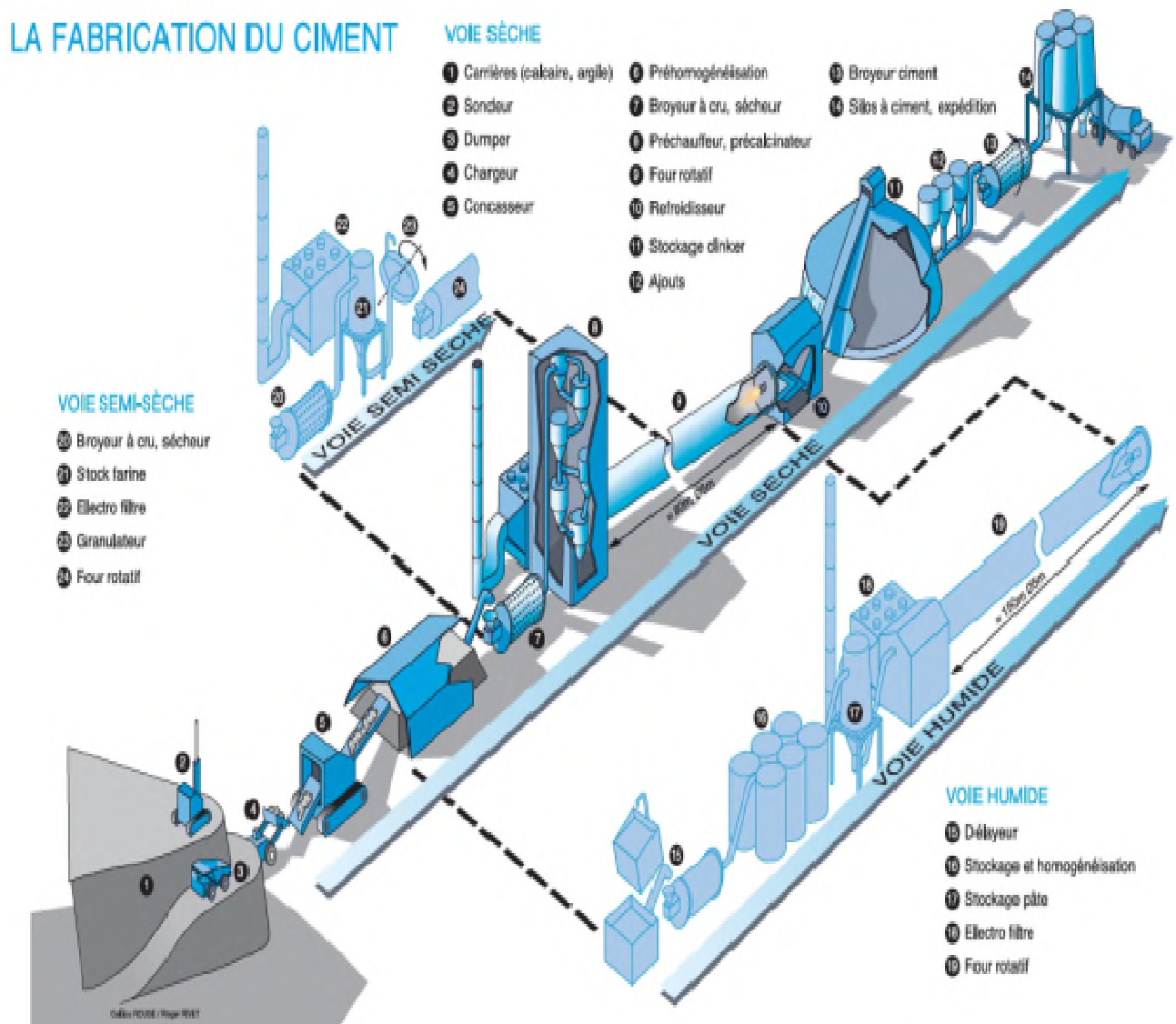


Figure I-2 : Le processus de fabrication du ciment Portland.

### I.2.1.1 L'extraction et la préparation des matières première :

Les matières premières sont extraites des parois rocheuses d'une carrière à ciel ouvert par abattage à l'explosif ou à la pelle mécanique ou encore par ripage au bulldozer. La roche est reprise par des dumpers vers un atelier de concassage. Pour produire des ciments de qualités constantes, les matières premières doivent être très soigneusement échantillonnées, dosées et mélangées de façon à obtenir une composition parfaitement régulière dans le temps.

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

- carbonate de calcium de 77% à 83%.
- silice ( $\text{SiO}_2$ ) : de 13 à 14%.
- Alumine ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) : de 2 à 4%.
- Oxyde ferrique ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) : de 1,5 à 3%.

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



Figure I-3 : Carrière d'extraction de calcaire et d'argile.



**Figure I-4 : Concassage des matières premières au niveau de la carrière.**



**Figure I-5 : Transport par tapis et par dumper.**



**Figures I-6 : Hall de pré-homogénéisation.**

### I.2.1.2 Le séchage et le broyage :

Pour favoriser les réactions chimiques qui suivent, les matières premières doivent être séchées et broyées très finement (quelque micron) dans des broyeurs à boulets ou dans des broyeurs à moule verticaux. Ces derniers, plus récents, sont plus économiques et permettent un séchage plus efficace. Ensuite 4 voies sont possibles : la voie humide, la voie sèche, la voie semi-humide, et semi-sèche.

La première est plus ancienne et implique une grande consommation d'énergie pour évaporer l'eau excédentaire. Dans ces procédés, les matières premières sont parfaitement homogénéisées et séchées lors de l'opération de broyage afin d'obtenir la farine. Celle-ci peut être introduite directement dans le four sous forme pulvérulente (voie sèche), ou préalablement transformée en « granules » par humidification (voie semi-sèche).



Figure I-7 : Broyeur cru.

### I.2.1.3 La cuisson :

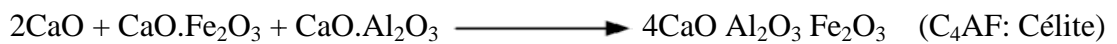
La cuisson se fait à une température voisine de 1450 °C dans un four rotatif, long cylindre tournant de 1,5 à 3tour/minute et légèrement incline.la matière chemine lentement et se préchauffe le cru a environ 800 °C. À la sortie du four, un refroidisseur à grille permet d'assurer la trempe nodules incandescents et de les ramener à une température d'environ 100 °C. Tout au long de la cuisson, un ensemble de réaction physico-chimique conduit à l'obtention du clinker.

\*la décarbonatation du carbonate de calcium (calcaire) donne la chaux vive.

\*l'argile se décompose en ses constituantes silices et alumine qui se combinent à la chaux pour former des silicates et aluminates de chaux. Ce phénomène progressif constitue la clinkérisation.

Les phénomènes physico-chimiques à la cour de la cuisson sont comme suit :

- A 100 °C : évaporation de l'eau mécanique ou eau libre.
- Entre 450 et 550 °C : Evaporation de l'eau de constitution (chimique) ou cristalline.
- A partir de 650 °C : Formation des aluminates et ferrites de calcium.



- A partir de 700 °C : Décomposition du calcaire.  $\text{CaCO}_3 \longrightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$
- Vers 800 °C : Formation du silicate bicalcique ( $2\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ) 'Bélite'.



- A partir de 1250 °C: le silicate tricalcique applé 'Alite' commence à apparaître à partir de la chaux et de la Bélite.  $2\text{CaO} + 2\text{CaO} \text{ SiO}_2 \longrightarrow 3\text{CaO} \text{ SiO}_2 \quad (\text{C}_3\text{S : Alite})$
- Entre 1260 et 1450 °C : apparition du premier liquide
- T = 1450 °C : Clinkérisation.



Figure I-8 : Préchauffeur.



Figure I-9 : Four rotatif.

#### I.2.1.4 Le broyage du clinker :

Pour obtenir un ciment aux propriétés hydraulique actives, le clinker doit être à son tour broyé très finement. Ce broyage s'effectue dans des broyeurs à boulets. Les corps broyant sont constitués de boulets d'acier qui, par choc, font éclater les grains de clinker et amènent progressivement le ciment à l'état de fine farine, ne comportant que très peu de grains supérieurs à 80 microns. À la sortie du broyeur, un cyclone sépare les éléments suffisamment fins des autres qui sont renvoyés à l'entrée du broyeur, C'est également lors du broyage que l'on ajoute au clinker le gypse (3 à 5 %) indispensable à la régulation de prise du ciment. on obtient alors le ciment « ciment portland

#### I.2.1.5 Le stockage et l'expédition des ciments :

Après le broyage le ciment est sous sa forme définitive tel que nous le connaissons sur les chantiers il est alors stocké dans des silos verticaux qu'il faut entretenir régulièrement. En effet au bout d'un certain temps le ciment sèche dans les silos et s'entasse il faut donc qu'il se renouvelle régulièrement dans les silos afin qu'il n'y stagne pas. Pour ce faire, on installe, des injections d'air dont la pression est plus forte vers l'extérieur et moins forte vers le centre du silo. En tête du silo un aspirateur d'air est également mis en place pour dégonfler le silo. Par ce procédé, le ciment acquiert les propriétés d'un fluide et ne se bloque plus, économisant des pertes qui peuvent être conséquentes. Le ciment est ensuite extrait de ces silos par un bec verseur. Ensuite, les ciments quittent l'usine en sac ou en vrac. [4]



Figure I-10 : Silos de stockage de ciment.



Figure I-11 : Expédition.

I.2.2 Méthode de fabrication du ciment :

Pour fabriquer du ciment il existe quatre méthodes dont les plus connues sont

(voir figure 1-12) :

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

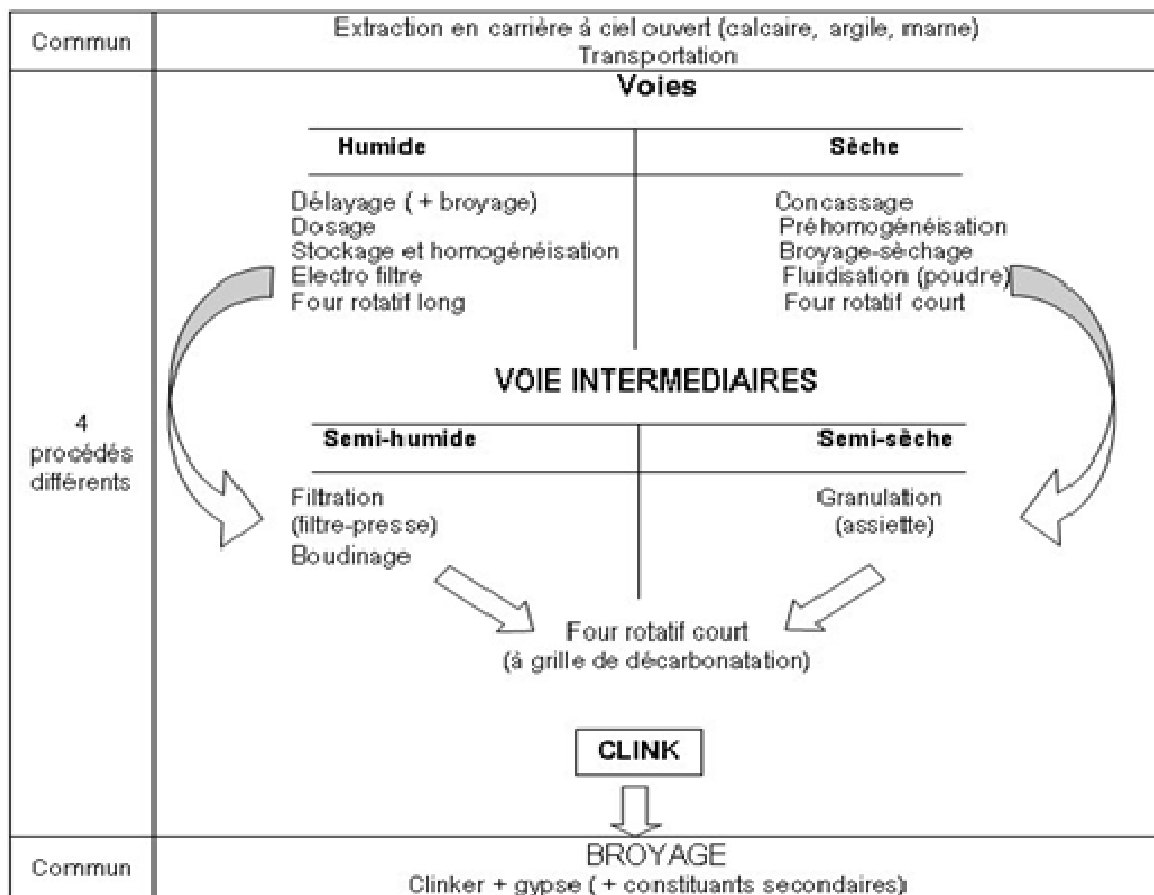


Figure I-12 : Le schéma de la fabrication du ciment.

On ce qui concerne la méthode la plus utilisée on peut la décrire :

### **I.2.2.1 Fabrication par Voie sèche :**

Les ciments usuels sont fabriqués à partir d'un mélange de calcaire ( $\text{CaCO}_3$ ) 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 ( $\text{CO}_2$ ) 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 :

1-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.

2-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.

3- 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. [5]

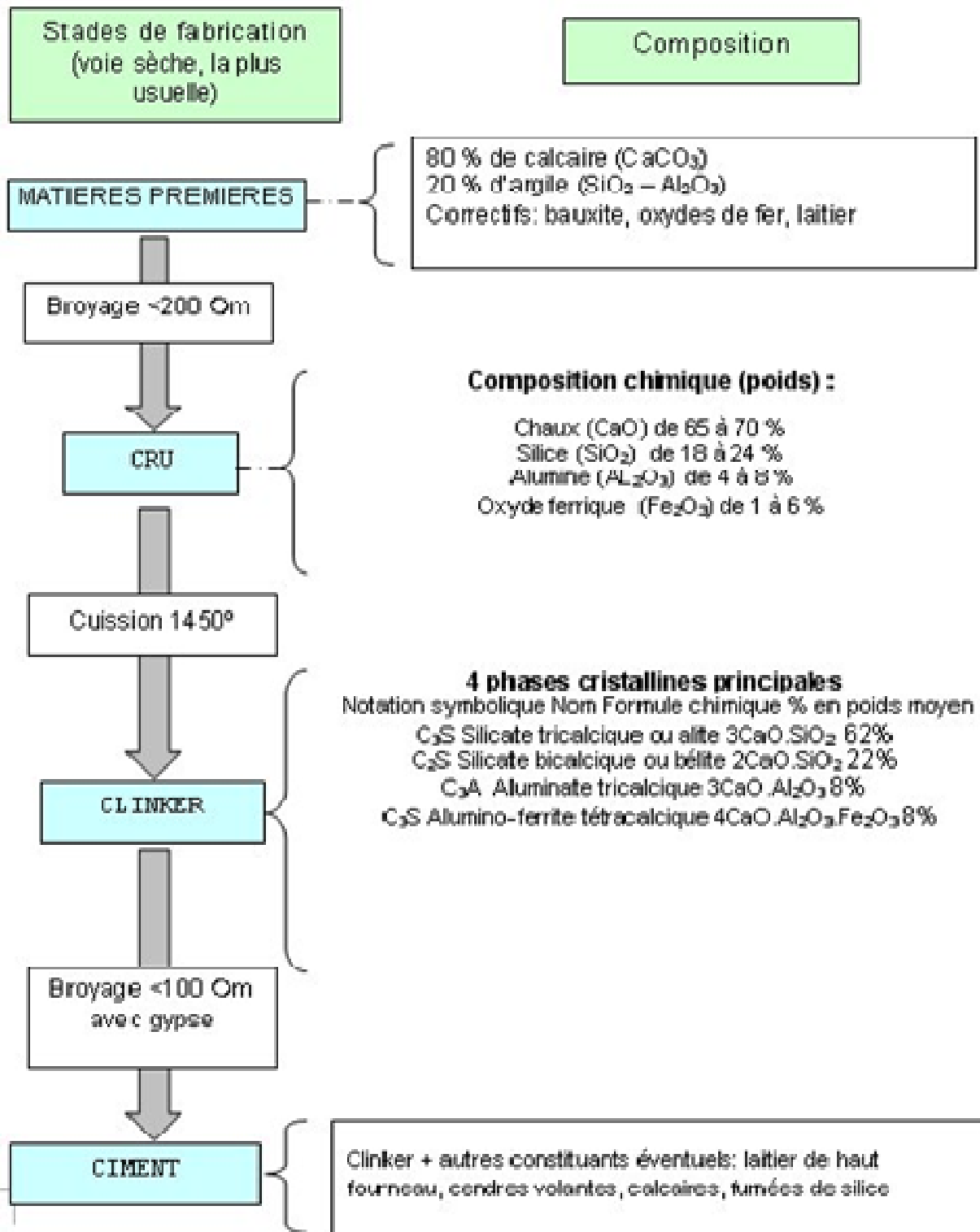


Figure I-13 : Fabrication du ciment par voie sèche

## I.2.3 Différente type de ciment :

Type / sans ou avec lettre	Composition
CEM I ou CPA-CEM I	Clinker : 95 à 100 % Gypse : 0 à 5 % Ajouts : sans
CEM II /A ou CPJ-CEM II /A  CEM II /B ou CPJ-CEM II /B	Clinker : 80 à 94 % Gypse : 0 à 5 % Ajouts : 6 à 20 % de soit laitier, pouzzolane, cendres, calcaire schiste ou maxi 10 % fumées de silice Clinker : 65 à 79 % Gypse : 0 à 5 % Ajouts : 21 à 35 % de soit laitier, pouzzolane, cendres, calcaire schiste ou maxi 10% fumées de silice.
CEM III /A ou CHF-CEM III /A  CEM III /B ou CHF-CEM III /B  CEM III /C ou CLK-CEM III /C	Clinker : 35 à 64 % Gypse : 0 à 5 % Ajouts : 36 à 65 % de laitier de Haut Fourneau Clinker : 20 à 34 % Gypse : 0 à 5 % Ajouts : 66 à 80 % de laitier de Haut Fourneau Clinker : 5 à 19 % Gypse : 0 à 5 % Ajouts : 81 à 95 % de laitier de Haut Fourneau
CEM IV /A ou CPZ-CEM IV /A  CEM IV /B ou CPZ-CEM IV /B	Clinker : 65 à 90 % Gypse : 0 à 5 % Ajouts : 10 à 35 % de soit de pouzzolane, cendres siliceuses ou maxi 10 % de fumées de silice. Clinker : 45 à 64 % Gypse : 0 à 5 % Ajouts : 36 à 55 % de soit de pouzzolane, cendres siliceuses ou maxi 10 % de fumées de silice.
CEM V /A ou CLC-CEM V /A  CEM V /B ou CLC-CEM V /B	Clinker : 40 à 64 % Gypse : 0 à 5 % Ajouts : 18 à 30 % de soit de pouzzolane, cendres siliceuses Clinker : 20 à 39 % Gypse : 0 à 5 % Ajouts : 31 à 50 % de soit de pouzzolane, cendres Siliceuses.

Tableau I-3 : Différente type de ciment portland.

### I.3. Composition du ciment

#### I.3.1. Composition du clinker :

##### I.3.1.1. Composition chimique :

Les principaux oxydes (Tableau 1-3) sont en % pondéral d'après l'analyse chimique par fluorescence X d'un clinker de ciment portland. Elle consiste à exciter l'échantillon à l'aide d'un tube à RX et d'analyser le spectre (en longueurs d'onde ou en énergie) de rayons X émis. Ce spectre est représentatif de la composition élémentaire de l'échantillon.

Elément	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>
Fourchette(%)	62 à 68	18 à 24	4 à 8	2 à 5	0 à 5	0 à 5	0 à 2	0 à 2	0 à 2
Moyenne (%)	66,6	21,9	6,3	2,5	1	0,8	0,2	0,2	0,2

Tableau I-4 : Composition chimique du clinker.

##### I.3.1.2 Composition minéralogique :

Les principaux composants anhydres obtenus lors du refroidissement rapide du clinker

- Le silicate tricalcique  $3\text{CaO}.\text{SiO}_2$  ( $\text{C}_3\text{S}$ ) (50-70% du clinker).
- Le silicate bicalcique  $2\text{CaO}.\text{SiO}_2$  ( $\text{C}_2\text{S}$ ) (10-30% du clinker).
- L'aluminate tricalcique  $3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$  ( $\text{C}_3\text{A}$ ) (2-15% du clinker).
- L'alumino-ferrite tétracalcique (Ferro-aluminate tétracalcique)



Le clinker contient encore en faibles quantités, sous forme de solution solide ou pris dans des combinaisons complexes, des alcalis (Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O), de la magnésie (MgO), et diverses traces de métaux. La teneur en alcalis et magnésie doit rester faible, car ces matières peuvent influencer défavorablement la stabilité du ciment durci. [6]

### I.3.2. Les caractéristiques du ciment portland :

#### I.3.2.1-Prise (Norme EN 196-3) :

La prise du ciment c'est-à-dire le passage de la pâte de ciment (ciment + eau) d'une consistance fluide à un état solide est une phase essentielle dans la fabrication du béton ou mortier puisqu'elle donne sa cohésion au matériau. La norme spécifie, suivant les ciments, un temps de prise minimal de :

1h30 pour les ciments des classes 32,5 et 32.5R.

1h pour les ciments des classes 42,5-42,5R-52,5-52,5R.

D'une façon générale les temps de prise sont supérieurs à ces valeurs minimales, l'ordre de grandeur étant de 2h 30 à 3h30 pour la grande majorité des ciments, ces valeurs s'entendent pour une température ambiante de 20°C.

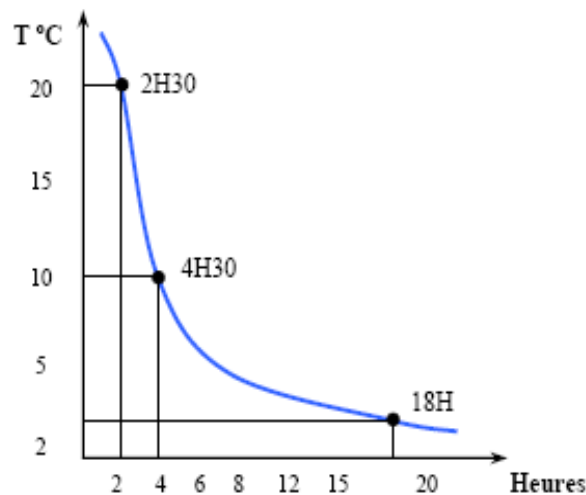


Figure I-14 : Evolution du temps de prise en fonction de la température.

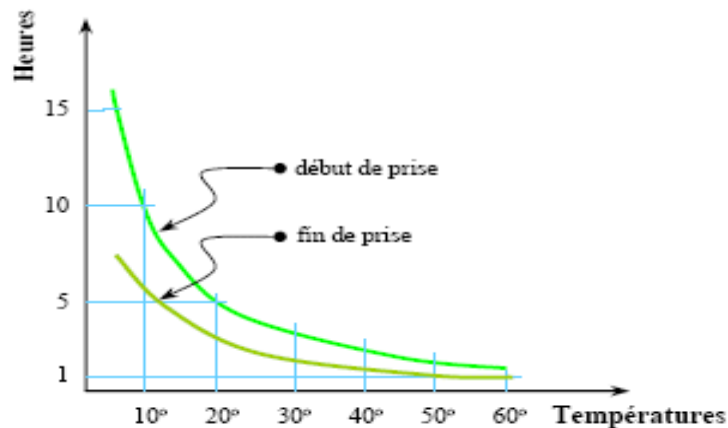


Figure I-15 : Influence de la température sur la prise des ciments.

### I.3.2.2-Durcissement :

Une fois la prise amorcée, le phénomène d'hydratation se poursuit, c'est la période de durcissement rapide qui se poursuit pendant des mois voire des années au cours desquelles les résistances mécaniques continuent de croître. Lorsqu'on désire un durcissement rapide, on choisit des ciments de classe élevée et de préférence de classe « R » c'est-à-dire ayant la caractéristique complémentaire. « Rapide ». Il est également possible d'utiliser du ciment alumineux fondu CA, qui après quelques jours a atteint la quasi-totalité de sa résistance.

