

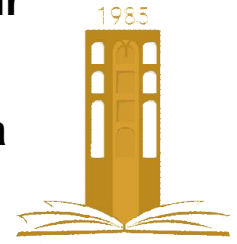


جامعة محمد بوضياف - المسيلة  
Université Mohamed Boudiaf - M'sila

Ministère de l'Enseignement Supérieur  
et de la Recherche Scientifique

Université Mohamed Boudiaf - M'sila

Faculté de Technologie



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

Département de GENIE CIVIL

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de  
MASTER

FILIERE : Génie Civil

SPECIALITE : Matériaux

THEME

***INFLUENCE DE L'AJOUT DU LAITIER SUR  
LES CARACTERISTIQUES PHYSICO-  
CHIMIQUES ET MECANIQUES DU CIMENT  
PORTLAND AU LAITIER (CEM II) ET  
CIMENT DE HAUT FOURNEAU ( CEM III )***

Dirigé par :

Mr. Miloud Beddar

Mr. Abdelaziz Meddah

Présenté par :

Mohamed Boubakri

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 **Professeur : Beddar Miloud** et **Dr : Medah.Abdaziz** , qui ont encadré ce travail, pour leur disponibilité, pour leur écoute, pour leur grandes qualités pédagogiques, ainsi que pour leur rigueur scientifique, qu'il ont su me communiquer pour mener au mieux ce travail de recherche. je tiens à exprimer ma profonde gratitude.

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 Azzaz Yacine Responsable Contrôle Qualité de la cimenterie Lafargeholcim M'sila .

Monsieur Baiteche Ahmed Responsable Assurance Qualité de la cimenterie Lafargeholcim M'sila

Monsieur Dr : Rebhi Mohamed professeur université Zaine Achour Djalfa.

Monsieur Dr : Touhami Mohamed professeur université Ahmed ben bella Oran.

Tous les personnes du laboratoire d'usine lafargeholcim 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

Résumé

Abstract

Introduction.....	1
Contexte générale de l'étude .....	1
Laitier granulé de haut fourneau.....	2
Objectifs de l'étude.....	2
Méthodologie du travail.....	3

## Chapitre I Le ciment et les ajouts minéraux

### 1ère partie le ciment

<b>I-1 Introduction.....</b>	<b>4</b>
<b>I-2 Principe de fabrication ciment Portland.....</b>	<b>5</b>
I-2-1 Fabrication par voie humide.....	6
I-2-2 Fabrication par Voie sèche.....	7
<b>I-3 Constituants principaux du ciment et les additions.....</b>	<b>9</b>
I-3-1 Constituants du clinker.....	9
I-3-1-1 Préparation de la matière première.....	9
I-3-1-2 Broyabilité du clinker.....	10
I-3-1-3 Qualité du clinker.....	10
I-3-2 Le Sulfate de Calcium ( Le gypse - $\text{CaSO}_4$ ).....	11
I-3-3 Le Calcaire .....	11
I-3-3-1 Action du calcaire.....	12
<b>I-4 Principales Catégories de Ciments.....</b>	<b>12</b>
<b>I-5 Les Constituants anhydres du ciment (CPA) .....</b>	<b>13</b>
I-5-1 Composition chimique.....	13
I-5-2 Performance des ciments .....	13
I-5-3 Composition minéralogique .....	14
I-5-3-1 Le silicate tricalcique ( Alite ) $\text{C}_3\text{S}$ .....	14
I-5-3-2 Le silicate bicalcique (belite) $\text{C}_2\text{S}$ .....	14
I-5-3-3 Les aluminates tricalciques ( $\text{C}_3\text{A}$ ).....	15
I-5-3-4 L'alumino -ferrite tétracalcique.....	15
I-5-3-5 La chaux $\text{CaO}$ libre.....	15
I-5-4 Composition potentielle du ciment (équation de bogue).....	16
I-5-5 Composition chimique des minéraux.....	16
<b>I-6 Hydratation du ciment Portland.....</b>	<b>17</b>
I-6-1 Introduction.....	17
I-6-2 Hydratation des composants du ciment Portland.....	17
I-6-2-1 Hydratation du silicate tricalcique $\text{C}_3\text{S}$ .....	18
I-6-2-2 Hydratation du silicate bi calcique $\text{C}_2\text{S}$ .....	19
I-6-2-3 Hydratation de l'aluminate tricalcique $\text{C}_3\text{A}$ .....	19
I-6-2-4 Hydratation de l'aluminoferrite tétracalcique $\text{C}_4\text{AF}$ .....	20
I-6-2-5 Conclusion.....	20
<b>I-7 Les caractéristiques du ciment Portland.....</b>	<b>20</b>
I-7-1 La prise ( NA230 NF EN 196-3).....	20

I-7-2 Le durcissement .....	23
I-7-3 La Finesse de Mouture (finesse de Blaine - NA231 NF EN196-6).....	25
I-7-4 Le Retrait ( NA440 NF P15 433 ) .....	27
I-7-5 Chaleur d'hydratation (EN196-9 NF P15-436 ).....	28
I-7-6 Résistance à la compression ( NA 234 EN 196-1).....	29

## **2ème partie : Les ajouts minéraux**

<b>I-8 Généralités</b> .....	30
I-8-1 Avantages techniques .....	30
I-8-2 Avantages économiques .....	30
I-8-3 Avantages écologiques .....	30
<b>I-9 Classification des ajouts minéraux</b> .....	31
I-9-1 Les ajouts minéraux actifs .....	31
I-9-1-1 La pouzzolane .....	31
I-9-1-2 Fumée de silice .....	33
I-9-1-3 Le laitier de haut fourneau .....	34
I-9-1-4 Les cendres volantes .....	36
I-9-2 Principaux ajouts minéraux inertes .....	37
I-9-2-1 La poussière .....	37
I-9-2-2 Fillers calcaires .....	37

## **Chapitre II Le laitier et les ciments au laitier**

<b>II-1 Définition</b> .....	39
<b>II-2 Caractéristiques du laitier</b> .....	39
<b>II-3 Les différentes formes de laitiers</b> .....	40
II-3-1 Laitier rocheux (ou cristallisé).....	40
II-3-2 Laitier bouleté .....	40
II-3-3 Laitier expansive.....	41
II-3-4 Laine de laitier et laine de roche.....	41
II-3-5 Laitier granule.....	41
II-3-5-1 Fabrication.....	41
a) Granulation.....	41
b) Filtration .....	42
II-3-5-2 Description du produit .....	44
<b>II-4 Emploi du laitier vitrifié en cimenterie</b> .....	45
II-4-1 Ciment au laitier.....	45
II-4-2 Qualités demandées au laitier destiné à la cimenterie.....	45
II-4-3 Caractéristiques et domaines d'emploi.....	46
II-4-3-1 Évolution de la résistance dans le temps.....	46
II-4-3-2 Effet de la chaleur d'hydratation.....	46
II-4-3-3 Résistance aux agressions chimiques.....	47
<b>II-5 Prise hydraulique du laitier vitreux</b> .....	47
<b>II-6 Méthodes d'activation du ciment au laitier</b> .....	48
II-6-1 Activation calcique.....	48
II-6-2 Activation par le clinker du ciment Portland.....	48
II-6-3 L'activation sulfatique .....	48
II-6-4 L'activation alcaline.....	49

II-6-4-1 L'activation par les alcalis caustiques (la soude).....	49
II-6-4-2 L'activation par les sels non siliceux (carbonate de sodium).....	49
II-6-4-3 L'activation par les sels siliceux (verre soluble).....	49
II-6-5 L'activation mixte (sodo-sulfatique) .....	50
<b>II-7 Comportement mécanique des ciments au laitier .....</b>	<b>50</b>
II-7-1 Influence de la composition chimique.....	50
II-7-1-1 Le module de basicité.....	51
II-7-1-2 Le module d'activité.....	51
II-7-2 Influence de la porosité de la pâte du ciment.....	52
II-7-3 Influence de la finesse de mouture (surface spécifique) .....	53
II-7-4 Influence de la concentration de l'activant.....	53
II-7-5 Influence de la température de cure .....	53
<b>II-8 Conclusion.....</b>	<b>54</b>
<b>CHAPITRE III EXPERIMENTATION</b>	
<b>III-1 INRODUCTION.....</b>	<b>55</b>
III-1-1 Caractéristiques des matériaux utilise. ....	55
III-1-1-1 Le ciment avec ajout Laitier.....	55
III-1-1-2 Mélange Laitier .....	55
III-1-1-3 Composition chimique de laitier.....	55
III-1-1-4 Composition minéralogique de laitier .....	55
III-1-2 Le clinker .....	56
III-1-2-1 Composition chimique du clinker .....	57
III-1-2-2 Composition minéralogique du clinker .....	57
III-1-2-2-1 Modules caractéristiques du clinker.....	58
III-1-3 Le gypse.....	58
III-1-3-1 Composition chimique.....	58
III-1-3-2 Composition minéralogique.....	59
<b>III-2 PROCEDE DE PREPARATION DES DIFFERENT CIMENT.....</b>	<b>59</b>
III-2-1 Composition pondérale des différents ciments.....	59
III-2-2 Analyses chimiques des différents ciments préparés.....	65
III-2-3 Analyses minéralogiques des différents ciments préparés par diffraction aux rayons x ( Diffractomètre D8-BRUCKER D.R.X ).....	67
III-2-3-1 Principe de la method .....	67
III-2-3-2 Application de la method .....	67
<b>III-3 L'EAU DE GACHAGE.....</b>	<b>76</b>
<b>III-4 LES GRALNULATS FINS ( SABLE DE DUNE ).....</b>	<b>77</b>
III-4-1 Caractéristique physique du sable.....	77
III-4-1-1 Masse volumique absolue .....	77
III-4-1-2 Masse volumique apparent.....	78
III-4-1-3 Equivalent de sable ( Norme NF P18-598) .....	78
III-4-1-4 Essai au bleu de méthylène.....	80
III-4-1-5 Foisonnement .....	80
III-4-1-6 La porosité.....	81
III-4-1-7 Analyse granulométrique .....	81
III-4-2 Analyse chimique .....	83
<b>III-5 METHODES D'ESSAIS.....</b>	<b>83</b>
III-5-1 Essai sur ciment anhydre.....	83

III-5-1-1 Masse volumique absolue .....	83
III-5-1-2 Mesure de la finesse du ciment ( Norme NF P 15-442 -EN-196-6).....	84
III-5-1-3 Analyse granulométrique .....	86
III-5-1-4 Analyse granulométrique ( Méthode alpine ) .....	88
III-5-2 Essais sur ciment hydraté ( pâtes de ciment ).....	90
III-5-2-1 Essai De Consistance ( Norme EN 196-3 ).....	90
III-5-2-2 ESSAI DE PRISE .....	92
III-5-2-3 Essai de stabilité .....	93
III-5-3 Essai sur mortier .....	95
III-5-3-1 Mortier normalise.....	95
III-5-3-2 Préparation des éprouvettes et déroulement des essais mécaniques.....	95
III-5-3-3 Mesure du Retrait sur éprouvette de mortier normal.....	98
III-5-3-4 Ouvrabilité.....	100
III.5-3-5 La chaleur d'hydratation ( La méthode semi-adiabatique ).....	102
1-Principe .....	102
2-Appareillage.....	105
3-Détermination de la chaleur d'hydratation .....	105
3-1 Laboratoire.....	105
3-2 Mode opératoire.....	105
3-2-1 Composition du mortier .....	106
3-2-2 Malaxage .....	106
3-2-3 Mise en place de l'échantillon d'essai .....	106
3-3 Mesure de l'échauffement .....	106
3-4 Chaleur d'hydratation.....	107
3-5 Evolution de l'hydratation.....	107
III-5-4 Détermination de la rhéologie du mortier et béton .....	109
III-5-4-1 Essai micro béton équivalent M.B.E .....	109
III-5-4-1-1 Objectif d'essai M.B.E.....	109
A-Matériels .....	110
B-Mode opératoire .....	110
C-Les états d'écoulement et d'étalement d' MBE .....	112
III-5-4-1-2 Formulation MBE Ciments prepares.....	112

## **Chapitre IV Résultats et Interpretation**

<b>IV-1 Introduction .....</b>	<b>113</b>
<b>IV-2 Facteurs de Qualité du Clinker .....</b>	<b>113</b>
IV-2-1 Broyabilité du clinker .....	113
IV-2-2 Qualité du linker.....	113
IV-2-3 Résistance au choc Clinker ( Essai Los Angeles ) .....	113
<b>IV-3 Influence du Taux d'ajout laitier Sur le Poids Spécifique du Ciment .....</b>	<b>115</b>
<b>IV-4 Influence du Taux d'ajout laitier Sur la Surface Spécifique du Ciment .....</b>	<b>116</b>
<b>IV-5 Influence du Taux d'ajout laitier Sur la Pâte de Ciment .....</b>	<b>117</b>
IV-5-1 Influence du taux d'ajout laitier Sur la Consistance Normale .....	117
IV-5-2 Influence du Taux d'ajout laitier sur le Temps de Prise.....	118
IV-5-3 Influence du Taux d'ajout laitier Sur la Stabilité du Ciment .....	119
IV-5-4 Influence du Taux d'ajout laitier sur les Teneurs en Oxydes .....	120
IV-5-5 Influence du Taux d'ajout laitier sur les Analyses minéralogiques des différents ciments	

prepares.....	122
<b>IV-6 Influence du Taux d'ajout laitier Sur Le Mortier à base de sable Normalisé .....</b>	<b>125</b>
IV-6-1 Résistance à la flexion et Compression.....	125
<b>IV-7 Effet du Taux d'ajout laitier (effet chimique) Sur Le Retrait et Le Gonflement .....</b>	<b>127</b>
<b>IV-8 Effet du Taux d'ajout laitier Sur Le Mortier ( La Maniabilité ) .....</b>	<b>129</b>
<b>IV-9 Effet du Taux d'ajout Laitier (effet chimique) Sur La Chaleur d'hydratation.....</b>	<b>130</b>
IV-9-1 Effet du Chaleur d'hydratation Sur le Temps de Prise .....	132
IV-9-1-1 Début de prise Vs Chaleur d'hydratation .....	132
IV-9-1-2 Fin de prise Vs Chaleur d'hydratation.....	132
<b>IV-10 Analyse Granulométrique.....</b>	<b>133</b>
IV-10-1 Granulométrie à Laser .....	133
IV-10-2 Granulométrie à Méthode Alpine.....	136
IV-10-3 Comparaison .....	137
IV-10-4 La Relation entre la surface spécifique et les analyses granulométriques .....	138
<b>IV-11 Influence du Taux d'ajout Laitier dans le Ciment Sur Le Béton à base de Matériaux Locaux .....</b>	<b>138</b>
IV-11-1 Résultats des Essais Sur Béton Frai .....	138
IV-11-1-1 l'affaissement .....	138
<b>IV-12 Influence du Taux d'ajout Laitier dans le Ciment Sur La Résistance à la Compression de Béton à base de Matériaux Locaux .....</b>	<b>140</b>
<b>IV-13 La rhéologie du mortier et béton (écoulement – étalement) .....</b>	<b>141</b>
IV-13-1 Influence du Taux d'ajout Laitier dans le Ciment Sur Le micro Béton à base de Matériaux Locaux (sable) .....	141
IV-13-1-1 l'écoulement – l'étalement .....	141
IV-13-1-2 La Relation entre E/C ciment et E/C MBE et l'écoulement et l'étalement du micro béton frai .....	143
IV -13-1-3 La relation entre E/C ciment avec E/C M.B.E .....	144

## **Chapitre V La durabilité du Mortier**

<b>V-1 Introduction .....</b>	<b>146</b>
<b>V-2 Durabilité des mortiers par la maîtrise de l'absorption d'eau.....</b>	<b>146</b>
V-2-1 La détermination du coefficient d'absorption capillaire d'eau.....	146
V-2-2 Effet du Taux d'ajout Laitier Sur la porosité (absorption capillaire d'eau) .....	150
V-2-2-1 Le rapport eau/ciment et son influence sur la porosité .....	151
V-2-2-2 Influence de la porosité de la pâte du ciment .....	152
<b>V-3 Attaque des mortiers par les acides .....</b>	<b>152</b>
V-3-1 Processus expérimental .....	152
V-3-2 Observations visuelles des mortiers attaques par l'acide sulfurique ( H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ) .....	153
V-3-3 Influence de la durée de cure ( 21jours d'immersion dans H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ) sur la perte de masse des mortier .....	154
<b>V-4 Conclusion .....</b>	<b>156</b>
<b>Conclusion Générale .....</b>	<b>157</b>
<b>Bibliographie .....</b>	<b>161</b>
<b>Annexe .....</b>	<b>165</b>

## **INDEX DES TABLEAUX ET FIGURES**

### **1- Index des Tableaux :**

N <sup>o</sup> Tableau	Intitulé	N <sup>o</sup> Page
	<b>CHAPITRE I</b>	
Tableau 1-1	Principales catégories de ciment	12
Tableau 1-2	Composition chimique du clinker	13
Tableau 1-3	Composition potentielle d'après les formules Empiriques de BOGUE	16
Tableau 1-4	Compositions minéralogiques moyennes des clinkers	16
Tableau 1-5	Microstructure élémentaire des quatre minéraux	17
Tableau 1-6	Le Comportement et le dégagement de chaleur des constituants du clinker	28
Tableau 1-7	Composition chimique type de certaines fumées de silice	33
Tableau 1-8	Composition chimique type de laitiers de haut fourneau	35
Tableau 1-9	Composition chimique type de certaines cendres volantes	36
<b>CHAPITRE II</b>		
Tableau 2-1	Variation de la composition chimique du laitier	39

<b>CHAPITRE III</b>		
Tableau 3-1	Composition chimique de laitier	55
Tableau 3-2	Composition minéralogique de laitier	56
Tableau 3-3	Principaux constituants du cru de clinker	56
Tableau 3-4	Principaux constituants chimique du clinker ( Lafargeholcim M'sila )	57
Tableau 3-5	Principaux constituants minéralogiques du clinker ( Lafargeholcim M'sila )	57
Tableau 3-6	Modules caractéristiques du clinker	58
Tableau 3-7	Composition chimique du gypse	58
Tableau 3-8	Composition minéralogique du gypse ( Lafargeholcim M'sila )	59
Tableau 3-9	Compositions pondérales des quatorze ( 14 ) ciments préparés	65
Tableau 3-10	Composition chimique des ciments préparés	66
Tableau 3-11	Composition chimique des ciments préparés	68
Tableau 3-12	Caractéristiques physiques du sable de dune	77
Tableau 3-13	Valeurs préconisées pour l'équivalent de sable par DREUX	80
Tableau 3-14	Dimension nominal des tamis	81
Tableau 3-15	Composition chimique du sable de dune	83
Tableau 3-16	Masse volumique absolue des ciments	84
Tableau 3-17	SSB de défèrent ciment préparé	86
Tableau 3-18	Caractéristiques de la granulométrie ( Refus 32 & 45 µm ) des différents ciments	90
Tableau 3-19	Composition des mortiers	95
Tableau 3-20	Classification de Maniabilimètre	101
Tableau 3-21	États d'écoulement et d'étalement d' MBE	111

Tableau 3-22	Formulation MBE Ciments préparés	112
--------------	----------------------------------	-----

<b>CHAPITRE IV</b>		
Tableau 4-1	Coefficient de Broyabilité.	113
Tableau 4-2	Coefficient de saturation en chaux du clinker.	113
Tableau 4-3	Analyse de granulats clinker	115
Tableau 4-4	Poids spécifique des ciments préparés.	115
Tableau 4-5	Surface spécifique des ciments préparés.	116
Tableau 4-6	Propriétés physiques des ciments préparés (consistance normale).	118
Tableau 4-7	Propriétés physiques des ciments préparés ( Temps de Prise ).	119
Tableau 4-8	Propriétés physiques des ciments préparés ( Expansion de Chatelier ).	120
Tableau 4-9	Influence du taux d'ajout laitier sur les Teneurs en Oxydes	121
Tableau 4-10	Influence du taux d'ajout laitier sur les Composition minéralogique des ciments préparés (DRX).	123
Tableau 4-11	Evolution des Résistances à la Compression du Mortier en fonction du taux d'ajout laitier ( avec sable normalisé ).	125
Tableau 4-12	Retrait du Mortier normal en fonction du taux d'ajout (laitier).	127
Tableau 4-13	Gonflement du mortier normal en fonction du taux d'ajout ( laitier ).	128
Tableau 4-14	La Maniabilité de Mortier	129
Tableau 4-15	La chaleur d'hydratation de mortier normal en fonction du taux d'ajout laitier	130
Tableau 4-16	Chaleur d'hydratation en fonction du temps de prise	132
Tableau 4-17	Début de prise en fonction du chaleur d'hydratation	132
Tableau 4-18	Caractéristiques de la granulométrie a laser des différents ciments	134
Tableau 4-19	Analyse granulométrique de ciment préparé (ALPINE).	136
Tableau 4-20	Comparaison (CEM-10 ( 65% laitier ) & cimentCHF& Ciment CRS de M'sila	137
Tableau 4-21	L'affaissement de béton frais	139
Tableau 4-22	Classification de Maniabilimètre	139
Tableau 4-23	Evolution des résistances à la compression du béton en fonction du taux d'ajout laitier dans le ciment.	140
Tableau 4-24	Résultats d'écoulement et d'étalement du micro béton en fonction du taux d'ajout laitier dans le ciment.	142
Tableau 4-25	résultats d'écoulement et d'étalement du micro béton en fonction du taux d'ajout laitier et E/C ciment et E/C micro-béton.	143
Tableau 4-26	résultats E/C ciment et E/C du micro béton en fonction du taux d'ajout laitier dans le ciment.	144

<b>CHAPITRE V</b>		
Tableau 5-1	Absorption d'eau des mortiers préparés en (g)	148
Tableau 5-2	Les Coefficients d'absorption d'eau (%)	148
Tableau 5-3	Variation de la perte de masse des mortiers immergées dans la solution acide sulfurique pendant 21 jours des différents mortiers	154

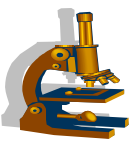
## 2- Index des Figures :

N° Figure	Intitulé	N° Page
	CHAPITRE I	
Figure 1-1	Fabrication du ciment	5
Figure 1-2	Le schéma de la fabrication du ciment	6
Figure 1-3	Fabrication du ciment par voie sèche	9
Figure 1-4	Microphotographie d'un clinker	10
Figure 1-5	Fractographie de granules de clinker industriel broyé	10
Figure 1-6	Image de clinker en microscope optique (section polie) C-S-H fibreux avec Cristal de Portlandite (X) entre des C-S-H (#),	15
Figure 1-7	La porosité est repérée par (O)	18
Figure 1-8	Microscopie Electronique à Balayage, ettringite aciculaire (aiguille) dans un béton	19
Figure 1-9	Détermination du temps de début de prise	21
Figure 1-10	Détermination du temps de fin de prise	21
Figure 1-11	Evolution du temps de prise en fonction de la température	22
Figure 1-12	Influence de la température sur la prise des ciments	22
Figure 1-13	Influence du E/C sur le temps de prise	23
Figure 1-14	Le développement des résistances dans le temps des constituants purs du CPA	24
Figure 1-15	L'évolution physico-chimique de la pâte de ciment	25
Figure 1-16	Influence de la surface spécifique sur la résistance à la compression	26
Figure 1-17	Principe de fonctionnement de Perméabilimètre de Blaine	26
Figure 1-18	Influence du E/C sur le retrait plastique des mortier	27
Figure 1-19	Chaleur dégagée lors de l'hydratation du CPA	29
Figure 1-20	Résistance du mortier normal	29
Figure 1-21	Laitier haut fourneau chloré ( cimentrie M'sila )	35
	<b>CHAPITRE II</b>	
Figure 2-1	Situation du laitier de haut fourneau dans le système	40
Figure 2-2	Pot de granulation	42
Figure 2-3	Granulation en rigole et fond filtrant	43
Figure 2-4	Tambour INBA [Coupe]	43
Figure 2-5	Évolution de la résistance à la compression Rc de deux ciments en fonction du temps	46
Figure 2-6	Élévation de la température au moment de la prise du ciment (d'après Lesage)	47
	<b>CHAPITRE III</b>	
Figure 3-1	Composition minéralogique de laitier ( Lafargeholcim M'sila )	56
Figure 3-2	Clinker four ( Lafargeholcim M'sila )	57
Figure 3-3	Composition minéralogique du clinker ( Lafargeholcim M'sila )	58
Figure 3-4	Composition minéralogique du gypse ( Lafargeholcim M'sila )	59
Figure 3-5	Concasseurs à mâchoires vu de profil	62

Figure 3-6	Broyeur à anneaux ( partie broyante )	62
Figure 3-7	Pycnomètre	63
Figure 3-8	Blainemètre semi-automatique	63
Figure 3-9	Broyeur à boulets BB10	64
Figure 3-10	DRX BRUKER D4 ENDEAVOR ( Lafargeholcim laboratoire )	69
Figure 3-11	Composition minéralogique du CEM 01 ( 0 % laitier )	69
Figure 3-12	Composition minéralogique du CEM 02 ( 6% laitier )	70
Figure 3-13	Composition minéralogique du CEM 03 ( 10% laitier )	70
Figure 3-14	Composition minéralogique du CEM 04 ( 20% laitier )	71
Figure 3-15	Composition minéralogique du CEM 05 ( 25% laitier )	71
Figure 3-16	Composition minéralogique du CEM 06 ( 30% laitier )	72
Figure 3-17	Composition minéralogique du CEM 07 ( 35% laitier )	72
Figure 3-18	Composition minéralogique du CEM 08 ( 40% laitier )	73
Figure 3-19	Composition minéralogique du CEM 09 ( 50% laitier )	73
Figure 3-20	Composition minéralogique du CEM 10 ( 65% laitier )	74
Figure 3-21	Composition minéralogique du CEM 11 ( 70% laitier )	74
Figure 3-22	Composition minéralogique du CEM 12 ( 80% laitier )	75
Figure 3-23	Composition minéralogique du CEM 13 ( 85% laitier )	75
Figure 3-24	Composition minéralogique du CEM 14 ( 90% laitier )	76
Figure 3-25	Distillateur (Lafarge laboratoire)	76
Figure 3-26	L'équivalent de sable	79
Figure 3-27	Foisonnement des déferents sables en fonction de l'humidité	81
Figure 3-28	la porosité.	81
Figure 3-29	Courbe granulométriques dans différent cas	82
Figure 3-30	Tamiseuse électrique( laboratoire Lafargeholcim M'sila )	82
Figure 3-31	Le Chatelier flask	85
Figure 3-32	Perméabilimètre de Blaine	86
Figure 3-33	GRANULOMETRE A LASER DE TYPE MASTERSIZ	87
Figure 3-34	Tamiseuse Alpine ( Laboratoire de Lafargeholcim M'sila ) .	88
Figure 3-35	Appareil de Vicat ( Consistance % E/C)	91
Figure 3-36	Appareil de vicat ( mesure de temps de prise DP& FP )	92
Figure 3-37	les Aiguillé de chatelier	94
Figure 3-38	les Aiguillé et bain marie de chatelier	94
Figure 3-39	Malaxeur semi-automatique de mortier (Laboratoire de Lafargeholcim M'sila)	96
Figure 3-40	Eprouvette Prismatique (4x4x16) cm <sup>3</sup> (Laboratoire de Lafargeholcim M'sila)	96
Figure 3-41	Table Vibrante ( Laboratoire de Lafarge M'sila )	96
Figure 3-42	Table à Choc (Laboratoire de Lafarge M'sila)	96
Figure 3-43	La Chambre d'humidité (Laboratoire de Lafarge M'sila)	97
Figure 3-44	Bains d'eau ( laboratoire de Lafargeholcim M'sila )	97
Figure 3-45	Machine de Compression ( Laboratoire de Lafarge M'sila )	98