### I.3.2.3-Finesse de mouture (Norme EN 196-6) :

La finesse de mouture, également appelée finesse Blaine, exprimée en  $\text{cm}^2/\text{g}$ , représente la surface spécifique ou surface développée d'une masse de 1g de ciment. Elle est, d'une façon générale, comprise entre 3000 et 3500  $\text{cm}^2/\text{g}$ , certains ciments prompts naturels « CNP » ont une Blaine supérieure à 4500  $\text{cm}^2/\text{g}$ . Plus la finesse est grande, plus les résistances sont précoces et élevées, mais par contre, plus les risques de retrait et par conséquent de fissuration ainsi que d'éventement du Ciment sont accrus.



Figure I-16 : Influence de la surface spécifique sur la résistance à la compression.

### I.3.2.4-Retrait Norme NF P15-433 :

Lorsque l'élément du béton ou mortier se trouvera dans une atmosphère ayant une humidité relative inférieure à celle d'équilibre de l'élément, les dimensions de ce dernier diminuent ; c'est le retrait. On mesure le retrait sur des éprouvettes prismatiques de mortier de 16 cm de longueur et d'une section droite de  $4 \times 4 \text{ cm}$ , conservées dans l'air à une température de  $20^\circ\text{C}$  et une hygrométrie de 50%. La norme NA 440 impose les valeurs limites, à 28 jours, de :

- 800  $\mu\text{m}/\text{m}$  pour les ciments portland CEM I et CEMII de classe 32,5R.
- 1000  $\mu\text{m}/\text{m}$  pour des types de ciment identique mais des classes 32,5R-42,5 et 42,5R.

Les principaux paramètres agissant sur le retrait sont :

- la nature du ciment ;
- la finesse de mouture ;
- le dosage en ciment, dans le béton ;
- le dosage en eau ;
- la propreté et nature des granulats ;

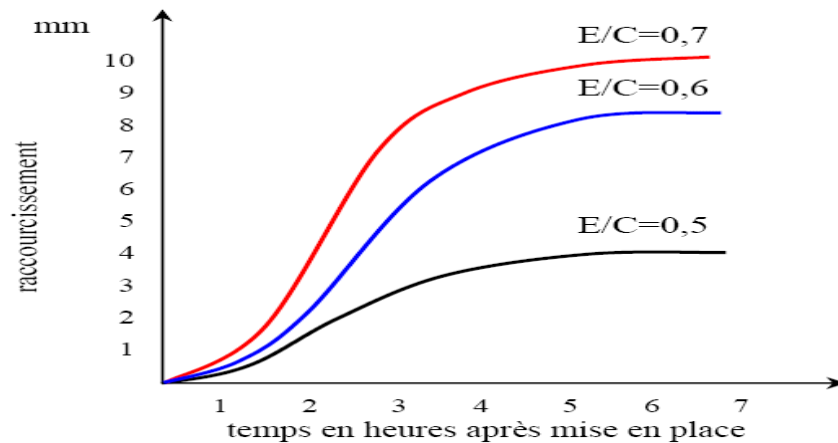


Figure I-17 : Influence de l'E/C sur le retrait plastique des mortiers.

### I.3.2.5-Chaleur d'hydratation Norme NF EN 196-9

La dissolution des différents constituants est exothermique et, selon leurs pourcentages relatifs, le dégagement de chaleur est donc plus ou moins important, c'est le cas par exemple des ciments riches en  $C_3A$  que l'on intérêt à les temps chaud. Suivant les ciments, cette chaleur est comprise à 12 heures, approximativement, entre 65 j/g par exemple pour certains CHF-CEM III/B et 300 j/g pour certains CEM I.

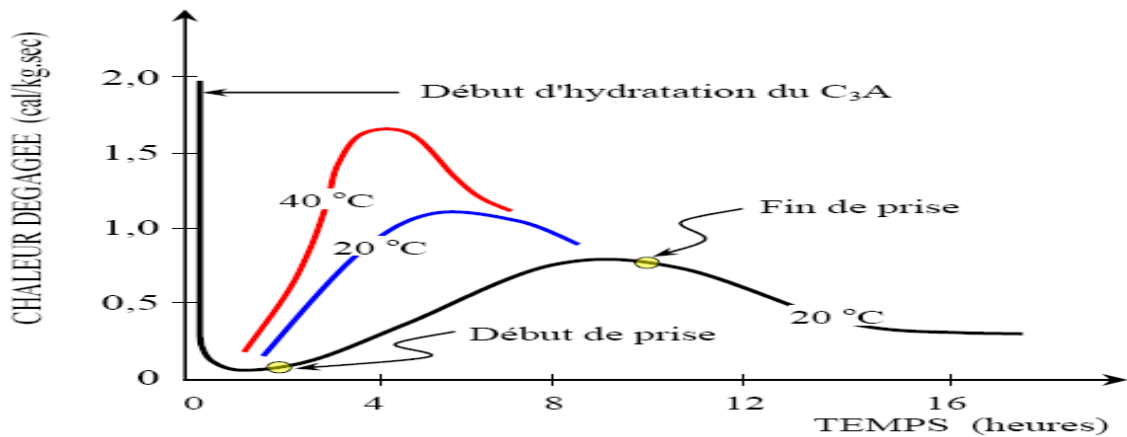


Figure I-18 : Chaleur dégagée lors de l'hydratation du CPA

Si l'élément se trouve dans une atmosphère à humidité relative supérieure à celle d'équilibre de l'élément, les dimensions de ce dernier augmentent ; c'est le gonflement. Ce qui entraîne l'apparition des tensions internes. [7]

### I.3.2.7-La consistance (Norme EN 196-3) :

La consistance de Vicat est généralement utilisée pour contrôler la consistance du ciment. C'est un essai simple et très pratique, son index, permettant d'apprécier la consistance grâce à la lecture de la distance  $d$ , est compris entre 0 et 50 mm. il est mal adapté aux mortiers très ferme (ou d'inférieur a 0) ou trop plastique ( $d$  supérieur à 50mm). [8]

### I.3.2.8-Résistance à la compression (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) cm<sup>3</sup>.

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.

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. [9]

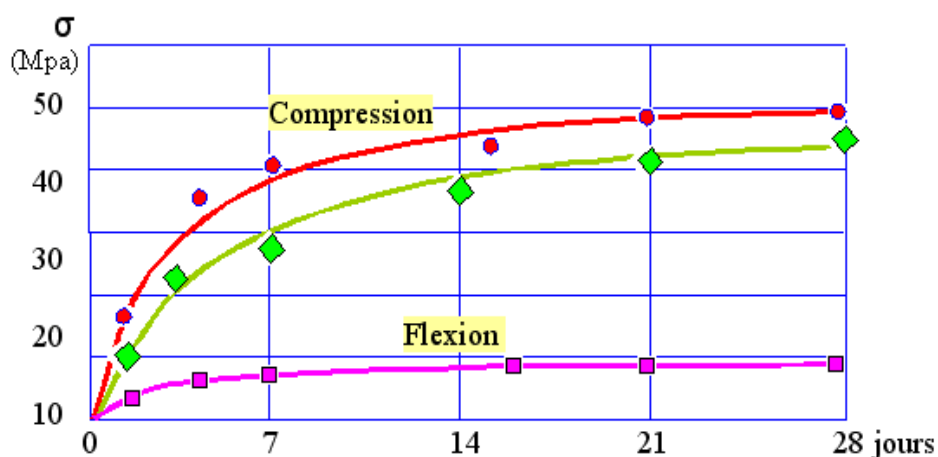


Figure I-19 : Résistance du mortier normale.

#### I.4. Industrie cimentaire en Algérie :

L'industrie cimentaire en Algérie est régie par deux grandes entreprises : Le groupe public GICA et l'entreprise étrangère Lafargeholcim.

##### I.4.1. Présentation du groupe Lafargeholcim :

LAFARGEHOLCIM est un groupe Partenariat Suisse Français de matériaux de construction, leader mondial dans son secteur. Il produit et vend principalement du ciment, des granulats et du béton prêt à l'emploi dans le monde entier. Lafarge a développé des ciments spéciaux et des bétons innovants de renommée internationale.

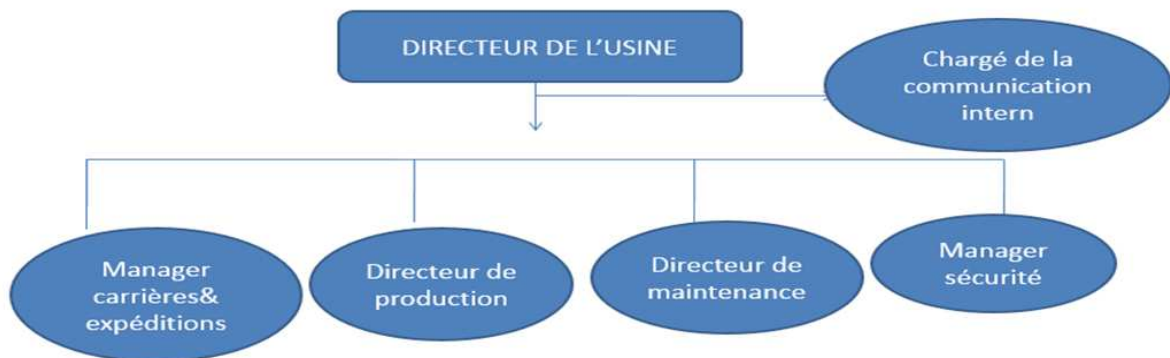


Figure I-20 : Organigramme de l'entreprise.

##### I.4.1.1 Départements de l'entreprise

La structure de LAFARGEHOLCIM se divise en quatre départements :

- Département de Sécurité : l'entreprise réserve pour ça une école spécialisée en formation sécurité avec un objectif de 0 accident.
- Département de maintenance : la tâche principale de ce département est de faire suivre les machines chaque jour avec un but de minimiser l'arrêt de machine ou de four.
- Département de Production : autrement dit Service procès ; c'est le département le plus essentiel ; car toutes les mesures de qualité ou de taux de production ou de fabrication sont calculé et exécuté.
- Département de Carrière : il se forme d'un ensemble de bureau spécialiser « bureau d'exploitation ; bureau de géologue ; Bureau de topographe etc... chacun de ces bureau prend la responsabilité d'une tache par ex : plan de tire ; calcule de réserve ; plan topographique.

#### I.4.1.2 LAFARGEHOLCIM En Algérie :

LAFARGEHOLCIM possède 2 cimenteries (M'Sila & Oggaz) avec une capacité totale de production qui dépasse les 8 millions de tonnes, gère en partenariat avec le GICA la cimenterie de Meftah et compte 22 centres de production de béton d'une capacité de 1Mm3.

LAFARGEHOLCIM, Algérie compte plus de 2600 collaborateurs et s'investit dans le développement d'actions citoyennes envers ses communautés. [10]



Figure I-21 : Lafargeholcim hammam Dalâa M'sila.

#### I.4.2. Le Groupe industriel des ciments d'Algérie (GICA)



Le groupe a consacré un investissement de 154 milliards de DA pour porter sa capacité de production annuelle de ciment à 18,5 millions de tonnes à l'horizon 2017, contre 11,5 millions de tonnes aujourd'hui.

La vision stratégique du Groupe **GICA** est basée essentiellement sur :

1. L'augmentation de sa part de marché.
2. La diversification de sa gamme de produits.
3. La création d'emplois et la formation.
4. Un positionnement sur le marché international.

➤ **SCIZ - Société des Ciments de Zahana,Spa :**

Production et commercialisation des ciments :

- Ciment portland composé.
- Ciment (HTS) CRS.

➤ **SCAEK - Société des Ciments de Ain El Kébira,Spa :**

Production et commercialisation de

- Ciment Portland composé CEM II 42, 5.
- Ciment résistant aux sulfates(CRS).
- Ciment prise mer(PM).

➤ **ECDE - Entreprise des Ciments & Dérivés d'Ech-Cheliff, Spa :**

Fabrication et commercialisation du ciment portland composé CEM II/A 42.5 et autres types de ciment à la demande.

➤ **SCIS - Société des Ciments de Saida, Spa :**

Production de ciment, ciment portland composé CEM II A 42.5, employé en :

- Maçonnerie.
- Béton courant (non armé ou faiblement armé).
- Remplissage de fondations, portées réduites, décoffrage différé.
- Béton armé sollicité pour structures porteuses.
- Béton routier.
- Travaux de fondations en milieu non agressif.
- Travaux en grandes masses moyennement sollicités qui exigent une chaleur d'hydratation modérée. [11]

## I.4.3 Différent cimenterie en Algérie [12] :

LOCALITE	WILAYA	ENTREPRISE	DOMAINE	Capacité T/An	Etat du projet	Début de travaux	Fin des travaux	Cout Millions Dollars
OGGAZ	Mascare	Lafarge	Privé Etranger	3 900 000	Existant			
HAMMAM DHALAA	M'sila	Lafarge	Privé Etranger	5 300 000	Existant			
HADJER-SOUD	Skikda	SCHS (GICA+Buzzi Unicem)	Public+Privé Etranger	950 000	Existant			
AIN TOUT	Batna	SCIMAT (GICA)	Public	1 000 000	Existant			
EL HASSASNA	Saida	SCIS (GICA)	Public	500 000	Existant			
RAIS HAMIDOU	Alger	SCAL (GICA)	Public	450 000	Existant			
ELMA LABIOD	Tébassa	SCT (GICA)	Public	500 000	Existant			
HAMMA BOUZIANE	Constantine	SCHB (GICA)	Public	1 000 000	Existant			
OUED SLY	Chelf	ECDE (GICA)	Public	4 000 000	Encour d'extension			348
AIN KEBIRA	Sétif	SCAEK (GICA)	Public	3 000 000	Encour d'extension			370
MAGHRA	M'sila	HCC (SASACE+PCC)	Privé DZ+Privé Etranger	2 200 000	En travaux	2015	2017	250
BRANIS	Biskra	Biskra Ciment	Privé DZ	1 000 000				
ZAHANA	Mascara	SCIZ (GICA+Asec)	Public+Privé Etranger	1 200 000	Extension prévue			357
MEFTAH	Blida	SCMI (GICA+LAFARGE)	Public+Privé Etranger	1 200 000	Extension prévue			
SOUR EL GHOZLANE	Bouira	SCSEG (GICZ+Buzzi Unicem)	Public+Privé Etranger	1 000 000	Extension prévue			
BENI SAF	Ain Témouchent	SCBS (GICA+Pharaon)	Public+Privé Etranger	1 200 000	Extension prévue			348
SIGUS	Oum El Bouaghi	SCS (Lafarge+Sagremac)	Privé DZ+Privé Etranger	2 000 000	Projet			350
BENI ZIREG	Béchar	GICA	Public	1 000 000	Projet			156
IN SALAH	Tamanrasset	GICA	Public	500 000	Projet			
YELLEL	Relizane	GICA	Public	2 000 000	Projet			
L,S,, CHEIKH	El Bayadh	GICA	Public	500 000	Projet			
ILIZI	Illizi	GICA	Public	250 000	Projet			
DJEMOURAH	Biskra	CILAS(Sagremac+Lafarge)	Privé DZ+Privé Etranger	2 700 000	Projet	2014	2016	350
ADRAR	Adrar	CTIEC+?	Pivé Etranger+?	1 500 000	Projet			
YELLEL	Relizane	Groupe ETRHB	Privé DZ	6 000 000	Projet	206		600
EL KHEROUB	Constantine	Cevital	Privé DZ	8 000 000	Projet			

Tableau 1-5: Différent cimenterie en Algérie.

## Chapitre II : Hydratation du ciment Portland.

### Introduction :

Le ciment est un liant hydraulique, il se contact à l'eau en donnant des hydrates stables qui lui confèrent une résistance mécanique. La réaction chimique d'hydratation du ciment conduit donc à la formation d'une pâte qui, après prise, durcit progressivement à l'air ou dans l'eau.

Les mécanismes fondamentaux de l'hydratation du ciment ont été mis en lumière, dès la fin du siècle dernier, par Henri Le Chatelier. Il a notamment décrit les trois phénomènes concomitants qui concourent au phénomène de prise :

- la dissolution des constituants du ciment dans l'eau.
- la formation de solutions sursaturées par rapport aux différents hydrates.
- la précipitation et la cristallisation de ces hydrates dans les vides intergranulaires. [9]

### II-1 Mécanismes de l'hydratation :

Différents mécanismes ont été proposés pour rendre compte du phénomène de l'hydratation du ciment. Cependant, le mécanisme le plus pertinent et toujours confirmé par les constatations expérimentales est celui décrit par Le Chatelier. C'est un mécanisme de dissolution-précipitation : lorsqu'on ajoute de l'eau au ciment, les réactifs anhydres vont progressivement passer en solution. Or, ils sont plus solubles que les produits d'hydratation finaux. Ils vont donc sursaturer la solution et causer la précipitation d'hydrates. Ceci va diminuer la concentration des espèces en solution et donc permettre de nouveau un passage en solution des constituants anhydres. Le phénomène se poursuivant ainsi jusqu'à l'hydratation totale. Lorsqu'on mélange du ciment avec de l'eau, la pâte fraîche de ciment ainsi formée se présente comme un système dispersé constitué d'un réseau de particules dans une phase aqueuse et les principaux mécanismes d'actions de l'eau sur la pâte de ciment sont les suivants :

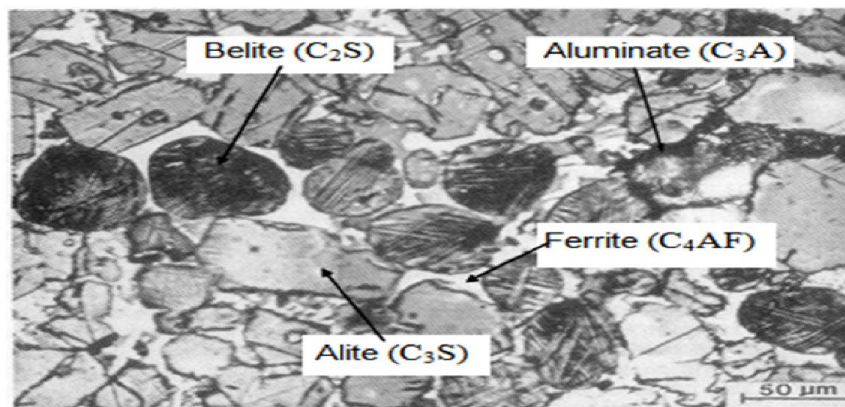
- L'adsorption : fixation physique ou chimique en surface des molécules d'eau.
- L'hydrolyse : transformation du solide et décomposition de l'eau.
- Dissolution/Solvatation : rupture des liaisons ioniques dans le cristal et dispersion des ions dans le liquide qui sont rapidement hydratés.
- Cristallisation : elle a lieu en deux parties, la germination (ou nucléation) qui consiste à former des assemblages (germes) aléatoirement, puis la croissance des germes qui s'effectue par accumulation d'atomes ou de molécules en couches successives au niveau de l'interface liquide/solide.

## II-2 Description du mécanisme de l'hydratation du ciment :

Le sable, le ciment et l'eau. Parmi le composant le plus important est le ciment, dont la propriété essentielle est de durcir au contact de l'eau. C'est pour cette raison qu'on l'appelle le liant hydrique Taylor 1990 a défini de manière générale l'hydratation du ciment par : « L'ensemble des changements qui se produisent quand un ciment anhydre, ou une de ses phases constitutives, est mélangé avec de l'eau ». Dès que le ciment anhydre est mélangé avec de l'eau, l'hydratation commence.

Le ciment est composé de clinker et de sulfates de calcium. Le clinker est obtenu par un broyage à haute température (1450°C) d'un mélange de 20% d'argile et 80% de calcaire. Ses principaux composants minéralogiques sont :

1. Les silicates Tricalcique (Alite) :  $3\text{CaO}.\text{SiO}_2$  ou  $\text{C}_3\text{S}$  (40 à 75%)
2. Les silicates Bicalcique (Belite) :  $2\text{CaO}.\text{SiO}_2$  ou  $\text{C}_2\text{S}$  (6 à 30 %)
3. Les aluminates Tricalciques :  $3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$  ou  $\text{C}_3\text{A}$  (0.1 à 12 %)
4. Ferro aluminate tétracalcique :  $4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$  ou  $\text{C}_4\text{AF}$  (2 à 16 %)



**Figure II-1 : Micrographe en lumière réfléchie d'une section polie de clinker de ciment Portland**

Les abréviations suivantes sont souvent utilisées en chimie du ciment :

C = CaO : la Chaux,

S = SiO<sub>2</sub> : la Silice,

S = SO<sub>3</sub> : le trioxyde de soufre

C = CO<sub>2</sub> : le dioxyde de carbone,

H = H<sub>2</sub>O : l'Eau,

F = Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> : la Ferrite.

En présence d'eau, ces composés vont réagir et former les principaux hydrates de la pâte de ciment, à savoir : le silicate de calcium hydraté ou C-S-H, la portlandite  $\text{Ca(OH)}_2$ , le trisulfoaluminate de calcium appelé aussi ettringite (noté AFt) et le Monosulfoaluminate (noté AFm).

Les réactions chimiques d'hydratation du ciment se font essentiellement à partir des quatre phases minérales du clinker  $\text{C}_3\text{S}$ ,  $\text{C}_2\text{S}$ ,  $\text{C}_3\text{A}$ ,  $\text{C}_4\text{AF}$

Le mélange de ciment et d'eau forme une pâte qui se rigidifie progressivement et devient solide après un délai de quelques heures : c'est le phénomène de prise du ciment.

La prise du ciment est le résultat de réactions entre l'eau et les constituants du ciment anhydre. Le principal produit de l'hydratation est le silicate de calcium hydrate  $\text{CaO.SiO}_2\text{H}_2\text{O}$  ou C-S-H.

Le sulfate de calcium permet de réguler l'hydratation du ciment. Il peut se présenter sous forme dihydraté ( $\text{CaSO}_4.2\text{H}_2\text{O}$ ), d'hémihydrate ( $\text{CaSO}_4. 1/2\text{H}_2\text{O}$ ) ou de mélange des deux. [13]

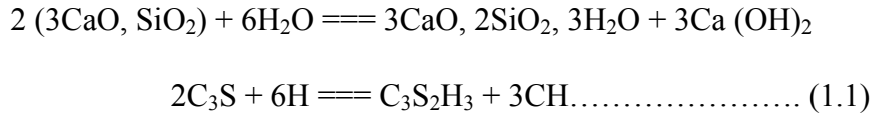
Notation cimentaire	Formule chimique	Dénomination
CH	$\text{Ca(OH)}_2$	Portlandite
C-S-H	$(\text{CaO})_{\text{C/S}}-(\text{SiO}_2)-(\text{H}_2\text{O})_{\text{H/s}}$	Silicate de calcium hydraté
$\text{C}_3\text{A}(\text{CS})_3\text{H}_{32}$	$[\text{Ca}_3\text{Al(OH)}_6]_2, 3\text{SO}_4, 26\text{H}_2\text{O}$	Trisulfoaluminate de calcium hydrate ou ettringite (structure de type AFt)
$\text{C}_3\text{ACSH}_{12}$	$[\text{Ca}_2\text{Al(OH)}_6]_2. \text{SO}_4, 6\text{H}_2\text{O}$	Monosulfoaluminate de calcium hydrate (structure de type AFm)
$\text{C}_2\text{AH}_8$	$(\text{CaO})_2-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{H}_2\text{O}_8$	Aluminate dicalcique hydraté
$\text{C}_4\text{AH}_{13}$	$(\text{CaO})_4-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{H}_2\text{O} 13$	Aluminate tétracalcique hydraté

**Tableau II-1 : Principaux hydrates formés lors de l'hydratation du ciment.**

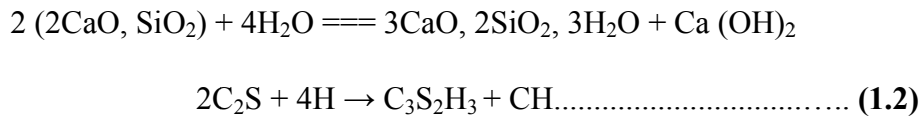
**II-3 Hydratation :**

**II-3-1 Hydratation des silicates :**

Le constituant majoritaire du ciment anhydre est le silicate tricalcique C<sub>3</sub>S. L'hydratation du C<sub>3</sub>S produit un silicate de calcium hydraté C-S-H. et de la portlandite Ca(OH)<sub>2</sub> ou (CH). L'équation globale de l'hydratation du C<sub>3</sub>S est la suivante :



Ces réactions sont exothermiques et peuvent servir de catalyseur à la réaction d'hydratation. Dans le cas du C<sub>2</sub>S, la cinétique d'hydratation est plus lente et la quantité de portlandite formée est plus faible.