Figure 3-46	Moules ( 4x4x16) cm <sup>3</sup> Équipés de plots de Retrait	99
Figure 3-47	Comparateur de Retrait ( Laboratoire de Lafargeholcim M'sila )	99
Figure 3-48	L'ouvrabilité	100
Figure 3-49	Maniabilimètre à mortier ( Laboratoire de Lafargeholcim M'sila)	101
Figure 3-50	Malaxeur semi-automatique de mortier	105
Figure 3-51	Calorimètre sable normalisé ( chaleur )	107
Figure 3-52	dégagement de chaleur lors de l'hydratation du ciment en fonction du temps	108
Figure 3-53	Equipement pour mesuré la rhéologie des ciments MBE (écoulement et étalement)	111
<b>CHAPITRE IV</b>		
Figure 4-1	Appareil pour Essai Los Angeles.	115
Figure 4-2	Variation du poids spécifique de ciment en fonction de taux d'ajout (laitier).	116
Figure 4-3	Variation de la surface spécifique de ciment en fonction de taux d'ajout ( laitier)	117
Figure 4-4	Variation du Rapport E/C en fonction du taux d'ajout ( laitier ) .	118
Figure 4-5	Variation des Temps de prises en fonction de taux d'ajout ( laitier ) .	119
Figure 4-6	Effet du taux d'ajout laitier sur l'expansion du ciment.	120
Figure 4-7	Variation de la teneur des oxydes (Al <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ,SiO <sub>2</sub> ,MgO,SO <sub>3</sub> ) en fonction du taux d'ajout de laitier	121
Figure 4-8	Variation de la teneur des oxydes ( CaO,Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) en fonction du taux d'ajout de laitier	122
Figure 4-9	Variation de la teneur des oxydes ( perte au feu ) en fonction du taux d'ajout de laitier	122
Figure 4-10	Influence du taux d'ajout laitier sur les Composition minéralogique (Alite – BFS amorphous) des ciments préparés (DRX).	124
Figure 4-11	Influence du taux d'ajout laitier sur les Composition minéralogique ( Belite-Alum-Ferrite ) des ciments préparés ( DRX ) .	124
Figure 4-12	Effet du Taux d'ajout laitier sur la Résistance à la Compression	126
Figure 4-13	Effet du Taux d'ajout laitier sur la Résistance à la Flexion	126
Figure 4-14	Evolution du Retrait du mortier en fonction du taux d'ajout laitier	127
Figure 4-15	Evolution du gonflement du mortier en fonction du taux d'ajout ( laitier )	128
Figure 4-16	Influence du Taux d'ajout laitier dans le ciment sur le mortier (ouvrabilité).	130
Figure 4-17	Effet du taux d'ajout laitier sur la chaleur d'hydratation.	131
Figure 4-18	Courbe de chaleur d'hydratation et d'échauffement ( CHF 65% ).	131
Figure 4-19	Effet chaleur d'hydratation en fonction du temps de prise	132
Figure 4-20	Effet chaleur d'hydratation en fonction du débit de prise	133
Figure 4-21	Courbe granulométrique de Clinker	134
Figure 4-22	Courbe granulométrique de Laitier	135
Figure 4-23	Courbe granulométrique de CEM 01 CPA ( 0%)	135
Figure 4-24	Courbe granulométrique de CEM 10 ( 65% de laitier )	135
Figure 4-25	Courbe globale des ciments préparés	136
Figure 4-26	Analyse granulométriques de ciment préparé (ALPINE	137
Figure 4-27	Effet de surface spécifique sur l'analyse granulométriques de ciment (ALPINE).	138
Figure 4-28	Influence du Taux d'ajout laitier dans le ciment sur le Béton frais (l'affaissement)	139
Figure 4-29	Influence du Taux d'ajout laitier dans le ciment sur la Résistance à la compression du Béton durci.	141

Figure 4-30	Influence du Taux d'ajout laitier dans le ciment sur l'écoulement et l'étalement du micro béton frais.	142
Figure 4-31	l'écoulement et l'étalement du micro béton en fonction du taux d'ajout laitier et E/C ciment et E/C micro-béton.	144
Figure 4-32	Relation entre E/C ciment Vs E/C M.B.E	145
<b>CHAPITRE V</b>		
Figure 5-1	Dispositif expérimental de l'essai d'absorption capillaire	147
Figure 5-2	Effet du taux d'ajout laitier sur l'absorption d'eau (en gramme).	149
Figure 5-3	Effet du taux d'ajout laitier sur l'absorption d'eau (coefficient d'absorption (%))	149
Figure 5-4	Effet du rapport E/C Ciment sur l'absorption d'eau.	150
Figure 5-5	Eprouvettes prismatiques (40x40x160) mm <sup>3</sup> immergées dans la solution d'acide sulfurique	153
Figure 5-6	éprouvette avant et après immersion dans la solution (acide sulfurique H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )	153
Figure 5-7	Mortier CEM 06 (65% de laitier) après 21 jours d'immersion dans l'acide sulfurique (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ).	154
Figure 5-8	Variation de la perte de masse (%) des mortiers immergés dans la solution acide sulfurique pendant 21 jours des différents mortiers.	155
Figure 5-9	Variation de la perte de masse (g) des mortiers immergés dans la solution acide sulfurique pendant 21 jours des différents mortiers	155



## تأثير إضافة خبث الأفران على الخصائص الفيزيائية والكيميائية والميكانيكية للإسمنت

### ملخص:

إن تدعيم استعمال الإضافات الإسمنتية هي حالياً جزء من التطورات الأخيرة في إنتاج الإسمنت ، مما أدى إلى تحسن كبير للخصائص الميكانيكية للمواد الإسمنتية ( المونة والخرسانة ) . وعلاوة على ذلك ، إن استعمالها يؤدي إلى انخفاض في استهلاك مادة الكلنكر ويساهم في حل المشاكل البيئية بطريقة بسيطة واقتصادية .

الغرض من هذا العمل التجريبي هو دراسة مزايا وإمكانية طريقة الاستبدال الجزئي للإسمنت بمادة خبث الأفران المضافة في المونة والخرسانة .

تهتم هذه الدراسة التجريبية إلى تحضير اسمنت ذو إضافات معدنية باستبدال نسبة مئوية معينة من مادة الكلنكر بمادة خبث الأفران :

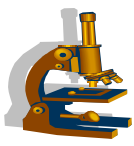
[0%, 6%, 10%, 20%, 25%, 30%, 35%, 40%, 50%, 65%, 70%, 80%, 85% et 90%]

لقد قمنا في هذه الدراسة بتغيير نسبة مادة خبث الأفران في الإسمنت باستعمال طريقة الاستبدال ( التغيير الجزئي لمادة الكلنكر بمادة خبث الأفران ) لدراسة أثره على الخصائص الفيزيائية

والكيميائية للإسمنت المحضر بالمادة المعدنية المضافة وكذلك المقاومة الميكانيكية للمونة والخرسانة .

إن الخصائص الفيزيائية والكيميائية للإسمنت المحضر بالمادة المعدنية المضافة في الحالة الجافة والمبللة ( التركيب الكيميائي ، زمن السحق ، الوزن النوعي ، النعومة ، التوزيع الحبيبي ، القوام القياسي للعجينة الإسمنتية ، وزمن الشك ) وكذلك مميزات المونة والخرسانة في الحالة الصلدة ، منها التقلص الانتفاخ ، والمقاومة الميكانيكية ( مقاومة الضغط ) ، تم تحديدهم خلال هذا العمل التجريبي .

ووفقاً لنتائج التجارب التي حصل عليها ، يتبين لنا أن كمية مادة خبث الأفران المضاف والتركيب الكيميائي للإسمنت المصنع هي العوامل الرئيسية التي تؤثر على تغيير المقاومة الميكانيكية (مقاومة الضغط ) للمونة والخرسانة المختبرة .



# **INFLUENCE DE L'AJOUT LAITIER SUR LES CARACTERISTIQUES PHYSICO-CIMIQUES ET MECANIQUES DES CIMENTS PORTLAND AU LAITIER ( CEM II ) & CIMENT DE HAUT FOURNEAU ( CEM III ).**

## **Résumé :**

L'industrie cimentière est un très gros producteur de CO<sub>2</sub>. C'est pourquoi elle a déjà réduit l'émission du CO<sub>2</sub> due à la cuisson du clinker en améliorant le rendement énergétique des fours. La part chimique due à la décarbonatation du calcaire est quant à elle irréductible.

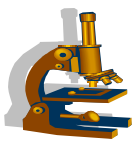
Toutefois, il existe une autre voie possible pour réduire les rejets de CO<sub>2</sub> de l'industrie du ciment : elle consiste à remplacer une partie du clinker contenu dans les ciments par des additions, telles que des fillers calcaires, des cendres volantes issues des centrales thermiques et de laitiers granulé de haut-fourneau, co-produit de l'industrie sidérurgique.

Les ciments à base de laitiers ( CEM II ) et ciment de haut fourneau ( CEM III – CHF ) sont composés de ciment Portland (de 06 à 90%) additionné de laitiers de haut fourneau. L'addition des laitiers se fait pendant l'opération de broyage. Cette étape consiste à doser les différents constituants, puis à les mélanger et à les broyer de façon à obtenir une poudre homogène et très fine.

Les CHF sont des ciments à faible chaleur d'hydratation, très employés dans les bétons enterrés utilisés pour les :

- Travaux hydrauliques, souterrains, fondations et injection,
- Travaux en eaux agressives : eau de mer, eaux séléniteuses, eaux industrielles, eaux pures,
- Ouvrages massifs : fondations, piles d'ouvrages d'art, murs de soutènement, barrages.

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



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

Ce travail expérimental étudie les avantages et la possibilité de substitution partielle du clinker par l'ajout laitier dans le ciment.

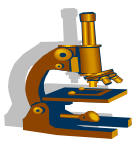
Cette étude expérimentale consiste à préparer un ciment avec addition minérale en remplaçant un certain pourcentage de clinker par l'ajout laitier :

[0%, 6%, 10%, 20%, 25%, 30%, 35%, 40%, 50%, 65%, 70%, 80%, 85% et 90%].

dans cette étude, nous avons fait varier le pourcentage de l'ajout laitier dans le ciment par la méthode de substitution (remplacement partiel du clinker par laitier) afin d'étudier son effet sur les propriétés physico-chimiques du ciment confectionné avec l'addition minérale et le comportement mécanique du mortier et béton.

Les propriétés physico-chimiques du ciment à l'état anhydre et l'état hydraté (composition chimique, temps de broyage, poids spécifique, finesse, distribution des particules, consistance des pâtes de ciment, 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 et les essais de la durabilité (attaque par acide et essai d'absorption) ont été étudiées.

D'après les résultats expérimentaux obtenus, il ressort que la quantité d'ajout laitier et la composition chimique du ciment confectionné sont les principaux paramètres qui influent sur la variation des résistances mécaniques (compression) des mortiers et béton testés.



## **INFLUENCE OF SLAG ADDING ON PHYSICO-CHEMICAL AND MECHANICAL OF SLAG PORTLAND CEMENT (CEM II) & BLAST FURNACE CEMENT (CEM III).**

### **Abstract:**

The cement industry is a major producer of CO<sub>2</sub>. This is why it has already reduced the emission of CO<sub>2</sub> due to the clinker burning by improving the energy efficiency of ovens.

Chemical hand due to the decarbonisation of limestone is itself irreducible. However, there is another possible way to reduce CO<sub>2</sub> emissions from the industry cement: it consists in replacing part of the clinker content in cements by additions such as limestone fillers, fly ash from thermal power plants and granulated blast furnace slag, a co-product of the steel industry.

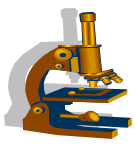
Slag cement (CEM II) and blast furnace slag (CEM III - CHF) are composed of Portland cement (of 06 to 90%) supplemented with blast furnace slag.

The addition of slag is done during the grinding operation. This step is to measure the various constituents and then mixing them and crushing so as to obtain a homogeneous and very fine powder.

The CHF are cements with low heat of hydration, much used in concrete buried used for :

- Hydraulic works, underground, foundations and injection,
- Works in aggressive water: sea water, selenitic water, industrial water, water pure,
- Massive structures: foundations, structures piles, retaining walls, dams.

The supplementary cementitious materials are currently part of the latest developments in the production of cement, resulting in a significant improvement to the mechanical performances of cementitious materials (mortar and concrete).



For the more, to the existed that it leads to a reduction in cement consumption, the use of additions contributes to solving environmental problems in a simple and economic manner.

This experimental work presents a study of the advantages and the possibility of the partial replacement of cement by slag admixture in mortar.

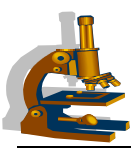
This experimental study consists to make the cement with mineral admixture while replacing a certain percentage of clinker by slag admixture :

[0%, 6%, 10%, 20%, 25%, 30%, 35%, 40%, 50%, 65%, 70%, 80%, 85% et 90%].

In this study, we varied the percentage of the slag admixture in cement by the substitution method (partial replacement of the clinker by the slag) to study its effect on the physico-chemical properties of cement manufactured with mineral addition and mortar mechanical behavior.

The physico-chemical properties of cement at anhydrous state and the hydrated state (chemical composition, grinding time, specific weight, fineness, particle size distribution, consistency of the cement paste, setting times, shrinkage and expansion), thus the characteristics of the mortars and concrete made at their bases, such as, the mechanical behavior (compressive strengths) for the mortar and concrete were studied.

According to the experimental results obtained, it comes that the quantity of mineral additive (slag) and the chemical composition of cement manufactured are the principal parameters who influence on the variation of the mechanical strengths (compressive) of the mortars and concrete tested.



## **INTRODUCTION:**

### **1- Contexte générale de l'étude :**

L'utilisation des ajouts minéraux dans la production des ciments Portlands composés avec laitier et ciment de haut fourneau

(C.P.J - C.E.M II/A-S , C.E.M II/B-S , C.E.M III/A , C.E.M III/B , C.E.M III/C ) a résolu en grande partie le problème d'autosuffisance nationale, ainsi que celui de la baisse du coût énergétique. En faisant varier les pourcentages d'ajouts, on pourrait obtenir en fonction des domaines d'utilisation, différents types de ciments aux ajouts minéraux avec les propriétés physico-mécaniques demandées.

Les ajouts minéraux sont largement utilisés dans la fabrication des ciments avec additions minérales dans le monde. Du point de vue économique, ils présentent un facteur très important dans la production des ciments Portland composé avec laitier et ciment de haut fourneau

(C.P.J - C.E.M II/A-S , C.E.M II/B-S , C.E.M III/A , C.E.M III/B , C.E.M III/C ) du moment que la consommation en clinker baisse en fonction du taux d'ajout utilisé (laitier).

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

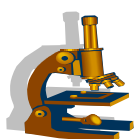
D'une part les additions minérales sont susceptibles de modifier le processus d'hydratation du ciment ainsi que la structuration des produits hydratés et, d'autre part, certaines additions minérales à caractère pouzzolanique ou hydraulique latent peuvent réagir en milieu cimentaire et former de nouveaux produits hydratés.

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

Les ciments portland composé avec laitier et ciment de haut fourneau (C.P.J - C.E.M II/A-S , C.E.M II/B-S , C.E.M III/A , C.E.M III/B , C.E.M III/C ) avec ajout minéral se distingue par un durcissement ralenti à sa période initiale en comparaison avec un ciment Portland ordinaire sans ajout, c'est-à-dire sans constituant secondaire (C.P.A-C.E.M I).

Cette propriété latente du ciment avec ajout minéral (C.P.J-C.E.M II – CEM III), nécessite l'emploi d'un bon activant, chimique (utilisation des solutions alcalines qui modifient la prise et le durcissement), mécanique (broyage poussée du liant hydraulique) ou thermique (accélération des réactions chimiques par l'élévation de la température).

Les ciments composés avec ajouts minéraux laitier (CEM II – CEM III) ont des temps de



prise un peu plus longs que les ciments Portlands purs (CPA - CEM I), surtout dans le cas de bétonnage par temps froid.

L'ajout laitier de remplacement d'origine minérale sont largement exploités pour la fabrication des ciments Portlands composés avec laitier et ciment de haut fourneau.

Du point de vue économique, ils présentent un facteur très important dans la production du ciment avec ajout minéral (CEM II – CEM III), du moment que la consommation en clinker baisse en fonction du taux d'ajout utilisé (laitier).

La réduction de la proportion du clinker dans la fabrication du ciment avec ajout minérale (laitier) présente les avantages suivants :

- Réduire le besoin en énergie de production (moins de clinker) .
- Réduction des émissions de CO<sub>2</sub> (consommation moins de clinker).
- Amélioration des propriétés des matériaux cimentaires (mortier et béton).

### **2- Laitier granulé de haut fourneau (S) :**

Le laitier granulé de haut fourneau est le matériau hydraulique le plus souvent utilisé dans les ciments composés.

Il est obtenu par refroidissement rapide de la scorie fondue produite pendant la fabrication de la fonte dans le haut fourneau.

Pour être utilisé en cimenterie, le laitier granulé de haut fourneau doit présenter des propriétés hydrauliques latentes.

Le laitier est généralement moins réactif que le clinker.

Il améliore les résistances finales et la durabilité du ciment.

### **3-Objectifs de l'étude :**

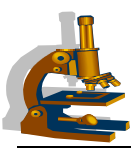
La stratégie de cette étude est basée sur l'étude des effets de l'addition minérale (dans notre cas: le laitier ) sur les propriétés du ciment au laitier afin de pouvoir les améliorer pour obtenir un ciment au laitier activé sans clinker ou (moins de clinker ) avec des propriétés semblables ou meilleures que celle du ciment Portland ordinaire.

L'objectif de notre étude est d'évaluer expérimentalement l'influence de taux d'ajout laitier (0%, 6%, 10%, 20%, 25%, 30%, 35%, 40%, 50%, 65%, 70%, 80%, 85% et 90%).

Sur les propriétés physico-chimiques et mécaniques de mortier et du béton.

L'étude de recherche dans ce mémoire vise à atteindre les objectifs principaux suivants :

- 1-** Etude des effets de l'incorporation d'ajouts minéraux : laitier sur les propriétés physico-chimiques et mécaniques et la durabilité des mortiers et bétons confectionnés à base de ciments binaires et ciments ternaires.



**2- Sélection le dosage optimum d'ajout laitier sur les ciments Portlands composés avec laitier et ciment de haut fourneau les plus performants du point de vue Résistance mécanique que du point de vue durabilité.**

Ce travail est une contribution à l'amélioration des propriétés des mortiers et des bétons par activation mécanique de ciment (CEM II – CEM III) de cimenterie Lafargeholcim M'sila Hammam Dalaa, (Ciments fabriqués avec ajouts laitier – CHF 65% de laitier).

**4-Méthodologie du travail :**

**Le premier chapitre :**

Le premier chapitre de ce travail est destiné à l'étude bibliographique sur le ciment. Dans cette partie nous avons exposé les travaux réalisés sur les ajouts minéraux, l'hydratation des ciments, propriétés des mortiers et bétons contenant des laitier, retrait, etc.

**Le deuxième chapitre :**

Le deuxième chapitre de ce travail est destiné à l'étude bibliographique sur le laitier. Dans cette partie nous avons exposé les travaux réalisés sur le laitier, et les Caractéristiques du laitier et Les différentes formes de laitiers, la fabrication de laitier.

**Le troisième chapitre :**

Le troisième chapitre est consacré à l'expérimentation. Nous présentons dans cette partie la caractérisation des matériaux utilisés (laitier, clinker, gypse) et les méthodes d'essais réalisés sur les ciments préparés - mortiers et béton. Et les essais sur la durabilité réalisés.

**Le quatrième chapitre :**

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

**Le cinquième chapitre :**

Présente les résultats expérimentaux obtenus et les discussions tirées lors l'étude de la durabilité des mortiers à base de ciment avec laitier (étudier l'absorption capillaire d'eau pour voir la porosité des mortiers préparé à base de ciment avec laitier et l'étude d'attaque acide).

**Enfin**, dans la conclusion générale, on présente les principaux résultats dégagés lors de cette étude ainsi en terme d'expérimentation pour une meilleure utilisation de l'addition (ajout laitier) pour la confection des ciments avec ajouts secondaires résistant au milieu agressive.



## Chapitre I : Le ciment et les ajouts minéraux

### 1ère partie le ciment

#### I-1 Introduction :

Le ciment est un produit moulu du refroidissement du clinker qui contient un mélange de silicates et d'aluminates de calcium porté à 1450 – 1550 °C, température de fusion.

Le ciment usuel est aussi appelé liant hydraulique, car il a la propriété de s'hydrater et de durcir en présence d'eau et par ce que cette hydratation transforme la pâte liante, qui a une consistance de départ plus ou moins fluide, en un solide pratiquement insoluble dans l'eau.

Ce durcissement est dû à l'hydratation de certains composés minéraux, notamment des silicates et des aluminates de calcium.

L'expression de (pâte de ciment durcissant) sera utilisée pour désigner la pâte de ciment dans la transformation d'un état plus ou moins fluide en un état solide.

La composé de base des ciments actuels est un mélange de silicates et d'aluminates de calcium résultant de la combinaison de la chaux (CaO) avec la silice (SiO<sub>2</sub>), l'alumine (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), et 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 calcaire, argile ou marne et contiennent, en plus des oxydes déjà mentionnés, d'autres oxydes et en particulier Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, l'oxyde ferrique.

Le principe de la fabrication du ciment est le suivant: calcaires et argiles sont extraits des carrières, puis concassés, homogénéisés, portés à haute température (1450 °C) dans un four. Le produit obtenu après refroidissement rapide (la trempe) est le clinker.

Un mélange d'argile et de calcaire est chauffé. Au début, on provoque le départ de l'eau de mouillage, puis au delà de 100 °C, le départ d'eau d'avantage liée.

A partir de 400°C commence la composition en gaz carbonique (CO<sub>2</sub>) et en chaux (CaO), du calcaire qui est le carbonate de calcium (CaCO<sub>3</sub>).

Le mélange est porté à 1450-1550 °C, température de fusion. Le liquide ainsi obtenu permet l'obtention des différentes réactions. On suppose que les composants du ciment sont formés de la façon suivante: un partie de CaO est retenu par Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> en formant une masse liquide. SiO<sub>2</sub> et CaO restant réagissent pour donner le silicate bicalcique dont une partie se transforme en silicate tricalcique dans la mesure où il reste encore du CaO non combiné.



## I-2 Principe de fabrication ciment portland:

La fabrication de ciment se réduit schématiquement (voir figure 1.1) aux trois opérations suivantes:

- préparation du cru.
- cuisson.
- broyage et conditionnement.

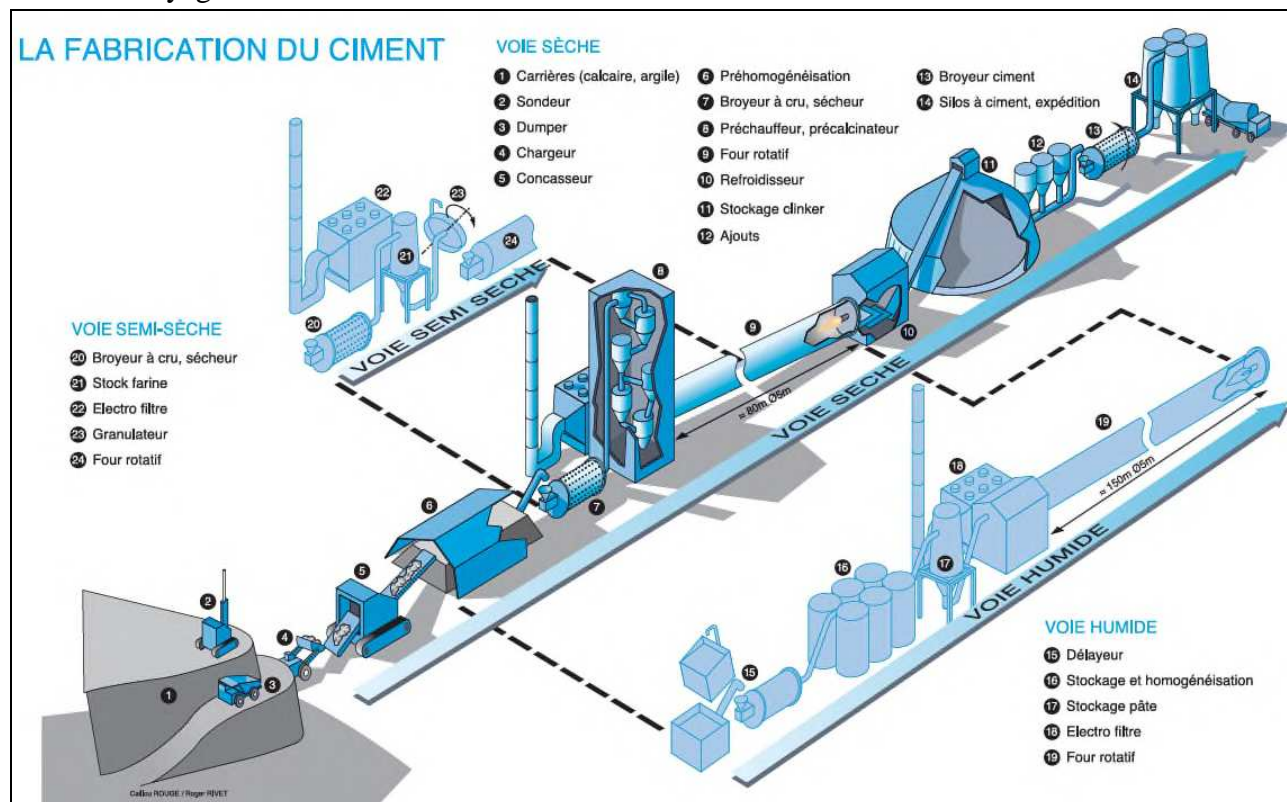


Figure 1-1 Fabrication du ciment.

Il existe 4 méthodes de fabrication du ciment (voir figure 1.1) qui dépendent essentiellement du matériau:

- Fabrication du ciment par voie humide (la plus ancienne).
- Fabrication du ciment par voie semi-humide (en partant de la voie humide).
- Fabrication du ciment par voie sèche (la plus utilisée).
- Fabrication du ciment par voie semi-sèche (en partant de la voie sèche).

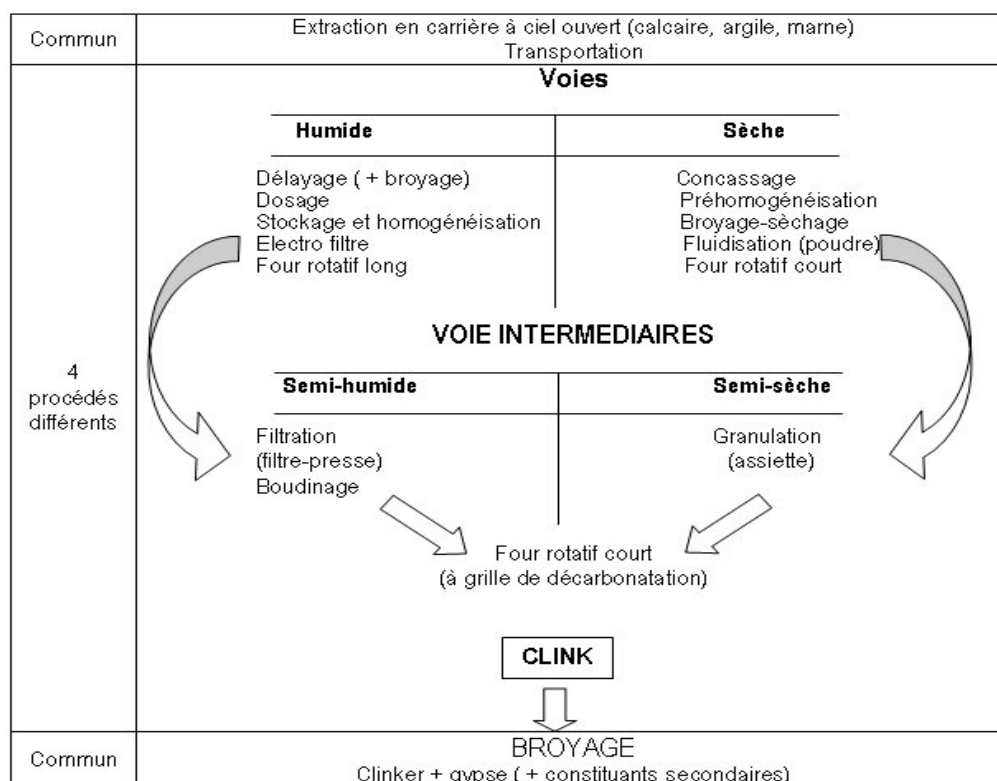


Figure 1-2 Le schéma de la fabrication du ciment.

On distingue deux types de fabrication :

### I-2-1 Fabrication par voie humide :

Cette voie est utilisée depuis longtemps. C'est le procédé le plus ancien, le plus simple mais qui demande le plus d'énergie.

Dans ce procédé, le calcaire et l'argile sont mélangés et broyés finement avec l'eau de façon, à constituer une pâte assez liquide (28 à 42% d'eau). On brasse énergiquement cette pâte dans de grands bassins de 8 à 10 m de diamètre, dans lesquels tourne un manège de herses.

La pâte est ensuite stockée dans de grands bassins de plusieurs milliers de mètres cubes, où elle est continuellement malaxée et donc homogénéisée. Ce mélange est appelé le cru.

Les analyses chimiques permettent de contrôler la composition de cette pâte, et d'apporter les corrections nécessaires avant sa cuisson.

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

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



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

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

De toutes façons, quelque soit la méthode de fabrication, à la sortie du four, on a un même clinker qui est encore chaud de environ 600-1200 °C. Il faut broyer celui-ci très finement et très régulièrement avec environ 5% de gypse  $\text{CaSO}_4$  afin de «régulariser» la prise.

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

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

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

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

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

### **I-2-2 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 aéroglisseur.



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 (CO<sub>2</sub>) 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 pannes, 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'une pré homogénéisation puis d'une homogénéisation.

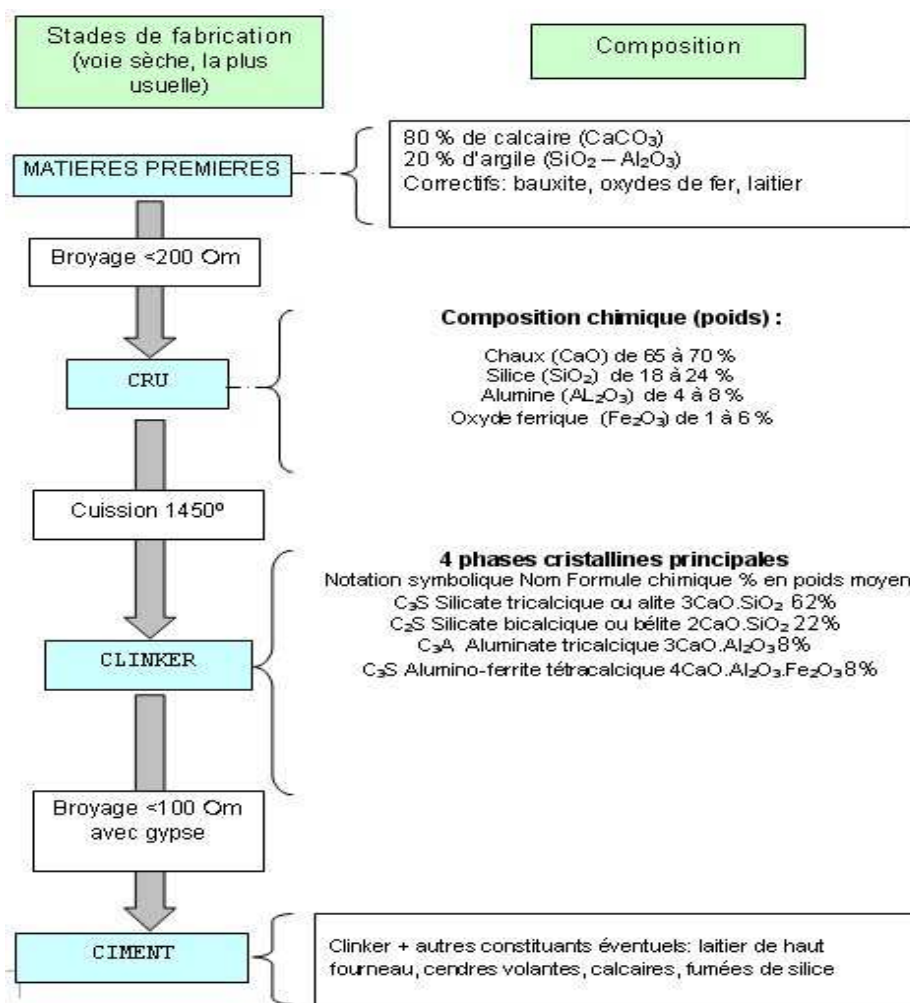


Figure 1-3 Fabrication du ciment par voie sèche.

### I-3 Constituants principaux du ciment et les additions :

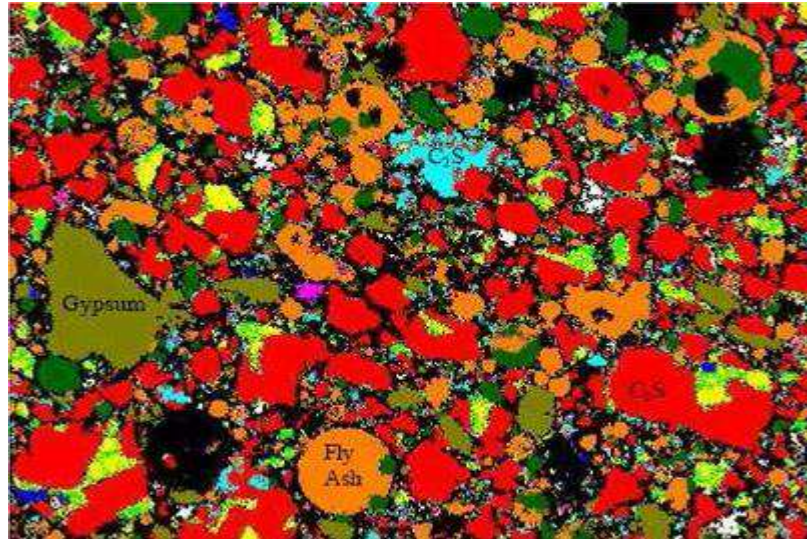
#### I-3-1 Constituants du clinker :

##### I-3-1-1 Préparation de la matière première :

Le mélange de calcaire et d'argile est broyé, en un mélange très fin, qu'on appelle le " cru " des corrections de composition peuvent être effectués en incorporant des ajouts en faible proportion.

Le produit cuit (clinker) est refroidi, puis broyé avec une petite quantité de gypse (additif indispensables destiné à régularisé la prise) dans d'énormes broyeurs à boulets est amené ainsi à une grande finesse de mouture.

Afin de rendre la matière plus réactive (plus grande la surface spécifique, plus la réactivité chimique est importante). Selon le cas, on ajoute ainsi au broyage du laitier de haut fourneau, des cendres volantes, ou des pouzzolanes et fillers (calcaire ou tuf).



**Figure 1.4 : Microphotographie d'un clinker**  
Noir= porosité, rouge= C<sub>3</sub>S, bleu clair= C<sub>2</sub>S, vert= C<sub>3</sub>A, vert= sulfates de calcium,  
Jaune= K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, et blanc = CaO

### ***I-3-1-2 Broyabilité du clinker :***

Le clinker présente une bonne broyabilité s'il contient plus de C<sub>3</sub>S, moins de C<sub>3</sub>A et une forte micro-fissuration des grains lors du refroidissement. Selon certains chercheurs, plus le rapport  $[(C_3S + C_2S)/(C_3A + C_4AF)]$  est élevé, plus facile est la broyabilité .

La Figure (1-5) montre clairement l'influence du type de broyeur sur la constitution et la morphologie des grains.



**Broyeur à jet :** Les grains de clinker se fracturent  
taille régulière à anguleux et surface lisse



**Broyeur à boulets :** granularité étendue  
à contour arrondis et recouvert de fines particules

**Figure 1-5 Fractographie de granulés de clinker industriel broyé [01]**

### ***I-3-1-3 Qualité du clinker :***

Dans la fabrication du ciment, une bonne préparation (mélange) est calculée pour avoir un rapport (rapport de saturation en chaux)  $m$  proche de 1.

$$m = \text{CaO} / (2.8 \text{SiO}_2 + 1.18 \text{Al}_2\text{O}_3 + 0.65 \text{Fe}_2\text{O}_3) \text{ [01].}$$

Si  $m=1$  toute la chaux est consommée .



L'art du cimentier consiste à se rapprocher au maximum de cette valeur, Mais en réalité on prend une quantité de quelques pour cents inférieures à ces valeurs .

### I-3-2 Le Sulfate de Calcium ( Le gypse - $\text{CaSO}_4$ ) :

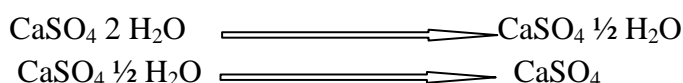
Le gypse est une roche blanche, d'aspect mat, finement cristallin, tendre (rayable à l'ongle) et de densité 2.3 .

Quelques traces jaunes de soufre peuvent apparaître. Il est constitué en majeure partie de sulfate de calcium hydraté ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2(\text{H}_2\text{O})$ ). Le gypse est très pur (souvent 98%) et ne nécessite pas de purification lors de son exploitation.

Le sulfate de calcium (gypse  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) est un régulateur de prise ajouté en faible quantité aux autres constituants du ciment au cours de sa fabrication de 3 à 5% de la masse du ciment .

La teneur en  $\text{SO}_3$  ne doit pas dépasser 3.5% dans le ciment .Pour chaque nature de clinker, il existe un pourcentage optimal de gypse qui donne à la fois les meilleurs résistances et le retrait minimal.

Pendant le broyage sous l'effet de la température atteinte pendant le broyage et le stockage . Le gypse va se déshydrater en plâtre, éventuellement en anhydrite et modifier le comportement rhéologique du ciment.



### I-3-3 Le Calcaire :

Les calcaires sont des roches sédimentaires, troisièmes par ordre d'abondance après les schistes et les grès, facilement solubles dans l'eau (voir karst), composées majoritairement de carbonate de calcium  $\text{CaCO}_3$  mais aussi de carbonate de magnésium  $\text{MgCO}_3$ .

- Le filler calcaire en général conduit à une augmentation de la vitesse d'hydratation du ciment et par conséquence :

À une diminution du début de prise.

À une augmentation des résistances initiales.

- La finesse du filler contrôle ce mécanisme.

- Le filler calcaire va réagir avec les produits d'hydratation du ciment, en se formant des carboaluminates de calcium au lieu de monosulfoaluminate, ce qui permet d'avoir d'ettringite à long terme.

**I-3-3-1 Action du calcaire :**

- Les particules du calcaire peuvent agir comme descentres de nucléation, en ayant un effet accélérateur de l'hydratation du ciment.
- Pour cela, la finesse des particules de calcaire est essentielle.
- Certains auteurs envisagent la réaction du calcaire avec les composants du ciment.
- En même temps, le clinker est en général broyé a une finesse supérieure, ce qui augmentera la vitesse des réactions.

**I-4 Principales Catégories de Ciments:**

D'après la norme ENV 197-1 définit 5 types de ciment dont la composition doit être conforme au Tableau 1-page 12.

Désignations	Notation	Clinker	Autres constituants	Constituants secondaires
Ciment Portland	CPA -CEM I	95-100	----	0-5
Ciment Portland composé	CPJ-CEM II/A CPJ-CEM II/B	80-94 65-79	6-20 21-35	-----
Ciment de haut fourneau	CHF-CEM III/A	35-64	36-65	0-5
	CHF-CEM III/B	20-34	66-80	0-5
	CLK -CEM III/C	5-19	81-95	0-5
Ciment pouzzolanique	CPZ-CEM IV/A	65-90	10-35	0-5
	CEM-CPZ IV/B	45-64	36-55	0-5
Ciment composé	CLC-CEM V/A	40-64	18-30	0-5
	CLC-CEM V/B	20-39	31-50	0-5

**Tableau 1-1 Principales catégories de ciment .**

Avec les notations abrégées correspondantes qui sont comme suit : CEM pour indiquer que le produit est un ciment. Un chiffre romain 1, 2, 3, 4 ou 5 pour indiquer le type de ciment Pour le ciment 2 ; 3 ; 4 et 5 une lettre A, B, C pour indiquer la proportion des constituants Le nombre indiquant la classe de résistance 32.5, 42.5, 52.5 suivi le cas échéant de la lettre R pour signaler une résistance élevée au jeune âge ( 2 jours) .

**I-5 Les Constituants anhydres du ciment (CPA) :****I-5-1 Composition chimique :**

Le ciment portland résulte du broyage du clinker qui se présente sous forme de nodules durs et cristallisés de teinte grise foncée .Le clinker est obtenu par cuisson vers 1450°C d'un mélange bien précis de calcaire (80%) et d'argile (20%) auquel on ajoute 5% de gypse ( $\text{CaSO}_4,2\text{H}_2\text{O}$ ) destinés à régulariser la prise. [02,03]

Les principaux oxydes (Tableau 1-2 ) sont en % pondéral d'après l'analyse chimique par fluorescence X d'un clinker de ciment portland. qui 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. [01] .

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 1-2 Composition chimique du clinker [01].**

**I-5-2 Performance des ciments :**

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.

Module hydraulique de Michaelis ( $M_h$ ) compris entre (1.7 et 2.3) :

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

Module silicique de Kühl compris entre (1.5 et 5) :

$$M_h = \text{SiO}_2 / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3)$$

Modules alumino -ferrique ( $M_{af}$ ) de Kühl compris entre (1.5 et 2.5) :

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

Indice d'hydraulicité de Vicat compris entre( 0.4 et 0.5):

$$HI = (\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3) / (\text{CaO} + \text{MgO})$$



Les composés sont exprimés en moles et non en pour-cent.

Indice de saturation en chaux de Kühl compris entre (0.85 et 1) :

$$LSI = \text{CaO} / (2,8 \times \text{SiO}_2 + 1,1 \times \text{Al}_2\text{O}_3 + 0,7 \times \text{Fe}_2\text{O}_3)$$

Facteur de saturation de Lea Parker compris entre (0.85 et 1):

$$M_{\text{sat}} (\text{LSF}) = \text{CaO} / (2,8 \times \text{SiO}_2 + 1,18 \times \text{Al}_2\text{O}_3 + 0,65 \times \text{Fe}_2\text{O}_3)$$

C'est le rapport de la chaux (CaO) totale dans le mélange à la chaux susceptible de se combiner avec les autres oxydes ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) plus le Msat est élevé plus les résistances le sont aussi.

### I-5-3 Composition minéralogique :

Les compositions minéralogiques des ciments Portlands est fonction du mélange (clinker + 5% de gypse) mais aussi de la température de cuisson du clinker et des conditions de refroidissement (trempe à l'air) [01]. Il contient quatre principaux composants:

- Le silicate tricalcique (alite) :  $3\text{CaO}, \text{SiO}_2 : \text{C}_3\text{S}$
- Le silicate bicalcique (bélite) :  $2\text{CaO}, \text{SiO}_2 : \text{C}_2\text{S}$
- L'aluminate tricalcique (célite) :  $3\text{CaO}, \text{Al}_2\text{O}_3 : \text{C}_3\text{A}$
- L'alumino-ferrite tétracalcique (célite) :  $4\text{CaO}, \text{Al}_2\text{O}_3, \text{Fe}_2\text{O}_3 : \text{C}_4\text{AF}$

#### I-5-3-1 Le silicate tricalcique ( Alite ) $\text{C}_3\text{S}$ :

- Se forme vers 1400 à 1450 °C, sa densité  $d = 3.15$
- Il contient, en solution, des impuretés  $\text{MgO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  et  $\text{Fe}_2\text{O}_3$
- Se présente en gros cristaux pseudo-hexagonaux jointifs ou maclés, la taille varie suivant la cuisson de 10 à 50  $\mu\text{m}$  Figure (1-5).

Les réactions d'hydratation du  $\text{C}_3\text{S}$  sont plus rapides que celle de  $\text{C}_2\text{S}$ , et libérant une quantité de chaleur proche du double de celle libérée par  $\text{C}_2\text{S}$ , ce qui donne au ciment une résistance initiale rapide et élevée.

#### I-5-3-2 Le silicate bicalcique ( belite ) $\text{C}_2\text{S}$ :

Il existe plusieurs formes allotropiques, la forme la plus active se trouve dans le ciment portland est la forme  $\beta$  qui possède des propriétés hydrauliques .Se forme entre 1200 à 1300 °C, sa densité  $d = 3.28$ .

Il contient en suspension solide, des impuretés  $\text{P}_2\text{O}_5$  (anhydre phosphorique) et  $\text{BaO}$  (oxyde de baryum) Les cristaux ont souvent des formes arrondies de taille de 30  $\mu\text{m}$  en moyenne suivant la cuisson ( voir figure 1-6 ).

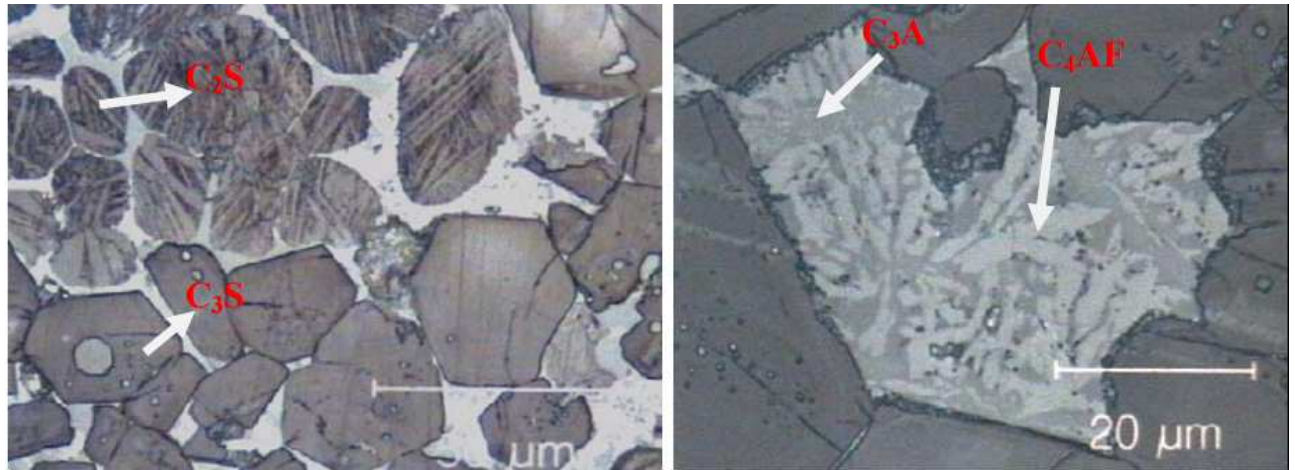


Figure 1-6 Image de clinker en microscope optique (section polie) [04]

### I-5-3-3 Les aluminates tricalciques ( $C_3A$ ):

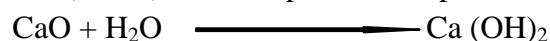
- Le  $C_3A$  à une densité proche de 3,04.
  - Il existe plusieurs aluminates parmi lesquels, on peut citer 3 composés présentant des propriétés hydrauliques.
  - CA et C12A17 que l'on trouve dans les ciments alumineux.
  - L'hydratation des  $C_3A$  est très rapide et exothermique (l'ajout du gypse au clinker à pour effet de contrôler sa cinétique d'hydratation)
  - Le  $C_3A$  contribue à la prise du ciment par contre, il contribue assez peu à la résistance finale.
- Le  $C_3A$  contient des impuretés ( $Na_2O$ ) et se présente sous plusieurs formes allotropiques dont la réactivité vis-à-vis de l'eau est variable.

### I-5-3-4 L'alumino -ferrite tétracalcique :

Il forme un solide de  $C_2A$  et  $C_2F$  ( $C_4AF$ ,  $C_6A_2F$ ), leurs réactions d'hydratation sont voisines de celles du  $C_3A$ .

### I-5-3-5 La chaux $CaO$ libre :

Elle est cristallisée dans le système cubique, sa densité est de 3.18 sa présence dans le ciment est proscrite ( $\leq 2\%$ ) notant cependant les problèmes posés par son hydratation.



Volume molaire :  $56/3.18 = 17.6 \text{ cm}^3$   $74/2.34 = 31.6 \text{ cm}^3$   $100 \Delta V/V = 80\%$  Extinction de la chaux provoque un gonflement important ce qui conduit à des désordres en cas d'hydratation tardive de  $CaO$ .

**I-5-4 Composition potentielle du ciment (équation de bogue) :**

Les Tableaux (1-3) et (1-4) illustrent Les compositions minéralogiques des clinkers [1,5].

Le clinker	
Formules chimiques	Formules de Bogue
Le silicate tricalcique ( $3\text{CaO}, \text{SiO}_2$ ) : $\text{C}_3\text{S}$	$4.07. \text{CaO} - 7.6. \text{SiO}_2 - 1.43. \text{Fe}_2\text{O}_3 - 6.72. \text{Al}_2\text{O}_3$
Le silicate bicalcique ( $2\text{CaO}, \text{SiO}_2$ ) : $\text{C}_2\text{S}$	$2.87. \text{SiO}_2 - 0.75. \text{C}_3\text{S}$
L'aluminate tricalcique ( $3\text{CaO}, \text{Al}_2\text{O}_3$ ) : $\text{C}_3\text{A}$	$2.65. \text{Al}_2\text{O}_3 - 1.69. \text{Fe}_2\text{O}_3$
L'alumino-ferrite tétracalcique ( $4\text{CaO}, \text{Al}_2\text{O}_3, \text{Fe}_2\text{O}_3$ ) : $\text{C}_4\text{AF}$	$3.04. \text{Fe}_2\text{O}_3$

**Tableau 1-3 Composition potentielle d'après les formules Empiriques de BOGUE [01].**

Constituants	Alite	Bélite	Célite	Célite
Notations cimentières simplifiée	$\text{C}_3\text{S}$	$\text{C}_2\text{S}$	$\text{C}_3\text{A}$	$\text{C}_4\text{AF}$
Notations cimentières détaillée	$3\text{CaO}, \text{SiO}_2$	$2\text{CaO}, \text{SiO}_2$	$3\text{CaO}, \text{Al}_2\text{O}_3$	$4\text{CaO}, \text{Al}_2\text{O}_3, \text{Fe}_2\text{O}_3$
Teneurs (%)	50-75	07-30	0-16	04-20

**Tableau 1-4 Compositions minéralogiques moyennes des clinkers [01].**

On peut remarquer que la méthode empirique de Bogue qui se base sur la composition chimique conduit aux mêmes résultats de quelques pour-cent près comparativement aux méthodes modernes comme exprimés aux ( Tableaux 1-4 ) .

La séquence des réactions et les formules sont exprimées comme suit:

- \* Le  $\text{C}_4\text{AF}$  se forme en premier
- \* Le  $\text{C}_3\text{A}$  se forme ensuite
- \* La chaux ( $\text{CaO}$ ) et  $\text{SiO}_2$  restant se combinent pour former  $\text{C}_2\text{S}$  et  $\text{C}_3\text{S}$ .

**I-5-5 Composition chimique des minéraux :**

Le Tableau (1- 5 ) montre bien la microstructure élémentaire des quatre minéraux selon une analyse par microsonde électronique de casting : analyse élémentaire ponctuelle (les résultats sont donnés sous forme d'oxyde) [01].



Oxyde	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF
CaO	74.2 ± 0.5	64.2 ± 0.6	57 ± 2.0	50.7 ± 0.5
SiO <sub>2</sub>	24.5 ± 0.3	30.8 ± 0.8	4.4 ± 0.1	3.8 ± 0.2
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.6 ± 0.2	2.2 ± 0.4	25.2 ± 0.9	17.4 ± 0.6
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.57 ± 0.07	0.63 ± 0.06	6.9 ± 0.6	18.5 ± 0.7
MgO	0.34 ± 0.02	0.16 ± 0.02	0.66 ± 0.01	1.96 ± 0.09
SO <sub>3</sub>	0.30 ± 0.06	1.2 ± 0.2	0.4 ± 0.1	0.09 ± 0.04
K <sub>2</sub> O	0.03 ± 0.01	0.3 ± 0.05	0.1 ± 0.04	0.03 ± 0.01
TiO <sub>2</sub>	0.18 ± 0.03	0.13 ± 0.05	0.5 ± 0.1	2 ± 0.2

Tableau 1-5 Microstructure élémentaire des quatre minéraux [01].

## I-6 Hydratation du ciment Portland :

### I-6-1 Introduction :

Le ciment est un liant hydraulique, il se combine 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 [6]:

- 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 inter granulaires.

### I-6-2 Hydratation des composants du ciment Portland:

Lorsque le ciment entre en contact avec l'eau, une réaction exothermique instantanée se produit avec une forte libération de chaleur, cette période dite de pré-induction est de courte durée (10 – 20 minutes). Elle est suivie d'une période relative inactivée appelée période d'induction ou période dormante au cours de laquelle le dégagement de chaleur est faible, mais jamais nul.

La durée de cette période peut varier entre 2 et 8 heures.

La période d'induction est très importante quant à l'ouvrabilité des bétons et mortiers, car à sa fin s'amorce la prise du ciment avec un fort dégagement de chaleur qui correspond à la période d'accélération associée au début de prise et de durcissement du ciment.

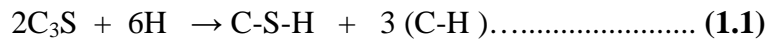
Pour comprendre les changements chimiques et physiques qui se produisent au cours de



l'hydratation du ciment portland, il est essentiel d'étudier séparément les réactions des silicates et des aluminates.

**I-6-2-1 Hydratation du silicate tricalcique C<sub>3</sub>S :**

L'hydratation des silicates produit des gels de silicate de calcium hydraté et l'hydroxyde de calcium. La réaction du C<sub>3</sub>S avec de l'eau est la suivante:

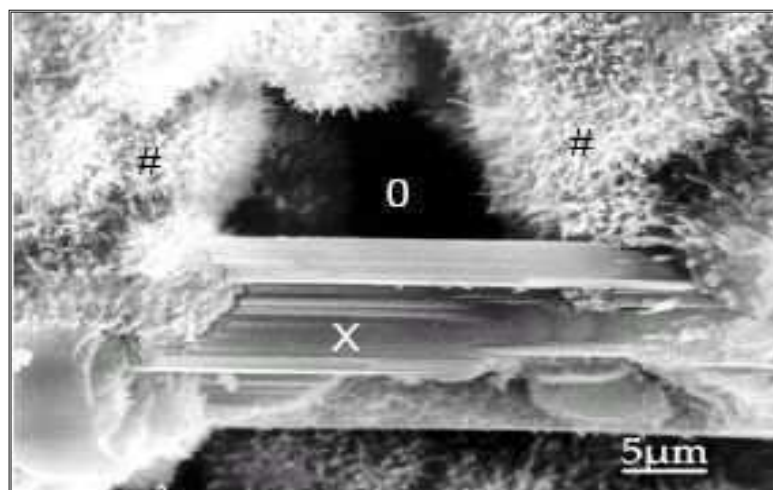


Où C-S-H représente le 3CaO.2SiO<sub>2</sub>. 3H<sub>2</sub>O (Silicate de calcium hydraté) et (C-H) représente le Ca(OH)<sub>2</sub> (Portlandite).