Où C-S-H représente le 3CaO.2SiO<sub>2</sub>. 3H<sub>2</sub>O (Silicate de calcium hydraté) et (C-H) représente le Ca(OH)<sub>2</sub> (Portlandite).

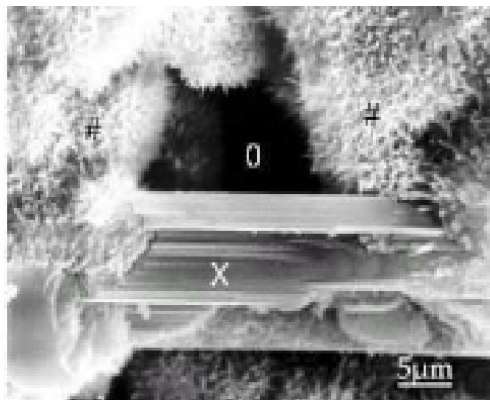


Figure II-2 : CSH fibreux avec Cristal de Portlandite (X) entre des CSH (#)

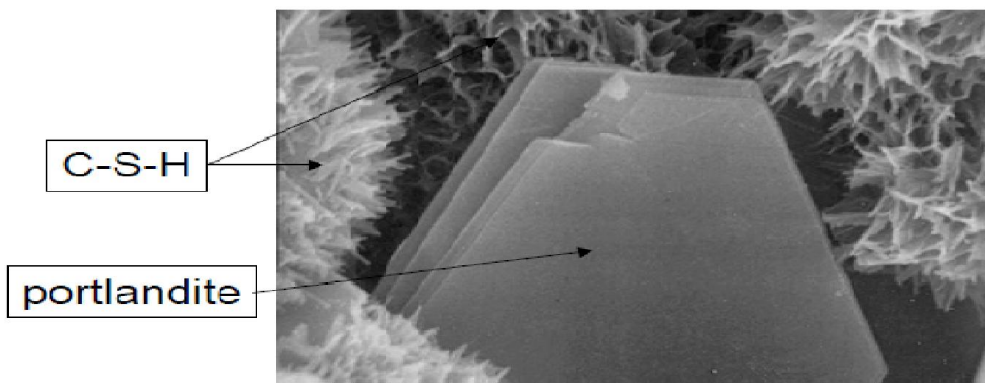


Figure II-3 : Microscopie Electronique à Balayage de C-S-H et portlandite

Lorsque le ciment est au contact de l'eau, les réactions au cours du gâchage forment des CSH en libérant des ions  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{OH}^-$ , ces deux espèces se combinent et forment la portlandite. [4] Comme on peut le voir, l'hydratation des silicates peut être séparée en cinq périodes distinctes comme suite (figure II-4)

Période 1 : Rections initiales

Lorsque les silicates entrent en contact avec l'eau, les ions  $\text{SiO}_4^{4-}$  qui sont situés en surface des grains passent en solution. La présence de ces ions provoque une augmentation de la conductivité électrique du milieu. Une couche protectrice de C-S-H se forme alors autour des grains et empêche la réaction entre les silicates et l'eau.

Par conséquent la dissolution du  $\text{C}_3\text{S}$  devient très lente après quelques minutes, et la première période se termine rapidement.

Période 2 : Période dormante

Durant cette période il y a peu d'activité chimique, ce qui se traduit par un faible dégagement de chaleur.

Ainsi la concentration en calcium croit alors que la concentration en silice décroît. La conductivité augmente mais plus faiblement que lors de la première période. Les C-S-H dits métastables ( $\text{C S H(m)}$ ) continuent de se former autour des grains de  $\text{C}_3\text{S}$  alors que la portlandite ne précipite pas. Cette période est dite dormante car le degré d'hydratation  $\alpha$  reste faible et quasiment constant.

Période 3 : Période d'accélération

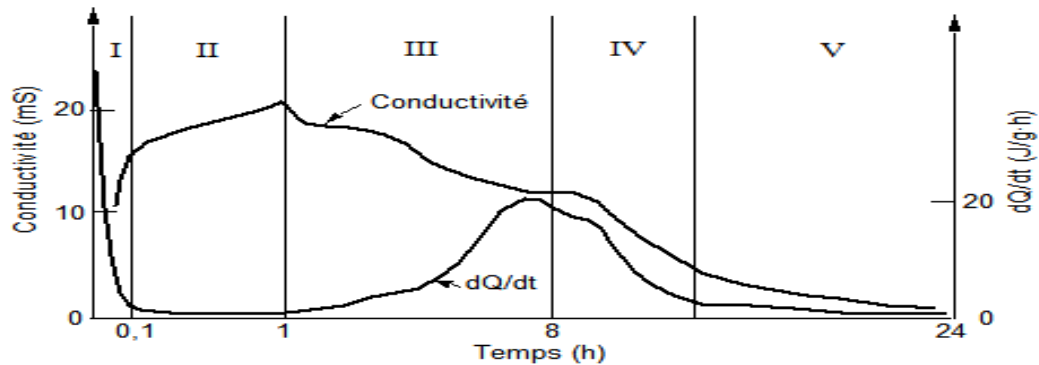
La caractéristique de cette période est le fort dégagement de chaleur qui traduit une activité chimique intense. C'est pendant cette période que survient la prise, deux types de réactions mènent à la formation de (C-S-H) dits (C-S-H(s)) et de portlandite. La formation de ces hydrates fait diminuer les concentrations ioniques de la solution interstitielle.

Cette période s'accompagne également d'une baisse importante de la conductivité, Figure (II-4).

Période 4 : Période de décélération

La formation de la couche d'hydrates ne permet plus qu'une réaction d'hydratation par diffusion à travers la couche d'hydrates déjà formés. En conséquence, la cinétique d'hydratation ralentit avec le temps. A mesure que les hydrates se forment, les ions disparaissent de la solution

interstitielle, ce qui entraîne une diminution de la conductivité électrique. Il apparaît également une diminution de la chaleur dégagée pendant cette période.



**Figure II-4 : Evolution du dégagement de chaleur et de la conductivité électrique lors de l'hydratation d'une pâte de C3S**

Période 5 : consolidation

Cette dernière période est considérée comme quasi-stable. Le ralentissement de la réaction, dû au caractère diffusif de la réaction d'hydratation, peut s'étaler sur des mois ou des années cette période est très importante du point de vue du développement de la résistance mécanique, car elle commence très tôt, après un jour d'hydratation, et persiste longtemps après.

### [5]II-3-2 Hydratation des aluminates

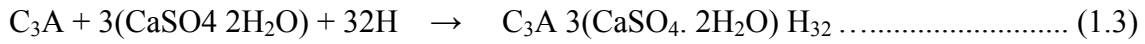
#### II-3-2-1 Hydratation $C_3A$ :

Le  $C_3A$  est le constituant le plus réactif du clinker. Il réagit très rapidement avec l'eau pour donner des hydrates métastables ( $C_4AH_{13}$ ,  $C_2AH_8$ ) qui se transforment en un aluminat de calcium hydraté  $C_3AH_6$ .

L'aluminat tricalcique contribue à la prise de la pâte de ciment, mais assez peu à la résistance finale. En l'absence de gypse, l'hydratation du  $C_3A$  est extrêmement rapide, exothermique et perturbe l'hydratation des silicates. Il s'en suit un phénomène de prise très rapide, empêchant la mise en œuvre du matériau. Pour remédier à cela, les cimentiers incorporent systématiquement du gypse dans la composition de leur ciment.

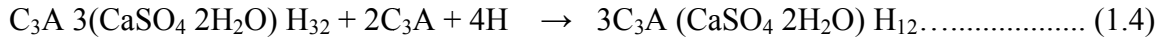
Ainsi, la réaction des aluminates avec le sulfate contenu dans le gypse, forme de l'ettringite ( $AF_t$ ) (tri sulfo-aluminat de calcium hydraté) qui précipite en masse autour du grain de  $C_3A$  et inhibe sa dissolution. Celle-ci, une fois le gypse totalement consommé, se décompose pour former du Monosulfoaluminat ( $AF_m$ ). La teneur en gypse des ciments étant limitée, il y a donc en général excès de  $C_3A$  par rapport au gypse.

Les réactions sont donnée par :



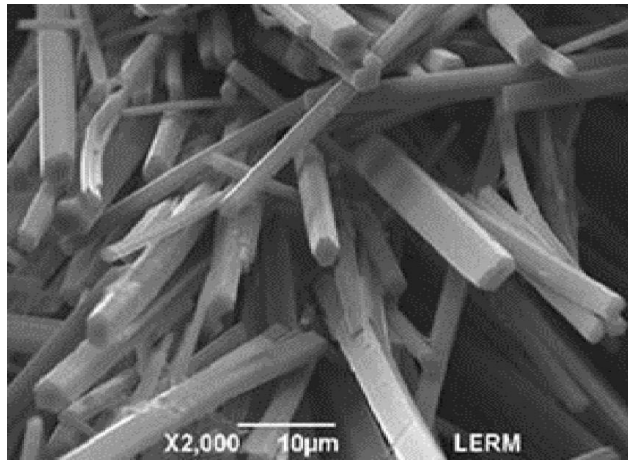
Gypse

Ettringite ou trisulfoaluminate



Ettringite

Monosulfoalumin



**Figure II-5 : MEB Ettringite aciculaire (aiguille)**

**II-3-2-2 Hydratation du C4AF :**

L'hydratation du C<sub>4</sub>AF est semblable à celle du C<sub>3</sub>A, mais la vitesse de réaction est plus lente et les hydrates formés contiennent du fer. Les produits de réactions sont les même que ceux issus du C<sub>3</sub>A en substituant aux aluminates des alumino-ferrites. Le C<sub>4</sub>AF a pour rôle de réduire la température de formation du clinker, il dégage peu de chaleur et participe peu au développement de la résistance mécanique. [4]

La réaction est donnée par :



La réaction d'hydratation du ciment combine les réactions d'hydratation des principaux composants du clinker et, éventuellement, celles de ses composants secondaires. Cependant, les réactions sont plus complexes du fait des interactions chimiques et thermiques qui se produisent au cours du processus d'hydratation et du fait des impuretés présentes dans la solution solide qui influencent beaucoup l'hydratation de chaque phase. [5]

## II-4 Le rôle du sulfate de calcium :

Le sulfate de calcium permet de contrôler la prise du clinker broyé. En effet, en présence d'eau et de sulfate de calcium, le  $C_3A$  se recouvre d'une fine couche plus ou moins perméable d'ettringite empêchant ainsi la poursuite de l'hydratation du  $C_3A$  qui, autrement, conduirait à la prise éclair en formant des hydrates hexagonaux. D'un point de vue pratique, cette réaction permet de bénéficier d'une pause, la période dormante, pour transporter et mettre en place le béton.

Cependant, le calcul de la quantité d'ions  $SO_4^{2-}$  nécessaire pour former l'ettringite n'est pas aussi facile que l'on pourrait le croire. Une partie des sulfates nécessaire aux réactions initiales est souvent dans le clinker sous forme de sulfates alcalins (l'arcanite :  $K_2SO_4$ , l'aphtitalite :  $3K_2SO_4 \cdot Na_2SO_4$ , et la langbeinite de calcium :  $2CaSO_4 \cdot K_2SO_4$ ). L'autre partie est apportée par le sulfate de calcium qui peut provenir des origines suivantes :

- du gypse (dihydraté)  $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ .
- de l'hémihydrate  $CaSO_4 \cdot 1/2H_2O$ .
- de l'anhydrite soluble  $CaSO_4$ .

La solubilité de tous les sulfates présents dans le clinker ou dans le ciment varie beaucoup. On peut cependant dire qu'en règle générale les sulfates alcalins se solubilisent plus rapidement que certaines formes de sulfate de calcium. Parmi les sulfates de calcium, l'hémihydrate est celui qui se solubilise le plus rapidement, alors que l'anhydrite naturelle se solubilise le moins rapidement.

Les différentes de réaction du système  $C_3A$ /sulfate et leurs conséquence sur le comportement rhéologique du béton en tenant compte de la réactivité du  $C_3A$  et de la disponibilité des ions sulfate. La quantité de  $C_3A$  qui réagit dès les premiers instants, en absence ou en présence d'ions sulfate, reste constante pendant la période dormante. [14]

## II-5 Effet des sulfates sur l'hydratation du ciment :

### II-5-1 Généralité :

En général, les sulfates jouent un rôle important comme régulateur de prise et d'hydratation du ciment. Leur présence a un effet sur la cinétique et la thermodynamique de l'hydratation du ciment. Les sulfates réagissent avec les aluminates pour donner d'ettringite. Si la quantité d'ions  $SO_4^{2-}$  en solution n'est pas suffisante, le  $C_3A$  va alors s'hydrater et donner lieu à une prise rapide,

tandis que si la concentration en ions sulfates est trop élevée, le gypse va précipiter et donner lieu à la fausse prise.

L'influence des sulfates sur le comportement rhéologique des pâtes de ciment ne dépend pas uniquement des quantités présentes mais de la forme des sulfates présents et surtout de la vitesse de passage des ions  $\text{SO}_4^{2-}$  en solution dans l'eau de gâchage.

L'apport en sulfate durant les premières minutes d'hydratation dépend de facteurs cinétiques et thermodynamiques et donc de la solubilité des sulfates de calcium, qui selon

Bomblet (1980) [15] dépend :

- Du degré d'hydratation et probablement des conditions de déshydratation
- De la température : La solubilité diminue avec la dissolution exothermique et la formation d'hydrates.

Selon Pierre-Claude Aïtcin (1990) [16] les facteurs susceptibles d'influencer la concentration en ions  $\text{SO}_4^{2-}$  dans la solution interstitielle sont :

- Le taux de gypsage
- La finesse de mouture de gypse
- L'état final du sulfate de calcium
- La solubilité des sulfates apportés par le ciment
- La présence de réducteurs d'eau ou de superplastifiant.

Une partie des sulfates nécessaires aux réactions initiales est souvent dans le clinker sous forme de sulfates alcalins qui passent rapidement en solution. L'autre partie provient du sulfate de calcium ajouté lors du broyage, mais sa dissolution dépend de la forme sous laquelle il est ajouté au clinker.

Lors d'une étude sur la teneur en sulfates dans les ciments, Jelenic et coll. (1977) [17] ont remarqué qu'en fonction du temps d'hydratation, les résistances à la compression se déplacent vers des teneurs plus élevées en  $\text{SO}_3$  dans le cas des ciments riches en alcalis, par rapport aux ciments faibles en alcalis.

Il est prouvé qu'il existe une teneur optimale en  $\text{SO}_3$  qui donne un maximum de résistance à la compression à 28 jours sans provoquer une expansion due à un excès de sulfates dans la matrice cimentaire. Cette quantité optimale dépend de plusieurs facteurs comme la finesse et les quantités d'alcalis et de  $\text{C}_3\text{A}$  du ciment. Plusieurs formules ont été proposées pour le calcul du  $\text{SO}_3$  optimal.

- Lerch (1946) [18] a proposé l'équation :

$$SO_{3opt} = 0,093(C_3A) + 1,71(Na_2O) + 0,94(K_2O) + 1,23$$

- Haskell(1959) [19] a obtenu la régression suivante :

$$SO_{3opt} = 0,095(C_3A) + 1,6364(Na_2O) + 1,841$$

- Une corrélation similaire a été obtenue par Meissner (1950) [20]

$$SO_{3opt} = 0,1149(C_3A) + 1,872(Na_2O) + 0,789$$

- Ost (1974) [21] proposa une formule qui tient compte de la finesse du ciment :

$$SO_{3opt} = 0,556(Na_2O\%) + 0,17656(\text{Finesse Blaine } m^2/kg) - 0,1072(Fe_2O_3\%) - 3,6004$$

Dans les cimenteries l'ajustement du  $SO_3$  optimal est obtenu par la détermination des résistances à la compression après 24 heures d'hydratation de mortiers de ciment ayant différents pourcentages en  $SO_3$  (Norme ASTM C563). Les cimentiers devraient accorder beaucoup plus d'attention à la présence des composés mineurs comme les alcalis qui exigent plus de gypse pour empêcher les problèmes de prise rapide des ciments.

Plusieurs publications sur l'effet des sulfates sur l'hydratation des aluminates et des silicates ont été reportés.

### II-5-2 Effet des sulfates sur l'hydratation des aluminates :

Skalny et Young [22] ont montré qu'une faible teneur en sulfate retarde l'hydratation des aluminates sans précipiter l'ettringite. Bien que la formation d'ettringite soit la première étape de l'hydratation du  $C_3A$ , ils suggèrent que l'adsorption des sulfates sur la surface du  $C_3A$  est un facteur important.

Jawed et coll [23] ont reporté que l'hydratation du  $C_3A$  et du  $C_4AF$  dans une solution saturée en gypse est retardé. Le Ferroaluminate est très fortement affecté, l'ettringite se forme initialement sur la surface du  $C_4AF$ , une chute de concentration des sulfates dans la solution engendre la formation de Monosulfoaluminate et l'hydratation accélérée de la ferrite.

Récemment, J. Havlica et D. Roztockà (1993) [24] ont étudié la cinétique d'hydratation dans le système  $C_3A-CaSO_4-Ca(OH)_2-H_2O$  et  $CaO.AL_2O_3-CaSO_4-Ca(OH)_2-H_2O$ . Ils ont trouvé que l'augmentation des ions calcium dans la structure des aluminates cause une augmentation du pH et diminue la dissolution de cette phase, ce qui influence le degré d'hydratation des aluminates.

Après une étude microstructurale sur l'hydratation des aluminates en présence de gypse et d'hydroxyde de sodium, E.Y. Ghorab et coll [25]. ont reporté que de larges cristaux de portlandite sont presque les seuls hydrates spontanément produits et que la période d'accélération de la courbe calorimétrique correspond à la formation d'ettringite.

### **II-5-3 Effet des sulfates sur l'hydratation des $C_3S$ :**

Des études sur l'hydratation des alites en présence de gypse ont montré que le sulfate de calcium accélère l'hydratation du  $C_3S$ . Copeland et Kantro [26] reportent que l'hydratation à 1 jour est indépendante du degré de "gypsage", mais, à long terme 1 à 1,5% de  $SO_3$  donne le degré d'hydratation maximum. Bennir [27] lui aussi a reporté que la résistance à la compression et le degré d'hydratation des  $C_3S$  jusqu'à 48 heures sont indépendants du pourcentage de gypse introduit.

Jawed et Skalny ont fait des études sur l'hydratation initiale des  $C_3S$  en présence de gypse, ils ont fini par conclure que la présence de  $SO_3$  favorise la dissolution des  $C_3S$  durant la première étape d'hydratation. Le C-S-H peut inclure des ions sulfates. [28]

## Chapitre III : Techniques Expérimentales

### Introduction :

Cette partie expérimentale vise à suivre l'évolution des caractéristiques physiques, chimiques et mécaniques des ciments obtenus avec différentes teneurs en gypse. Elle concernera la caractérisation des matières premières qui entrent dans la fabrication d'un ciment, à savoir : le clinker et le gypse.

Dans une deuxième partie, la caractérisation des variantes de ciment sera abordée. Elles ont été obtenues avec différents pourcentage de gypse. A leur état anhydre, les ciments ont été soumis à des analyses de composition chimique, de masse volumique, de SSB et de granulométrie.

Quant aux pâtes de ciment et mortiers normalisés, l'étude concernera la consistance normalisée, le temps de prise, l'expansion, la réponse mécanique, les variations dimensionnelles et la chaleur d'hydratation.

Les essais ont été conduits dans le laboratoire de contrôle qualité de Lafarge dans des conditions contrôlées de température ( $20\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ ) et d'humidité relative ( $RH \geq 50\%$ ).

### III-1 Matières Premières :

Les principaux composants des ciments élaborés sont :

- Clinker.
- Gypse.

#### III-1-1 Le clinker :

Le clinker utilisé au cours de cette étude provient de la cimenterie de Lafarge de M'sila. Il a été obtenu après cuisson d'un mélange contenant 80 % de calcaire et 2 % d'argile. Ses compositions chimique (obtenue par analyse chimique par fluorescence X) et minéralogique (obtenue selon les formules de Bogue) sont présentées dans les tableaux 1 et 2 respectivement. Sa finesse a été  $3700\text{ cm}^2/\text{g}$  et sa densité a été  $3,10\text{ g/cm}^3$ .

Nature	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> O	PAF
Clinker	21,5	4,89	3,79	65,92	1,59	0,73	0,69	0,10	0,01	0,03

Tableau III-1 : Composition chimique du clinker.

Les compositions minéralogiques du clinker utilisé sont présentées dans le Tableaux (III.3).

Éléments (%)	Clinker
C <sub>3</sub> S	59,18
C <sub>2</sub> S	16,99
C <sub>3</sub> A	6,94
C <sub>4</sub> AF	11,58

**Tableau III-2 : Composition minéralogique du clinker**

La composition minéralogique du clinker déterminée d'après la formule de BOGUE [29] comme suite :

-Le silicate tricalcique (3CaO, SiO<sub>2</sub>):  $C_3S = 4.07.CaO - 7.6.SiO_2 - 1.43.Fe_2O_3 - 6.72.Al_2O_3$ .

-Le silicate bicalcique (2CaO, SiO<sub>2</sub>):  $C_2S = 2.87.SiO_2 - 0.75.C_3S$ .

-L'aluminate tricalcique (3CaO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>):  $C_3A = 2.65.Al_2O_3 - 1.69.Fe_2O_3$ .

-L'aluminoferrite tétracalcique (4CaO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>):  $C_4AF = 3.04.Fe_2O_3$ .

Modules caractéristiques du clinker

Pour contrôler la qualité et la régularité de la fabrication du clinker à partir des oxydes dans les cimenteries .Certains modules ou indice chimiques sont nécessaires à calculer. [6]

- Module silicique de Kühl compris entre (1.5 et 5) :  $M_s = SiO_2 / (Al_2O_3 + Fe_2O_3)$
- Modules alumino -ferrique (AF) de Kühl compris entre (1.5 et 2.5) :  $AF = Al_2O_3 / Fe_2O_3$
- Facteur de saturation de Lea Parker compris entre (0.85 et 1) :

$$(LSF) = CaO / (2,8 X SiO_2 + 1,18 X Al_2O_3 + 0,65 X Fe_2O_3)$$

Modules caractéristiques	M <sub>s</sub>	AF	LSF
Clinker Lafarge Hammam Dalâa	2,42	1,23	98.5

**Tableau III-3 : Modules caractéristiques du clinker.**

A partir des résultats de composition chimique, minéralogiques et modules caractéristiques, on peut dire que notre clinker répond aux exigences en vigueur, que le module silicique M<sub>s</sub> et module aluminoferrique AF dans les tolérances pour la formation des phases clinker C<sub>3</sub>S-C<sub>2</sub>S-C<sub>3</sub>A-C<sub>4</sub>AF et la saturation en chaux LSF est inférieure à 100 que le clinker sortir moins de chaux libre (faible chaux libre).

**III-1-2 Le gypse :**

Le dosage du gypse naturel (sulfate de calcium dihydraté,  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) a été varié entre 0,5 et 8,8 dans nos variantes de ciments. Le rôle principal de ce matériau est d'agir comme régulateur de prise des ciments. Sa composition chimique et ses caractéristiques physiques sont regroupées dans les tableaux III-4 et III-5 respectivement.

Nature	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> O	PAF
Gypse	3,37	0,82	0,32	32,19	4,20	37,52	0,15	0,00	2,34	26,86

**Tableau III-4 : Composition chimique du gypse.**

Masse volumique abs	2.73 (g/cm <sup>3</sup> )
Masse volumique app	1.1 (kg/l)
SSB	5400 (g/cm <sup>2</sup> )

**Tableau III-5 : caractéristiques physique de gypse.****III-2 Formulation des Ciments**

Après leur broyage séparé, le clinker et le gypse (de dimensions inférieures à 100 µm) ont été mélangés selon les formulations choisies (Tableau III-6). Les mélanges obtenus ont été bien homogénéisés avant d'avoir les dix variantes de ciment.