- Les hydrates ainsi obtenus au cours de l'hydratation du C<sub>3</sub>S ( figure 1.7 ) sont :
- les silicates de calcium hydratés (C-S-H) qui occupent entre 60 et 70% du volume de solide d'une pâte de ciment complètement hydratée. Ils ont une structure en feuillets formés de cristaux très petits et mal cristallisés.
  - La surface spécifique est très élevée (100 - 700 m<sup>2</sup>/g).
  - La cohésion des feuillets de C-S-H est due aux forces de Van Der Walls entre leurs parties colloïdales.

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

La portlandite a une morphologie hexagonale prismatique. Elle participe peu au développement de la résistance. En fait, la présence de la portlandite peut être un risque, parce qu'elle est fortement soluble et susceptible à l'attaque d'acide et de sulfate [7].



**Figure 1-7 C-S-H fibreux avec Cristal de Portlandite (X) entre des C-S-H (#), La porosité est repérée par (O) [8]**



**I-6-2-2 Hydratation du silicate bi calcique C<sub>2</sub>S :**

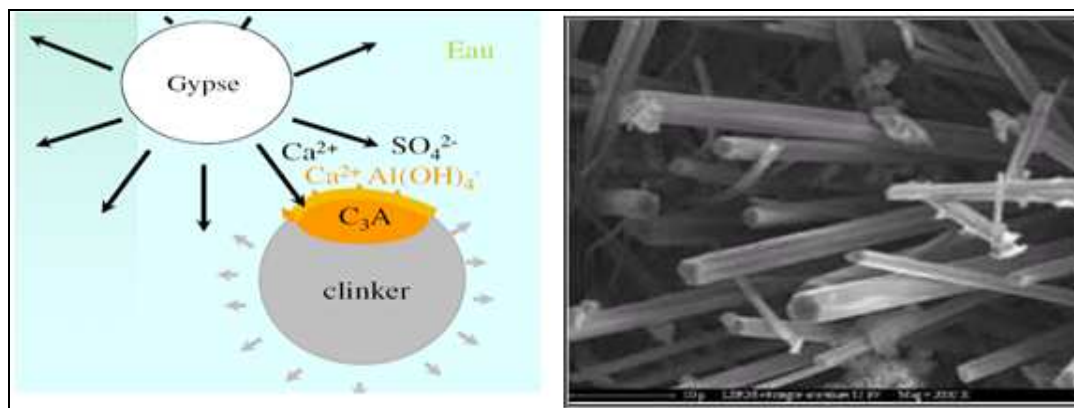
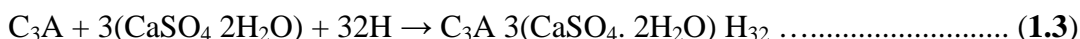
Une fois hydraté, C<sub>2</sub>S donne aussi des C-S-H. La réaction est donnée par:



Les études calorimétriques ont montré des résultats semblables à ceux de l'hydratation de C<sub>3</sub>S mais avec moins d'évolution de la chaleur. Selon des calculs de stoechiométrie, l'hydratation de C<sub>3</sub>S produirait 61% de gel de C-S-H et 39% de CH alors que l'hydratation de C<sub>2</sub>S produirait 82% de gel de C-S-H et seulement 18% de CH, donc une quantité plus élevée de C<sub>2</sub>S dans le ciment aurait comme conséquence plus de résistance. Pour la résistance au jeune âge, cependant, plus de C<sub>3</sub>S est nécessaire, parce que sa vitesse de réaction est plus élevée.

**I-6-2-3 Hydratation de l'aluminate tricalcique C<sub>3</sub>A :**

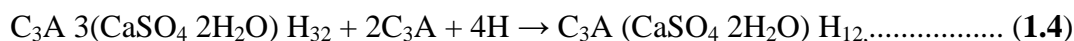
L'hydratation des aluminates est considérablement influencée par la présence du gypse (CaSO<sub>4</sub> 2H<sub>2</sub>O). En l'absence du gypse, la réaction de C<sub>3</sub>A avec de l'eau est très violente et mène au raidissement immédiat de la pâte, connu sous le nom de prise rapide. En présence du gypse, les C<sub>3</sub>A réagissent d'abord pour former le trisulfoaluminate hydraté (Ettringite) qui se cristallise en aiguilles à base Hexagonale (figure 1.8). La réaction est donnée par:



**Figure 1-8 Microscopie Electronique à Balayage, ettringite aciculaire (aiguille) dans un béton [9]**

Le gypse ajouté au clinker (3 à 5% en poids) n'est pas en teneur suffisante pour transformer tous les aluminates en étringite.

Il apparaît donc secondairement un monosulfoaluminate qui se cristallise en plaquettes hexagonales [10]. La réaction est donnée par :





Les aluminates hydratés ainsi obtenus occupent 15 à 20% du volume de la pâte de ciment complètement hydratée [11].

#### ***I-6-2-4 Hydratation de l'aluminoferrite tétracalcique $C_4AF$ :***

Le  $C_4AF$  réagit avec le gypse avec un mode semblable que celui de  $C_3A$ , mais dans ce cas, la réaction est beaucoup plus lente.

Dans la première étape de la réaction, le  $C_4AF$  produit une forme élevée de sulfoaluminate de calcium qui réagit avec l'excès de  $C_4AF$  pour donner une basse forme de sulfoaluminate.

Ces sulfoaluminates occupent environ 15-20% du volume de solides dans la pâte.

La réaction du  $C_4AF$  dégage peu de chaleur et participe peu au développement de la résistance [7].

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

#### ***I-6-2-5 Conclusion :***

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.

### **I-7 Les caractéristiques du ciment portland :**

#### **I-7-1 La prise ( NA230 NF EN 196-3 ) :**

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

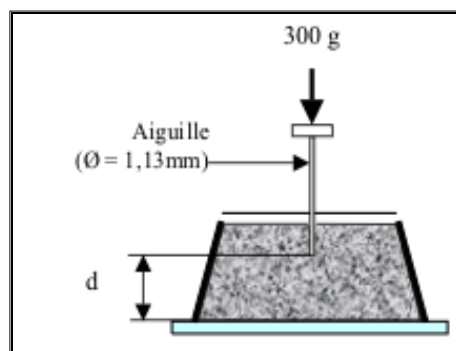


Figure 1-9 Détermination du temps de début de prise.

Le début de prise correspond au moment où l'on observe une augmentation de la viscosité, ou raidissement de la pâte, ce qui, dans la pratique, se mesure au moyen de l'aiguille normalisée (appareil de Vicat) et correspond au temps écoulé depuis le gâchage de la pâte jusqu'au moment où l'aiguille s'arrête à une distance ( $d = 6 \text{ mm} \pm 3 \text{ mm}$ ) du fond de l'anneau de 40 mm de hauteur remplie de pâte pure de ciment (voir figure 1-9).

De même, la fin de prise correspond au moment où l'aiguille ne s'enfonce plus dans l'anneau (voir figure 1-10).

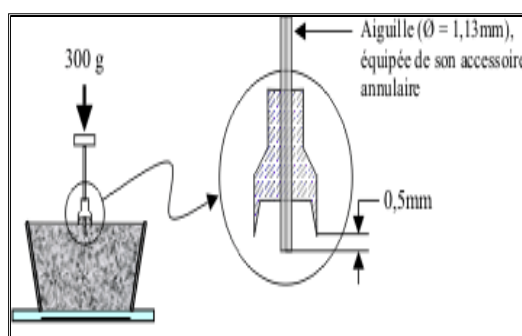


Figure 1-10 Détermination du temps de fin de prise.

Le phénomène de prise du ciment est lié à de nombreux paramètres tels: la nature du ciment, la finesse de mouture du ciment; plus son broyage a été poussé, plus le temps de prise est court, la température; alors qu'à zéro degré la prise est stoppée, plus la température ambiante est élevée plus la prise est rapide, pour un ciment donné le début de prise sera de 18 heures à 2 °C, de 5 heures à 10 °C, de 3h 30 à 20 °C et de 30 min à 35 °C ( figure 1-10), la présence de matières organiques dans l'eau ou dans l'un des autres constituants du béton qui ralentit la prise, l'excès d'eau de gâchage qui a, entre autres inconvénients, une action retardatrice sur la prise ( figure 1.12 ).

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

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

1 h pour les ciments des classes 55 et HP.



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

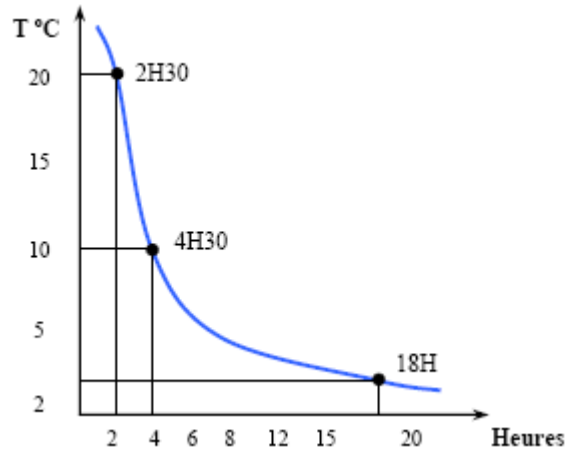


Figure 1-11 Evolution du temps de prise en fonction de la température.

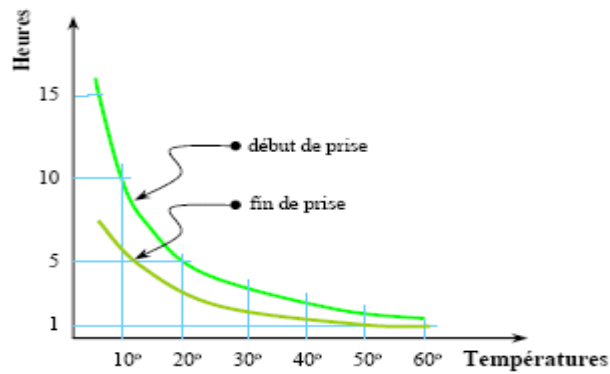


Figure 1-12 Influence de la température sur la prise des ciments.

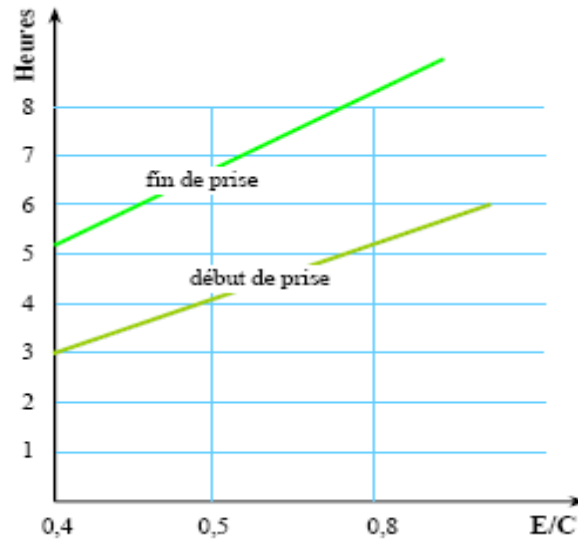


Figure1-13 Influence du E/C sur le temps de prise.

### I-7-2 Le durcissement :

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

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

La prise et durcissement des constituants du clinker :

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

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

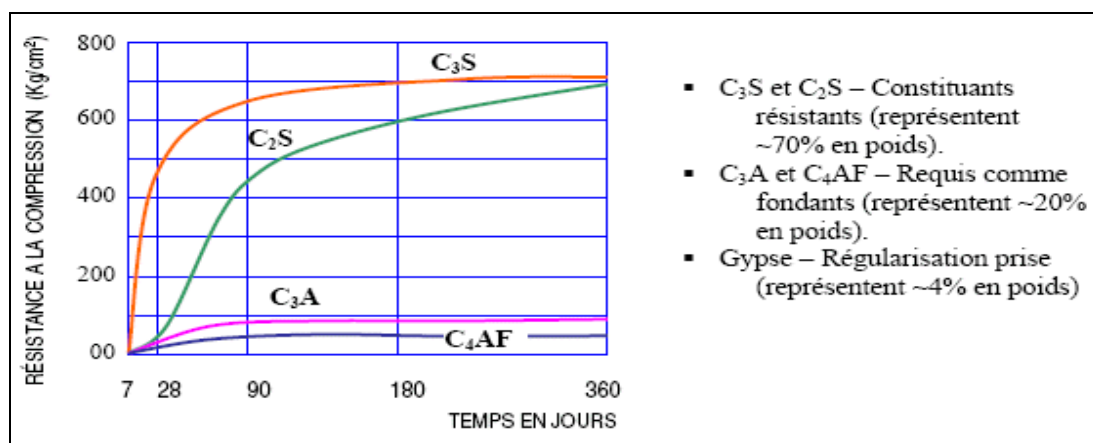


Figure 1-14 Le développement des résistances dans le temps des constituants purs du CPA.

Dans une poudre de ciment portland en contact avec l'eau, l'aluminate tricalcique (C<sub>3</sub>A) réagit en premier, se dissout et se recristallise. Vient ensuite la réaction d'hydrolyse, de l'alite-Silicate tricalcique (C<sub>3</sub>S) forme autour des grains une pellicule de gel et met en même temps des ions Ca<sup>2+</sup> en solution. L'hydrolyse et la recristallisation de (C<sub>3</sub>A) sont rapides.

En gâchant le ciment avec l'eau, on obtient une pâte dans laquelle l'eau entoure chaque grain de ciment en formant un réseau capillaire (voir fig 1.14) Les composés anhydres du ciment sont alors attaqués en surface par l'eau pour produire des composés hydratés.

Dans le cas des silicates de calcium C<sub>3</sub>S et C<sub>2</sub>S, la chaux hydratée se dissout et il se dépose des cristaux de Ca(OH)<sub>2</sub> en plaquettes hexagones alors que les silicates de calcium hydratés forment un gel composé de fines aiguilles à la surface du ciment. Ces aiguilles se développent en dimension et en nombre tout en réduisant les interstices capillaires entre les grains. Quand les aiguilles entre les grains de ciment se rapprochent, la pâte devient plus raide. Cette rigidité est au début faible et peut encore être facilement détruite mécaniquement. C'est le début de la prise. Après quelques heures, les interstices capillaires sont partiellement comblés par le gel.

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

Dans les pâtes de ciment durcies, il reste de ce fait toujours des grains de ciment non hydratés.

L'hydratation des grains de ciment continue non seulement des mois, mais des années durant, pour autant que le gel soit entouré d'eau, car le gel de tobermolite ne peut se former qu'en présence d'eau.

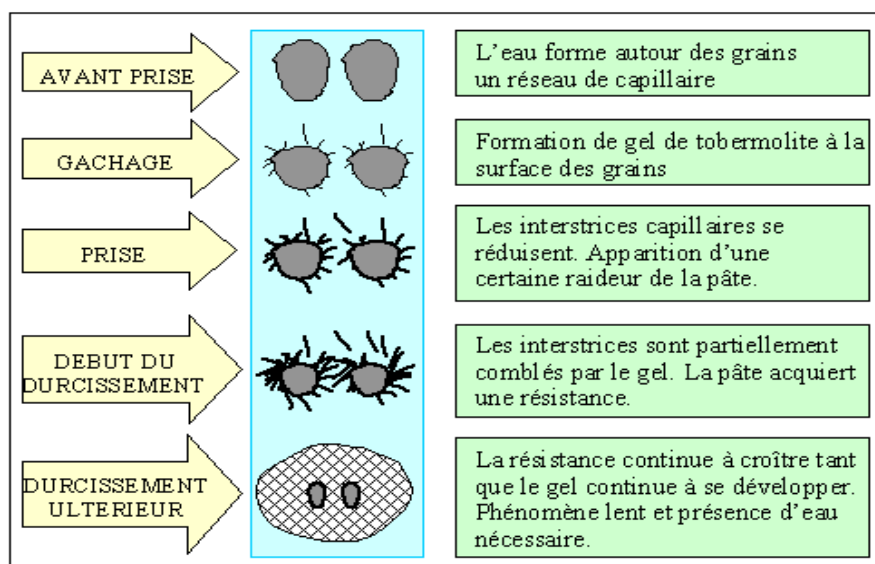
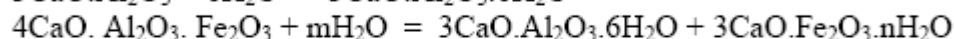
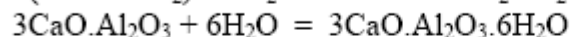
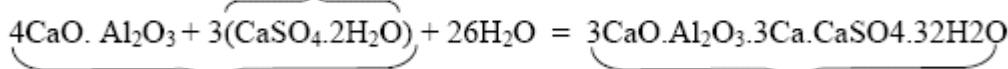


Figure 1-15 L'évolution physico-chimique de la pâte de ciment.

Quelques réactions chimiques importantes:



**GYPSE**



**CIMENT PORTLAND**

**HYDROSULFO-ALUMINATE CALCIQUE**

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

### I-7-3 La Finesse de Mouture ( finesse de Blaine - NA231 NF EN196-6 ):

Elle est caractérisée par la surface spécifique des grains de ciment, exprimée en (cm<sup>2</sup>/g).

Dans les cas courants, elle est de l'ordre de 3000 à 3500 cm<sup>2</sup>/g.

Plus la finesse de mouture est grande, plus la vitesse des réactions d'hydratation est élevée et plus ces résistances mécaniques à un âge jeune sont grandes (voir figure 1-16), par contre plus le ciment est sensible à l'éventellement et plus le retrait est important. En outre, la finesse de mouture influence la plasticité et la cohésion de la pâte de ciment à l'état frais, ainsi que son pouvoir de rétention d'eau et la ressuée.

La surface massique de ciment étudié n'est pas mesurée directement, mais par comparaison avec un ciment de référence dont la surface massique est connue. Il s'agit de faire



passer un volume d'air connu au travers d'une poudre de ciment. Toutes choses étant égales par ailleurs, plus la surface massique de cette poudre est importante et plus le temps  $t$  mis par l'air pour traverser la poudre est longue, Dans les conditions normalisées décrites, la surface est proportionnelle à  $\sqrt{t}$ .

L'appareil utilisé pour déterminer la finesse de mouture de ciment est appelé «Perméabilimètre de Blaine». Cet appareil est schématisé sur figure (1.17).

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

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

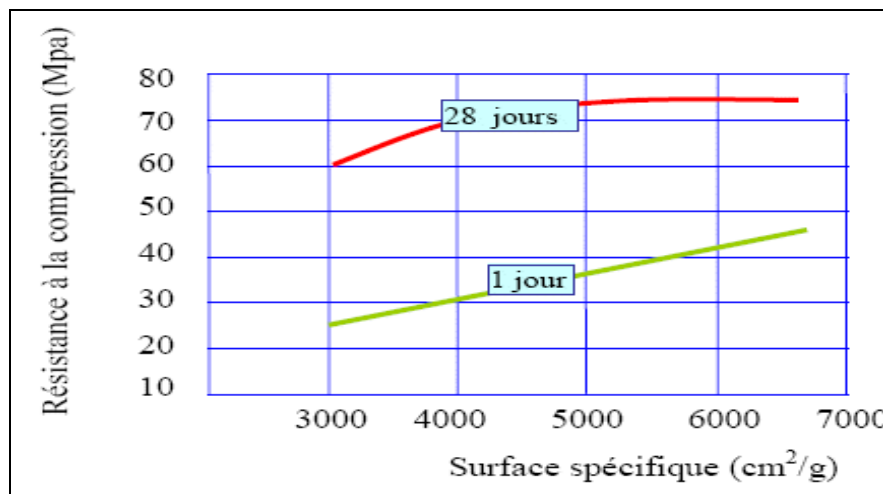


Figure 1-16 Influence de la surface spécifique sur la résistance à la compression.

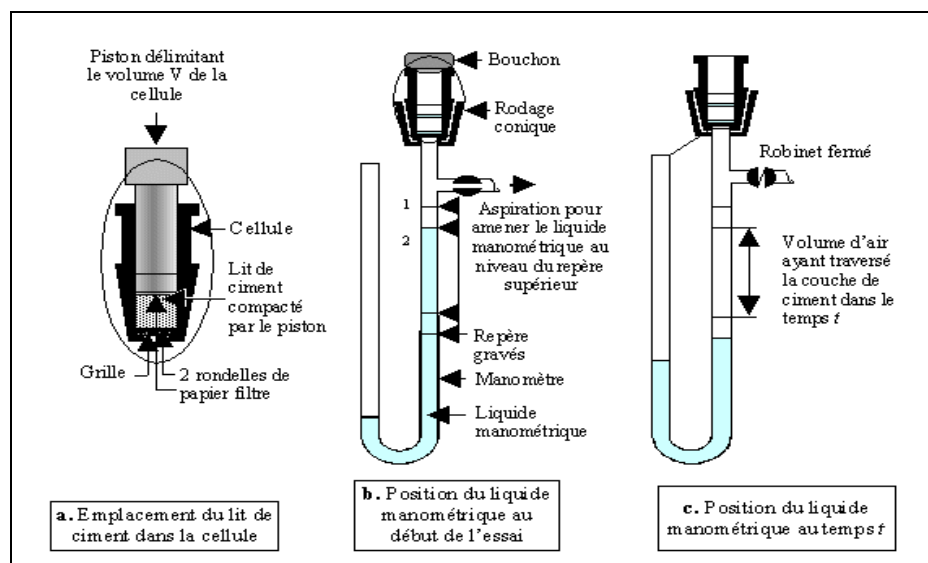


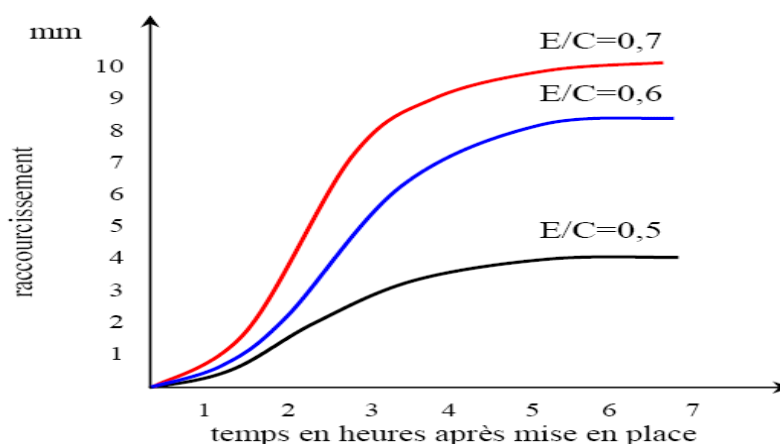
Figure 1-17 Principe de fonctionnement de Perméabilimètre de Blaine.

**I-7-4 Le Retrait ( NA440 NF P15 433 ) :**

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

C'est le retrait qui est cause des fissures que l'on observe dans des pièces en béton. En fait il existe plusieurs types de retrait :

- ⤴ Le retrait avant prise dû essentiellement à la perte prématurée d'une partie de l'eau de gâchage par évaporation et dont l'amplitude est dix fois celle du retrait hydraulique classique. Ce retrait qui provoque des contraintes de traction supérieures à la résistance du béton à la traction, qui est alors pratiquement nulle, se traduit par l'apparition, à la surface du béton encore plastique, de grosses crevasses peu profondes, pouvant être refermées par talochage.
- ⤴ Le retrait hydraulique, qui découle d'une part de la contraction Le Chatelier (le volume des hydrates est inférieur au volume des constituants de départ) et d'autre part du retrait de dessiccation (contraction au séchage), est de l'ordre de 0,2 à 0,4 mm/m pour les bétons. Dans le cas de béton à faible rapport E/C, la dessiccation d'origine "endogène" (consommation de l'eau de gâchage pour hydratation) peut être prépondérante sur la dessiccation par échange avec le milieu externe.
- ⤴ Le retrait thermique, qui est dû à la contraction du béton lors de son refroidissement. L'importance du retrait hydraulique, en dehors du facteur de temps, est fonction de nombreux paramètres parmi lesquels:
  - ⤴ la nature du ciment .
  - ⤴ le dosage en eau (figure 1-18).
  - ⤴ la propreté des sables.
  - ⤴ la forme et la dimension des granulats.



**Figure 1-18 Influence du E/C sur le retrait plastique des mortier.**

**I-7-5 Chaleur d'hydratation ( EN196-9 NF P15-436 ) :****Domaine d'application :**

La présente Norme européenne décrit une méthode de mesure de la chaleur d'hydratation des ciments par calorimétrie semi-adiabatique, dite méthode de Langavant.

L'essai a pour but de mesurer en continu la chaleur d'hydratation du ciment au cours des tout premiers jours.

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

**Principe :**

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

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

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

-la finesse de mouture: plus le ciment est broyé fin, plus la chaleur d'hydratation est élevée.

-la nature des constituants: les ciments CPA comportant presque exclusivement du clinker dégagent plus de chaleur que des ciments avec constituants secondaires.

-la nature minéralogique du clinker: plus les teneurs en aluminat tricalcique ( $C_3A$ ) et silicate tricalcique ( $C_3A$  et  $C_3S$ ) sont élevées, plus la chaleur d'hydratation est forte la température extérieure (voir tableau 1-6).

N <sup>o</sup>	CONSTITUANTS	COMPORTEMENT DES CONSTITUANTS PURS	CHALEUR DEGAGEE
1	$C_3S$	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Fait prise et durcit rapidement.</li> <li>▪ Haute résistance atteinte à <i>court terme</i></li> </ul>	120 cal / gr
2	$C_2S$	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Réagit lentement</li> <li>▪ Haute résistance atteinte à <i>long terme</i></li> </ul>	62 cal / gr
3	$C_3A$	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Prise de façon très désordonnée et rapide</li> <li>▪ Faible résistance</li> </ul> <p style="text-align: center;"><i>(Pour régulariser la prise du <math>C_3A</math>, il faut ajouter du gypse)</i></p>	207 cal / gr
4	$C_4AF$	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Faible résistance</li> </ul>	100 cal / gr

**Tableau 1-6 Le Comportement et le dégagement de chaleur des constituants du clinker.**

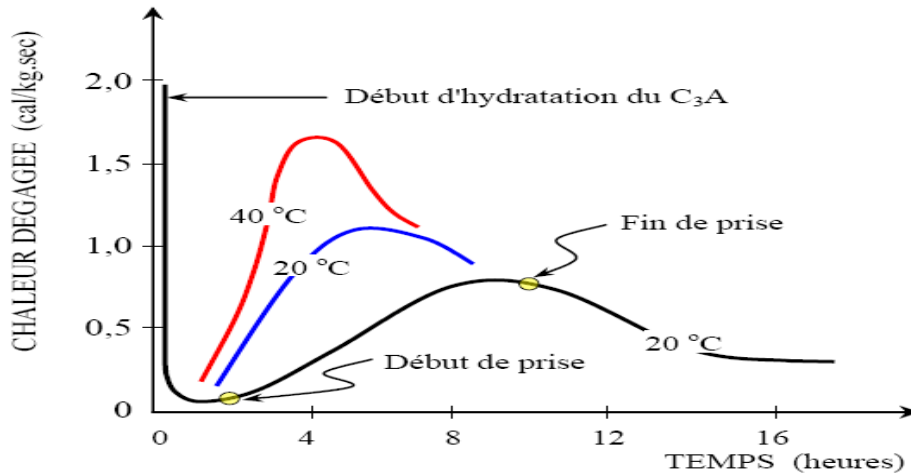


Figure 1-19 Chaleur dégagée lors de l'hydratation du CPA .

### I-7-6 Résistance à la compression ( NA 234 EN 196-1) :

Les résistances mécaniques des ciments sont déterminées par les essais sur mortier dit "normal", à 28 jours d'âges en traction et en compression des éprouvettes (4 x 4 x 16) 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 (voir Figure 1-20).

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

Le sable utilisé est un sable appelé "sable normaliser CEN EN 196-1".

Pour chaque type de ciment, il existe effectivement plusieurs classes de résistances pour lesquelles les fabricants garantissent des valeurs minimales et maximales.

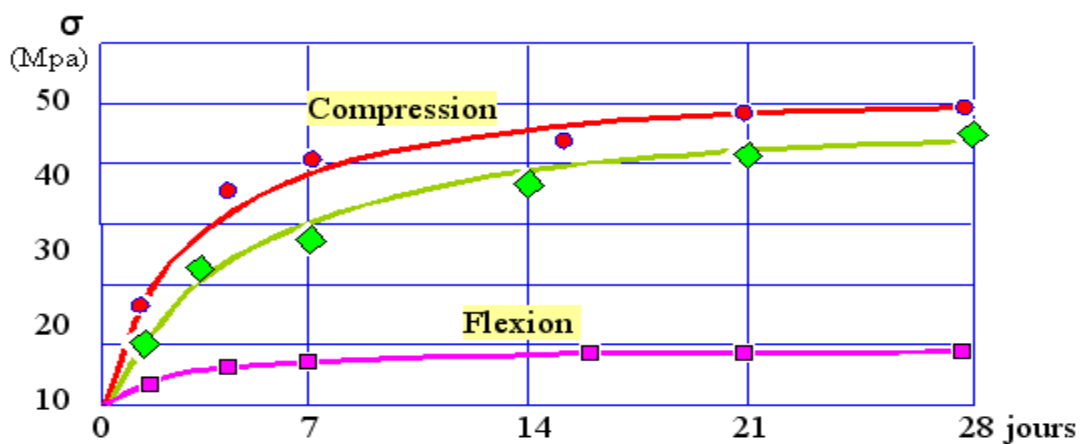


Figure 1-20 Résistance du mortier normal



## 2ème partie : Les ajouts minéraux

### I-8 Généralités :

Les ajouts cimentaires sont des matériaux minéraux que l'on mélange au ciment Portland afin d'améliorer les propriétés du mortier ou du béton grâce à une activité hydraulique et ou pouzzolanique. L'utilisation d'ajout cimentaire (calcaire) dans les industries du ciment et du béton présente des avantages techniques, économiques et écologiques.

#### I-8-1 Avantages techniques :

D'abord, l'incorporation de particules très fines dans un mélange de béton permet d'améliorer sa maniabilité et de réduire le besoin en eau à une consistance donnée .

L'ajout cimentaire (calcaire) améliore généralement la résistance, l'imperméabilité et la ténacité aux attaques chimiques. Enfin, parce qu'ils permettent une moindre chaleur d'hydratation des ciments mélangés, l'ajout cimentaire (calcaire) améliore la résistance à la fissuration.

#### I-8-2 Avantages économiques :

Typiquement, le ciment Portland est le composant le plus coûteux d'un mélange de béton, puisqu'il est un matériau à forte intensité d'énergie. La plus part des matériaux (ajouts) susceptibles de remplacer le ciment dans le mortier ou béton sont des sous-produits, et, à ce titre, demandent relativement moins d'énergie, sinon aucune, et sont beaucoup moins coûteux que le ciment Portland.

Toutefois, la distance qui sépare la source des ajouts cimentaires et le coût élevé du transport qui en résulte risquent de l'emporter sur leurs avantages économiques potentiels. De même, le manque de stockage abordable est parfois une barrière à leur utilisation dans certains marchés. Bien qu'il soit difficile à prédire, le prix des ajouts cimentaires pourrait se comparer à celui du ciment si la demande en béton ne diminuait pas, dans ce monde que menace le CO<sub>2</sub>. Et c'est bien le gaz carbonique (dioxyde de carbone) qui pourrait finalement décider de la valeur de ces denrées.

#### I-8-3 Avantages écologiques :

La production d'une tonne de ciment Portland libère dans l'atmosphère une quantité quasi équivalente de gaz carbonique (CO<sub>2</sub>). De fait, le remplacement du ciment Portland par des ajouts cimentaires réduit d'autant les émissions de CO<sub>2</sub>. En général l'utilisation de calcaire comme ajouts cimentaires ne demande pas un traitement à forte intensité d'énergie.



Il convient donc de considérer tous les paramètres avant d'établir les avantages écologiques de l'ajout cimentaire calcaire sur le ciment.

### **I-9 Classification des ajouts minéraux :**

Selon la norme [EN 2006] paragraphe 3.1.5, les ajouts minéraux dans le ciment sont classés en actifs et inertes.

On distingue quatre classes d'ajouts minéraux :

#### **I-9-1 Les ajouts minéraux actifs :**

##### ***I-9-1-1 La pouzzolane :***

Les pouzzolanes sont des matériaux, naturels ou artificiels, capables de réagir en présence d'eau avec l'hydroxyde de chaux pour donner naissance à des composés nouveaux, stables, peu solubles dans l'eau et possédant des propriétés liantes [12].

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

##### - Pouzzolane naturelle :

Est un produit d'origine volcanique essentiellement composé de silice, d'alumine et d'oxyde de fer ayant naturellement des propriétés pouzzolaniques. Elle peut être d'origine volcanique: verre volcanique, ponce, rhyolite, tufs, zéolite ou d'origine sédimentaire: terre à diatomées, diatomites.

##### -Pouzzolane artificielle :

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

Le professeur Massaza classe les pouzzolanes en trois catégories [12]:

- Les constituants actifs: phase vitreuse plus au moins altérée, opale, terre de diatomées, zéolites cristallisées.
- Les constituants inertes: phase cristallisée autre que les zéolites.
- Les constituants nocifs: substances organiques et argiles gonflantes.

##### Propriétés et caractéristiques des pouzzolanes :

Les pouzzolanes sont des roches " acides " ayant des teneurs élevées en silice et en alumine



(entre 70 et 80% pour les deux composants ensemble), puis en fer, en alcalins, en magnésie et en chaux.

Les pouzzolanes naturelles d'origine sédimentaire ont des teneurs en silice encore plus élevées (cas des squelettes siliceux de micro-organismes).

Les quantités de chaux sont limitées, ce qui explique par ailleurs, la capacité des pouzzolanes à fixer la chaux [13] et [14].

Les pouzzolanes sont formées surtout d'éléments vitreux. Elles sont plus au moins réactives. La réactivité est l'aspect chimique de fixation de la chaux.

L'activité pouzzolanique s'explique par une attaque lente de la silice et de l'alumine des pouzzolanes par l'hydroxyde de chaux (portlandite).

Des tests chimiques basés sur la quantité de chaux absorbée ou sur la vitesse de fixation ne suffisent pas pour déterminer la réactivité pouzzolanique .

D'autre part, la connaissance séparée des propriétés de chacun des constituants ne permet pas de prévoir le comportement des mélanges. Seuls les résultats des essais de l'évolution des résistances mécaniques dans le temps permettent de conclure [12] .

Tous les matériaux appelés « pouzzolanes » ne possèdent pas forcément cette propriété.

On peut dans certains cas , activer les pouzzolanes par certains procédés :

- ♣ ajouts de produits chimiques.
- ♣ broyage à une finesse plus élevée.
- ♣ traitement thermique .

En plus de ces caractéristiques, on cite les propriétés suivantes :

#### a- Propriétés hydrauliques :

La pouzzolane réagit avec l'eau , en présence d'une quantité suffisante de chaux , pour former des hydrates stables , peu solubles et résistants à long terme .

#### b- Propriétés physiques de remplissage :

En plus de leur effet pouzzolanique , elles jouent un rôle de remplissage des pores des produits hydratés et de correcteurs granulaires , ce qui améliore la compacité et diminue la perméabilité .

**I-9-1-2 Fumée de silice :**

La fumée de silice est un sous produit de la fabrication du silicium, de différents alliages de ferrosilicium ou de zircone . Le silicium et les alliages de silicium sont produits dans des fours à arc électrique où le quartz est réduit en présence de charbon (et de fer pour la production de ferrosilicium).

Durant la réduction de la silice dans l'arc électrique, un composé gazeux,  $\text{SiO}$  se forme [15] et s'échappe vers la partie supérieure du four, il se refroidit, se condense et s'oxyde sous forme de particules ultrafines de silice  $\text{SiO}_2$ .

Ces particules sont récupérées dans un système de dépoussiérage . D'un point de vue chimique, la fumée de silice est essentiellement composée de silice (Tableau 1-8).

La teneur en  $\text{SiO}_2$  de la fumée de silice varie selon le type d'alliage produit. Plus la teneur en silicium de l'alliage est élevée plus la teneur en  $\text{SiO}_2$  de la fumée de silice est élevée.

Les fumées de silice produites durant la fabrication de silicium métal contiennent en général plus de 90% de  $\text{SiO}_2$ . La fumée de silice produite lors de la fabrication d'un alliage Fe – Si à 75% a une teneur en silice généralement supérieure à 85%. Du point de vue structural, la fumée de silice est essentiellement composée de silice vitreuse.

Du point de vue morphologique, les particules de fumée de silice se présentent sous forme de sphères ayant des diamètres compris entre  $0.03\mu\text{m}$  et  $0.3\mu\text{m}$  (le diamètre moyen habituel se situant en dessous de  $0.1\mu\text{m}$ ), de telle sorte que la dimension moyenne des sphères de fumée de silice est 100 fois plus faible que celle d'une particule de ciment avec un diamètre moyen de l'ordre de 1/ 10 de micron.

Composés	Silicium ( grise)	Ferro silicium ( grise)	Blanche
$\text{SiO}_2$	93.7	87.3	90.0
$\text{AL}_2\text{O}_3$	0.6	1.0	1.0
CaO	0.2	0.4	0.1
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	0.3	4.4	2.9
MgO	0.2	0.3	0.2
$\text{Na}_2\text{O}$	0.2	0.2	0.9
$\text{K}_2\text{O}$	0.5	0.6	1.3
Perte au feu	2.9	0.6	1.2

**Tableau 1-7 Composition chimique type de certaines fumées de silice [15].**

Les caractéristiques très particulières de la fumée de silice en font une pouzzolane très réactive à cause de sa très forte teneur en silice, de son état amorphe et de son extrême finesse.



Les effets bénéfiques de la fumée de silice sur la microstructure et les propriétés mécaniques du béton sont dus essentiellement à la rapidité à laquelle la réaction pouzzolanique se développe et à l'effet physique particulier aux particules de fumée de silice qui est connu sous le nom d'effet filler.

Ces deux effets entraînent à la fois une forte augmentation de la compacité et une amélioration des résistances mécaniques du fait de la réaction pouzzolanique des fumées de silice. Ajoutons cependant que la fumée de silice est un matériau peu économique. La fumée de silice est aussi appelée micro silice ou fumée de silice condensée, mais le terme fumé de silice est le plus généralement utilisé.

La densité de la fumée de silice est généralement de 2.2, mais aussi un peu plus élevée lorsque la teneur en silice est plus faible.

Elle est moins dense que le ciment Portland dont la densité est ( 3,10).

Ce produit se présente sous la forme d'une poudre ultra fine de couleur claire ou grise. Lorsque l'on considère les propriétés du béton aux fumées de silice, il importe de garder à l'esprit qu'on utilise ces dernières de deux manières différentes :

- ▲ Comme substitue du ciment, pour réduire les quantités de ciment utilisées, en général pour des raisons d'économie
- ▲ Comme ajout, pour améliorer les propriétés du béton, aussi bien à l'état frais qu'à l'état durci.

### ***I-9-1-3 Le laitier de haut fourneau :***

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

D'un point de vue chimique (tableau 1.8), les laitiers ont une composition relativement constante à laquelle le métallurgiste porte une certaine attention puisque tout écart par rapport à cette composition chimique optimale se traduit par une augmentation des coûts énergétiques assez importants et donc à des coûts de production plus élevés pour la fabrication de la fonte.

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



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

**Tableau 1-8 Composition chimique type de laitiers de haut fourneau [16]**

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

La réactivité du laitier peut être augmentée de trois façons :

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



**Figure 1-21 Laitier haut fourneau chloré ( cimentrie M'sila )**

**I-9-1-4 Les cendres volantes :**

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

Cependant, comme on peut le voir dans le tableau (1-10) la composition chimique des cendres volantes qui proviennent de différentes usines peut varier beaucoup. Les particules de cendres volantes peuvent avoir des formes très différentes les unes des autres. Elles peuvent avoir une forme sphérique, avec une distribution granulométrique semblable à celle du ciment Portland, elles peuvent contenir des sphères creuses et même dans certains cas, elles peuvent contenir seulement des particules angulaires.

Les cendres volantes se divisent en trois catégories :

- ⤴ Les cendres silico- alumineuses ( cendre de houille).
- ⤴ Les cendres sulfocalciques ( cendre de lignite ).
- ⤴ Des cendres non typifiées de composition irrégulière ou de propriétés assez incertaines.

Composés	Classe F	Classe F	Classe C	Sulfo – calcique	Sulfo-calcique
SiO <sub>2</sub>	59.4	47.4	36.2	24.0	13.5
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	22.4	21.3	17.4	18.5	5.5
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8.9	6.2	6.4	17.0	3.5
CaO	2.6	16.6	26.5	24.0	56
MgO	1.3	4.7	6.6	1.0	1.8
Na <sub>2</sub> O	2.2	0.4	2.2	0.8	.....
SO <sub>3</sub>	2.4	1.5	2.8	8.0	15.1
Perte au feu	2.0	1.5	0.6	.....	.....
SiO <sub>2</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	90.7	74.9	60	59.5	22.5
Chaux libre	.....	.....	.....	.....	28.0

**Tableau 1-9 Composition chimique type de certaines cendres volantes [17].**

La plupart des particules ont un diamètre compris entre 1µm et 100 µm , leur surface spécifique Blaine se situe généralement entre 250 et 600 m<sup>2</sup>/kg . La grande surface spécifique des cendres volantes signifie que le matériau réagit facilement avec l'hydroxyde de calcium.

D'une façon générale, l'introduction des cendres volantes dans le béton diminue la porosité et la perméabilité. Elle diminue la sensibilité du béton aux eaux agressives, en fixant progressivement la chaux. La cendre volante permet au béton de conserver sa compacité et de



rester imperméable. Il est reconnu que l'emploi des ciments aux cendres volantes entraîne une diminution du retrait hydraulique et thermique du béton.

En plus des propriétés décrites, lorsqu'elles sont utilisées comme une fraction liante, les cendres volantes jouent également d'autres rôles dans le béton tels que l'amélioration de l'ouvrabilité, la diminution de la proportion d'eau pour le béton frais et l'imperméabilité des surfaces.

### **I-9-2 Principaux ajouts minéraux inertes :**

Selon certains chercheurs, les particules de clinker de dimension supérieure à 60  $\mu\text{m}$  ne subissent pas une hydratation complète même au cours du durcissement à long terme, pour cette même raison les particules de clinker de telle dimension pourraient être remplacées par celles de matériaux inertes (N F P 18- 305).

En outre, les particules les plus fines d'un ajout inerte servent à remplir les pores de la pâte de ciment, ils jouent le rôle de micro agrégats.

Ce sont des matériaux quasiment inertes, organiques naturels ou synthétiques spécialement sélectionnés qui, par leur composition granulométrique améliorent les propriétés physiques du ciment Portland (ouvrabilité, pouvoir de rétention d'eau, ...). Parmi ces additifs on distingue la poussière et les fillers calcaires.

#### ***I-9-2-1 La poussière :***

La poussière est une matière à particules fines, récupérée à la sortie du four, lors de son passage avec la fumée, sa finesse est comprise entre 7000 et 9000  $\text{cm}^2/\text{g}$ . Le ciment composé avec la poussière a des caractéristiques mécaniques et une résistance au gel-dégel comparable à celle du ciment sans ajouts. Le temps de prise, le fluage et le retrait augmente avec l'augmentation du pourcentage d'ajout.

#### ***I-9-2-2 Fillers calcaires :***

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

Les fillers se différencient les uns des autres par :

- ♣ leur origine, leurs compositions chimiques et minéralogiques, leurs défauts de structure, les impuretés qui'ils contiennent.
- ♣ leur finesse, la forme des grains, leur état de surface.
- ♣ leur dureté, leur porosité.



Un filler est dit calcaire s'il contient au moins 90% de carbonate de calcium. Dans les autres cas le filler est désigné par le nom de sa roche d'origine.

Les différents résultats montrent que les fillers calcaires ajoutés à un CPA peuvent jouer plusieurs rôles :

- ⤴ Un rôle de remplissage en substitution du ciment dans les éléments fins de la courbe granulométrique (bétons ouvrables retenant mieux l'eau).
  
- ⤴ Un rôle rhéologique par leur pouvoir fluidifiant sur la pâte interstitielle.
- ⤴ Un rôle chimique et physique conduisant à l'accélération de l'hydratation du  $C_3S$  et du  $C_3A$  et à la formation de carboaluminates, germes de cristallisation et points d'ancrage des hydrates.
- ⤴ Un rôle physique en permettant un arrangement initial différent ce qui réduit l'épaisseur entre la pâte et le granulat.

En fonction de différents facteurs (la composition chimique, la concentration de l'activant, la température de cure, ...etc.), les propriétés du ciment de laitier sont impressionnantes et des fois meilleures que celles du ciment Portland ordinaire; ce qui emmène à penser de pouvoir les améliorer pour obtenir des ciments de haute performance. Une des méthodes d'amélioration de ses propriétés se base sur l'utilisation des additions minérales qui agissent sur les propriétés chimiques ou physiques du béton exactement comme dans le cas de la fabrication des ciments Portland ordinaires.

Nous avons donc élaboré une stratégie d'étude qui se portera à la fois sur les effets des additions minérales sur le ciment au laitier activé tout en prenant en compte les principaux facteurs influant sur ses propriétés, et sur la recherche de la possibilité d'activation alcaline du laitier par une addition minérale au lieu des substances alcalines. Nous avons choisi pour cela d'utiliser la technique des plans d'expériences, idéale pour ce genre d'études



## Chapitre II

### Le laitier et les ciments au laitier

#### II.1 Définition :

Les laitiers de haut fourneau sont un sous-produit de la fabrication de la fonte des usines sidérurgiques. La production des laitiers est liée à celle des fontes à partir desquelles seront élaborés les aciers [18].

Pour chaque tonne de fonte la quantité de laitier produite dépend principalement de la masse des oxydes non réductibles enfournés, et est donc en raison inverse de la teneur en fer du minerai de fer.

L'utilisation majeure des laitiers des hauts-fourneaux est surtout dans le domaine de construction comme liant ou aussi comme granulats pour béton et travaux routiers, ainsi que pour la fabrication de vitrocéramiques, pierres artificielles, etc [19].

Les laitiers ont une composition relativement constante à laquelle le métallurgiste porte une certaine attention puisque tout écart par rapport à cette composition chimique optimale se traduit par une augmentation des coûts énergétiques assez importants (1 800 MJ/t de laitier soit 3,5 % du bilan énergétique du haut-fourneau [19]) et donc à des coûts de production plus élevés pour la fabrication de la fonte [18].

#### II.2 Caractéristiques du laitier :

Les laitiers sont des silico-aluminates de calcium et de magnésium, ils sont constitués essentiellement (> 90 %) de quatre oxydes (  $\text{SiO}_2$  –  $\text{Al}_2\text{O}_3$  –  $\text{CaO}$  –  $\text{MgO}$  ).

Ils contiennent également des petites quantités des oxydes (  $\text{TiO}_2$  –  $\text{MnO}$  –  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ) et des quantités insignifiantes des sulfures (  $\text{CaS}$  –  $\text{MnS}$  –  $\text{FeS}$  ) [2].

Cette composition dépend de plusieurs facteurs; elle varie suivant la nature du minérale, du métal à obtenir, le combustible utilisé et les conditions de refroidissement [19].

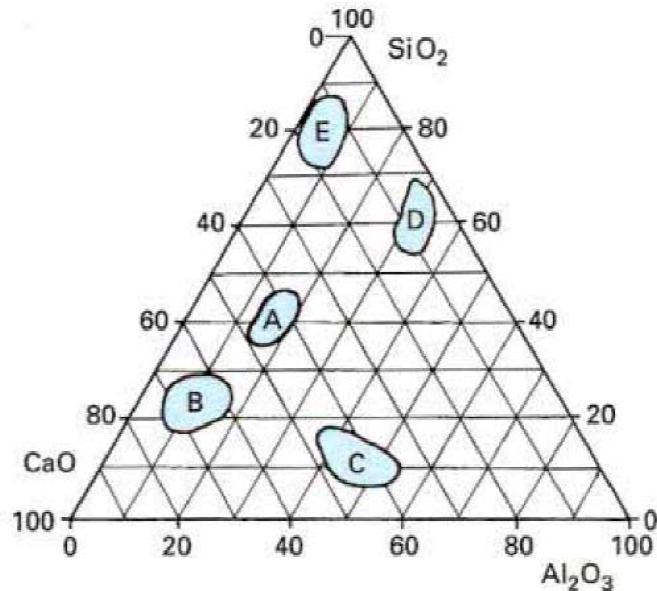
Le tableau ( 2.1 ) présente la variation des principaux éléments constituant le laitier du haut fourneau:

Element chimique	Pourcentage [%]
CaO	30 à 50
SiO <sub>2</sub>	28 à 38
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8 à 24
MgO	1 à 18
SO <sub>3</sub>	1 à 2,5
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1 à 3
MnO	1 à 3

Tableau 2.1 Variation de la composition chimique du laitier [20].



La figure 5 compare la position des laitiers et celle de divers matériaux dans le diagramme triangulaire chaux-silice-alumine:



A	laitiers	D	pouzzolanes et cendres volantes
B	ciments Portland	E	verres
C	ciments alumineux		

Figure 2.1 Situation du laitier de haut fourneau dans le système ( CaO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ) [19].

### II.3 Les différentes formes de laitiers :

Les laitiers peuvent se présenter sous différentes formes et avec une granulométrie s'étend de 0 à 300 mm, selon les méthodes de refroidissement de ces derniers :

#### II.3.1 Laitier rocheux (ou cristallisé) :

Le laitier rocheux s'obtient en déversant le laitier liquide dans une fosse et en l'y laissant refroidir le plus lentement possible. Dans d'autres cas, le laitier est d'abord versé dans des cuves en acier coulé placées sur des chariots circulant sur voie ferrée. Les fosses sont alors installées à distance du haut-fourneau, et le laitier y est déversé par basculement des cuves. Après refroidissement, souvent avec arrosage, le laitier est extrait de la fosse par des moyens classiques en travaux publics : pelles sur chenilles et camions de chantier [19].

#### II.3.2 Laitier bouleté :

Le bouletage consiste à refroidir le laitier dans des conditions telles qu'il se forme des boulettes quasi sphériques, dont l'intérieur est creux. Ce traitement se pratique dans une installation qui comprend [19]:



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

### II.3.3 Laitier expansé :

C'est un laitier cristallisé dans lequel, pendant le refroidissement, on a provoqué la formation d'alvéoles. Plusieurs méthodes peuvent être employées pour favoriser l'expansion, elles comprennent toujours une injection d'eau (environ  $1 \text{ m}^3/\text{t}$  de laitier), complétée éventuellement par une injection d'air et de vapeur d'eau [19].

### II.3.4 Laine de laitier et laine de roche :

La laine de laitier et la laine de roche sont fabriquées par filage d'un matériau liquide ; le filage nécessite  $1000$  à  $5000 \text{ m}^3$  d'air par tonne de laitier. La laine de laitier provient du laitier sortant de la halle de coulée du haut-fourneau ; c'est une méthode peu employée, car les conditions pour un bon filage [liquide de viscosité faible et régulière, ayant donc une température suffisamment élevée et une composition bien déterminée] sont plus facilement remplies quand on opère la refusion du laitier rocheux dans un four à cuve analogue au cubilot : on peut y ajuster le lit de fusion, qui comprend alors au maximum 80 % en masse de laitier, le complément étant du silex, du basalte, voire du minerai de fer [19].

### II.3.5 Laitier granulé

#### II.3.5.1 Fabrication :

##### a) Granulation :

Le laitier granulé est obtenu en mettant brutalement en contact le laitier liquide avec une importante quantité d'eau (environ  $10 \text{ m}^3/\text{t}$  de laitier), de façon à le diviser en petits grains et à le refroidir très vite [19].



On exploite différents procédés de granulation [19]:

- **la granulation en bassin** consiste à verser le laitier liquide dans un bassin de grandes dimensions rempli d'eau ; ce procédé a l'inconvénient de fabriquer une fraction parfois importante de laitier cristallisé à cause de l'augmentation de la température de l'eau pendant la granulation ;
- **la granulation en rigole** se fait en laissant couler le laitier liquide dans une goutte parcourue par un fort courant d'eau, qui sert à la fois à granuler et à transporter le sable de laitier
- **la granulation en pot** (figure 1.22) est une amélioration de la précédente : le laitier liquide est divisé et refroidi par un ensemble de jets d'eau issus de fentes pratiquées dans une boîte alimentée en eau ; ce système, qui est le seul mis en place dans les installations nouvelles ou renouvelées, permet d'optimiser le débit d'eau, et, en modifiant les fentes d'injection de l'eau, d'optimiser les conditions de granulation.

#### b) Filtration :

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

- **Le fond filtrant** où la pulpe d'eau et de laitier est versée dans un bassin dont le fond est constitué par une nappe de tuyaux en ciment percés de trous et recouvert de gravier grossier. La filtration se fait vers les tuyaux, d'abord à travers la couche de laitier granulé, puis à travers le gravier. Après l'évacuation du laitier par un pont muni d'un grappin, on souffle de l'air comprimé dans les tuyaux pour prévenir le colmatage des trous (figure 1.24).

Ce système est très efficace, mais coûteux à l'installation et en frais d'entretien.

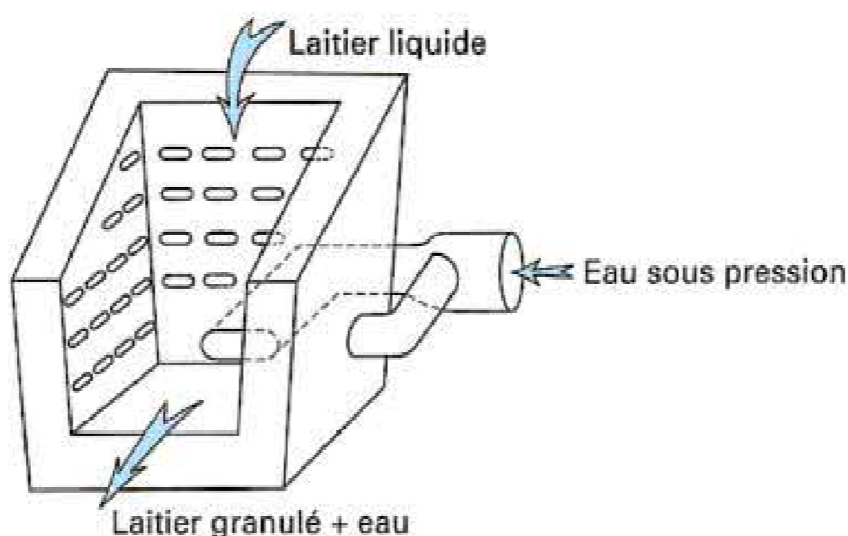


Figure 2.2 – Pot de granulation [19].