Types de ciment	Ciment CEM I	
	Clinker (%)	Gypse (%)
<b>CEM I-0.5</b>	99,5	0,5
<b>CEM I-1.5</b>	98,5	1,5
<b>CEM I-3</b>	97	3
<b>CEM I-4.3</b>	95,7	4,3
<b>CEM I-5</b>	95	5
<b>CEM I-5.8</b>	94,2	5,8
<b>CEM I-6.2</b>	93,8	6,2
<b>CEM I-7.1</b>	92,9	7,1
<b>CEM I-8</b>	92	8
<b>CEM I-8.8</b>	91,2	8,8

**Tableau III-6 : Les formulations choisies pour le ciment.**

### III-3 Essais sur ciments anhydres

#### III-3-1 Analyses chimiques Norme 15-467 :

L'analyse chimique par fluorescence X a été effectuée au laboratoire de la cimenterie LAFARGEHOLCIM M'sila (Hammam Dalâa).

##### Principe :

Mesure de l'intensité de raies caractéristique du spectre de fluorescence des rayons X produit par les éléments à doser. Pour atténuer l'influence des effets liés à la minéralogie, à la granulométrie et aux interactions possibles entre les éléments présents, l'échantillon est dilué par fusion dans un mélange fondant de composition appropriée.

##### Mode opératoire :

En principe l'échantillon, sous forme de poudre, est utilisé tout venant après homogénéisation préalable.

- peser à 0.0001g près la quantité d'échantillon déterminé en fonction des dimensions de la perle propres au spectromètre utilisé.
- le mélange intime des constituants en poudre (ciment et mélange fondant) est réalisé par action mécanique.
- le mélange homogénéisé est disposé dans le creuset de fusion et amené jusqu'à fusion complet suivant un processus bien défini. Une agitation périodique de creuset permet d'homogénéiser le liquide formé.
- la masse fondue est coulée dans le moule. Le verre obtenue est refroidi jusqu'à ce que la perle se détache du moule puis la perle démoulée est laissée jusqu'à équilibre avec la température ambiante. Après un éventuel polissage, la perle est ensuite soumise à l'analyse.
- Les résultats d'analyse des différents éléments sont exprimés en pourcentage.



Figure III-1 : L'appareil FRX

**III-3-2 Masse volumique absolue :**

Il s'agit de déterminer la masse volumique absolue des dix (10) types de ciments utilisés dans notre étude.

L'appareil utilisé pour réaliser cette technique expérimentale est appelé "le Densimètre de Le Chatelier".

- Peser  $M= 64$  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.
- Agiter 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  $V_1$ .

Calculer de la masse volumique absolue par la relation :

$$\gamma_c = M / (V_1 - V_0)$$



**Figure III-2 : Flasque Le Chatelier.**

**III-3-3 Mesure de la finesse des ciments (Norme EN 196-6) :**

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 spécifiée. (Figure III-3).

**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 un 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.

$$S = \frac{K}{\rho} \times \frac{\sqrt{e}3}{(1 - e)} \times \frac{\sqrt{t}}{\sqrt{0.1\eta}} \text{ (cm}^2\text{/g)}$$

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

$\rho$  : Masse volumique du ciment en g/cm<sup>3</sup>.

$\eta$  : Viscosité de l'air à la température de l'essai ( $\eta = 0.00001824$  Pa.s)

$t$  : 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.

$$m = \rho_c \cdot v \cdot e$$

$v = 1.848$  volume de la cellule.

$e$  = porosité du ciment dans la cellule.



Densimètre manuel



Densimètre automatique-

Figure III-3 : Le Densimètre de Le Chatelier.

### III-3-4 Analyse granulométrique (Méthode alpine) :

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)



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

#### 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 $\mu$ m, 90  $\mu$ m.

Pour la détermination du rejet en utilisant un seul tamis, les étapes suivantes sont 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 moleté.
- 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 :

$$\text{Rejet} = P \times 10 (\%).$$

### III-4 Essais sur pâtes de ciment :

#### III-4-1 Essai de Consistance (Norme EN 196-3) :

La pâte de ciment de consistance normalisée a une résistance spécifiée à la pénétration d'une sonde normalisée.

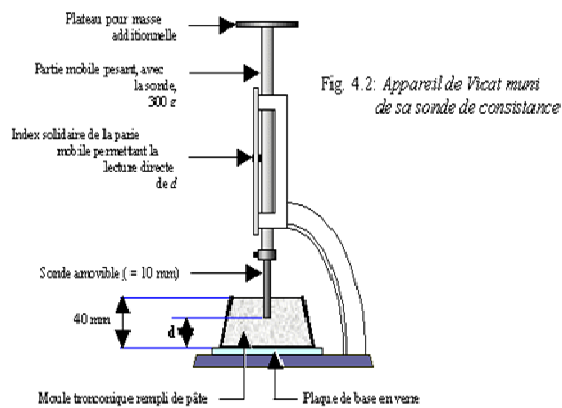
L'eau nécessaire pour obtenir une telle pâte est déterminée par des essais de pénétration sur des pâtes contenant différentes quantités d'eau.

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.

#### 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 diamètres 70 et 80 mm posé sur une plaque en verre huilée sans tassement ni vibration excessive.
- 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. (Figure III-5)

- 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. (Norme EN 196-3).



**Figure III-5 : Appareil de Vicat manuel.**  
(Laboratoire de Lafargeholcim M'sila)

#### III-4-2 Essai de Prise (Norme EN 196-3) :

Il consiste à déterminer le temps de début et celui de la fin de prise des pâtes de ciment, conformément à la norme EN 196-3. (Figure III-6 et III-7)

Le temps de prise est déterminé par l'observation de la pénétration d'une aiguille dans une pâte de ciment de consistance normalisée, jusqu'au moment où elle atteint une valeur spécifiée.



**Figure III-6 : L'appareil de Vicat.**(Laboratoire de Lafargeholcim M'sila)

L'appareil de Vicat manuel équipé 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.

### Conduite de l'essai :

Il s'agit de confectionner une pâte de ciment normalisée selon EN 196-3

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.

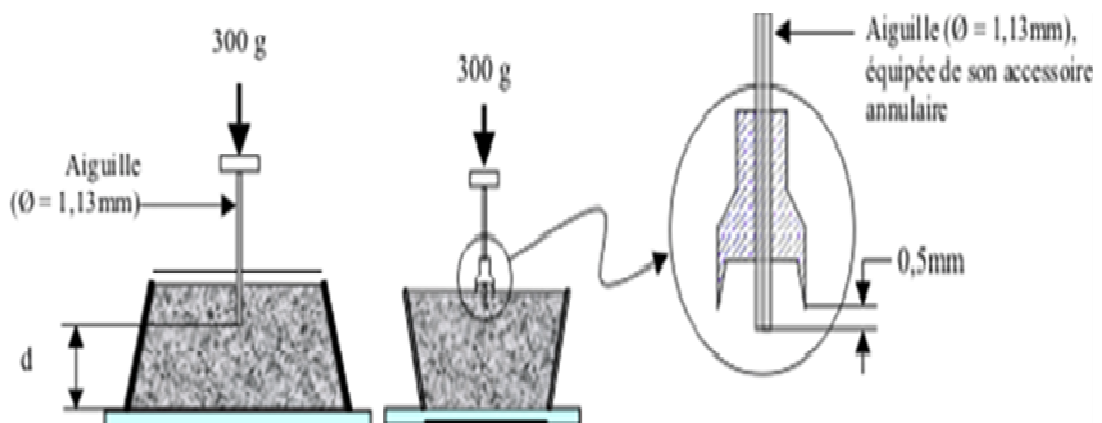


Figure III-7 : L'appareil de Vicat.

### III-4-3 Essai de stabilité :

La stabilité est déterminée par l'observation de l'expansion volumique d'une pâte de ciment de consistance normalisée, mise en évidence par le mouvement relatif de deux aiguilles.

#### 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 est introduite dans les deux moules en laiton.

Les moules sont conservés 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  $20^{\circ}\text{C}$ . La stabilité est caractérisée par la valeur C-A

Stabilité = C-A

Expansion = B-A

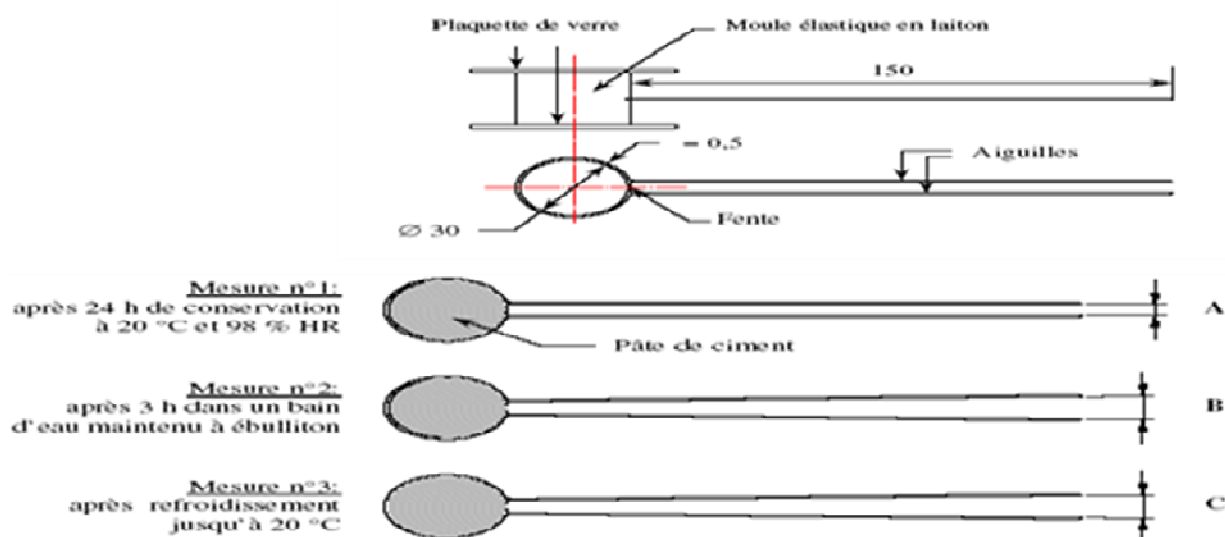


Figure III-8 : les Aiguillé de Chatelier.

Pour chaque moule, mesurer la différence entre les écarts, avant et après le traitement des moules dans l'eau bouillante. L'expansion est définie comme suit, soit :

**L1**, l'écart avant la cure dans l'eau bouillante,

**L2**, l'écart après la cure dans l'eau bouillante,

L'expansion est donc égale à la différence,

$$E = L2 - L1 \text{ (mm)}$$

### III-5 Essais sur mortiers normalisés :

#### III-5-1 Formulation des mortiers :

Le mortier est constitué par le mélange suivant selon la Norme EN 196-1 :

- 1350 g sable normalisé.
- 450 g de ciment.
- 225 g d'eau de gâchage.

#### Sable normalisé :

Le sable utilisé est un sable normalisé, certifié conforme à ISO 679 :2009 et EN196-1 C'est un sable naturel, siliceux notamment dans ses fractions les plus fines. Il est conditionné en sachets de polyéthylène contenant chacun  $1\,350 \pm 5$  g



Figure III-9 : sable normalisé.

**L'eau de gâchage :**

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



**Figure III-10 : Distillateur (laboratoire Lafargeholcim M'sila)**

**III-5-2 Préparation des éprouvettes :**

Les variantes de ciment ont été utilisées pour la confection des éprouvettes prismatiques de dimensions (4x4x16) cm<sup>3</sup> selon la norme EN 196-1 dans un malaxeur semi-automatique. (Voir les Figures III-11 et III-12).



**Figure III-11 : Epreuve Prismatique  
(4x4x16) cm<sup>3</sup>**



**Figure III-12 : Malaxeur semi-automatique de  
mortier**

(Laboratoire de Lafargeholcim M'sila)

La norme EN 196-1 décrit de manière détaillée le mode opératoire concernant la préparation des éprouvettes.

- On prépare le mortier comme suit :
  - On remplit un moule 40 x 40 x160 mm de mortier préparer en trois couches à l'aide due table vibrante (Figure III-13).
  - La face supérieure arasée. (Figure III-14)
- Les éprouvettes sont au nombre de trois par moule.



**Figure III-13 : Table Vibrante**  
(Laboratoire de Lafargeholcim M'sila)



**Figure III-14 : Eprouvette Prismatique de mortier (4x4x16) cm<sup>3</sup>**  
(Laboratoire de Lafargeholcim M'sila)

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-15).



**Figure III-15 : La Chambre d'humidité  
(Laboratoire de Lafargeholcim 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-16)



**Figure III-16 : Bains d'eau**

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.

**III-5-3 Essai de flexion Norme NF EN 196-1 :**

La flexion centrée de l'éprouvette 4x 4 x 16 est effectuée sur une machine de flexion décrite par la norme NF EN 196-1

- Placer le prisme dans le dispositif de flexion avec une face latérale de moulage sur les rouleaux d'appui.
- Appliquer la charge verticalement et faire augmenter uniformément la charge jusqu'à rupture. Conserver les deux demi-prismes.

Les essais sont d'abord effectués en flexion sur une presse permettant d'appliquer des charges jusqu'à 10KN asservie en chargement de 50N/s  $\pm$  10 N/s. (Voir Figure III-17). Pour chaque essai, 3 éprouvettes ont été testées, la valeur retenue présente la moyenne des trois.

**III-5-4 Essai de compression Norme NF EN 196-1 :**

L'essai de résistance à la compression a été conduit conformément à la norme NF EN 196-1.

Les demi-prismes de l'éprouvette obtenue après rupture en flexion seront rompus en compression.

Placer le demi-prisme en compression sur les faces latérales de moulage.

- Centrer chaque demi-prisme dans le compartiment d'essai.
- Appliquer la charge verticalement et faire augmenter uniformément la charge jusqu'à rupture.

La résistance à la compression

$$R_c \text{ (Mpa)} = F_c / 1600 \quad (\text{N/mm}^2)$$

$F_c$  : est la charge appliquée au milieu du prisme à la rupture (Newton)

1600 = 40mmx40mm la section des plateaux ou des plaques auxiliaires en (mm<sup>2</sup>)

L'éprouvette en compression

Les résultats obtenus pour chacun des 6 demi-prismes sont arrondis à 0,1 Mpa près et on fait la moyenne. Si l'un des 6 résultats diffère de  $\pm$  10% de cette moyenne, il est écarté et la moyenne est alors calculée à partir des 5 résultats restants. Si à nouveau un des 5 résultats s'écarte de  $\pm$  10% de cette nouvelle moyenne, la série des 6 mesures est écartée.

Les essais de compression sont effectués par une presse de type Perrier d'une charge de 200KN asservie en chargement de 2400N/s  $\pm$  200N/s. (Voir Figure III-17)

Les essais mécaniques ont eu lieu sur 3 éprouvettes et sont testés en flexion et en compression à 2,7, 14 et 28 jours



**Figure III-17 : Machine de Compression**  
(Laboratoire de Lafargeholcim M'sila)

#### **III-5-5 Mesure des variations dimensionnelles (NF P15-433) :**

L'essai consiste à suivre l'évolution des changements dimensionnels d'une éprouvette de mortier normal conservée 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 ( $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ ) ont été préparés pour chaque essai de retrait et de gonflement.

Les essais de retrait et de gonflement consistent à mesurer, en fonction du temps, la variation de longueur d'éprouvette prismatique de mortier. Après le démoulage de l'éprouvette de dimension ( $4 \times 4 \times 16$ )  $\text{cm}^3$ , on procède immédiatement à la mesure de sa longueur puis à 3,7 et 28 jours.

#### **Équipement nécessaire :**

Selon la Norme NF P15-433. Une salle maintenue à une température de  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  Un malaxeur normalisé. Des moules équipés de plots de retrait en laiton. (Figure III-18 et III-19)



**Figure III-18 : Moules (4x4x16) cm<sup>3</sup> 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  $\mu\text{m}$ .

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-19 : Comparateur de Retrait  
(Laboratoire de Lafargeholcim M'sila)**

#### **Conduite de L'essai :**

Chaque éprouvette ne doit pas sortir de son ambiance que le moins de temps possible, maximum 30 min. Lors du démoulage, mesurer L de l'éprouvette. La tige étalon en invar de longueur :

$L = 160$  mm Permet la vérification préalable du comparateur (mise au zéro).

Lire les variations de longueurs  $\Delta l(t)$  lue sur le comparateur à (3,7 et 28 jours).

$$\dot{\epsilon}(t) = \Delta l(t) / L \cdot 1000$$

$\Delta l(t)$  est la moyenne des trois éprouvettes issues 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-5-6 Chaleur d'hydratation (Méthode semi-adiabatique NF EN 196-9) :

C'est une méthode de mesure de la chaleur d'hydratation des ciments par calorimétrie semi adiabatique. La chaleur dégagée est exprimée en joule par gramme de ciment.

La méthode semi adiabatique consiste à introduire un échantillon de mortier fraîchement préparé dans un calorimètre afin de déterminer la quantité de chaleur dégagée lors de son hydratation.

A une échéance donnée, la chaleur d'hydratation du ciment contenu dans l'échantillon est égale à la somme de la chaleur 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.

#### Appareillage :

1. **Calorimètre** : constitué d'un vase isotherme fermé un bouchon isolant et placé dans une enveloppe rigide qui lui sert de support.
2. **Calorimètre de référence** : de construction et caractéristiques similaires à celles du calorimètre d'essai. Il doit comporter une boîte à mortier contenant un échantillon de mortier gâché au moins 12 mois auparavant (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. La température de l'échantillon d'essai doit être mesurée avec une précision de  $\pm 0.3$  °C.

4. **Boite à mortier** : consistant un récipient cylindrique muni d'un couvercle, d'un volume d'environ 800 cm<sup>3</sup> conçu pour contenir l'échantillon de mortier à essayer.
5. **Appareil d'enregistrement de la température** : capable d'enregistrement les mesures prises par chaque thermomètre.
6. **Malaxeurs** : à mortier conforme à EN 196-1

**Remarque :**

La distance entre chacun des calorimètres doit être d'environ 12 cm.

**Mode opératoire :**

- La composition du mortier doit être conforme à EN 196-1.
- Chaque gâché de mortier doit être constitué de (360.0±0.5) g de ciment ; (1080±1) g de sable normalisé (EN 196-1) et (180.0±0.5) g d'eau distillée.
- Après malaxage de mortier, peser (1575±1) g de mortier dans la boîte et l'introduire dans le calorimètre d'essai et le référence immédiatement avec le bouchonne.
- Mettre aussitôt le thermomètre en placer dans l'étui pour thermomètre de manière à ce qu'il soit approximativement au cœur de l'échantillon d'essai. Scelle l'orifice de passage travers le bouchon moyen d'un dispositif de fermeture.
- Prendre le moment où l'on verse de l'eau comme origine des temps, la mesure de l'échantillon 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 1h pendant les premières 24h, 4h au cours du deuxième jour et jusqu'à la fin de période de l'essai.

**III-5-6-1 Calcule de la chaleur d'hydratation :****Principe des calculs :**

La chaleur d'hydratation  $Q$  exprimée en joules par gramme de ciment, au temps écoulé  $t$  est calculée au moyen de l'équation suivante (1) :

$$Q = \frac{c}{m_c} + \frac{1}{m_c} \int_0^t \alpha \cdot \theta_t \cdot dt$$

Où

$m_c$  : est la masse de ciment contenu dans l'échantillon d'essai, en grammes.

$t$  : est la durée d'hydratation, en heures.

$C$  : est la capacité thermique totale du calorimètre en joules par kelvin.

$\alpha$  : est la coefficient de déperdition thermique totale du calorimètre en joules par heure et par kelvin.

$\theta_t$  : est l'échauffement de l'échantillon d'essai à l'instant  $t$ , en kelvins.

Le premier terme de l'équation (1) représente la chaleur accumulée dans le calorimètre A .Le second la chaleur dissipée vers le milieu ambiant B (en joules par gramme de ciment.

L'équation (1) peut être simplifiée en équation (2) :

$$Q = \frac{c}{m_c} \theta_i + \frac{1}{m_c} \sum_{i=0}^{i=n} \bar{\alpha}_i \cdot \bar{\theta}_i \cdot \Delta t_i$$

Où  $\bar{\alpha}_i$  et  $\bar{\theta}_i$  sont les valeurs moyennes du coefficient de déperdition thermique et de l'échauffement de l'échantillon d'essai pendant la période  $\Delta t_i$ .



Figure III-20 : Sable Normalisé



Figure III-21 : Calorimètre Langavant

(Laboratoire de Lafargeholcim M'sila)

## Chapitre IV : Résultats Expérimentaux et Interprétation

### IV-1 Introduction :

Dans ce chapitre, nous allons présenter l'interprétation des différents résultats relatifs ; aux caractéristiques physico-chimiques et mécaniques expérimentaux des essais effectués sur les différents mélanges du ciment anhydre, la pâte et les mortiers.

### IV-2 Influence du Taux de gypse sur ciments anhydre :

#### IV-2-1 Influence du Taux de gypse sur les Teneurs en Oxydes :

Le Tableau (IV-1) et la Figure (IV-1 IV-2 et IV4-3) représentent la variation des taux des principaux oxydes (la silice, la chaux, le magnésium, les alcaline  $K_2O$ ) ainsi que la perte au feu) dans le ciment en fonction du taux de gypse. On note que l'augmentation du pourcentage de gypse incorporé dans le ciment a l'effet suivant :

- Le taux d'oxyde de silice ( $SiO_2$ ) et la chaux ( $CaO$ ), diminuent dû à la diminution du pourcentage du clinker par apport à l'augmentation du gypse.

Le taux d'oxyde de ( $K_2O$ ,  $MgO$ ,  $SO_3$ ) et la perte au feu(P.F) augmentent et ce proportionnellement avec l'augmentation du gypse dû à la présence d'impureté et l'augmentation du pourcentage du gypse.

Eléments (%)	Taux de gypse (%)	$SiO_2$	$Al_2O_3$	$Fe_2O_3$	$CaO$	$MgO$	$SO_3$	$K_2O$	$Na_2O$	CL	PAF
CEM I	0.5	20,86	4,8	2,96	62,98	1,53	1,02	0,56	0,1	0,015	0,04
CEM I	1.5	20,53	4,96	3,07	62,94	1,53	1,53	0,57	0,1	0,014	0,25
CEM I	3.0	20,21	4,63	2,96	59,97	1,54	2,04	0,58	0,11	0,016	0,85
CEM I	4.3	19,95	4,86	2,98	59,37	1,54	2,52	0,59	0,11	0,015	1,12
CEM I	5.0	19,89	4,92	3,28	58,86	1,55	2,78	0,6	0,12	0,014	1,44
CEM I	5.8	19,86	5,11	3,13	58,42	1,56	3,02	0,61	0,12	0,015	1,56
CEM I	6.20	19,46	4,93	3,18	58,22	1,57	3,22	0,61	0,11	0,016	1,74
CEM I	7.10	19,31	4,89	3,25	58,01	1,58	3,48	0,62	0,12	0,016	2,1
CEM I	8.0	19,19	4,94	3,27	57,87	1,62	3,78	0,63	0,11	0,017	2,09
CEM I	8.8	19,06	4,84	3,4	57,33	1,69	3,99	0,64	0,11	0,016	2,4

Tableau IV-1 : Analyses chimiques par XRF des ciments préparés (les oxydes).

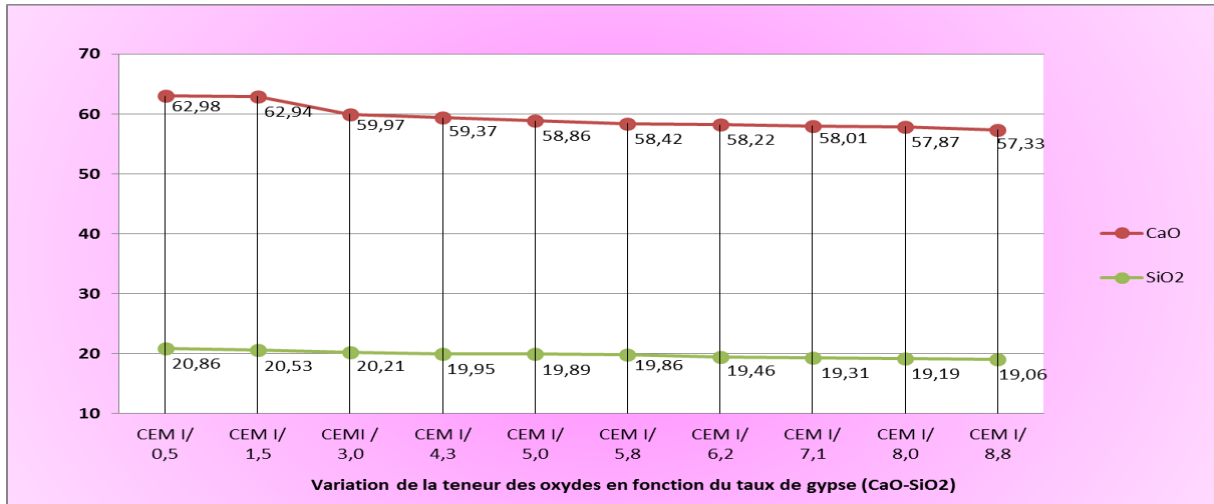


Figure IV-1 : Variation de la teneur des oxydes en fonction du taux de gypse (CaO-SiO2)

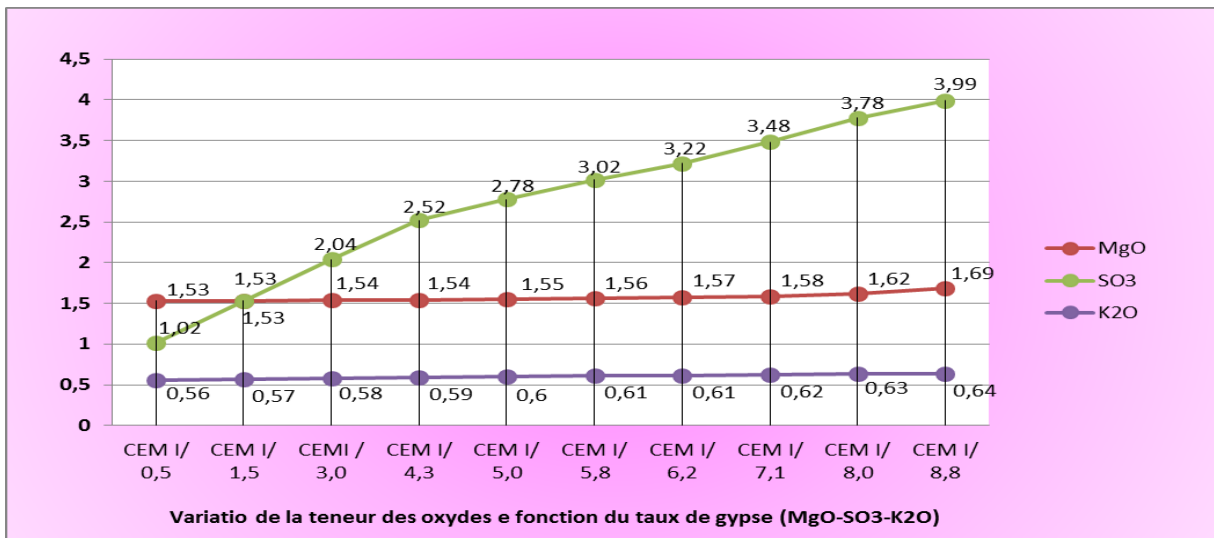


Figure IV-2 : Variation de la teneur des oxydes en fonction du taux de gypse (MgO-SO3-K2O)

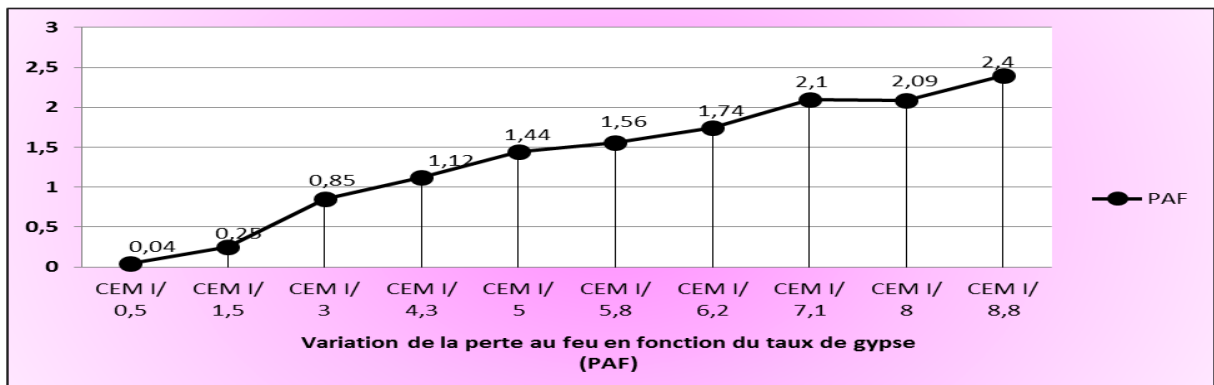


Figure IV-3 : Variation de la perte au feu en fonction du taux de gypse (PAF).

**IV-2-2 Influence du Taux de gypse sur le Poids Spécifique du Ciment (densité) :**

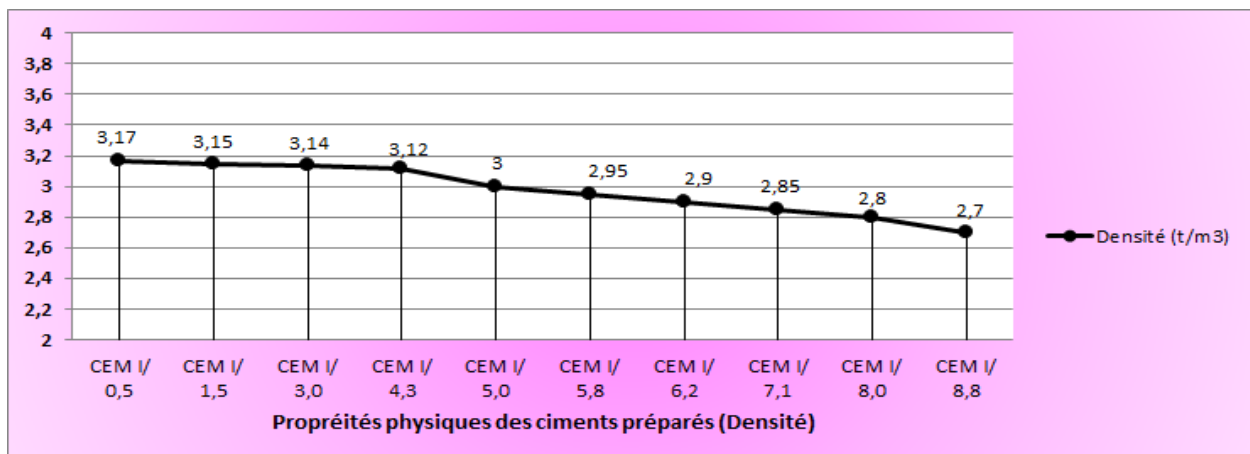
Les résultats du Tableau (IV-2) et la Figure (IV-4) présentent l'effet de l'addition de gypse sur le poids spécifique du ciment ou densité du ciment.

A la lumière des essais réalisés, les conclusions suivantes peuvent être tirées :

- on note que l'augmentation de la quantité de gypse incorporé dans le ciment à un effet significatif sur le poids spécifique de ciment.
- Une réduction du poids spécifique avec l'augmentation du pourcentage de gypse dans les ciments préparé.

Type de ciment	CEMI 0.5%	CEMI 1.5%	CEMI 3%	CEMI 4.3%	CEMI 5%	CEMI 5.8 %	CEMI 6.2%	CEMI 7.1%	CEMI 8%	CEMI 8.8%
Poids spécifique (t/m <sup>3</sup> )	3.17	3.15	3.14	3.12	3	2.95	2.9	2.85	2.8	2.7

**Tableau IV-2 : Poids spécifique des ciments préparés.**



**Figure IV-4 : Variation du poids spécifique de ciment en fonction de taux du gypse.**

Ceci peut être dû à la porosité créée par la substitution partielle du clinker par le gypse (taux de substitution de gypse) et la faible densité de gypse (densité de gypse = 2,56±0.1 g/cm<sup>3</sup>) inférieur à la densité de clinker (3.1±0.1 g/cm<sup>3</sup>).

**IV-2-3 Influence du Taux de gypse Sur la Surface Spécifique du Ciment :**

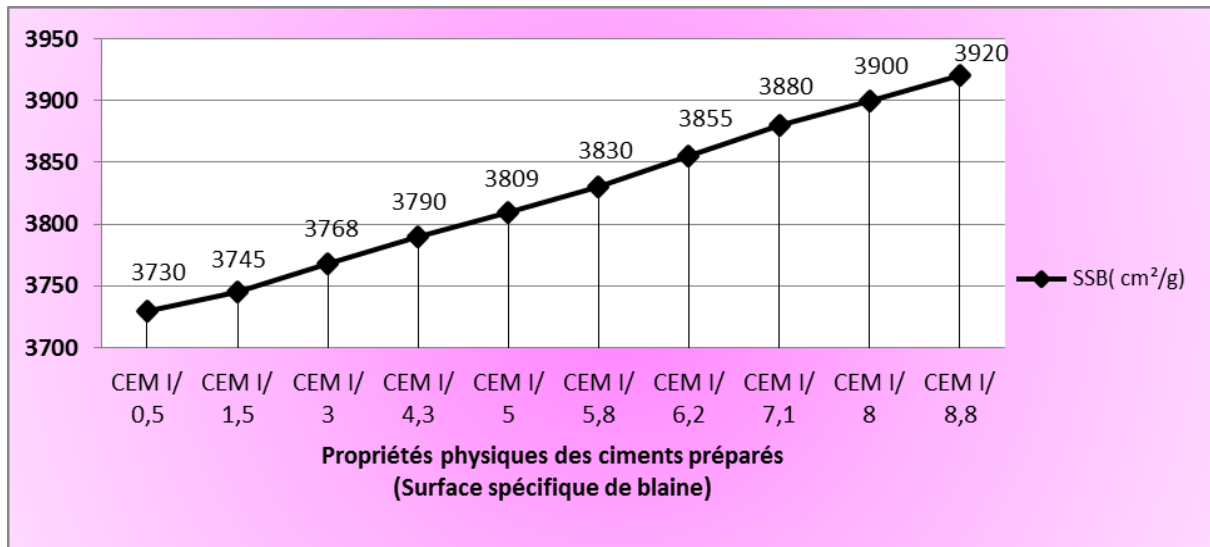
Les résultats du Tableau (IV-3) et la Figure (IV-5) présentent l'effet de l'addition de gypse sur la surface spécifique du ciment.

La Conclusion suivante peut être tirée :

- Une augmentation de la surface spécifique avec l'augmentation du pourcentage de gypse dans le ciment. Selon les résultats obtenus, voir tableau (IV-3), on note que l'augmentation de la quantité de gypse incorporé dans le ciment à un effet significatif sur la surface spécifique de (Blaine) des ciments préparé.

Type de ciment	CEMI 0.5%	CEMI 1.5%	CEMI 3%	CEMI 4.3%	CEMI 5%	CEMI 5.8 %	CEMI 6.2%	CEMI 7.1%	CEMI 8%	CEMI 8.8%
SSB (cm <sup>2</sup> /g)	3730	3745	3768	3790	3809	3830	3855	3880	3900	3920

**Tableau IV-3 Surface spécifique des ciments préparés.**



**Figure IV-5 : Variation de la surface spécifique de ciment en fonction de taux du gypse.**

Ceci peut être dû :

- à la porosité créée par la substitution partielle du clinker par le gypse (taux de substitution de gypse) et la densité de gypse. (Densité de gypse M'sila = 2.56)
- Et l'augmentation de SSB dû à la broyabilité de gypse (facile à broyé) de (5000 ± 100) par rapport le clinker difficile à broyé de (3200 ± 100) (le gypse jouie un rôle d'adjuvant de mouture et facilite le broyage des ciments)

IV-2-4 Influence du Taux de gypse Sur l'analyse Granulométrique (Méthode Alpine) :

Les résultats expérimentaux obtenus (Tableau IV-4 et Figures IV-6) présentent l'effet du taux d'ajout de gypse sur l'analyse granulométrique à 45 µm et 90µm.

Type ciment	Vol Over (%)									
	CEMI 0.5%	CEMI 1.5%	CEMI 3%	CEMI 4.3%	CEMI 5%	CEMI 5.8 %	CEMI 6.2%	CEMI 7.1%	CEMI 8%	CEMI 8.8%
45 µm	12.2	11.4	10.9	10.5	10.3	10	9.7	9.5	9.3	9.1
90 µm	1.4	1.3	1.2	.1	1.1	1	0.9	0.9	0.8	0.6
SSB (cm <sup>2</sup> /g)	3730	3745	3768	3790	3809	3830	3855	3880	3900	3920

Tableau IV-4 : Analyse granulométrique de ciment préparé (ALPINE).

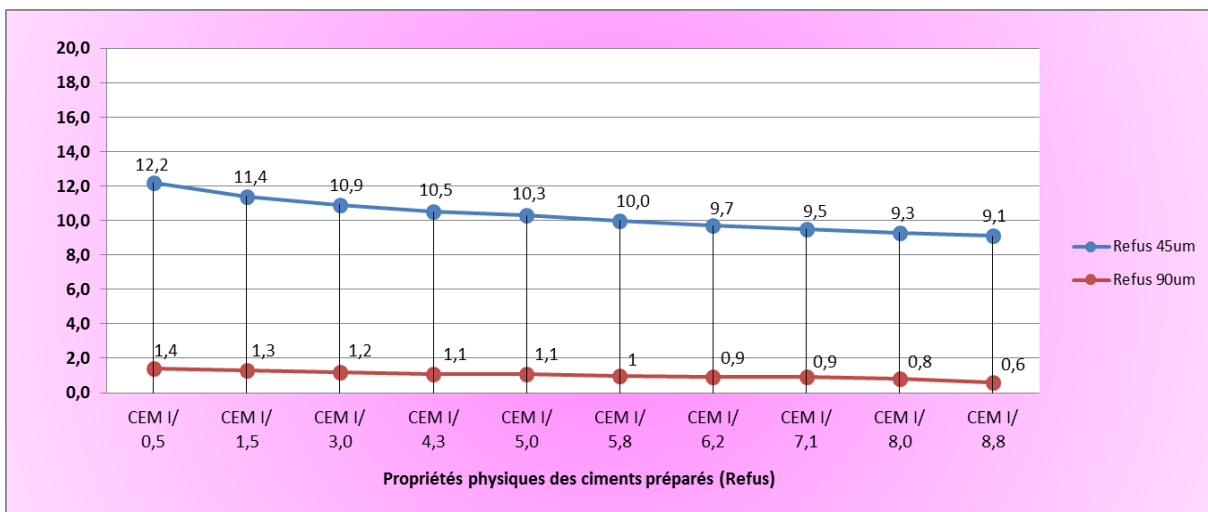


Figure IV-6 : Analyse granulométriques de ciment préparé (ALPINE).

On note que l'augmentation du pourcentage de gypse incorporé dans le ciment a l'effet suivant :

Diminution de la granulométrie des ciments préparés à cause principale la facilité de broyage de gypse (broyabilité de gypse 5000+-100 cm<sup>2</sup>/g) par apport une faible broyabilité de clinker (broyabilité de clinker 3700 +-100 cm<sup>2</sup>/g).

IV-2-4-1 La Relation entre la surface spécifique et les analyses granulométriques :

Selon la Figure(IV-7), on note que la relation de surface spécifique et l'analyse granulométrique est une relation inverse avec l'augmentation du taux d'ajout gypse.

L'augmentation du taux d'ajout gypse augmente la surface spécifique et diminue la granulométrie des ciments.

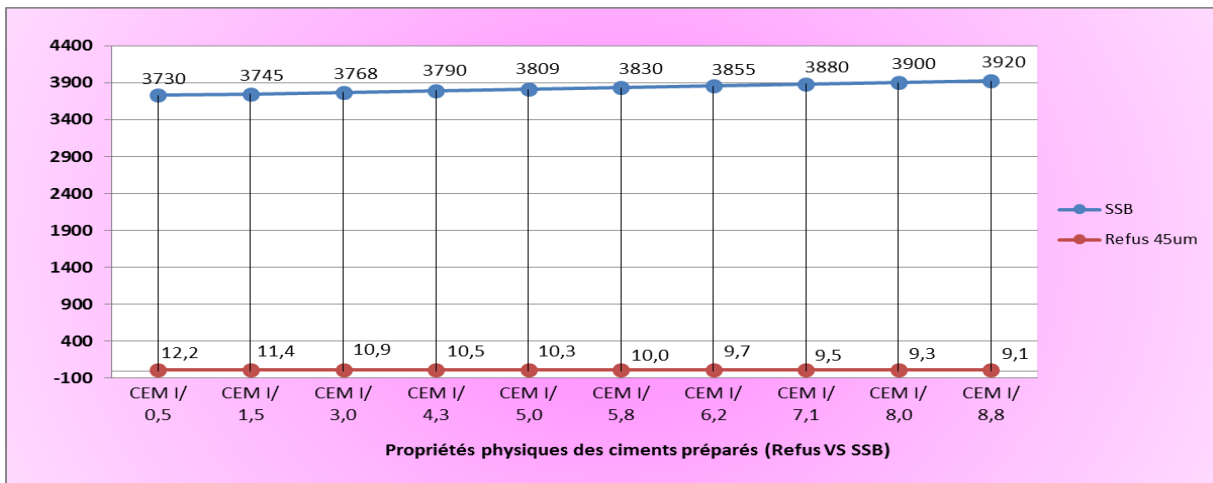


Figure IV-7 : Effet de la surface spécifique en fonction de l'analyse granulométrique.

IV-3 Influence du Taux de gypse sur la pâte du ciment :

IV-3-1 Influence du taux de gypse Sur la Consistance Normale :

Les résultats expérimentaux obtenus (Tableau IV-5 et Figures IV-8) présentent l'effet du taux du gypse sur la consistance normale de ciment.

La demande de l'eau des pâtes des ciments préparées avec les différents pourcentages de gypse : (0.5%, 1.5%, 3.0%, 4.30%, 5.0%, 5.8%, 6.20%,7.10%, 8.0% et 8.8%) est mesurée en utilisant l'essai d'aiguille de Vicat manuel.

Type de ciment	CEMI 0.5%	CEMI 1.5%	CEMI 3%	CEMI 4.3%	CEMI 5%	CEMI 5.8 %	CEMI 6.2%	CEMI 7.1%	CEMI 8%	CEMI 8.8%
Consistance Normale (E/C (%))	24.4	24.6	24.9	25.2	25.5	26	26.3	26.5	26.8	27.3

Tableau IV-5 : Propriétés physiques des ciments préparés (consistance normale).

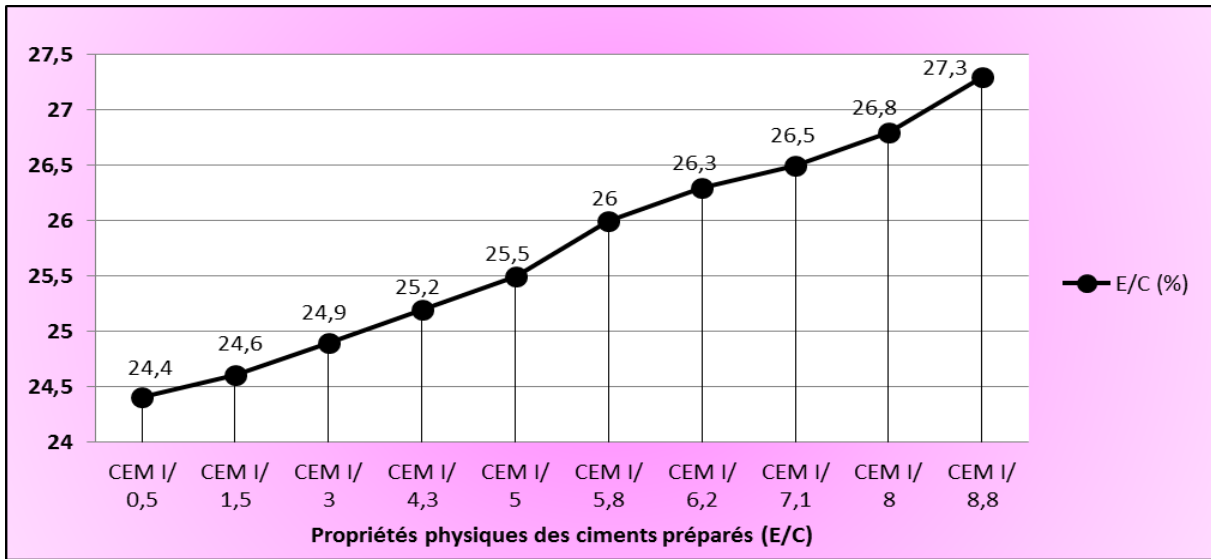


Figure IV-8 : Variation du Rapport E/C (Consistance normale) en fonction du taux de gypse.

Selon les résultats obtenus (Figures IV-8), on note que l'augmentation du pourcentage de gypse incorporé dans le ciment engendre l'effet suivant :

- L'augmentation de la surface spécifique implique l'augmentation de la quantité d'eau requise pour avoir une consistance normale de la pâte de ciment

**IV-3-2 Influence du Taux d'gypse sur le Temps de Prise :**

Les résultats expérimentaux obtenus (Tableau IV-6 et Figures IV-9) présentent l'effet du taux de gypse 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.

Type de ciment	CEMI 0.5%	CEMI 1.5%	CEMI 3%	CEMI 4.3%	CEMI 5%	CEMI 5.8 %	CEMI 6.2%	CEMI 7.1%	CEMI 8%	CEMI 8.8%
Début de prise (min)	45	68	77	110	145	180	155	130	85	55
Fin de prise (min)	60	110	150	225	235	260	210	170	110	90

Tableau IV-6 : Propriétés physiques des ciments préparés (Temps de Prise).

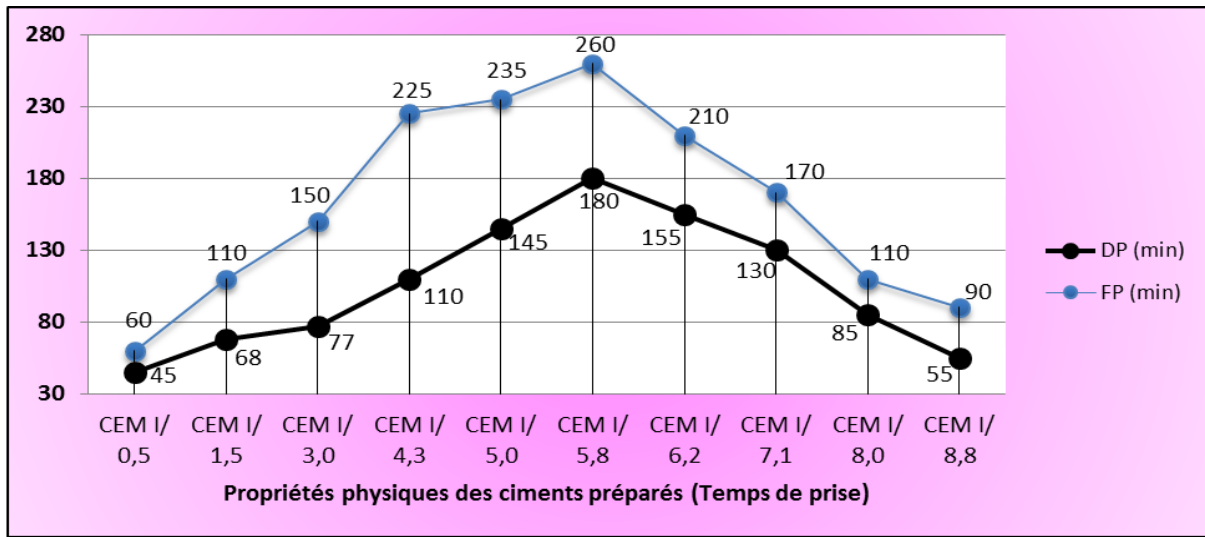


Figure IV-9 : Variation des Temps de prises en fonction de taux du gypse.