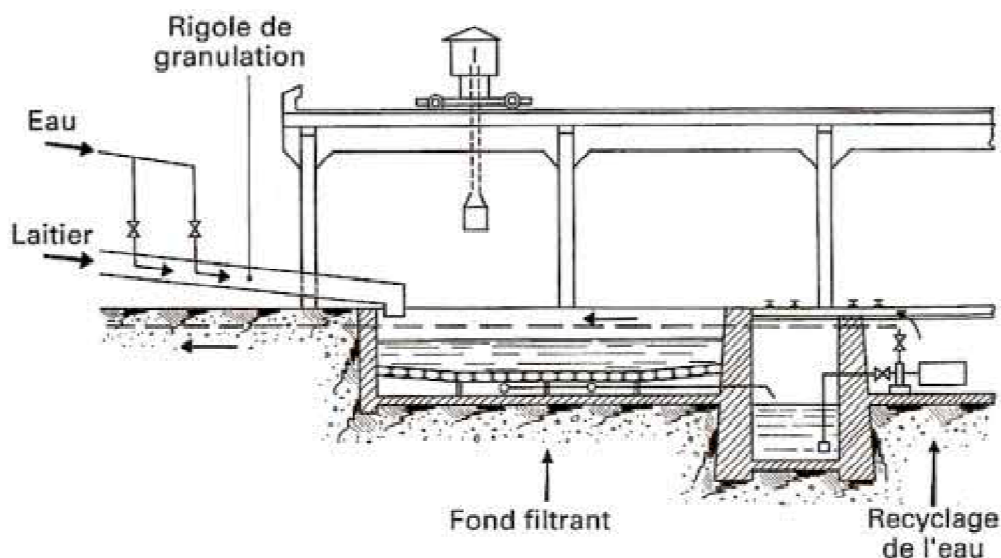
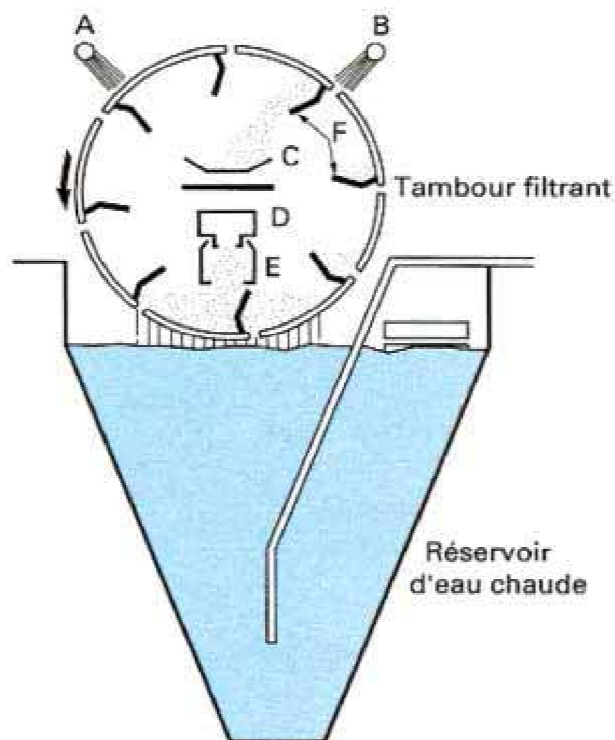


Figure 2.3 Granulation en rigole et fond filtrant [19].

- **Le tambour INBA** développé par la société P. Wurth, où le laitier est séparé de l'eau dans un tambour rotatif muni de tamis filtrants dont l'efficacité est maintenue par un décolmatage à l'air et à l'eau ( figure 2.4 ). Un convoyeur à bande situé dans l'axe du tambour évacue le granulé égoutté. Ce système tend à se généraliser à cause de son faible encombrement, et de son coût inférieur à celui d'un fond filtrant [21].



- |                           |                    |
|---------------------------|--------------------|
| A décolmatage à l'eau     | D distributeur     |
| B décolmatage à l'air     | E déflecteur       |
| C brin libre du convoyeur | F ailettes axiales |

Figure 2.4 – Tambour INBA [Coupe] [19].



### II.3.5.2 Description du produit :

Le laitier granulé se présente sous la forme d'un sable de dimensions 0 à 5 mm, et dont la dimension médiane est de l'ordre du millimètre. La trempe subie par le laitier ayant empêché sa cristallisation, la principale caractéristique du granulé est d'être, pour 85 à 100 %, sous la forme vitreuse ; il s'agit d'un liquide surfondu à très forte viscosité, donc en état instable et susceptible de cristalliser ; la chaleur latente de cristallisation est d'environ 200 MJ/kg. L'état instable du laitier granulé est à l'origine de sa capacité à faire prise à la manière d'un liant hydraulique ; cette hydraulicité dépend de la composition du laitier et augmente avec la surface spécifique des grains. D'une part, des formules empiriques établissent une correspondance entre l'analyse et l'hydraulicité : par exemple, on considère que cette propriété est à un niveau suffisant quand l'indice de Keil:

$$K = \frac{(\text{CaO} + \text{CaS} + \text{MgO} + \text{Al O})^{2.3}}{\text{SiO}_2}$$

est supérieur à 1,5. D'autre part, on mesure la faculté qu'a le laitier granulé de développer une surface spécifique importante lors des manutentions, malaxages ou compactages : par exemple, on détermine le coefficient  $\alpha$  (indice d'activité hydraulique):

$$\alpha = \text{SF}/1000$$

où S: est la surface spécifique des fines naturelles du laitier, et F le pourcentage de fines produites par un broyage normalisé [21].

Le coefficient  $\alpha$  varie généralement entre 15 et 100 [20] :

- pour  $\alpha < 15$ , le laitier est très pauvre;
- pour  $15 < \alpha < 40$ , le laitier est pauvre;
- pour  $40 < \alpha < 55$ , le laitier est suffisant;
- pour  $55 < \alpha < 85$ , le laitier est bon;
- pour  $85 < \alpha < 100$ , le laitier est très bon;
- pour  $\alpha > 100$ , le laitier est excellent.

Pour un laitier habituel, la teneur en eau résiduelle varie de 8 % à 15 % [19].



## II.4 Emploi du laitier vitrifié en cimenterie :

### II.4.1 Ciment au laitier :

Après les travaux de L. Vicat vers 1818 et de E. Langen en 1862, vint les travaux de G. Pressing qui ont permis le lancement de la première fabrication industrielle du ciment au laitier en Allemagne en 1882. En 1900 le ciment au laitier fut utilisé pour la construction du métro à Paris.

Actuellement, l'introduction du laitier dans le cycle de fabrication du ciment par des teneurs variables, permet une réduction considérable du coût énergétique de la fabrication des ciments (réduction des combustibles de 30 à 40 %) [34], ainsi que l'obtention des ciments présentant des caractéristiques physico-chimiques intéressantes telles que la résistance aux milieux agressifs, et le faible retrait.

Cette utilisation du laitier se fait:

- Soit, en mélange avec le clinker, avant le broyage pour la fabrication des ciments Portland au laitier [19];
- Soit, en mélange avec du calcaire comme matière première pour la préparation du clinker par voie sèche, qui est souvent mélangé à son tour avec du laitier (d'après les travaux de Neville, 2000) [34];
- Soit, par broyage du laitier à une finesse appropriée pour être utilisé seul comme liant, en présence d'un catalyseur à base d'alcalis ou de sulfate [34].

### II.4.2 Qualités demandées au laitier destiné à la cimenterie :

- a) Forte hydraulité**, et donc taux de vitrification élevé ( $\geq 90$  %), on emploie donc du laitier granulé ou bouleté) ; teneur en chaux aussi forte que possible, qui favorise la prise. Une teneur en alumine élevée est parfois recherchée parce qu'elle améliore la résistance initiale (en Allemagne, enfourné de la bauxite au haut-fourneau dans ce but) ; l'effet de la teneur en MgO est discuté et ne présente aucun risque de gonflement [19].
- b) Bonne aptitude au broyage**, on doit éviter l'emploi de laitier coulé froid qui donne des grains durs [19].
- c) Teneur en eau inférieure à 10 %**, pour éviter ou limiter les frais de séchage avant broyage [19].



### II.4.3 Caractéristiques et domaines d'emploi :

Pratiquement, le ciment CPJ étant utilisé comme le ciment Portland (CPA), à cause de sa faible teneur en laitier ( $\leq 35\%$ ). Alors, on va s'intéresser aux ciments à forte teneur en laitier (CHF et CLK) [19].

#### II.4.3.1 Évolution de la résistance dans le temps :

La figure ( 1.25 ) compare l'évolution de la résistance à la compression d'un ciment CPA et celle d'un CHF [19]:

- le ciment CHF prend plus lentement au départ, ce qui nécessite de garder le béton humide assez longtemps, et de prendre des précautions quand il faut décoffrer rapidement. Des adjuvants, comme des chlorures, peuvent accélérer la prise ;
- à long terme, la résistance du ciment CHF dépasse celle du CPA, d'où l'emploi du ciment au laitier vient quand la résistance finale doit être élevée.

#### II.4.3.2 Effet de la chaleur d'hydratation :

Les ciments ont une chaleur d'hydratation d'autant plus faible que la teneur en laitier est plus forte ( figure 2.5 ), la température au coeur du béton est donc plus faible avec les fortes teneurs en laitier, ce qui réduit le risque de fissuration et fait conseiller l'emploi des CHF et des CLK pour les grandes masses de béton. La mise en œuvre de ces ciments est plus facile par temps chaud, par contre, par temps froid, ils sont plus sensibles au gel que les autres [19].

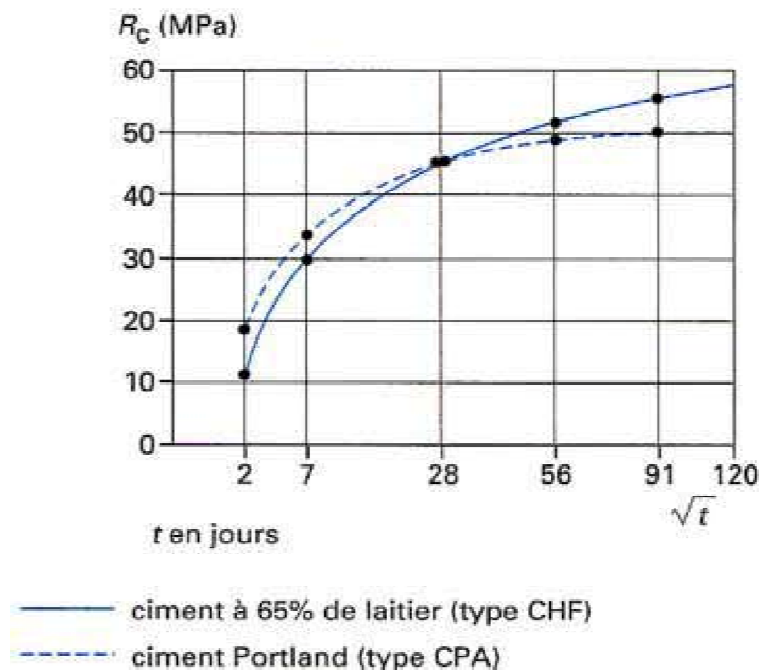


Figure 2.5 – Évolution de la résistance à la compression  $R_c$  de deux ciments en fonction du temps  $t$  [19].

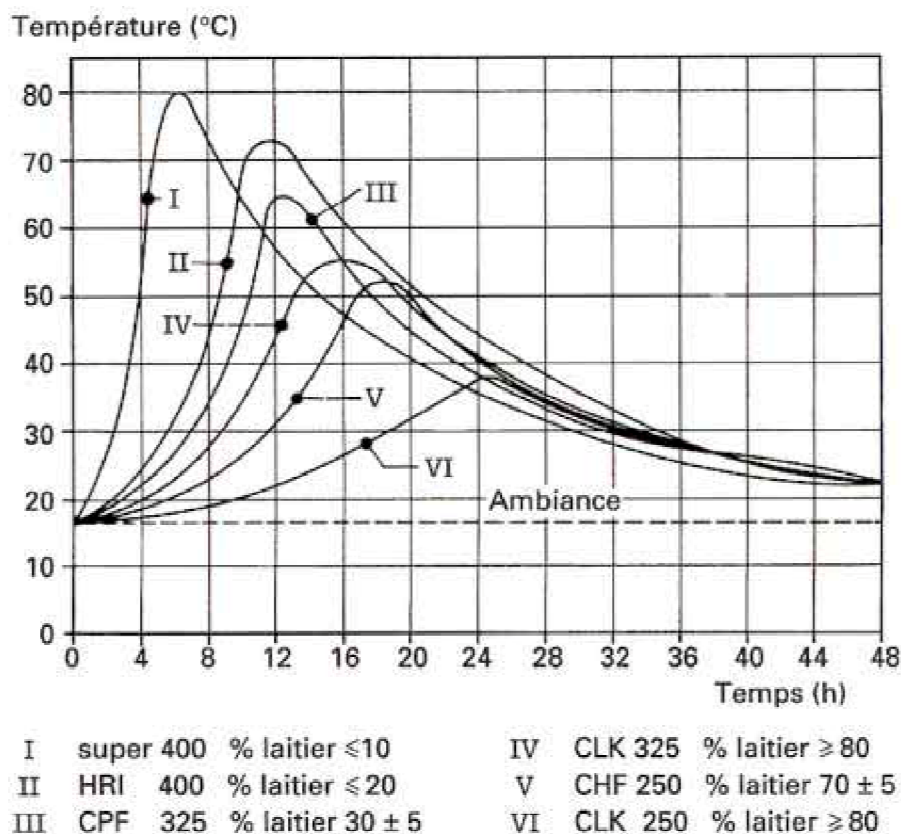


Figure 2.6 – Élévation de la température au moment de la prise du ciment (d'après Lesage) [19].

#### II.4.3.3 Résistance aux agressions chimiques :

Du fait de leur teneur en chaux faible ou nulle, les ciments CHF et CLK sont peu sensibles à l'attaque des eaux acides, des eaux chargées en chlorures ou en sulfates, et des eaux très pures. Ils sont donc recommandés pour les ouvrages marins, les égouts, les travaux dans la nappe phréatique, etc [19].

#### II.5 Prise hydraulique du laitier vitreux :

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

dissolution → concentration → précipitation

La prise est semblable à celle du ciment, à la différence que, ce dernier étant très basique ( $\text{pH}$  du ciment gâché  $\approx 13$ ), son hydratation se déclenche dès l'humidification, alors que, pour une prise rapide, le laitier vitreux doit être activé [19].



## II.6 Méthodes d'activation du ciment au laitier :

L'activation du laitier consiste à assurer la basicité nécessaire pour donner lieu à sa prise hydraulique. On distingue trois types d'activations, selon la nature de l'agent activant utilisé [22]:

### II.6.1 Activation calcique :

La chaux assure un pH suffisant pour permettre le passage en solution de l'alumine et par conséquent, de la silice et de la chaux. Les produits de l'hydratation sont: Les silicates de chaux hydratés (CSH) et l'aluminate tétra calcique ( $C_4AH_{13}$ ), ces derniers consomment l'activant (la chaux).

Dans ce type d'activation, la géhlenite est incompatible avec la phase chaux qui se décompose en (CSH) et ( $C_4AH_{13}$ ), et n'a pas lieu de se former [22].

Les bétons obtenus présentent une faible chaleur d'hydratation (idéal pour les ouvrages de masse).

### II.6.2 Activation par le clinker du ciment Portland :

Lors de l'hydratation, l'activation du laitier est faite par la chaux du clinker. Les composés qui apparaissent à la prise dans les ciments contenant ou non du laitier sont le (CSH), de l'ettringite ( $3CaO.Al_2O_3.3CaSO_4.32H_2O$ ) et de la portlandite [ $Ca(OH)_2$ ]; toutefois, la chaux libre étant d'autant plus utilisée pour l'activation que la teneur en laitier est plus élevée, plus il y a de laitier, moins il y aura de portlandite dans le béton. Dans le cas du béton de ciment CLK, il y en a plus de portlandite.

L'hydratation du laitier activé se déroule beaucoup plus lentement que celle du clinker; la prise est d'autant plus lente que le ciment contient plus de laitier [19].

### II.6.3 L'activation sulfatique :

Cette activation consiste à mélanger le laitier granulé (75 à 80 %) et un composant sulfatique comme le gypse (10 à 20 %), et pour accélérer l'hydratation on ajoute un activant alcalin comme le ciment Portland ordinaire (< 5 %) [23,24].

Le ciment résultant s'appelle le ciment sursulfaté. Le gypse utilisé dans l'industrie des ciments, doit avoir une teneur en sulfate supérieure à 31 %.

Pour obtenir de meilleures propriétés mécaniques il est nécessaire d'avoir un rapport Ca/Si >> 1, ainsi qu'une teneur d'alumine ( $Al_2O_3$ ) supérieure à 13 – 15 % est recommandée pour optimiser le comportement hydraulique [20,23].

Le produit principal de l'hydratation est l'ettringite ( $3CaO.Al_2O_3.3CaSO_4.32H_2O$ ) et le (CSH) [25-26]. La formation de l'ettringite favorise le développement de la résistance au



jeune âge, de la pâte du ciment hydraté; tandis que la formation du (CSH) permette un développement constant de la résistance à long terme [25,27].

#### II.6.4 L'activation alcaline :

L'activation alcaline fut abondamment étudiée (Voinovitch et Dron, 1976), (Glukhoviskij, Zaitsev et Pakhomow, 1983), (Talling et Brandstetr, 1989), (Puertas, 1995) et (Shi et Day, 1995) [28-29]. L'activation alcaline se fait principalement par:

- les alcalis caustiques (dont la formule chimique est R-OH);
- les sels non siliceux provenant d'acides faibles tels que:  $(R_2CO_3)$ ,  $(R_2SO_3)$  et  $(R_2S)$ ;
- les sels siliceux du type  $[R_2O (m) SiO_2]$ .

Où, R représente les ions des métaux alcalins ( $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Li^+$ ) et m représente le module siliceux (module du verre soluble).

Le produit principal de l'hydratation est un gel de (CSH). Cette phase est différente de celle formée dans l'hydratation du ciment Portland et avec un rapport  $(CaO/SiO_2)$  plus petit. La formation des autres phases ou produits d'hydratation dépend de l'activant utilisé, la structure et la composition du laitier utilisé et les conductions de cure et du durcissement [30].

##### II.6.4.1 L'activation par les alcalis caustiques (la soude) :

La soude ( $NaOH$ ) garantie à la solution un PH supérieur à 12, favorable à la dissolution du verre du laitier; elle agit comme un catalyseur sur le laitier, donnant une pâte à prise et durcissement rapide au jeune âge et améliore les résistances aux âges précoces.

##### II.6.4.2 L'activation par les sels non siliceux (carbonate de sodium) :

Le carbonate de sodium ( $Na_2CO_3$ ), commercialisé sous le nom de la soude et appelé par fois: cristaux de soude, permet de développer des résistances inférieures à celles qui sont obtenues en utilisant la soude ( $NaOH$ ) [31].

##### II.6.4.3 L'activation par les sels siliceux (verre soluble) :

Le verre soluble est une solution visqueuse de silicate de sodium ou de potassium, ayant une composition variable:  $(R_2O.m.SiO_2 + nH_2O)$  [32].

Le module du verre soluble à base de sodium est donné par:



$$m = \frac{\text{SiO}_2}{\text{Na}_2\text{O}} \cdot K_0 \quad \text{où: } (K_0=1,032);$$

et pour le verre à base de potassium par:

$$m = \frac{\text{SiO}_2}{\text{K}_2\text{O}} \cdot K_0 \quad \text{où: } (K_0=1,568)$$

Le module de verre soluble varie généralement de 2,5 à 3 [32].

D'après Mezghiche (1996), l'activation par le verre soluble est avantageuse, elle donne des résistances en compression très élevées (3 fois ou plus) par rapport aux autres activants [32]. L'augmentation de la densité du verre soluble liquide (de 1150kg/m<sup>3</sup> à 1300kg/m<sup>3</sup>), influe sur la résistance du ciment par une augmentation importante à 28 jours de durcissement normal ou par étuvage; par contre l'augmentation du module siliceux (de 1 à 3) influe négativement sur la résistance en compression pour les différentes densités [33].

### II.6.5 L'activation mixte (sodo-sulfatique) :

En combinant les deux activants (soude + sulfate), ils réagissent ensemble pour donner de la chaux et du sulfate de sodium. La soude joue le rôle de catalyseur, alors que le gypse et la chaux participent à la formation de l'ettringite et des silicates de chaux hydratés [34].

## II.7 Comportement mécanique des ciments au laitier :

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

### II.7.1 Influence de la composition chimique :

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

Les oxydes (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) et (CaO) augmentent l'activité hydraulique du laitier, tandis que la (SiO<sub>2</sub>) la fait diminuer [32]. Pour avoir une bonne hydraulicité, il faut que le rapport (CaO/SiO<sub>2</sub>) soit autour de 1,3; avec les rapports (SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) et (CaO/ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) autour de 3 [30].

L'augmentation du ( MgO ) jusqu'à 18 % est favorable; contrairement au ciment Portland, il n'y a pas de risque de gonflement engendré par le (MgO) libre pendant l'hydratation [35]. La teneur en (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) n'a pas d'effet considérable sur la qualité du laitier; tandis que les oxydes de titane, de protoxyde et de manganèse doivent être limités.



Une faible quantité de sulfures de calcium (jusqu'à 7 %) accroît quelque peu l'activité du laitier.

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

### II.7.1.1 Le module de basicité :

Suivant les auteurs et les pays, il existe plusieurs formules pour exprimer l'indice de basicité du laitier:

$$M_{b1} = \frac{\text{CaO} + \text{MgO}}{\text{SiO}_2}$$

$$M_{b2} = \frac{\text{CaO}}{\text{SiO}_2}$$

$$M_{b3} = \frac{\text{CaO} + \text{MgO}}{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3}$$

Le module de basicité du laitier présente le rapport entre la somme des oxydes basiques qu'il contient et la somme des oxydes acides, la valeur idéale de l'indice, qui permettra d'obtenir le meilleur laitier s'établit (1,32 à 1,34) [34].

Suivant le module de basicité, les laitiers peuvent être classés en 3 catégories:

- laitier basique dont  $M_b > 1$ ;
- laitier acide dont  $M_b < 1$ ;
- laitier neutre dont  $M_b = 1$ .

### II.7.1.2 Le module d'activité :

Il est donné par la formule:

$$M_a = \frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{\text{SiO}_2}$$

- le laitier est basique si  $0,17 < M_a < 0,25$ ;
- laitier est acide si  $0,33 < M_a < 0,40$ .

Les formules les plus utilisées sont:

En Allemagne ( la formule Keil) [19] :



$$K = \frac{(\text{CaO} + \text{CaS} + \text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3)}{\text{SiO}_2}$$

- pour  $K < 1,5$  , le laitier est médiocre;
- pour  $1,5 < K < 1,9$  , le laitier est bon;
- pour  $K > 1,9$  , le laitier est excellent.

En France ( la formule de Langavant ) [35]:

$$i = 20 + \text{CaO} + 0,5 \text{MgO} - 2 \text{SiO}_2$$

- pour  $12 < i < 15$ , le laitier est médiocre;
- pour  $15 < i < 20$ , le laitier est bon;
- pour  $i > 20$  le laitier est excellent.

D'après les normes soviétiques [GOST 3476-74], l'hydraulicité des laitiers granulés des hauts-fourneaux est estimée par le coefficient de qualité qui est défini comme étant le rapport entre les oxydes de calcium, d'aluminium et de magnésium et de bioxyde de silicium et de titane.

$$K' = \frac{\text{CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3 + 10}{\text{SiO}_2 + \text{TiO}_2}, \quad (\text{pour une teneur en MgO} \leq 10);$$

$$K' = \frac{\text{CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3 + 10}{\text{SiO}_2 + \text{TiO}_2 + (\text{MgO} + 10)}, \quad (\text{pour une teneur en MgO} > 10).$$

L'hydraulicité est élevée quand (K') est élevé [33].

### II.7.2 Influence de la porosité de la pâte du ciment :

La porosité de la pâte du ciment durcie est due essentiellement à la présence d'une quantité d'eau. Après durcissement du ciment, le reste de l'espace occupé par l'eau dans la pâte fraîche devient des pores. Ces pores sont devisés en [36]:

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

Le volume de ces pores a un effet inverse sur la résistance mécanique du ciment: plus ce volume augmente, plus la résistance diminue. Cela est dû à la création de discontinuité dans la matière, qui engendre une concentration des contraintes dans des points singuliers et par



suite la rupture de l'éprouvette ou de l'élément structurale, avant l'atteinte de la résistance mécanique réelle du ciment.

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

### **II.7.3 Influence de la finesse de mouture (surface spécifique) :**

La finesse du ciment joue un rôle essentiel dans la compacité du béton est par conséquence, dans le développement de sa résistance mécanique. Une finesse élevée assure un contact plus grand des grains de ciment, ce qui permet une forte réactivité et donne des résistances mécaniques élevées à long terme [25].

D'après, ( Nacéri, 2005 ), en augmentant de la surface spécifique du laitier de 2000 cm<sup>2</sup>/g à 4800 cm<sup>2</sup>/g, l'activité du ciment au laitier augmente et par suite la résistance mécanique augmente aussi [37].

Ainsi, la faible aptitude du laitier à développer une bonne résistance au jeune âge peut être compensée par l'augmentation de sa finesse (activation mécanique) [38].

### **II.7.4 Influence de la concentration de l'activant :**

L'augmentation de la concentration des activants alcalins influe positivement sur la résistance mécanique du ciment au laitier [39], est de même pour l'activation sulfatique avec le gypse .

D'après Puertas et al. (2000), dans le cas de la soude ( NaOH ), la résistance à la compression de la pâte de ciment (100% laitier) est plus de 35 MPa à 28 jours, pour une concentration de 2 mol/l, et supérieure à 50 MPa, pour une concentration de 10 mol/l [30].

### **II.7.5 Influence de la température de cure :**

Les ciments au laitier supportent bien l'étuvage (accélération de durcissement); la combinaison de l'activant et de l'étuvage (surtout pour les cycles moyens et longs), améliore nettement la résistance mécanique [41]. Cependant, cette augmentation de température de cure a un effet positif sur le développement de la résistance au jeune et moyen âge; mais à long terme, pour un ciment durci dans une température normale, la résistance est égale ou supérieure à celle qui est pour un ciment traité thermiquement [38].



## II.8 Conclusion :

Nous avons montré dans cette partie (chapitre) que les méthodes classiques de fabrication des ciments consomment un taux d'énergie important, que se soit pour la fabrication par voie sèche ou humide; ce qui influe non seulement sur le coût de la production mais aussi sur l'environnement, sans oublier les poussières dégagées par la voie sèche.

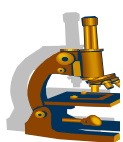
Le laitier vitreux, en présence d'un activant (alcalin, sulfatique ou les deux ensembles), peut faire prise et durcir comme le ciment Portland ordinaire, même sans utilisation du clinker; cela donne une possibilité de fabriquer un ciment moins coûteux et moins polluant, en supprimant la phase de cuisson.

En fonction de différents facteurs (la composition chimique, la concentration de l'activant, la température de cure,...etc.), les propriétés du ciment de laitier sont impressionnantes et des fois meilleures que celles du ciment Portland ordinaire; ce qui emmène à penser de pouvoir les améliorer pour obtenir des ciments de haute performance.

Une des méthodes d'amélioration de ses propriétés se base sur l'utilisation des additions minérales qui agissent sur les propriétés chimiques ou physiques du béton exactement comme dans le cas de la fabrication des ciments Portland ordinaires.

Nous avons donc élaboré une stratégie d'étude qui se portera à la fois sur les effets des additions minérales sur le ciment au laitier activé tout en prenant en compte les principaux facteurs influant sur ses propriétés, et sur la recherche de la possibilité d'activation alcaline du laitier par une addition minérale au lieu des substances alcalines.