Selon les résultats obtenus (Figures IV-9), on note que l'augmentation du pourcentage de gypse incorporé dans le ciment a l'effet suivant :

- augmentation des temps de début et fin de prise à partir du taux minimale visé 0.5% de gypse jusqu'au le point d'ajout gypse 5.80% dû à l'hydratation des  $C_3A$  avec le gypse , (le gypse qui joue le rôle d'un régulateur de prise qui retarde la formation d'aluminate de calcium hydraté en donnant d'abord du trisulfoaluminate de calcium hydraté (ettringite)
- diminution des temps de début et fin de prise à partir du point 6.20% de gypse jusqu'au le point d'ajout gypse 8.80% (une chute des temps de prise à partir de 6.20% sous l'effet excès du gypse).

### IV-3-3 Influence du Taux de gypse Sur la Stabilité du Ciment :

Les résultats du (Tableau IV-7 et la Figure IV-10) indiquent que l'expansion à chaud (hydratation accéléré par traitement thermique à 100°C), on note que l'augmentation du pourcentage de gypse incorporé dans le ciment a l'effet suivant :

- diminution avec l'augmentation du taux de gypse d'une façon relativement linéaire jusqu'au le point 5.8% de gypse.
- augmentation avec l'augmentation du taux de gypse à partir du point 6.20% d'une façon relativement linéaire jusqu'au le point 8.8% de gypse et 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

Type de ciment	CEMI 0.5%	CEMI 1.5%	CEMI 3%	CEMI 4.3%	CEMI 5%	CEMI 5.8 %	CEMI 6.2%	CEMI 7.1%	CEMI 8%	CEMI 8.8%
Expansion à chaud (mm)	4	3.5	3.2	2	1.8	1.5	2.2	2.7	3.2	3.8

Tableau IV-7 : Propriétés physiques des ciments préparés (Expansion de Chatelier).

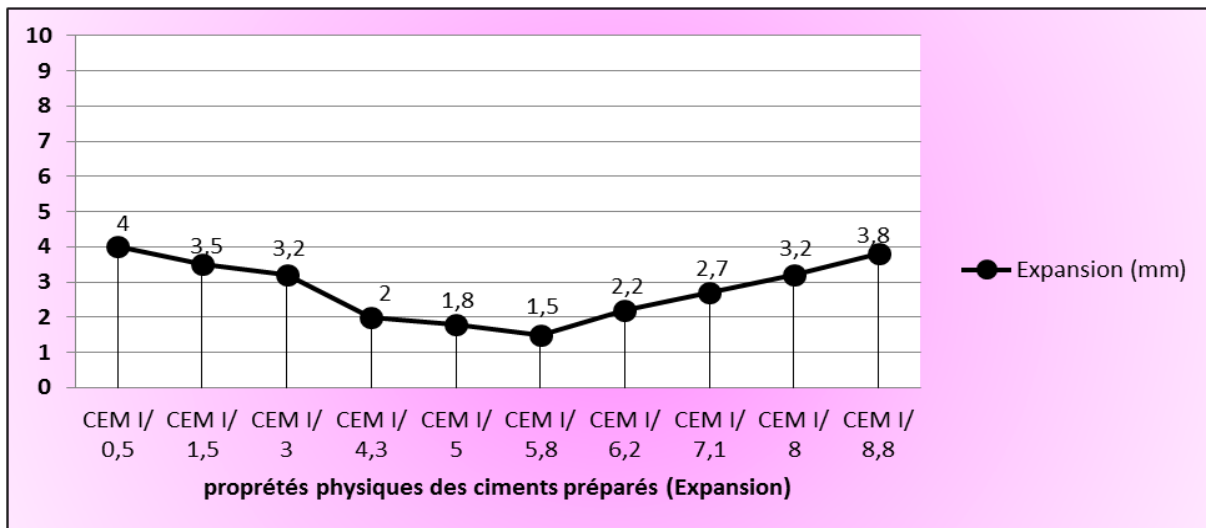


Figure IV-10 : Effet du taux de gypse sur l'expansion du ciment.

Cette dernière augmentation de l'expansion peut être expliquée par le pourcentage élevé du gypse (excès du gypse) et par la présence d'impuretés ainsi que d'autres éléments tels que le MgO et SO<sub>3</sub> qui sont préjudiciables au ciment et qui donnent généralement une expansion plus élevée.

**IV-4 Influence du Taux d'gypse Sur Le Mortier à base de sable Normalisé :**

**IV-4-1 Résistance à la Compression :**

Le Tableau (IV-8) et la Figure (IV-11) montrent le développement des performances des mortiers contenant différents pourcentages du gypse par substitution (remplacement partiel du ciment par le gypse) dans le ciment (effet chimique) en fonction des différents âges.

Type de Ciment	CEMI 0.5%	CEMI 1.5%	CEMI 3%	CEMI 4.3%	CEMI 5%	CEMI 5.8 %	CEMI 6.2%	CEMI 7.1%	CEMI 8%	CEMI 8.8%
Résistances à la Compression 01j (MPa)	5.6	7.80	12.30	13.40	13.70	14.10	12.90	12.10	11.90	8.70
Résistances à la Compression 02j (MPa)	8.00	11.00	24.10	26.70	28.80	30.50	28.40	25.50	24.80	23.7
Résistances à la Compression 07 j (MPa)	13	16.00	28.00	35.30	36.10	37.3	36.10	32.9	25.30	24.80
Résistances à la Compression 14 j (MPa)	18	21.70	35.20	43.60	45.20	46.60	43.30	39.30	33.40	28.9
Résistances à la Compression 28 j (MPa)	33	36.20	44.60	54.80	56.40	58.80	54.10	48.40	42.40	34.20

Tableau IV-8 : Evolution des Résistances à la Compression du Mortier en fonction de taux de gypse (sable normalisé).

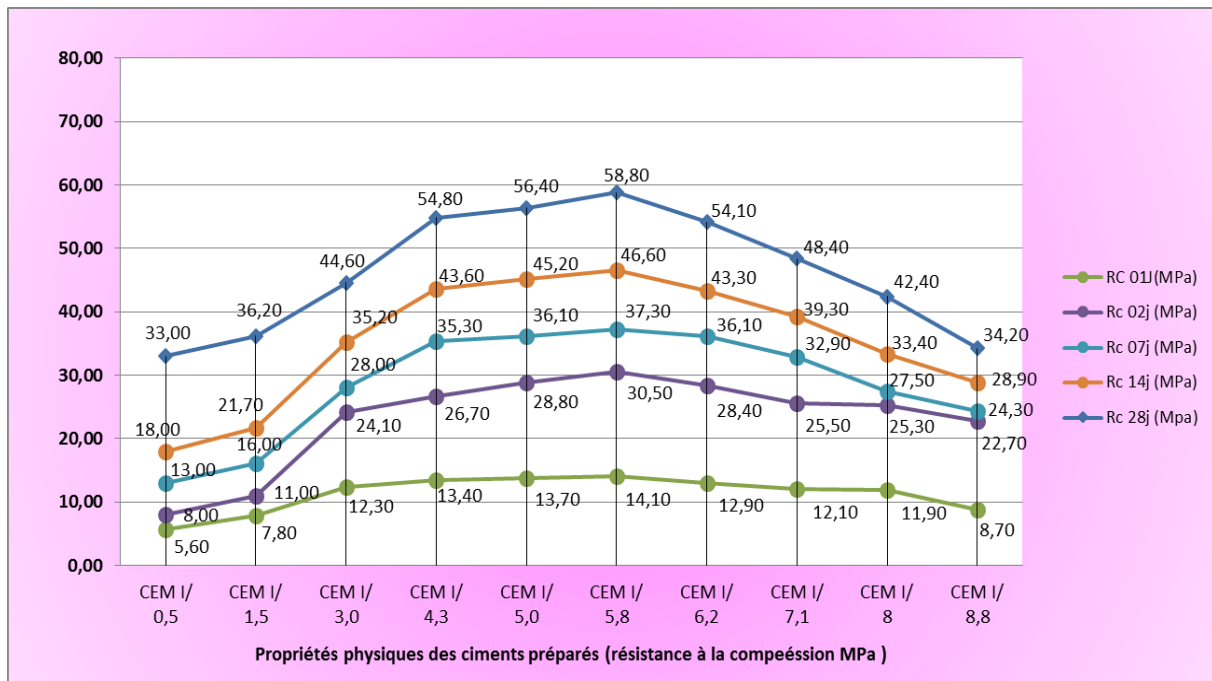


Figure IV-11 : Effet du Taux de gypse sur la Résistance à la Compression.

On remarque que les résistances de tous les mortiers augmente régulièrement à âge (02j ; 07j ; 14j ; 28j), jus ‘qua le point 5.8% de gypse ; par contre les résistances de tous les mortiers diminue (une chute de résistance) régulièrement à âge (02 j ; 07j ; 14j ; 28j) à partir de point 6.2%de gypse jus ‘qua le point 8.8% de gypse.

Cette diminution (chute de la résistance) :

Est due au fait que la réaction chimique n'est pas prédominante aux jeunes âges. ceci mène à une hydratation du minerais C<sub>3</sub>S (silicate tricalcique) et C<sub>2</sub>S (silicate bi calcique) moins intense aux jeunes âges 02j-07j-14j et résistance à 28jours en induisant de faibles résistances à cause principale sous l'effet excès du gypse ( le sulfate(SO<sub>3</sub>) plus de l'optimum hydrate avec le C<sub>3</sub>A et C<sub>2</sub>S est chuté la résistance à jeune âges 02j-07j-14j et hydrate avec le C<sub>3</sub>S ( hydrate avec CSH est ralentir hydratation CSH et diminué les résistances à 28jours.

**IV-4-2 Effet du Taux de gypse (effet chimique) Sur Le Retrait et Le Gonflement :**

La variation du retrait et du gonflement du mortier normal en fonction de gypse sont représentées dans les Tableaux (IV-9 et IV-10) et le Figure (IV-12 et IV-13).

- D'après les résultats obtenus, on peut affirmer que tous les ciments étudiés provoquent un faible retrait sur les mortiers étudiés jusqu'au le point 5.8% de gypse et forte retrait (augmentation des retraits) à partir de point 6.2% de gypse jusqu'au point 8.8% de gypse.
- Et D'après les résultats obtenus du gonflement, on peut affirmer que tous les ciments étudiés provoquent un faible gonflement (diminution du gonflement) sur les mortiers étudiés .

Type de Ciment	CEMI 0.5%	CEMI 1.5%	CEMI 3%	CEMI 4.3%	CEMI 5%	CEMI 5.8 %	CEMI 6.2%	CEMI 7.1%	CEMI 8%	CEMI 8.8%
Retrait à 03 Jours (µm/m)	234.61	256.8	277.96	299.12	320.28	341.44	362.6	383.76	404.92	405.2
Retrait à 07 Jours (µm/m)	424.32	444.4	464.4	484.56	504.64	524.72	544.8	564.88	584.96	585.14
Retrait à 28 Jours (µm/m)	610.68	629.35	648.02	666.69	685.36	704.03	722.7	741.37	760.04	760

**Tableau IV-9 : Retrait du Mortier normal en fonction du taux de gypse.**

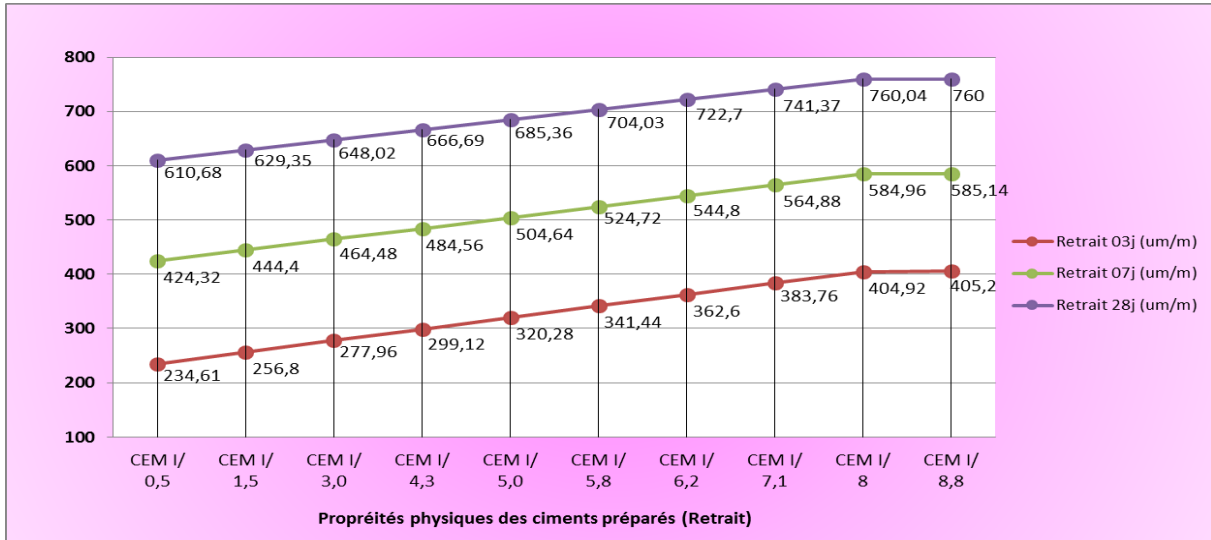


Figure IV-12 : Evolution du Retrait du mortier en fonction du taux de gypse.

Type de Ciment	CEMI 0.5%	CEMI 1.5%	CEMO 3 3%	CEMI 4.3%	CEMI 5%	CEMI 5.8 %	CEMI 6.2%	CEMI 7.1%	CEMI 8%	CEMI 8.8%
Gonflement à 03 Jour (µm/m)	33.34	32.12	30.90	29.69	28.47	27.26	26.04	24.82	23.61	23.6
Gonflement à 07 Jours (µm/m)	64.5	62.85	61.2	59.55	57.9	56.25	54.6	52.95	51.3	51.3
Gonflement à 28 Jours (µm/m)	91.6	89.83	88.05	86.28	84.50	82.73	80.95	79.17	77.40	77.4

Tableau IV-10 : Gonflement du mortier normal en fonction du taux de gypse.

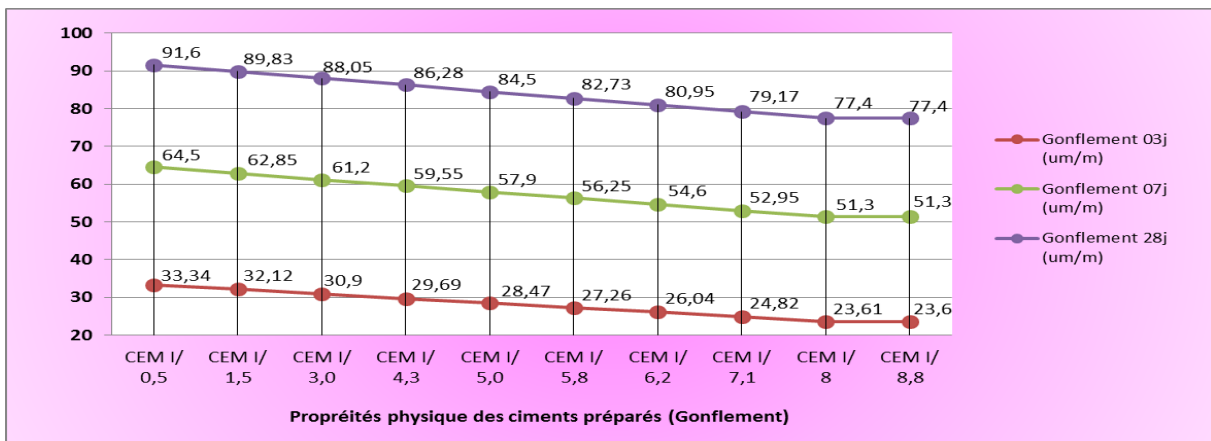


Figure IV-13 : Evolution du gonflement du mortier en fonction du taux de gypse

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.

-  $\leq 800 \mu\text{m/m}$  pour la classe 32,5

-  $\leq 1000 \mu\text{m/m}$  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 différents taux du gypse sont supérieurs à ceux du ciment avec faible taux du gypse 0.5%.

Ceci peut s'expliquer par la diminution du nombre et du diamètre des pores de la pâte du ciment hydraté.

La Figure (IV-12) illustre la variation des déformations de retrait des ciments ; on remarque que la vitesse de retrait est relativement linéaire entre 3 et 28 jours.

Cette cinétique de retrait est due à l'hydratation tardive de gypse

Le gonflement observé sur les éprouvettes contenant comme ajout de gypse est inférieur au gonflement dû au ciment à faible taux du gypse, ceci est dû à la consommation de la portlandite  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  et à la combinaison de l'oxyde de magnésium et le sulfate et à l'épuisement de la chaux libre pendant les réactions d'hydratation avec l'ajout incorporé dans le ciment à long terme (formation du deuxième (C-S-H))

La Figure (IV-13) illustre la variation des déformations du gonflement des ciments ; on remarque que la vitesse de gonflement (vitesse diminution de gonflement) est relativement linéaire entre 3 et 28 jours.

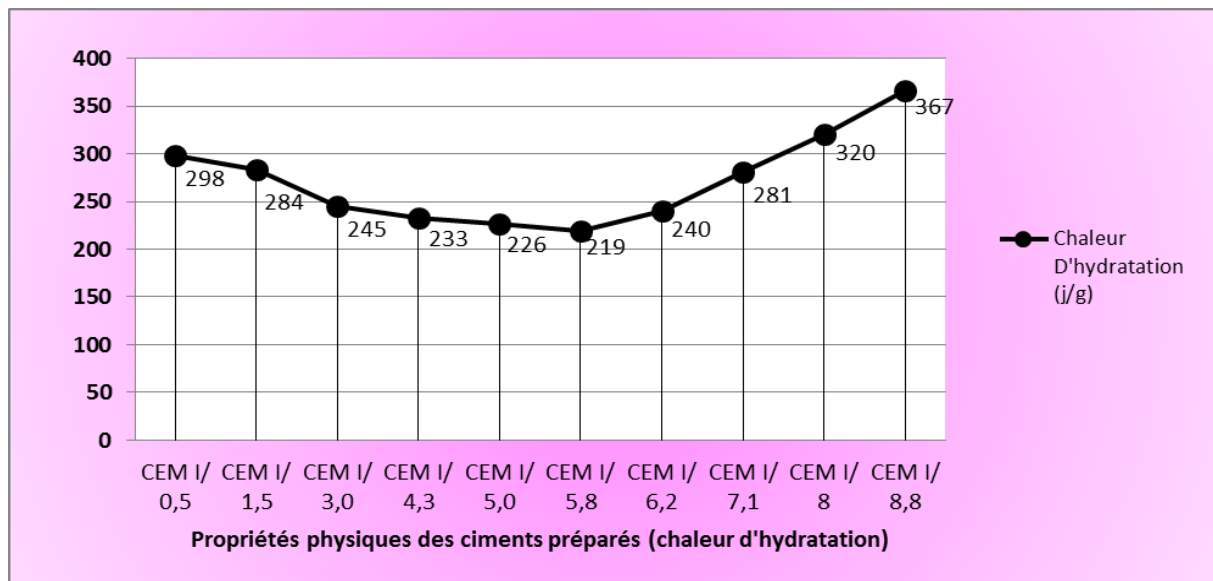
#### **IV-4-3 Effet du Taux de gypse (effet chimique) Sur La Chaleur d'hydratation :**

Les résultats expérimentaux obtenus (Tableau IV-11 et Figure IV-14) présentent l'effet du taux de gypse 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)

Type de ciment	CEMI 0.5%	CEMI 1.5%	CEMI 3%	CEMI 4.3%	CEMI 5%	CEMI 5.8 %	CEMI 6.2%	CEMI 7.1%	CEMI 8%	CEMI 8.8%
Chaleur d'hydratation (j/g)	298	264.00	245.00	233.00	226.00	219.00	240.40	280.70	320.10	367

**Tableau IV-11 : La chaleur d'hydratation de mortier normal en fonction du taux de gypse.**



**Figure IV-14 : Effet du taux de gypse sur la chaleur d'hydratation.**

On note que l'augmentation du pourcentage de gypse incorporé dans le ciment a l'effet suivant :

- diminution le taux de dégagement de chaleur d'hydratation avec l'augmentation du taux de gypse d'une façon relativement linéaire jusqu'au le point 5.8% de gypse.
- augmentation le taux de dégagement de chaleur d'hydratation avec l'augmentation du taux de gypse à partir du point 6.20% d'une façon relativement linéaire jusqu'au le point 8.8%

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 gypse.
- la nature minéralogique du clinker : plus les teneurs en aluminat tricalcique (C<sub>3</sub>A) et silicate tricalcique (C<sub>3</sub>S) sont élevées, plus la chaleur d'hydratation est forte.

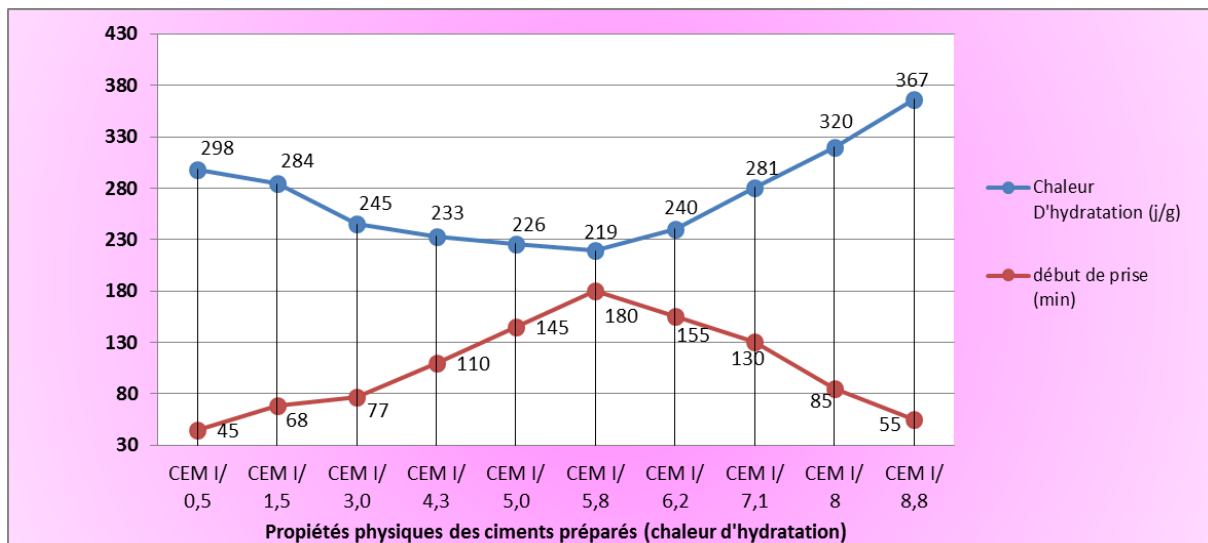
- la température extérieure

**IV-4-3-1 Effet du Chaleur d'hydratation Sur le Temps de Prise (début de prise) :**

Les résultats expérimentaux obtenus (Tableau IV-12 et Figure IV-15) présentent l'effet du taux de gypse sur la chaleur d'hydratation des échantillons de mortier normalise.

Type de Ciment	CEMI 0.5%	CEMI 1.5%	CEMI 3%	CEMI 4.3%	CEMI 5%	CEMI 5.8 %	CEMI 6.2%	CEMI 7.1%	CEMI 8%	CEMI 8.8%
Chaleur d'hydratation (j/g)	298	264	245	233	226	219	240	281	320	367
Début de prise (min)	45	68	77	110	145	180	155	130	85	55

**Tableau IV-12 : Chaleur d'hydratation en fonction du temps de prise (début de prise et fin de prise).**



**Figure IV-15 : Effet chaleur d'hydratation en fonction du temps de prise (début de prise).**

On note que l'augmentation du pourcentage de gypse incorporé dans le ciment a l'effet suivant :

- diminution de la chaleur d'hydratation avec l'augmentation du taux de gypse et le suivi par une augmentation du débit de prise d'une façon relativement linéaire jusqu'au le point 5.8% de gypse.