Nous avons choisi pour cela d'utiliser la technique des plans d'expériences, idéale pour ce genre d'études.



## CHAPITRE III : EXPERIMENTATION

### III-1 INTRODUCTION :

Ce chapitre présente d'une part les matériaux utilisés pour la confection des ciments avec ajouts laitier ainsi que les modes opératoires des différents essais réalisés.

- \* Laitier.
- \* Clinker.
- \* Gypse.

#### III-1-1 Caractéristiques des matériaux utilisés :

##### III-1-1-1 Le ciment avec ajout Laitier :

La préparation des ciments avec et sans additions laitier ainsi que la détermination de leurs caractéristiques chimiques et physiques et les essais mécaniques des mortiers confectionnés à leurs bases ont été réalisés au laboratoire de Lafarge (Cimenterie de Hammam Dalâa) Wilaya de M'sila .

##### III-1-1-2 Mélange Laitier :

Le Laitier utilisé dans notre étude expérimentale comme ajout est laitier séché importé. Le ciment a été substitué partiellement à différents pourcentages (0%, 6%, 10%, 20%, 25%, 30%, 35%, 40%, 50%, 65%, 70%, 80%, 85% et 90%) par rapport au poids massique de clinker par un ajout laitier,

##### III-1-1-3 Composition chimique de laitier :

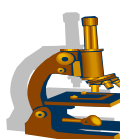
La composition chimique est indiquée dans le Tableau ( 3.1). Elle a été déterminée par l'essai de Spectrométrie à Fluorescence aux rayons X au laboratoire de la cimenterie de Lafargeholcim hammam Dalâa . L'analyse s'effectue sur un échantillon finement broyé, afin de déterminer sa composition chimique.

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	CL	PF
Laitier	42.36	35.28	12.27	0.88	8.03	1.95	0,0	0,04	0,12	0.41

Tableau 3-1 Composition chimique de laitier

##### III-1-1-4 Composition minéralogique de laitier :

La composition minéralogique est indiquée dans le Tableau 3.2. Elle a été déterminée par l'essai de DRX au laboratoire de la cimenterie de Lafargeholcim hammam Dalâa .



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

- Phase vitreuse (teneur en verre)  $\geq 2 / 3$  de la masse totale (Calculé par DRX)
- $( CaO + MgO + SiO_2 ) \geq 2 / 3$  de la masse des constituants
- $( CaO + MgO ) / SiO_2 \geq 1$  (l'indice de basicité ).

Elément	Merwinite	Melilite	Bredigite	Quartz	Calcite	BFS_amorphous
Laitier	0.38	0.45	0.09	0.01	0.72	98.35

Tableau 3-2 Composition minéralogique de laitier

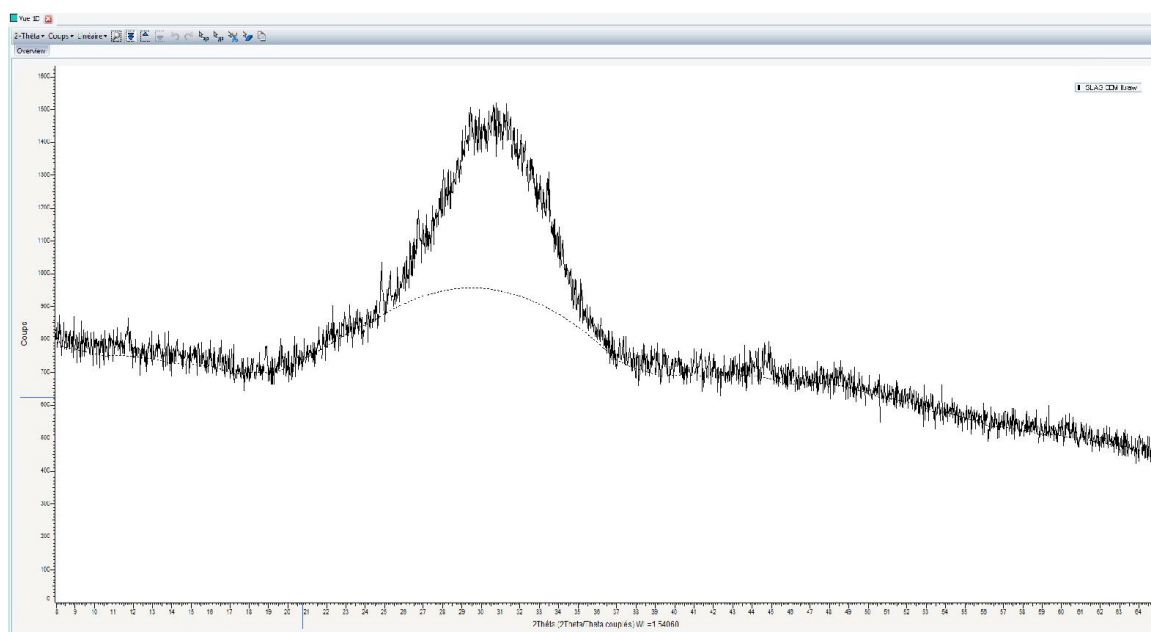


Figure 3-1 Composition minéralogique de laitier ( Lafargeholcim M'sila )

### III-1-2 Le clinker :

La composition chimique en oxydes du cru détermine la composition minéralogique du clinker, donc on doit apporter un grand soin aux matières introduites dans le four pour obtenir un taux élevé de  $C_3S$ .

Les matières premières utilisées pour la fabrication du clinker de la cimenterie de Hammam Dalâa et les caractéristiques physiques sont indiquées dans le Tableau 3-3.

Clinker	Clinker de Hammam Dalâa ( H/D)
Ingrédient du clinker	Calcaire
	Argile
	Sable de dune (Boussaâda)
	Minerai de fer ( khanchla )
Densité apparente	1,42
Dureté	14,3

Tableau 3-3 Principaux constituants du cru de clinker.

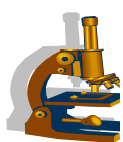


Figure 3-2 Clinker four ( LafargeHolcim M'sila )

### III-1-2-1 Composition chimique du clinker :

Les compositions chimiques du clinker utilisé sont présentées dans le Tableau 3-4 .  
L'analyse chimique a été effectuée au laboratoire de la cimenterie LafargeHolcim (Hammam Dalâa)

Eléments	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	Cl	FL	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF
clinker	21,3	5,03	3,38	65,9	1,8	0,9	0,64	0,1	0,02	0,94	63	18	8	11

Tableau 3-4. Principaux constituants chimiques du clinker ( LafargeHolcim M'sila )

la composition minéralogique théorique (C<sub>3</sub>S-C<sub>2</sub>S-C<sub>3</sub>A-C<sub>4</sub>AF) du clinker déterminée d'après la formule de BOGUE.

### III-1-2-2 Composition minéralogique du clinker :

Les compositions minéralogiques du clinker utilisé sont présentées dans le Tableau 3-5.  
L'analyse minéralogique a été effectuée au laboratoire de la cimenterie LafargeHolcim ( Hammam Dalâa )

Eléments	Alite	Belite	Alum	Ferrite	Lime	Portlandite	fCaO	Periclase	Quartz	Arcanite	Aphthitalite
Clinker	61	18,4	2,4	14,37	1,97	0,11	2,05	0,4	0	0,78	0,28

Tableau 3-5. Principaux constituants minéralogiques du clinker ( LafargeHolcim M'sila )

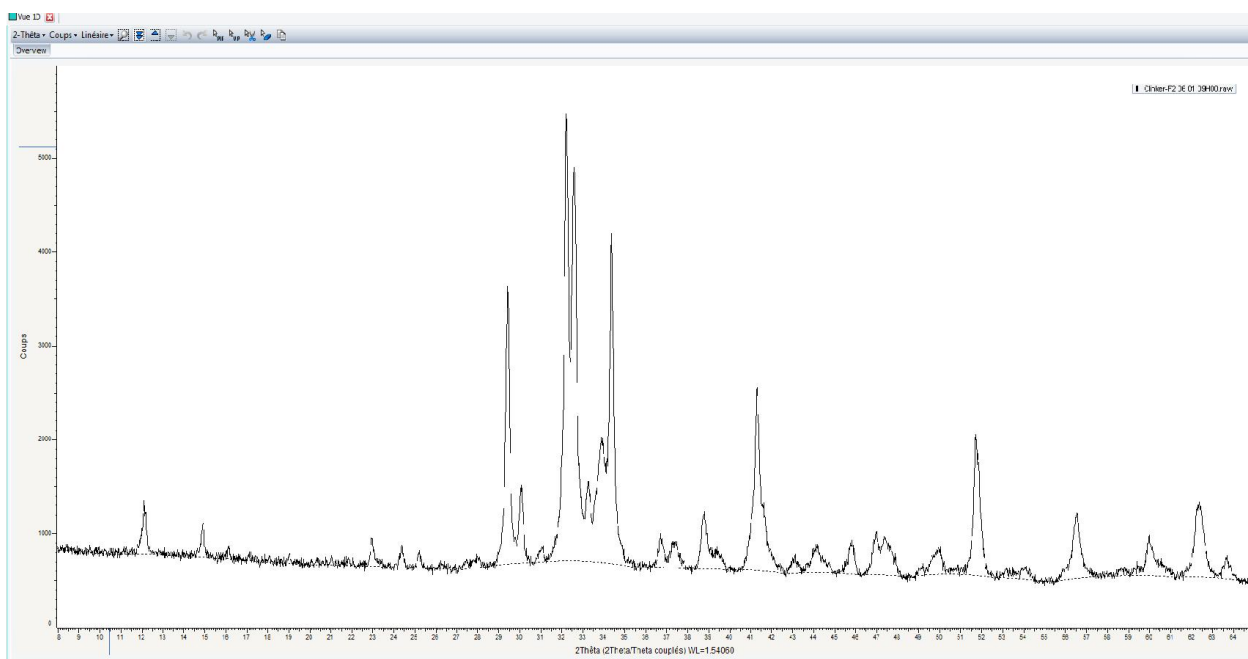
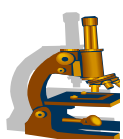


Figure 3-3 Composition minéralogique du clinker ( Lafargeholcim M'sila )

### III-1-2-2-1 Modules caractéristiques du clinker :

Modules caractéristiques	LPH	Ms	AF	LSF
Clinker Lafargeholcim Hammam Dalâa	25-26	2,55	1,55	98.5

Tableau 3-6. Modules caractéristiques du clinker.

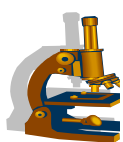
### III-1-3 Le gypse

#### III-1-3-1 Composition chimique :

Le dosage du gypse naturel ( sulfate de calcium déshydraté,  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) a été maintenu constant à 5% dans la préparation de tous les ciments, pour deux raisons, réguler la prise et ne pas masquer l'influence de la teneur en ajouts sur les propriétés mécaniques du ciment. Les compositions chimiques du gypse sont données par le ( tableau 3-7).

Eléments(%)	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	LOI	CL
Gypse de Biskara(chaïba)	3.11	0.68	0.38	31.06	3.31	40.05	0.02	0	23,57	0,015

Tableau 3-7. Composition chimique du gypse.



### III-1-3-2 Composition minéralogique :

Les compositions minéralogiques du gypse sont données par le tableau 3-8.

Elements	Gypsum	Hemi-Hydrate	Anhydrite	Calcite	Dolomite	Quartz	Illite	Chlorite	SO <sub>3</sub> _XRD
Gypse de Biskara(chaiba)	85.74	0.00	0.11	1.81	10.06	0.29	1.33	0.66	39,98

Tableau 3-8 Composition minéralogique du gypse ( Lafargeholcim M'sila )

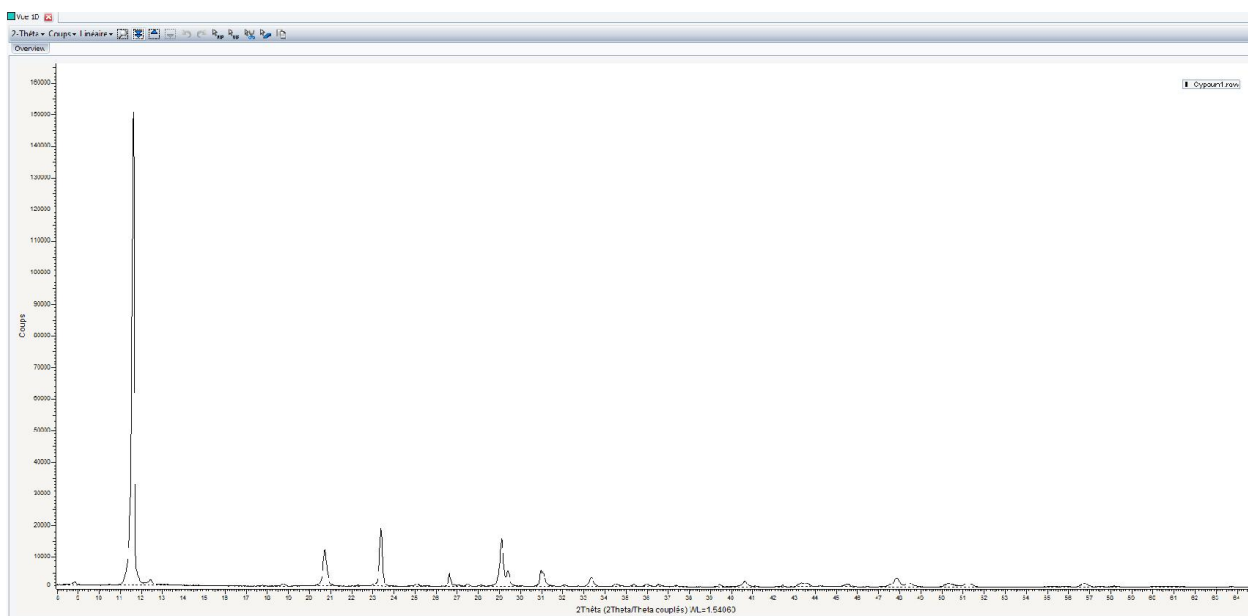


Figure 3-4 Composition minéralogique du gypse ( Lafargeholcim M'sila )

### III-2 PROCEDE DE PREPARATION DES DIFFERENT CIMENT :

#### III-2-1 Composition pondérale des différents ciments :

- Fabrication ciment laboratoire :

- Objet :

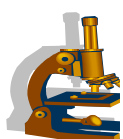
Cette méthode d'essai permet de connaître la fabrication de ciment de laboratoire.

-Domaine d'application :

L'échantillons concerné par cette méthode est du clinker mélangé à du gypse et laitier.

-Références :

Aucune norme n'est à signaler pour la fabrication de ciment de laboratoire. Toutefois, il faut respecter le mode opératoire (taille de tamis, etc...) afin d'obtenir des données exploitables et avoir des ciments souhaités dans sa composition.



**-Définitions :**

- CEM II- CEM III : Ciment constitué de clinker et de gypse et laitier.
- Quartage : Opération ayant pour but de diviser un échantillon en deux parts égales (même quantité et même caractéristique).
- Broyage Aurec : Broyage permettant de rendre la matière en poudre.
- Blaine : Nom donné à la finesse d'un ciment (mesuré avec un blainemètre en  $\text{cm}^2/\text{g}$ ).

**-Principe :**

Du clinker et du gypse sont mélangés dans des proportions bien définies afin de permettre la fabrication d'un ciment de laboratoire après broyage.

Cela sert à effectuer des essais mortiers (résistances mécaniques, recherche en eau et temps de prise) et ainsi pouvoir analyser le clinker sur ces critères.

Cela permet de faire avancer la recherche, de contrôler des lots douteux ou d'analyser tout simplement la matière.

**-Réactifs :**

Du gypse pour faire augmenter la teneur en  $\text{SO}_3$  (afin de compenser le faible taux présent dans le clinker) pour obtenir la valeur visée.

**-Appareillages**

**Matériels utilisés :**

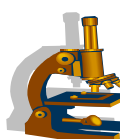
- ⇒ Concasseur à mâchoires
- ⇒ Quarteurs pour grosse capacité
- ⇒ Broyeur à anneaux (type Aurec)
- ⇒ Mélangeur type Turbula ou bétonnière
- ⇒ Balance au centième de capacité maxi 20 kg
- ⇒ Broyeur à boulets
- ⇒ Balance de précision (au millième) avec cage
- ⇒ Pycnomètre
- ⇒ Blainemètre semi-automatique

**Petits matériels :**

- ⇒ Puisette
- ⇒ Bac de pesé
- ⇒ Tamis normalisé à 3.15 mm avec fond

**Consommables :**

- ⇒ Sac plastique
- ⇒ Poudriers plastiques
- ⇒ Pinceaux
- ⇒ Sable de nettoyage pour broyeur

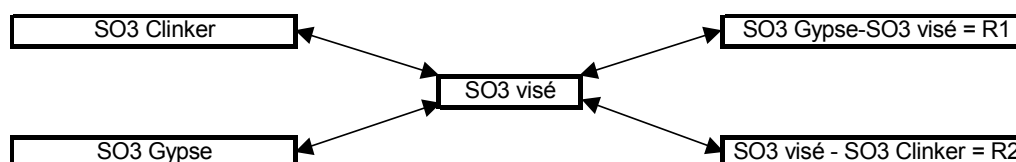


**-Mode opératoire :**

- Concasser la matière en 3.15 mm (tous les refus seront réintroduits dans le concasseur et retamisés autant que nécessaire).
- Mesurer la masse volumique du clinker (celle du gypse étant déjà connue) dans un pycnomètre automatique afin de pouvoir connaître après calcul, celle du ciment de laboratoire créé.  
Elle nous permettra de mesurer la finesse Blaine.
- Mélanger le clinker et le gypse dans des proportions bien précises :
  - ✓ Connaître le SO<sub>3</sub> du clinker et du gypse
  - ✓ La teneur en SO<sub>3</sub> du ciment doit être de 3%
  - ✓ Calculer selon la croix des mélanges décrites au paragraphe 11
- Introduire le mélange dans le broyeur à boulets
- Broyer la matière jusqu'à obtention d'une finesse SSB de 3700 ± 100 (faire plusieurs contrôles pour ne pas dépasser la consigne).  
La finesse se contrôle avec un blainemètre;  
prélever une petite quantité de matière en plusieurs endroits et introduire et tassée dans la cellule du blainemètre une quantité de matière donnée selon la masse volumique du ciment.
- Vider le broyeur et le nettoyer en broyant du sable prévu à cet effet.

**-Expression des résultats :**

Calcul de la composition clinker/gypse :



$$R1 + R2 = R3$$

Soit :  $(R1 / R3) * 100 = \% \text{ Clinker}$   
 $(R2 / R3) * 100 = \% \text{ Gypse}$

Calcul de la masse volumique du ciment :

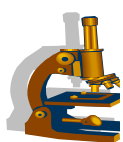
$$MV = m \text{ CEM I} / ((m \text{ CK} / MV \text{ CK}) + (m \text{ G} / MV \text{ G}))$$

Où **m** est la masse

**MV** la masse volumique

Calcul du blaine (en cas d'utilisation d'un blainemètre manuel) :

$$\text{Blaine} = (524.2 * K * \text{racine carré du temps}) / MV \text{ CEM I}$$



Où  $K$  est la constante de la cellule du blainemètre

Le temps est celui mesuré par la descente du liquide entre  $M_2$  et  $M_1$ ;  
il est exprimé en seconde.

**-Exactitude et biais :**

Les tamisages des échantillons s'effectuent avec des tamis de mailles régulières et calibrés en laboratoire.



Figure 3-5 Concasseurs à mâchoires vu de profil



Figure 3-6 Broyeur à anneaux ( partie broyante )



Figure 3-7 Pycnomètre



Figure 3-8 Blainemètre semi-automatique

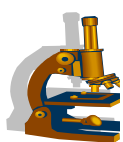
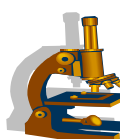


Figure 3-9 Broyeur à boulets BB10 ( Cimenterie Lafargeholcim M'sila )

Matériels	Utilisation
Concasseur à mâchoires	Concassage de la matière
Broyeur à anneaux	Fabrication d'échantillon
Mélangeur électrique	Homogénéisation
Tamis de mailles égales à 3.15 mm	Tamisage en 3.15 mm
Blainemètre	Mesure de la finesse du ciment
Pycnomètre	Mesure de la masse volumique
Quarteur	Divisions d'échantillons en 2 parts égales
Broyeur à boulets	Broyage de la matière
Balances	Pesée de la matière (composition et blaine)
Puisette	Prélèvement et manipulation de la matière
Bac de pesé	Récipient servant à la pesée
Pinceaux	Nettoyage du broyeur
Sac plastique	Mise sac du ciment fabriqué
Poudriers plastiques	Fabrication d'échantillon pour la chimie
Sable de nettoyage	Nettoyage des broyeurs

Tableau récapitulatif des différents matériels utilisés et leur utilisation



Les différents ingrédients (Clinker ; laitier et gypse ) ont été concassés à une dimension inférieure à 1mm .puis mélangés soigneusement à différentes proportions ( Tableau 3-9 ) .

Types de ciments	Clinker (%)	Gypse (%)	Laitier (%)
CEM I	95	5	0
CEM II/A-S	89	5	6
CEM II/A-S	85	5	10
CEM II/A-S	75	5	20
CEM II/B-S	70	5	25
CEM II/B-S	65	5	30
CEM II/B-S	60	5	35
CEM III/A	55	5	40
CEM III/A	45	5	50
CEM III/A	30	5	65
CEM III/B	25	5	70
CEM III/B	15	5	80
CEM III/C	10	5	85
CEM III/C	5	5	90

Tableau 3-9 Compositions pondérales des quatorze (14) ciments préparés

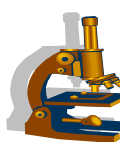
### III-2-2 Analyses chimiques des différents ciments préparés :

Les résultats de la composition chimique des quatorze (14) ciments préparés sont présentés dans le ( Tableau 3-10).

L'ajout laitier substitué à divers pourcentages : (0%, 6%, 10%, 20%, 25%, 30%, 35%, 40%, 50%, 65%, 70%, 80%, 85% et 90%).

Dans cette étude, nous avons fait varier le pourcentage de l'ajout laitier dans le ciment par la méthode de substitution (remplacement partiel du clinker par laitier) afin d'étudier son effet sur les propriétés physico-chimiques du ciment confectionné avec l'addition minérale et le comportement mécanique du mortier.

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



étudiées.

L'incorporation des additions laitier dans le clinker à différents pourcentages (0%, 6%, 10%, 20%, 25%, 30%, 35%, 40%, 50%, 65%, 70%, 80%, 85% et 90%) ; augmente le pourcentage des oxydes ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{SO}_3$ ) et diminue le taux d'oxyde de chaux ( $\text{CaO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , PAF).

Le pourcentage d'ajout laitier dans les ciments préparé ne doit pas dépasser le pourcentage (95% max) conformément à la norme NA 442 qui stipule que les ciments composés CPJ-CEM III/C doivent contenir au minimum 81% de laitier à 95 % de laitier max et de (au minimum 05% de clinker à 19 % clinker max).

Dans notre étude on a visé dans la classe CPJ-CEM III/C ( min 85% et 90% max).

Taux de laitier (%)	Eléments (%)	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{CaO}$	$\text{MgO}$	$\text{SO}_3$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{Na}_2\text{O}$	CL	LOI
0	CEM I	21,95	5,12	4,12	69,64	1,84	2,25	0,60	0,16	0,014	1,61
6	CEM II/A-S	22,75	5,63	4,09	65,27	2,28	2,28	0,59	0,16	0,014	1,58
10	CEM II/A-S	23,23	5,97	4,00	61,50	2,58	2,31	0,59	0,15	0,015	1,55
20	CEM II/A-S	24,39	6,78	3,89	61,06	3,27	2,32	0,58	0,15	0,015	1,48
25	CEM II/B-S	25,04	7,20	3,79	60,07	3,63	2,35	0,58	0,14	0,015	1,46
30	CEM II/B-S	25,55	7,58	3,68	60,00	3,93	2,41	0,56	0,14	0,016	1,43
35	CEM II/B-S	26,56	8,06	3,57	59,96	4,28	2,42	0,56	0,14	0,016	1,40
40	CEM III/A	27,41	8,51	3,54	59,88	4,64	2,43	0,56	0,14	0,016	1,38
50	CEM III/A	28,02	8,89	3,33	59,73	4,72	2,48	0,55	0,14	0,017	1,31
65	CEM III/A	28,62	9,32	3,28	59,52	4,75	2,52	0,55	0,13	0,018	1,19
70	CEM III/B	29,01	9,55	3,22	59,38	4,81	2,58	0,54	0,13	0,018	0,99
80	CEM III/B	29,62	9,68	3,19	59,21	4,86	2,62	0,53	0,13	0,018	0,85
85	CEM III/C	29,82	9,74	3,15	59,12	4,89	2,69	0,52	0,13	0,018	0,81
90	CEM III/C	30,20	9,87	3,11	59,03	4,93	2,72	0,52	0,13	0,018	0,76

Tableau 3-10. Composition chimique des ciments préparés.

La composition chimique est un facteur déterminant de la résistance des ciments aux agents agressifs.

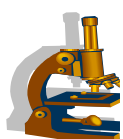
On voit que le pourcentage en teneur d'anhydride sulfurique ( $\text{SO}_3$ ) est :

inférieur à 4% pour le CEM II .

inférieur à 4.5% pour le CEM III/A et B .

inférieur à 5% pour le CEM III/C .

Ceci est conforme à la norme NF EN 197-1 et la norme algérien NA 442 (page20) .



### III-2-3 Analyses minéralogiques des différents ciments préparés par diffraction aux rayons x (Diffractomètre D8-BRUCKER D.R.X) :

#### III-2-3-1 Principe de la méthode :

Condition de diffraction  
Diffractomètres de Bragg-Brentano Intensité des ondes  
Phénomènes de diffusion et de diffraction  
Diffraction par un cristal fini  
Diffraction par une poudre

#### III-2-3-2 Application de la méthode :

Identifier une phase  
Doser un mélange de phases  
Mesurer des dilatations  
Estimer les contraintes d'ordre I, II et III  
Evaluer la taille des cristallites  
Juger de la texture  
Faire une détermination structurale

#### \* Condition de diffraction :

- Les atomes se comportent comme des centres de diffusion :  
(amplitude = facteur de diffusion f).
- Interférences des diffusions
- Interférences constructives si la condition de Bragg :

$$2d_{hkl} \sin \theta_{hkl} = \lambda \quad \text{est respectée.}$$

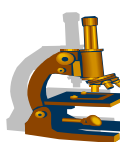
Tout se passe comme s'il y avait (potentiellement)  
réflexion partielle sur la famille de plans ( hkl ).  
On parle de réflexions sélectives.