- augmentation la chaleur d'hydratation avec l'augmentation du taux de gypse à partir de point 6.2% de gypse et le suivi par une diminution du débit de prise à partir du point 6.20% d'une façon relativement linéaire jusqu'au le point 8.8%. (Figure IV-16).

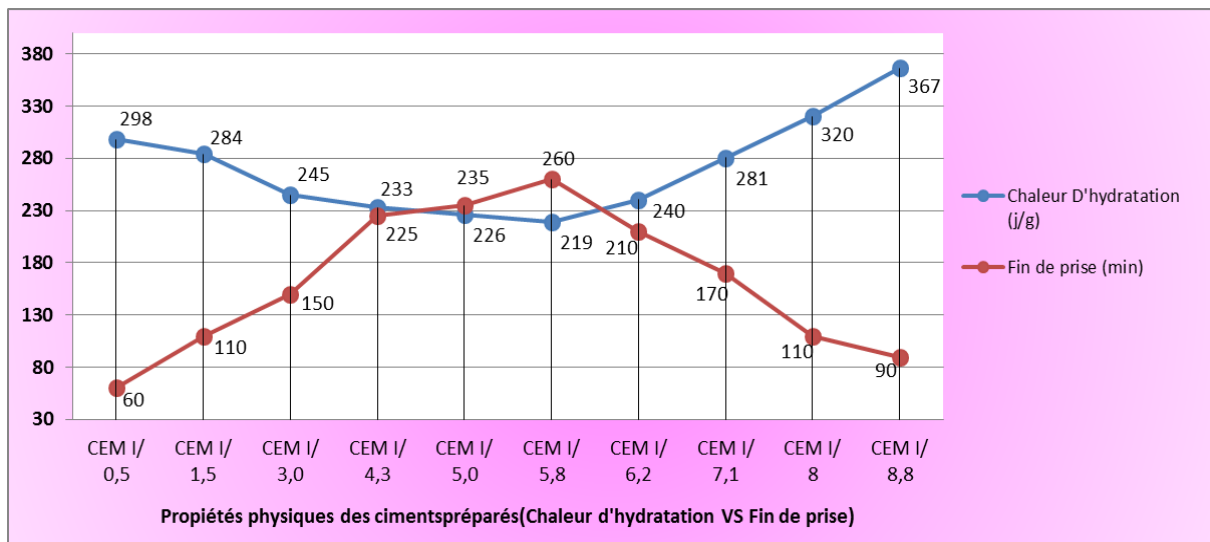
La chaleur d'hydratation des ciments a faible chaleur d'hydratation ne doit pas dépasser la valeur caractéristique de 270 j/g selon la Norme NA 442 donc les ciments du taux de gypse (1.5% ,3% ,4.3% ,5%,5.8%,6.2% ) c'est un ciment à faible chaleur d'hydratation.

**IV-4-3-2 Effet du Chaleur d'hydratation Sur le Temps de Prise (fin de prise):**

Les résultats expérimentaux obtenus (Tableau IV-13 et Figure IV-16) présentent l'effet du taux de gypse sur la chaleur d'hydratation des échantillons de mortier normalise.

Type de Ciment	CEMI 0.5%	CEMI 1.5%	CEMI 3%	CEMI 4.3%	CEMI 5%	CEMI 5.8 %	CEMI 6.2%	CEMI 7.1%	CEMI 8%	CEMI 8.8%
Chaleur d'hydratation (j/g)	298	264	245	233	226	219	240	281	320	367
Fin de prise (min)	60	110	150	225	235	260	210	170	110	90

**Tableau IV-13 : Chaleur d'hydratation en fonction du temps de prise (fin de prise).**



**Figure IV-16 : Effet chaleur d'hydratation en fonction du temps de prise (début de prise).**

On note que l'augmentation du pourcentage de gypse incorporé dans le ciment a l'effet suivant :

- diminution de la chaleur d'hydratation avec l'augmentation du taux de gypse et le suivi par une augmentation de temps de prise final d'une façon relativement linéaire jusqu'au le point 5.8% de gypse.

- augmentation la chaleur d'hydratation avec l'augmentation du taux de gypse à partir de point 6.2% de gypse et le suivi par une diminution de temps de prise final à partir du point 6.20% d'une façon relativement linéaire jusqu'au le point 8.8%. (Figure IV-16).

**IV-5 Comparaison :**

Dans cette étude, nous comparons le ciment préparée (CEM 06, 5.8% de gypse équivalent de 3.02 de sulfate sur le ciment préparé) avec le ciment (CPA) decimenterie M'sila(Lafargeholcim).

éléments	CEM I (5.8% de gypse »SO <sub>3</sub> =3.08)	CPA LAFARGEHOLCIM (M'sila) »SO <sub>3</sub> =3.18	Différence	Tolérance (±)
Poids spécifique	2.95	2.97	0.02	0.02
Surface spécifique	3830	3900	70	80
Consistance normale (E/C)	26	26.7	0.70	0.7
Début de prise	180	190	10	20
Fin de prise	260	280	20	-
Expansion	1.5	2.0	0.5	0.8
Résistance de compression à 02j	30.50	29.2	1.30	1.5
Résistance de compression à 28j	58.8	57.10	1.7	2.5
Chaleur hydratation	219	230	11	-
Refus 45 µm	10	11.2	1.20	2.2
Refus 90 µm	1.0	0.7	0.30	-

**Tableau IV-14 : Comparaison (CEM 06 (5.8% de gypse)Vs CPA Lafargeholcim (M'sila))**

## CONCLUSION

Le ciment portland sans ajouts (CEM I) se distingue par un durcissement rapide à sa période initiale en comparaison avec un ciment Portland composé avec ajout c'est-à-dire avec constituant secondaire (CEM II).

Cette propriété rapide du ciment sans ajout (CEM I), nécessite l'emploi d'un sulfates de calcium (dans notre cas le gypse) qui ralentir la prise et le durcissement, et augmente la résistance à jeune âge, mécanique (broyage poussée du liant hydraulique) ou thermique (accélération des réactions chimiques par l'élévation de la température).

L'objectif de cette étude expérimentale consiste à :

- Etudier l'influence de l'augmentation du taux d'ajout (gypse),
- Chercher le point optimum du sulfate  $SO_3$  pour obtenue les meilleurs caractéristique physico-chimique et mécanique des ciments préparés.

Ce travail est une recherche de l'optimum propriété physico-mécanique des pâtes de ciment et mortiers basé sur l'augmentation de pourcentage du gypse sur le ciment portland (CEM I) de classe de résistances (32,5-42,5-52,5).

Les propriétés physiques des ciments (CEM I) activés mécaniquement à l'état anhydre et à l'état hydraté (poids spécifique, consistance des pâtes de ciments et temps de prise) ainsi que les caractéristiques des mortiers confectionnés (le retrait, le gonflement et la chaleur d'hydratation) de mortier ont été étudiées en fonction de varier les pourcentages du gypse.

D'après les résultats expérimentaux obtenus, il ressort que l'augmentation de gypse par différentes pourcentage est le principale responsable à l'amélioration de la réactivité rapide des ciments avec différent pourcentage du gypse et résistances mécaniques des mortiers.

Les divers résultats présentés dans ce mémoire précisent clairement les influences majeures de la variation du gypse des ciments portland (CEMI) sur la cinétique d'hydratation des ciments (consistance – temps de prise et chaleur d'hydratation), sur les propriétés mécaniques des mortiers et aussi sur les variations dimensionnelles (retrait) et volumiques (gonflement) des pâtes de mortiers testés.

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

- l'augmentation du taux de gypse dans le ciment influe sensiblement sur le besoin en eau nécessaire pour avoir une consistance normale.
- Les demandes en eau (E/C) augment proportionnellement avec l'augmentation du taux du gypse.

- l'augmentation de la quantité de gypse incorporé dans le ciment à un effet significatif sur la surface spécifique de (Blaine) des ciments préparé.

L'augmentation du pourcentage de gypse incorporé dans le ciment a l'effet suivant :

- augmentation des temps de début et fin de prise à partir du taux minimale 0.5% de gypse jusqu'au le point d'ajout gypse 5.80%.
- diminution des temps de début et fin de prise à partir du point 6.20% de gypse jusqu'au le point d'ajout gypse 8.80% (une chute des temps de prise à partir de 6.20% sous l'effet excès du gypse).
- l'augmentation du taux de gypse ralentir aux premiers âges de durcissement (à court terme), avec des variations dimensionnelles et volumiques (retrait et gonflement) faibles conformément à la norme NF P 15-433.
- l'effet du taux de gypse sur la chaleur d'hydratation une diminution le taux de dégagement de chaleur d'hydratation avec l'augmentation du taux de gypse d'une façon relativement linéaire jusqu'au le point 5.8% de gypse.
- augmentation le taux de dégagement de chaleur d'hydratation avec l'augmentation du taux de gypse à partir du point 6.20% d'une façon relativement linéaire jusqu'au le point 8.8%

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 gypse.
  - 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.
- les résistances à la compression de tous les tests de mortier augmentent régulièrement avec l'âge.
  - La résistance à la compression diminue avec l'augmentation du pourcentage d'ajout (gypse).
  - L'influence du taux d'ajout gypse sur les propriétés physiques et mécaniques des matériaux (mortiers) donnée des changements de type et classe de résistance de ciment (CEM I /32.5 vers 42.5 vers 52.5 et chute des classes de résistance directement vers 42.5 et 32.5).
  - les ciments CEM I aux défèrent pourcentage de gypse doivent être finement broyés entre ( $3700\text{cm}^2/\text{g} - 4000\text{ cm}^2/\text{g}$ ) et poids spécifique entre ( $2.90\text{ t/m}^3 - 3,18\text{ t/m}^3$ ) afin de ralentir la cinétique d'hydratation des ciments à court terme (amélioration de la réactivité de CEM I) et assurer une bonne résistance mécanique du matériau.

L'augmentation du taux d'ajout gypse de tous les ciments étudiés provoquent un faible retrait sur les mortiers étudiés jusqu'au le point 5.8% de gypse et forte retrait (augmentation des retraits) à partir de point 6.2% de gypse jusqu'au point 8.8% de gypse.

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 CEM I

- \*  $\leq 800 \mu\text{m/m}$  pour la classe 32,5
- \*  $\leq 1000 \mu\text{m/m}$  pour la classe 42,5 et 52.5.

Enfin pour assurer une bonne qualité des ciments (CEM I) avec caractéristique physico-chimiques et mécanique conforme à la norme ; ciment durable toujours cherché l'optimum de gypse dans notre cas le taux de gypse optimum fixé à l'ordre de 5,8% et pour formalisé un ciment CEM I il faut utiliser :

- Un clinker a bonne broyabilité et des bonnes réactivités stockées dans un endroit à l'abri de l'humidité.
- Gypse de dureté moyenne (facile à broyer).
- Un gypse de bonne réactivité.
- Bonne qualité de gypse  $\text{SO}_3 > 35\%$ .
- Assure un bon broyage de ciment (broyage poussé).

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] DJEFELL FELLA, l'effet combiné de la cure et la substitution partielle du ciment par le laitier sur les propriétés mécanique et physique du mortier, 2015, p2.
- [2] MEZERAI NAIMA, Durabilité d'un mortier à base d'un ciment portland composé à la PouzzolaneCPJ-CEM II A vis-à-vis d'un milieu agressif, 2012/2013,P14.
- [3] BOUSSAID Bachir, Caractéristiques d'un massif rocheux et anomalies de tir. Carrière de Gypse de Sidi Boutbal, plateau de Boufatis, Oran. (Entreprise Knauf plâtres, 2015,p28.
- [4] SOUMAYA Amina Bensafir,mécanisme d'altération des matériaux cimentaires soumis aux milieu fortement agressifs,2010,p25.
- [5] BOUBAKRI MOUHAMED ; HADDA NAOUI, influence de l'ajout calcaire sur sur les caracteristiques physico-chimiques des ciments, 2011, p07
- [6] CHIKOUCHE HAMMINA ,influenceof the pozzolanicadmixture(calcinedclay) on the physico-chemicalProperties of cements,
- [7] Belhocin aida-nagoudinadjat, Etude expérimentale d'un mortier avec ajouts minéraux, 2014,p6.
- [8] ben Achour yasine,Analyse de l'influence de l'ajout de taux élevé de fillers calcaires sur les propriétés physique, mécaniques,microstructurales, de transfert et de durabilité des mortiers,2009,p57
- [9] Boudraa Mohamed- ChouiterAmar,caracteristique physico-mécanique d'un ciment confectionne a base de laitier,2012, 27.
- [10] KHANOUS Amar, Optimisation du taux de calcaire pour la production d'un nouveau ciment blanc 42.5, 2014, p13
- [11] <http://dz.kompass.com/>
- [12] document lafargeholcim.laboratoire physique ph5 2014.
- [13] haouéssouad-TaouafIlhém,Théorie d'hydratation,2012,p7

- [14] Emmanuel GUILLON, Durabilité des matériaux cimentaires - Modélisation de l'influence des équilibres physico-chimiques sur lamicrostructure et les propriétés mécaniques résiduelles , 2004 , P 9
- [15] J.P. Bombléd 7th Int. Symp. Chemistry of Cements. Paris, III, VI, 164, 1980
- [16] P.C. Aïtcin rapport technique, non publié 1990
- [17] Jélenic et A. Panovic, Halle R. et Gacesa T. Cern. Conc. Resc., 7, 239.
- [18] BENIA Mounir, Influence de la surface spécifique des ciments aux ajouts minéraux sur le comportement mécanique du mortier et du béton à base de matériaux locaux, p06
- [19] W.E. HaskeU, Rock Prod., 62, 110, 1959
- [20] H.S. Meissner, ASTM Bulletin, N0169, 39
- [21] B.W. Ost, Ceram. Bulletin, N053, 573.
- [22] J. Skalny et J. F. Young, "Mechanism of Portland Cernent Hydration" 7th. int. congr. chern, cernent, Paris, 1980
- [23] I. Jawed, S. Goto et R. Kondo, "Hydration of C4AF in presence of Lime and sulfates", Cern. concr. res., 6(4), 441 (1976)
- [24] J. Havlica et D-Roztocka "Hydration Kinetics of calcium aluminate phases in the présence of various ratio of Ca<sup>2+</sup> and SC)<sup>2-</sup> ions in liquid phase" Cern. Conc. Resc., 23, 294-300, 1993.
- [25] E.Y. Ghorab et S.H. Abou el Foutouh, "The effet of lime and alkalis on the hydration of C<sub>3</sub>A in presence of gypsum" Wiss, Janey, Elstner associate, hc.-Northbook, II, 60062, USA.
- [26] L. E. Copeland et Kantro D. L., "Hydration of portland cernent" 5th. Int. Symp. Chem. Cerne., Tokyo. 1968, V II p.387
- [27] A. Bentur, " Effect of gypsum on the hydration and strength of C3S pastes", J. Am. Ceram. Soc., 59(5), 210 (1976)
- [28] slahedine BouRAOUI , effet des sulfates alcalins sur les propriétés des ciments avec et sans superplastifiant, 1997, p13
- [29] Ameer El Amine HAMAMI, Vers une prédiction de la perméabilité au gaz à partir de la composition des matériaux cimentaires, 2009, p170.

## **ANNEXE**

Les Certificats de :

- 1- Prisometre vicat automatique.
- 2- Machine à la flexion et Compression.
- 3- Appareil Vibrante .
- 4- Malaxeur.
- 5- Moules prismatiques
- 6- Balance 220g.
- 7- Balance 4200g
- 8- Armoire humide.
- 9- Appareil de chaleur d'hydratation –Calorimètre de langavant .
- 10-Vicat manuel.
- 11-Sable normalisé.



## E2ME - Equipements et Maintenance de Machines d'Essais

40 bis rue Pierre Brossolette 78500 Sartrouville France  
Tel : +33 (0)9 64 18 78 97 Fax : + 33 (0)1 39 57 94 40 Mail : info@e2me.fr

### CONSTAT DE VERIFICATION

14-06-236-V

Délivré à : LAFARGE CIMENT DE MSILA  
USINE DE M'SILA  
HAMMAM DALAA  
ALGERIE

ORIGINAL

#### Equipement vérifié :

Type : VICAT AUTOMATIQUE  
Constructeur : ACMEL  
Référence : P48  
Numéro de série : 7666-M256  
Identification : 833.G6010.000

#### Condition de vérification :

Lieu de vérification : Site  
Température ambiante : 22 °C  
Humidité ambiante : 40%  
Norme de référence : EN 196-3:2009  
Observation : -

#### Equipements de référence utilisés :

Capteur température Testo 625 - n°02409091 + 02402987 - Certificat TESTO n°TH-3552 du 23/01/2014  
Capteur température Chaîne de mesure de température HI935005/ Tc K - n°08282392 - Certificat COFRAC n°T-3555 du 28/01/2014  
Série de poids Série de poids 1g à 5kg F1 - n°G1313938 - Certificat DKD n°G2-491 du 29/01/2013  
Pied à coulisse Mitutoyo CD-15CPX - 150mm - 0.01mm - n°08468033 - Certificat COFRAC n°14OME0590/04 du 26/05/2014

#### Conclusion : CONFORME

Selon la norme EN 196-3:2009, les résultats des mesures notés dans le rapport de vérification d'étalonnage n°14-06-236-E sont déclarés conformes suivants les écarts maximums tolérés, sans tenir compte de l'incertitude de mesure.

Résultats, incertitudes, moyens de mesures et conditions d'environnement suivant certificat d'étalonnage n°14-06-236-E.

Date de vérification : 07 Juin 2014

Vérification effectuée par : F. RANDE

Date d'émission : 08 Juin 2014

Validité : 1 an

Signature :

  
E2ME sarl  
40 Bis rue Pierre Brossolette  
78500 Sartrouville - FRANCE  
Tél +33 (0)9 64 18 78 97 - info@e2me.fr  
RCS Versailles 510497027 Capital 26000€

Ce document est réalisé suivant les recommandations du fascicule de documentation X 07-011 définissant le constat de vérification, il peut être utilisé pour démontrer le raccordement du moyen de mesure aux étalons nationaux ou internationaux, sous réserve qu'il réponde aux recommandations du fascicule de document X 07-015.

La reproduction de ce constat n'est autorisée que sous la forme d'un fac-similé photographique intégral. Ce document ne peut pas être utilisé en lieu et place d'un certificat d'étalonnage.



## E2ME - Equipements et Maintenance de Machines d'Essais

40 bis rue Pierre Brossolette 78500 Sartrouville France  
Tel : +33 (0)9 64 18 78 97 Fax : + 33 (0)1 39 57 94 40 Mail : info@e2me.fr

### CONSTAT DE VERIFICATION

**14-06-201-V**

**Délivré à :** LAFARGE CIMENT DE MSILA  
USINE DE M'SILA  
HAMMAM DALAA  
ALGERIE

ORIGINAL

#### Equipement vérifié :

Type : PRESSE DE FLEXION  
Constructeur : TONI TECHNIK  
Référence : 2010-010  
Numéro de série : 1544  
Identification : -

#### Afficheur :

Type : NUMERIQUE  
Constructeur : TONI TECHNIK  
Référence : 0510  
Numéro de série : 718  
Identification :

#### Caractéristiques :

Etendue de mesure (kN) : 10  
Résolution (kN) : 0.01  
Classe d'exactitude : 1  
Indicateur de maximum : Oui  
Automatique : Oui

#### Equipement de référence utilisé :

Type : Dynamomètre  
Capteur de force : Etalon 10kN  
Pont de mesure : Etalon 10kN  
Numéro de série : 211944  
Certificat COFRAC : M050190/1  
Date d'émission : 30/05/2011

#### Condition de vérification :

Lieu de vérification : Site  
Température ambiante : 20.2 °C  
Norme de référence : EN 196-1:2006  
Méthode de vérification : Charge indiquée  
Sens de sollicitation : Compression - Sens croissant  
Observation : -

#### **Conclusion : CONFORME**

Selon la norme EN 196-1:2006, les résultats des mesures de l'indicateur de force notés dans le certificat d'étalonnage n°14-06-201-E sont déclarés conformes à la classe d'exactitude 1 de 1kN à 10kN suivant la limite des critères d'acceptation, sans tenir compte de l'incertitude de mesure.

Résultats, incertitudes, moyens de mesures et conditions d'environnement suivant le certificat d'étalonnage n°14-06-201-E.

Date de vérification : 09 Juin 2014  
Vérification effectuée par : J. MESSAGER  
Date d'émission : 10 Juin 2014

Validité : 1 an  
Signature :

E2ME sarl  
40 Bis rue Pierre Brossolette  
78500 Sartrouville - FRANCE  
Tél +33 (0)9 64 18 78 97 - info@e2me.fr  
RCS Versailles 510497027 Capital 26000€

Ce document est réalisé suivant les recommandations du fascicule de documentation X 07-011 définissant le constat de vérification, il peut être utilisé pour démontrer le raccordement du moyen de mesure aux étalons nationaux ou internationaux, sous réserve qu'il réponde aux recommandations du fascicule de document X 07-015.

La reproduction de ce constat n'est autorisée que sous la forme d'un fac-similé photographique intégral. Ce document ne peut pas être utilisé en lieu et place d'un certificat d'étalonnage.



## E2ME - Equipements et Maintenance de Machines d'Essais

40 bis rue Pierre Brossolette 78500 Sartrouville France  
Tel : +33 (0)9 64 18 78 97 Fax : + 33 (0)1 39 57 94 40 Mail : info@e2me.fr

### CONSTAT DE VERIFICATION

14-06-200-V

Délivré à : LAFARGE CIMENT DE MSILA  
USINE DE M'SILA  
HAMMAM DALAA  
ALGERIE

ORIGINAL

#### Equipement vérifié :

Type : PRESSE CIMENT  
Constructeur : TONI TECHNIK  
Référence : 2010-010/1543  
Numéro de série : 409  
Identification : -

#### Afficheur :

Type : NUMERIQUE  
Constructeur : TONI TECHNIK  
Référence : 0510  
Numéro de série : 718  
Identification :

#### Caractéristiques :

Etendue de mesure (kN) : 200  
Résolution (kN) : 0.1  
Classe d'exactitude : 1  
Indicateur de maximum : Oui  
Automatique : Oui

#### Equipement de référence utilisé :

Type : Dynamomètre  
Capteur de force : Etalon 200kN  
Pont de mesure : Etalon 200kN  
Numéro de série : P110YD  
Certificat COFRAC : N050147/1  
Date d'émission : 06/07/2012

#### Condition de vérification :

Lieu de vérification : Site  
Température ambiante : 19.2 °C  
Norme de référence : EN 196-1:2006  
Méthode de vérification : Charge indiquée  
Sens de sollicitation : Compression - Sens croissant  
Observation : -

#### Conclusion : CONFORME

Selon la norme EN 196-1:2006, les résultats des mesures de l'indicateur de force notés dans le certificat d'étalonnage n°14-06-200-E sont déclarés conformes à la classe d'exactitude 1 de 20kN à 200kN suivant la limite des critères d'acceptation, sans tenir compte de l'incertitude de mesure.

Résultats, incertitudes, moyens de mesures et conditions d'environnement suivant le certificat d'étalonnage n°14-06-200-E.

Date de vérification : 08 Juin 2014  
Vérification effectuée par : J. MESSAGER  
Date d'émission : 09 Juin 2014

Validité : 1 an  
Signature :

E2ME sarl  
40 Bis rue Pierre Brossolette  
78500 Sartrouville - FRANCE  
Tél +33 (0)9 64 18 78 97 - info@e2me.fr  
RCS Versailles 510497027 Capital 26000€

Ce document est réalisé suivant les recommandations du fascicule de documentation X 07-011 définissant le constat de vérification, il peut être utilisé pour démontrer le raccordement du moyen de mesure aux étalons nationaux ou internationaux, sous réserve qu'il réponde aux recommandations du fascicule de document X 07-015.

La reproduction de ce constat n'est autorisée que sous la forme d'un fac-similé photographique intégral. Ce document ne peut pas être utilisé en lieu et place d'un certificat d'étalonnage.



## E2ME - Equipements et Maintenance de Machines d'Essais

40 bis rue Pierre Brossolette 78500 Sartrouville France  
Tel : +33 (0)9 64 18 78 97 Fax : + 33 (0)1 30 99 59 55 Mail : info@e2me.fr

### CONSTAT DE VERIFICATION

15-06-162-V

**Délivré à :** LAFARGE CIMENT DE MSILA  
USINE DE M'SILA  
HAMMAM DALAA  
ALGERIE

ORIGINAL

#### Equipement vérifié :

Type : TABLE VIBRANTE  
Constructeur : TONI TECHNIK  
Référence : 5533  
Numéro de série : 026  
Identification : 2

#### Condition de vérification :

Lieu de vérification : Site  
Température ambiante : 21 °C  
Humidité ambiante : 54%  
Norme de référence : NF EN 196-1:2006  
Observation : -

#### Equipements de mesure utilisés :

Pied à coulisse Mitutoyo CD-15CPX - 150mm - 0.01mm - n°08468033 - Certificat COFRAC n°15OME0505/01 du 13/05/2015  
Série de poids Série de poids 1g à 5kg F1 - n°G1313938 - Certificat DKD n°G2-491 du 29/01/2013  
Chronomètre Chronomètre RS 278698 - n°E2/10224 raccordé à l'étalon de référence Chronomètre Quantum - Certificat COFRAC n°08/189114/1 du 19/09/2014

#### Conclusion : CONFORME

Selon la norme NF EN 196-1:2006, les résultats des mesures notés dans le rapport de vérification d'étalonnage n°15-06-162-E sont déclarés conformes suivants les écarts maximums tolérés, sans tenir compte de l'incertitude de mesure.

Résultats, incertitudes, moyens de mesures et conditions d'environnement suivant certificat d'étalonnage n°15-06-162-E.

Date de vérification : 14 Juin 2015

Validité : 1 an

Vérification effectuée par : F. RANDE

Signature :

Date d'émission : 15 Juin 2015

E2ME sarl  
40 Bis rue Pierre Brossolette  
78500 Sartrouville - FRANCE  
Tél +33 (0)9 64 18 78 97 - info@e2me.fr  
RCS Versailles 510497027 Capital 26000€

Ce document est réalisé suivant les recommandations du fascicule de documentation X 07-011 définissant le constat de vérification, il peut être utilisé pour démontrer le raccordement du moyen de mesure aux étalons nationaux ou internationaux, sous réserve qu'il réponde aux recommandations du fascicule de document X 07-015.

La reproduction de ce constat n'est autorisée que sous la forme d'un fac-similé photographique intégral. Ce document ne peut pas être utilisé en lieu et place d'un certificat d'étalonnage.



## CONSTAT DE VERIFICATION

**15-06-166-V**

**Dé livré à :** LAFARGE CIMENT DE MSILA  
USINE DE M'SILA  
HAMMAM DALAA  
ALGERIE

ORIGINAL

### Equipement vérifié :

**Type :** MALAXEUR A MORTIER  
**Constructeur :** E2ME  
**Référence :** 095R0010  
**Numéro de série :** 001  
**Identification :** -

### Condition de vérification :

**Lieu de vérification :** Site  
**Température ambiante :** 21.6 °C  
**Humidité ambiante :** 52.2%  
**Norme de référence :** NF EN 196-1:2006  
NF EN 196-3:2009  
**Observation :** -

### Equipements de mesure utilisés :

**Cuvoscope** Cuvoscope 4mm - n°X09146 - Certificat COFRAC n°15OME0505/05 du 13/05/2015  
**Pied à coulisse** Mitutoyo CD-15CPX - 150mm - 0.01mm - n°08468033 - Certificat COFRAC n°15OME0505/01 du 13/05/2015  
**Tachymètre** Tachymètre optique LUTRON DT6236C - n°S332089 raccordé à l'étalon de référence Tachymètre optique DT2234A - Certificat COFRAC n°08/189113/1 du 17/09/2014  
**Chronomètre** Chronomètre RS 278698 - n°E2/10224 raccordé à l'étalon de référence Chronomètre Quantum - Certificat COFRAC n°08/189114/1 du 19/09/2014  
**Cuvoscope** Cuvoscope 2mm - n°X09147 - Certificat COFRAC n°15OME0505/05 du 13/05/2015

### Conclusion **CONFORME**

Selon la norme NF EN 196-1:2006, les résultats des mesures notés dans le rapport de vérification d'étalonnage n°15-06-166-E sont déclarés CONFORMES suivants les écarts maximums tolérés, sans tenir compte de l'incertitude de mesure.  
Selon la norme NF EN 196-3:2009, les résultats des mesures notés dans le rapport de vérification d'étalonnage n°15-06-166-E sont déclarés CONFORMES suivants les écarts maximums tolérés, sans tenir compte de l'incertitude de mesure.

Résultats, incertitudes, moyens de mesures et conditions d'environnement suivant certificat d'étalonnage n°15-06-166-E.

**Date de vérification :** 14 Juin 2015  
**Vérification effectuée par :** J. MESSAGER  
**Date d'émission :** 15 Juin 2015

**Validité :** 1 an  
**Signature :**

E2ME sarl  
40 Bis rue Pierre Brossolette  
78500 Sartrouville - FRANCE  
Tél +33 (0)9 64 18 78 97 - info@e2me.fr  
RCS Versailles 510497027 Capital 26000€

Ce document est réalisé suivant les recommandations du fascicule de documentation X 07-011 définissant le constat de vérification, il peut être utilisé pour démontrer le raccordement du moyen de mesure aux étalons nationaux ou internationaux, sous réserve qu'il réponde aux recommandations du fascicule de document X 07-015.

La reproduction de ce constat n'est autorisée que sous la forme d'un fac-similé photographique intégral. Ce document ne peut pas être utilisé en lieu et place d'un certificat d'étalonnage.



## E2ME - Equipements et Maintenance de Machines d'Essais

40 bis rue Pierre Brossolette 78500 Sartrouville France

Tel : +33 (0)9 64 18 78 97 Fax : + 33 (0)1 30 99 59 55 Mail : info@e2me.fr

### CONSTAT DE VERIFICATION

**15-06-200-V**

Délivré à : LAFARGE CIMENT DE MSILA  
USINE DE M'SILA  
HAMMAM DALAA  
ALGERIE

ORIGINAL

#### Equipement vérifié :

Type : MOULE 4X4X16  
Constructeur : TONI TECHNIK  
Référence : -  
Numéro de série : 322  
Identification : -

#### Condition de vérification :

Lieu de vérification : Site  
Température ambiante : 21.6 °C  
Humidité ambiante : 52.2%  
Norme de référence : NF EN 196-1:2006  
Observation : -

#### Equipements de mesure utilisés :

Rugosimètre Rugosimètre TR100 - n°6110000005  
Série de poids Série de poids 1g à 5kg F1 - n°G1313938 - Certificat DKD n°G2-491 du 29/01/2013  
Jauge de profondeur Jauge de profondeur 150mm - n°8000S07 - Certificat COFRAC n°15OME0505/02 du 13/05/2015  
Pied à coulisse Mitutoyo CD-15CPX - 150mm - 0.01mm - n°08468033 - Certificat COFRAC n°15OME0505/01 du 13/05/2015  
Série de poids Série de poids 1g à 5kg F1 - n°G1313938 - Certificat DKD n°G2-491 du 29/01/2013  
Rugosimètre Rugosimètre TR100 - n°6110000005  
Duromètre Bloc de référence de dureté Rockwell - n°EP12143571 - Certificat UKAS n°197677 du 30/04/2012

#### Conclusion **CONFORME**

Selon la norme NF EN 196-1:2006, les résultats des mesures notés dans le rapport de vérification d'étalonnage n°15-06-200-E sont déclarés conformes suivants les écarts maximums tolérés, sans tenir compte de l'incertitude de mesure.

Résultats, incertitudes, moyens de mesures et conditions d'environnement suivant certificat d'étalonnage n°15-06-200-E.

Date de vérification : 13 Juin 2015

Validité : 1 an

Vérification effectuée par : J. MESSAGER

Signature :

Date d'émission : 14 Juin 2015

E2ME sarl  
40 Bis rue Pierre Brossolette  
78500 Sartrouville - FRANCE  
Tél +33 (0)9 64 18 78 97 - info@e2me.fr  
RCS Versailles 510497027 Capital 26000€

Ce document est réalisé suivant les recommandations du fascicule de documentation X 07-011 définissant le constat de vérification, il peut être utilisé pour démontrer le raccordement du moyen de mesure aux étalons nationaux ou internationaux, sous réserve qu'il réponde aux recommandations du fascicule de document X 07-015.

La reproduction de ce constat n'est autorisée que sous la forme d'un fac-similé photographique intégral. Ce document ne peut pas être utilisé en lieu et place d'un certificat d'étalonnage.



## E2ME - Equipements et Maintenance de Machines d'Essais

40 bis rue Pierre Brossolette 78500 Sartrouville France  
Tel : +33 (0)9 64 18 78 97 Fax : + 33 (0)1 30 99 59 55 Mail : info@e2me.fr

### CONSTAT DE VERIFICATION

15-06-188-V

Délivré à : LAFARGE CIMENT DE MSILA  
USINE DE M'SILA  
HAMMAM DALAA  
ALGERIE

ORIGINAL

#### Equipement vérifié :

Type : BALANCE 220G  
Constructeur : SARTORIUS  
Référence : CP224S  
Numéro de série : 15307857  
Identification : 835.G3001.000

#### Caractéristiques :

Portée maximum (g) : 220  
Portée minimum (g) : -  
Résolution : 0.0001

#### Condition de vérification :

Lieu de vérification : Site  
Température ambiante : 25 °C  
Humidité ambiante : 45%  
Norme de référence : FD P18-663:2005  
Observation : -

#### Equipements de mesure utilisés :

Série de poids Série de poids 1g à 5kg F1 - n°G1313938 - Certificat DKD n°G2-491 du 29/01/2013

#### Conclusion : CONFORME

Selon la norme FD P18-663:2005, les résultats des mesures notés dans le rapport de vérification d'étalonnage n°15-06-188-E sont déclarés conformes suivants les écarts maximums tolérés, sans tenir compte de l'incertitude de mesure.

Résultats, incertitudes, moyens de mesures et conditions d'environnement suivant certificat d'étalonnage n°15-06-188-E.

Date de vérification : 15 Juin 2015

Validité : 1 an

Vérification effectuée par : F. RANDE

Signature :

Date d'émission : 16 Juin 2015

E2ME sarl  
40 Bis rue Pierre Brossolette  
78500 Sartrouville - FRANCE  
Tél +33 (0)9 64 18 78 97 - info@e2me.fr  
RCS Versailles 510497027 Capital 26000€

Ce document est réalisé suivant les recommandations du fascicule de documentation X 07-011 définissant le constat de vérification, il peut être utilisé pour démontrer le raccordement du moyen de mesure aux étalons nationaux ou internationaux, sous réserve qu'il réponde aux recommandations du fascicule de document X 07-015.

La reproduction de ce constat n'est autorisée que sous la forme d'un fac-similé photographique intégral. Ce document ne peut pas être utilisé en lieu et place d'un certificat d'étalonnage.



## E2ME - Equipements et Maintenance de Machines d'Essais

40 bis rue Pierre Brossolette 78500 Sartrouville France  
Tel : +33 (0)9 64 18 78 97 Fax : + 33 (0)1 30 99 59 55 Mail : info@e2me.fr

### CONSTAT DE VERIFICATION

15-06-186-V

Délivré à : LAFARGE CIMENT DE MSILA  
USINE DE M'SILA  
HAMMAM DALAA  
ALGERIE

ORIGINAL

#### Equipement vérifié :

Type : **BALANCE 4200G**  
Constructeur : **SARTORIUS**  
Référence : **CP4201**  
Numéro de série : **15307873**  
Identification : -

#### Caractéristiques :

Portée maximum (g) : **4200**  
Portée minimum (g) : -  
Résolution : **0.1**

#### Condition de vérification :

Lieu de vérification : **Site**  
Température ambiante : **21 °C**  
Humidité ambiante : **54%**  
Norme de référence : **FD P18-663:2005**  
Observation : -

#### Equipements de mesure utilisés :

Série de poids Série de poids 1g à 5kg F1 - n°G1313938 - Certificat DKD n°G2-491 du 29/01/2013

#### Conclusion : **CONFORME**

Selon la norme FD P18-663:2005, les résultats des mesures notés dans le rapport de vérification d'étalonnage n°15-06-186-E sont déclarés conformes suivants les écarts maximums tolérés, sans tenir compte de l'incertitude de mesure.

Résultats, incertitudes, moyens de mesures et conditions d'environnement suivant certificat d'étalonnage n°15-06-186-E.

Date de vérification : **15 Juin 2015**

Validité : **1 an**

Vérification effectuée par : **F. RANDE**

Signature :

Date d'émission : **16 Juin 2015**

E2ME sarl  
40 Bis rue Pierre Brossolette  
78500 Sartrouville - FRANCE  
Tél +33 (0)9 64 18 78 97 - info@e2me.fr  
RCS Versailles 510497027 Capital 26000€

Ce document est réalisé suivant les recommandations du fascicule de documentation X 07-011 définissant le constat de vérification, il peut être utilisé pour démontrer le raccordement du moyen de mesure aux étalons nationaux ou internationaux, sous réserve qu'il réponde aux recommandations du fascicule de document X 07-015.

La reproduction de ce constat n'est autorisée que sous la forme d'un fac-similé photographique intégral. Ce document ne peut pas être utilisé en lieu et place d'un certificat d'étalonnage.



## E2ME - Equipements et Maintenance de Machines d'Essais

40 bis rue Pierre Brossolette 78500 Sartrouville France  
Tel : +33 (0)9 64 18 78 97 Fax : + 33 (0)1 30 99 59 55 Mail : info@e2me.fr

### CONSTAT DE VERIFICATION

15-06-163-V

Délivré à : LAFARGE CIMENT DE MSILA  
USINE DE M'SILA  
HAMMAM DALAA  
ALGERIE

ORIGINAL

#### Equipement vérifié :

Type : ENCEINTE CLIMATIQUE  
Constructeur : WEISS  
Référence : WK3-600/0  
Numéro de série : 58226126240010  
Identification : -

#### Condition de vérification :

Lieu de vérification : Site  
Température ambiante : 21.6 °C  
Humidité ambiante : 52.2%  
Norme de référence : NF EN 196-1:2006  
Observation : -

#### Equipements de mesure utilisés :

Capteur hygrométrie Testo 625 - n°02409091 + 02402987 - Certificat TESTO n°TH-3552 du 23/01/2014  
Capteur température Testo 625 - n°02409091 + 02402987 - Certificat TESTO n°TH-3552 du 23/01/2014

#### Conclusion CONFORME

Selon la norme NF EN 196-1:2006, les résultats des mesures notés dans le rapport de vérification d'étalonnage n°15-06-163-E sont déclarés conformes suivants les écarts maximums tolérés, sans tenir compte de l'incertitude de mesure.

Résultats, incertitudes, moyens de mesures et conditions d'environnement suivant certificat d'étalonnage n°15-06-163-E.

Date de vérification : 13 Juin 2015 Validité : 1 an  
Vérification effectuée par : J. MESSENGER Signature :  
Date d'émission : 14 Juin 2015

E2ME sarl  
40 Bis rue Pierre Brossolette  
78500 Sartrouville - FRANCE  
Tél +33 (0)9 64 18 78 97 - info@e2me.fr  
RCS Versailles 510497027 Capital 26000€

Ce document est réalisé suivant les recommandations du fascicule de documentation X 07-011 définissant le constat de vérification, il peut être utilisé pour démontrer le raccordement du moyen de mesure aux étalons nationaux ou internationaux, sous réserve qu'il réponde aux recommandations du fascicule de document X 07-015.

La reproduction de ce constat n'est autorisée que sous la forme d'un fac-similé photographique intégral. Ce document ne peut pas être utilisé en lieu et place d'un certificat d'étalonnage.



## E2ME - Equipements et Maintenance de Machines d'Essais

40 bis rue Pierre Brossolette 78500 Sartrouville France  
Tel : +33 (0)9 64 18 78 97 Fax : + 33 (0)1 30 99 59 55 Mail : info@e2me.fr

### CERTIFICAT D'ETALONNAGE

**15-06-180-E**

Délivré à : LAFARGE CIMENT DE MSILA  
USINE DE M'SILA  
HAMMAM DALAA  
ALGERIE

ORIGINAL

#### Equipement vérifié :

Type : CENTRALE DE CALORIMETRIE  
Constructeur : PERRIER  
Référence : S0705/L0071  
Numéro de série : 301002  
Identification : -  
Etendue : 100 °C  
Résolution : 0.1 °C

#### Condition de vérification :

Lieu de vérification : Site  
Température ambiante : 25 °C  
Humidité ambiante : 40 %  
Norme de référence : NF EN 196-9:2012  
Observation : -

#### Equipements de référence utilisés :

Capteur Chaîne de mesure de température HI935005/ Tc K - n°08282392 - Certificat COFRAC n°1T150266c du  
température 26/02/2015

#### Caractéristiques vérifiées :

Température de référence (°C)	Voie 1 (°C)	Voie 2 (°C)
27,20	26,75	26,35
33,10	31,15	32,16
42,50	40,76	41,16
52,40	50,37	51,47
65,10	63,76	64,85
85,10	83,91	84,80
91,50	89,89	90,98
-	-	-
-	-	-
-	-	-

Date de calibration : 15 Juin 2015

Calibration effectuée par : F. RANDE

Date d'émission : 16 Juin 2015

Validité : 1 an

Signature :

E2ME sarl  
40 Bis rue Pierre Brossolette  
78500 Sartrouville - FRANCE  
Tél +33 (0)9 64 18 78 97 - info@e2me.fr  
RCS Versailles 510497027 Capital 26000€

L'incertitude élargie (K=2) mentionnées correspondent respectivement aux incertitudes indiquées dans chacun des certificats de raccordement des équipements de référence utilisés.



## E2ME - Equipements et Maintenance de Machines d'Essais

40 bis rue Pierre Brossolette 78500 Sartrouville France

Tel : +33 (0)9 64 18 78 97 Fax : + 33 (0)1 30 99 59 55 Mail : info@e2me.fr

### CONSTAT DE VERIFICATION

**15-06-182-V**

**Délivré à :** LAFARGE CIMENT DE MSILA  
USINE DE M'SILA  
HAMMAM DALAA  
ALGERIE

ORIGINAL

#### Equipement vérifié :

Type : VICAT MANUEL

Constructeur : BERATEST

Référence : E055N

Numéro de série : E055NZH/0223

Identification : -

#### Condition de vérification :

Lieu de vérification : Site

Température ambiante : 21.6 °C

Humidité ambiante : 52.2%

Norme de référence : NF EN 196-3:2009

Observation : -

#### Equipements de mesure utilisés :

Série de poids Série de poids 1g à 5kg F1 - n°G1313938 - Certificat DKD n°G2-491 du 29/01/2013

Pied à coulisse Mitutoyo CD-15CPX - 150mm - 0.01mm - n°08468033 - Certificat COFRAC n°15OME0505/01 du 13/05/2015

Capteur température Testo 625 - n°02409091 + 02402987 - Certificat TESTO n°TH-3552 du 23/01/2014

Pied à coulisse Mitutoyo CD-15CPX - 150mm - 0.01mm - n°08468033 - Certificat COFRAC n°15OME0505/01 du 13/05/2015

Série de poids Série de poids 1g à 5kg F1 - n°G1313938 - Certificat DKD n°G2-491 du 29/01/2013

Capteur température Chaîne de mesure de température HI935005/ Tc K - n°08282392 - Certificat COFRAC n°1T150266c du 26/02/2015

#### Conclusion **CONFORME**

Selon la norme NF EN 196-3:2009, les résultats des mesures notés dans le rapport de vérification d'étalonnage n°15-06-182-E sont déclarés conformes suivants les écarts maximums tolérés, sans tenir compte de l'incertitude de mesure.

Résultats, incertitudes, moyens de mesures et conditions d'environnement suivant certificat d'étalonnage n°15-06-182-E.

Date de vérification : 14 Juin 2015

Validité : 1 an

Vérification effectuée par : J. MESSEGER

Signature :

Date d'émission : 15 Juin 2015

E2ME sarl  
40 Bis rue Pierre Brossolette  
78500 Sartrouville - FRANCE  
Tél +33 (0)9 64 18 78 97 - info@e2me.fr  
RCS Versailles 510497027 Capital 26000€

Ce document est réalisé suivant les recommandations du fascicule de documentation X 07-011 définissant le constat de vérification, il peut être utilisé pour démontrer le raccordement du moyen de mesure aux étalons nationaux ou internationaux, sous réserve qu'il réponde aux recommandations du fascicule de document X 07-015.

La reproduction de ce constat n'est autorisée que sous la forme d'un fac-similé photographique intégral. Ce document ne peut pas être utilisé en lieu et place d'un certificat d'étalonnage.



# Société Nouvelle du Littoral

Siège Social & Usine : Z.A. – BP 9 – 11370 LEUCATE (France)

Tél. : 33 (0) 4 68 40 14 05 – Fax : 33 (0) 4 68 40 92 72

Internet : [www.s-n-l.fr](http://www.s-n-l.fr) - e.mail : [contact@s-n-l.fr](mailto:contact@s-n-l.fr) • [s.n.l@wanadoo.fr](mailto:s.n.l@wanadoo.fr)

SABLE NORMALISE CEN  
CERTIFIE CONFORME –  
EN 196.1 par l'AFNOR et conforme ISO 679

**SABLE NORMALISE CEN CERTIFIE  
CONFORME EN 196-1  
SABLE NORMALISE ISO  
CONFORME ISO 679**

Contrôlé par le Laboratoire d'Essais des Matériaux  
de la Ville de Paris (L.E.M.V.P.)  
4 Avenue du Colonel Henri Rol-Tanguy  
75014 PARIS

**Méthodes d'essais des ciments**  
Sable pour mesure des résistances mécaniques

## 1- CARACTERISTIQUES

Le sable normalisé CEN (sable normalisé ISO) est un sable naturel, siliceux notamment dans ses fractions les plus fines. Il est propre, les grains sont de forme généralement isométrique et arrondi. Il est séché, criblé et préparé dans un atelier moderne offrant toutes garanties de qualité et de régularité.

Le sable est conditionné en sachets de polyéthylène contenant chacun  $1\ 350 \pm 5$  g.

Les livraisons se font à l'unité carton de 16 sachets pesant 21.6 kg et sur palette de 2 à 54 cartons, protégés par une housse en polyéthylène (transport routier) ou en carton renforcé (transport maritime).

## 2- CONTROLES

La composition granulométrique déterminée par tamisage est conforme aux exigences des normes EN 196-1 (§ 5) et ISO 679 : 2009 (§ 5).

Tamis ouverture des mailles (mm)	Refus cumulés (%)
0.08	$99 \pm 1$
0.16	$87 \pm 5$
0.50	$67 \pm 5$
1.00	$33 \pm 5$
1.60	$7 \pm 5$
2.00	0

Ces analyses sont complétées par des contrôles de masse des sachets, des mesures du taux d'humidité et des contrôles de résistances mécaniques, selon les exigences des normes EN 196-1 (§ 11) et ISO 679 : 2009 (§ 11).

## 3- CONFORMITE

La conformité à la norme est contrôlée par le L.E.M.V.P. (Laboratoire d'Essais des Matériaux de la Ville de Paris), 4 Avenue du Colonel Henri Rol-Tanguy - 75014 PARIS

Le certificat de conformité à la norme Européenne est délivré par l'AFNOR (Association Française de Normalisation), 11 Rue Francis de Pressensé – 93571 La Plaine Saint Denis Cédex.

MAJ : 1 - 05/11



S.N.L. fondée en 1910 – SAS capital 250 000 € - NIF FR 93 976 750 257 – SIRET 976 750 257 00025 APE 0812Z  
Certifiée pour la PREPARATION DU SABLE NORMALISE CEN POUR LA DETERMINATION DES RESISTANCES MECANIQUES DES CIMENTS