**NB<sub>1</sub>** : Ceci est strictement vrai pour les cristaux de taille infinie.

**NB<sub>2</sub>** : Même si la condition de Bragg est respectée ;  
l'intensité de l'onde diffractée peut être nulle.

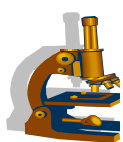
#### \*Conclusion :

La probabilité de faire diffracter un monocristal à partir d'un faisceau X monochromatique, est quasi-nulle

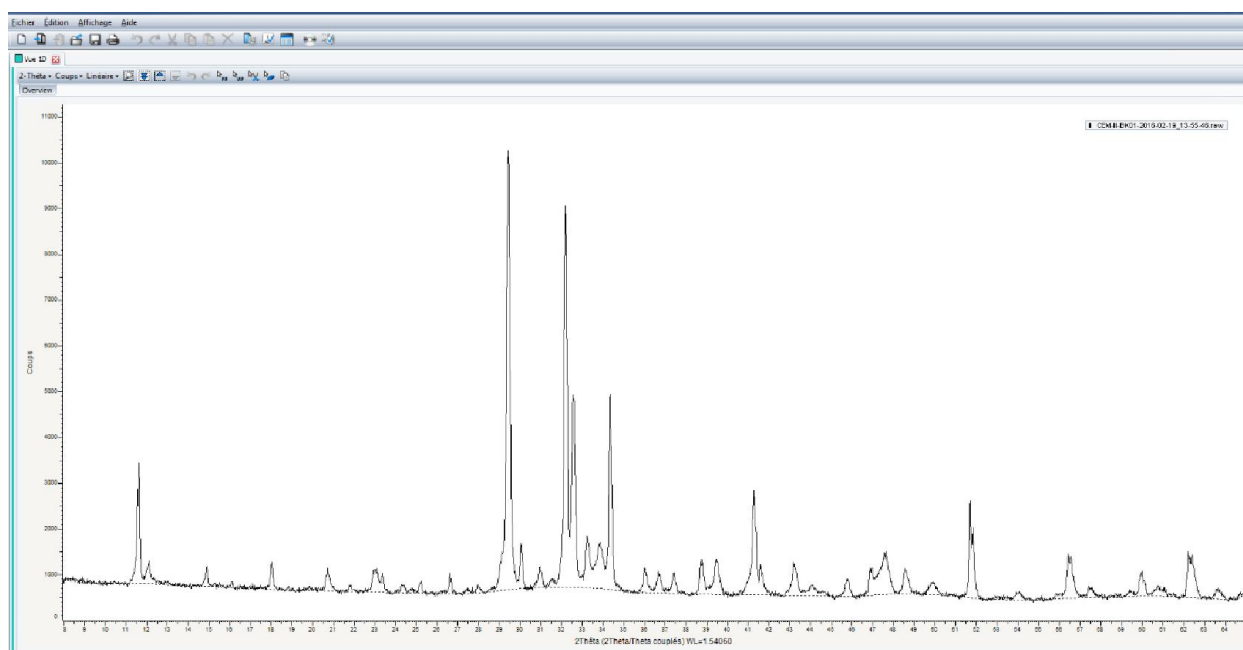


Laitier (%)	0	6	10	20	25	30	35	40	50	65	70	80	85	90
Sample	CEM 01	CEM 02	CEM 03	CEM 04	CEM 05	CEM 06	CEM 07	CEM 08	CEM 09	CEM 10	CEM 11	CEM 12	CEM 13	CEM 14
Alite	63,1	59,4	58,1	50,9	48,2	46,3	41,4	38,3	31,8	24,7	18,7	10,7	7,86	4,81
Belite	11,4	11,2	10,2	9,54	8,58	7,73	6,82	6,29	5,67	5,02	4,37	3,17	1,99	0,88
Alum	3,36	3,29	3,16	2,99	2,48	2,37	2,23	2,02	1,99	1,43	0,98	0,96	0,74	0,52
Ferrite	13,2	12,8	12	10,1	9,67	9,34	8,37	7,73	6,35	5,42	4,26	2,32	1,83	1,21
Lime	1,02	0,97	0,72	0,72	0,53	0,48	0,44	0,32	0,29	0,22	0,18	0,09	0,05	0,02
Portlandite	0,64	0,58	0,42	0,36	0,32	0,65	0,66	0,28	0,14	0,15	0,02	0,05	0,02	0
fCaO XRD	1,5	1,25	1,19	0,99	0,91	0,88	0,85	0,69	0,39	0,38	0,19	0,11	0,09	0,02
Periclase	0,17	0,38	0,33	0,24	0,16	0,12	0,07	0,13	0,04	0,1	0,03	0,05	0,04	0
Quartz	0	0,00	0	0	0,00	0,00	0	0,00	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0
Arcanite	0,5	0,37	0,41	0,36	0,37	0,34	0,3	0,27	0,15	0,17	0,05	0,15	0	0
Langbeinite	0,15	0,1	0,18	0,18	0,18	0,13	0,1	0,15	0	0,11	0,06	0,12	0	0,03
Aphthitalite	0,16	0,22	0,17	0,11	0,02	0,11	0,09	0,12	0,01	0,03	0,1	0,01	0,07	0
Gypsum	2,22	2,38	2,28	2,65	2,34	2,55	2,45	2,82	2,45	2,78	2,4	2,84	2,71	2,56
Hemi hydrate	0,25	0,22	0,12	0,33	0,13	0,15	0,21	0	0,1	0	0,1	0	0,27	0,06
Anhydrite	0,01	0,04	0,04	0	0	0	0	0,01	0	0,02	0	0,02	0	0
Calcite	0,42	0,89	0,11	0,17	0,71	0,5	0,37	0,18	0,26	0,54	0,75	0,41	0,4	0,44
Dolomite	0,31	0,63	0,42	0,21	0,83	0,82	0,39	0,18	0,33	0,25	0,34	0,33	0,39	0,08
SO3 XRD	1,57	1,58	1,52	1,73	1,44	1,55	1,49	1,58	1,27	1,45	1,27	1,48	1,44	0,08
BFS amorphous	3,1	6,88	10,9	22,1	25,2	29,6	36	41	51,3	59,9	68,7	79,7	84,5	92,2
Gypsum XRD	2,79	3,27	2,86	3,2	3,3	3,53	3,06	3,01	2,88	3,04	2,83	3,2	3,36	3,19

Tableau 3-11 Composition minéralogique des ciments préparés.



**Figure 3-10 DRX BRUKER D4 ENDEAVOR  
( Lafargeholcim laboratoire )**



**Figure 3-11 Composition minéralogique du CEM 01 ( 0 % laitier )**

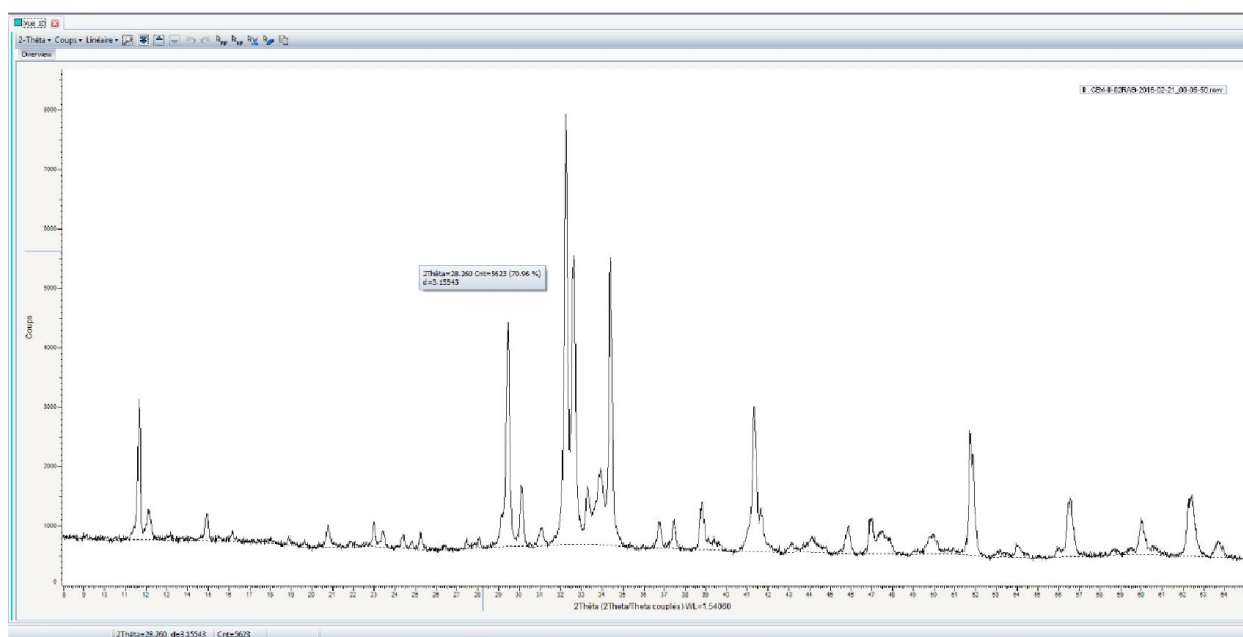
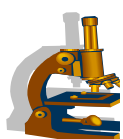


Figure 3-12 Composition minéralogique du CEM 02 ( 6% laitier )

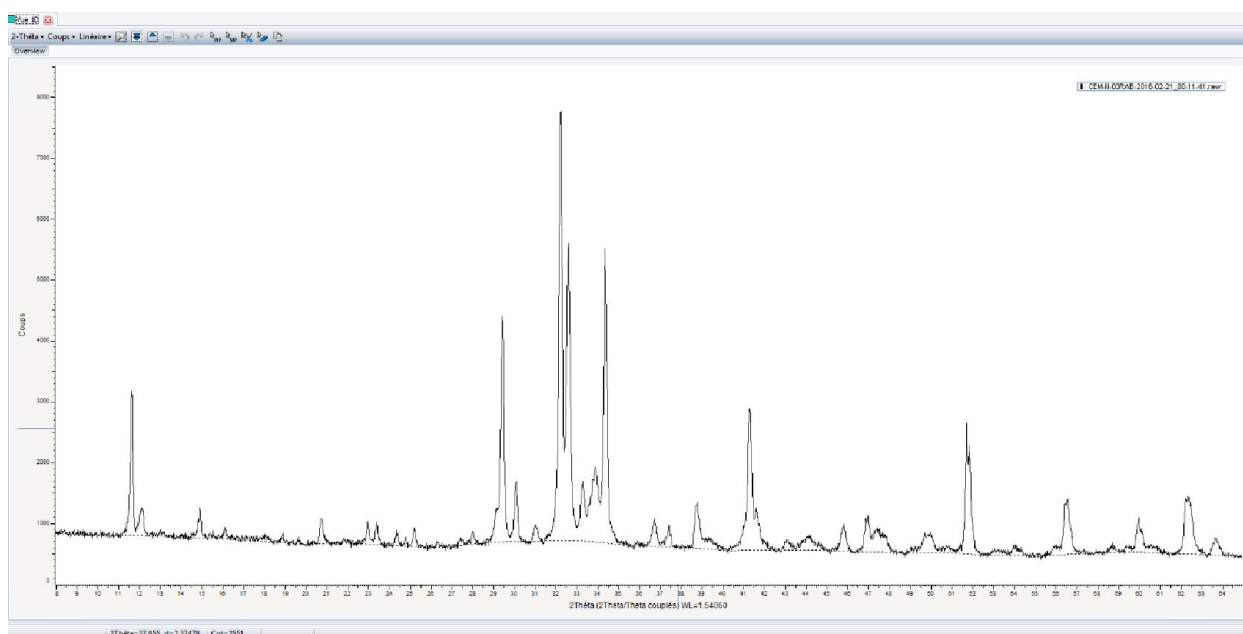


Figure 3-13 Composition minéralogique du CEM 03 ( 10% laitier )

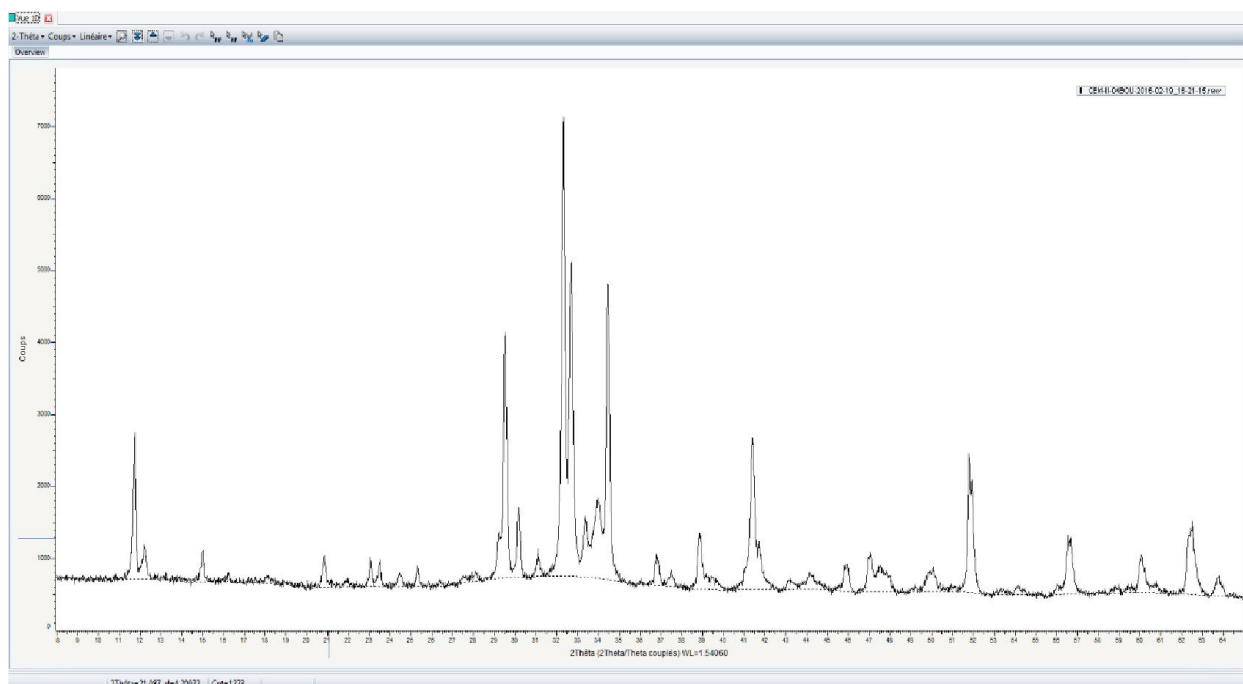
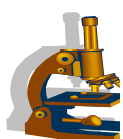


Figure 3-14 Composition minéralogique du CEM 04 ( 20% laitier )

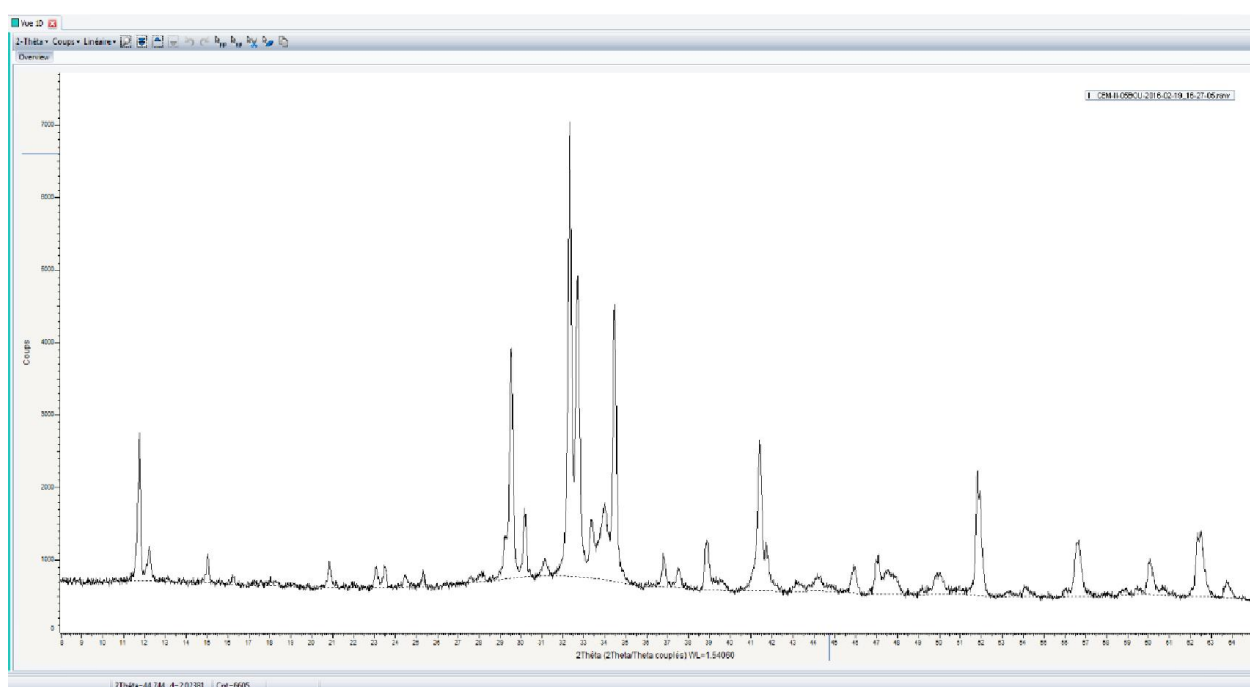


Figure 3-15 Composition minéralogique du CEM 05 ( 25% laitier )

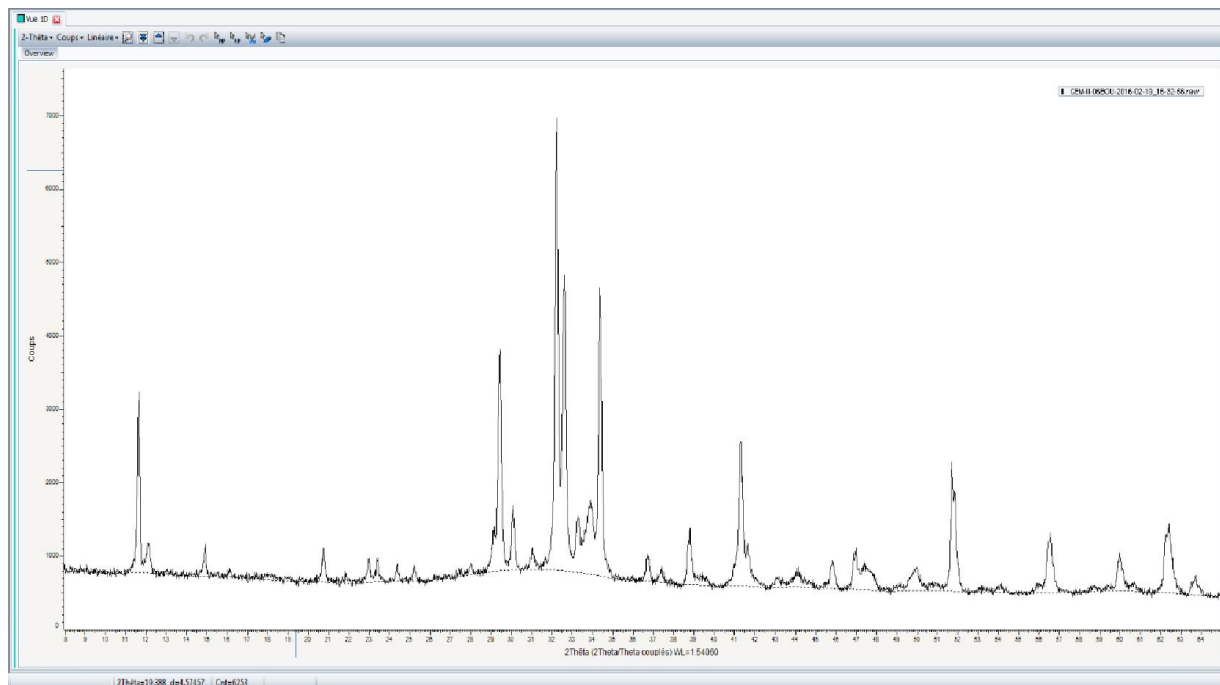


Figure 3-16 Composition minéralogique du CEM 06 ( 30% laitier )

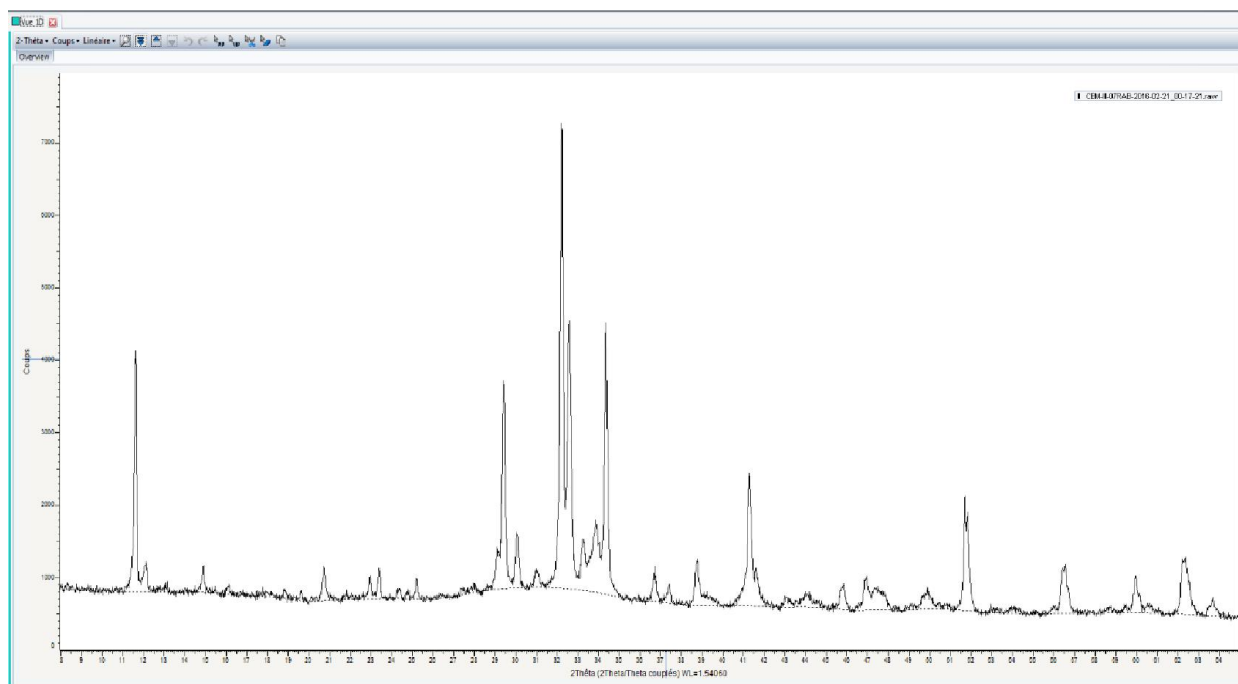


Figure 3-17 Composition minéralogique du CEM 07 ( 35% laitier )

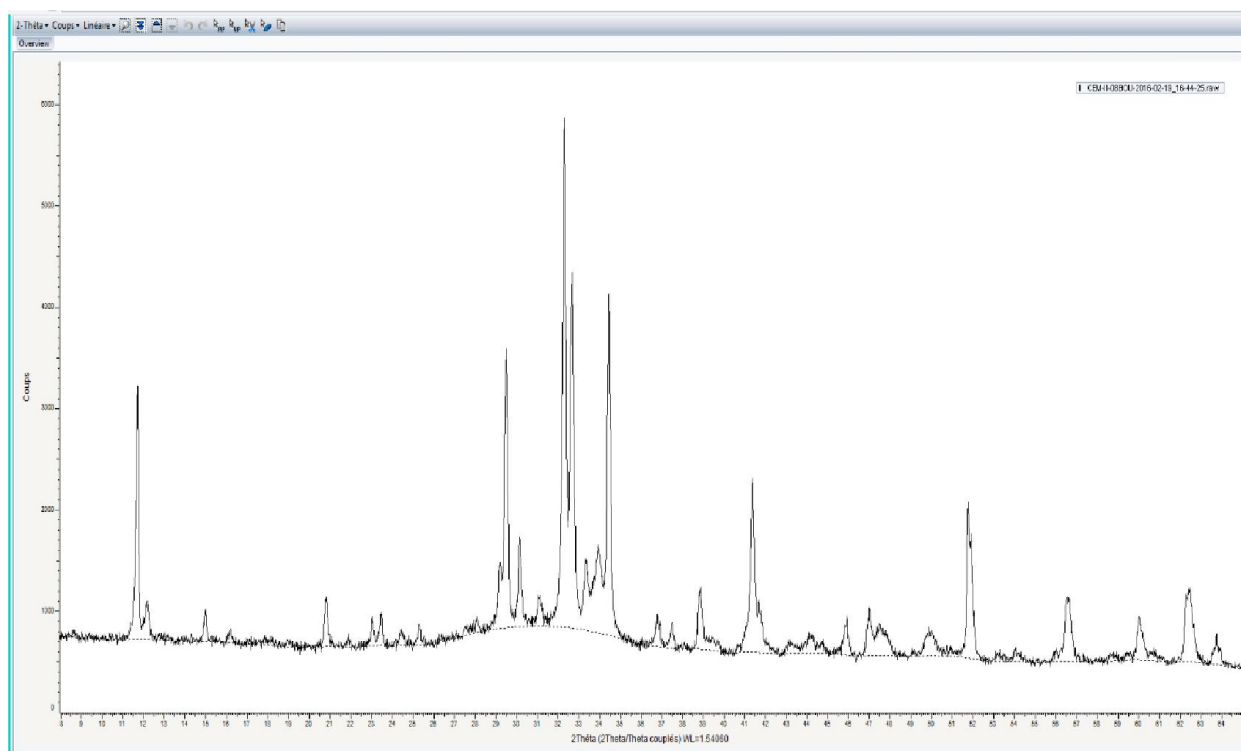
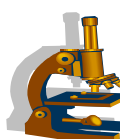


Figure 3-18 Composition minéralogique du CEM 08 ( 40% laitier )

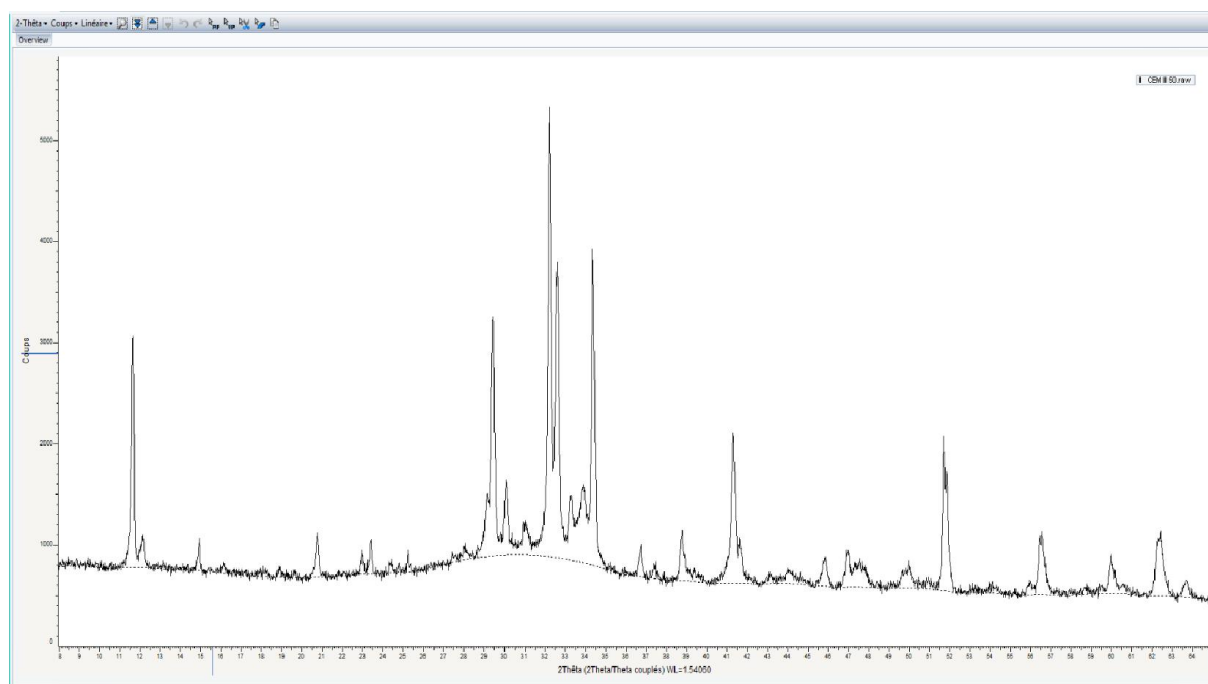


Figure 3-19 Composition minéralogique du CEM 09 ( 50% laitier )

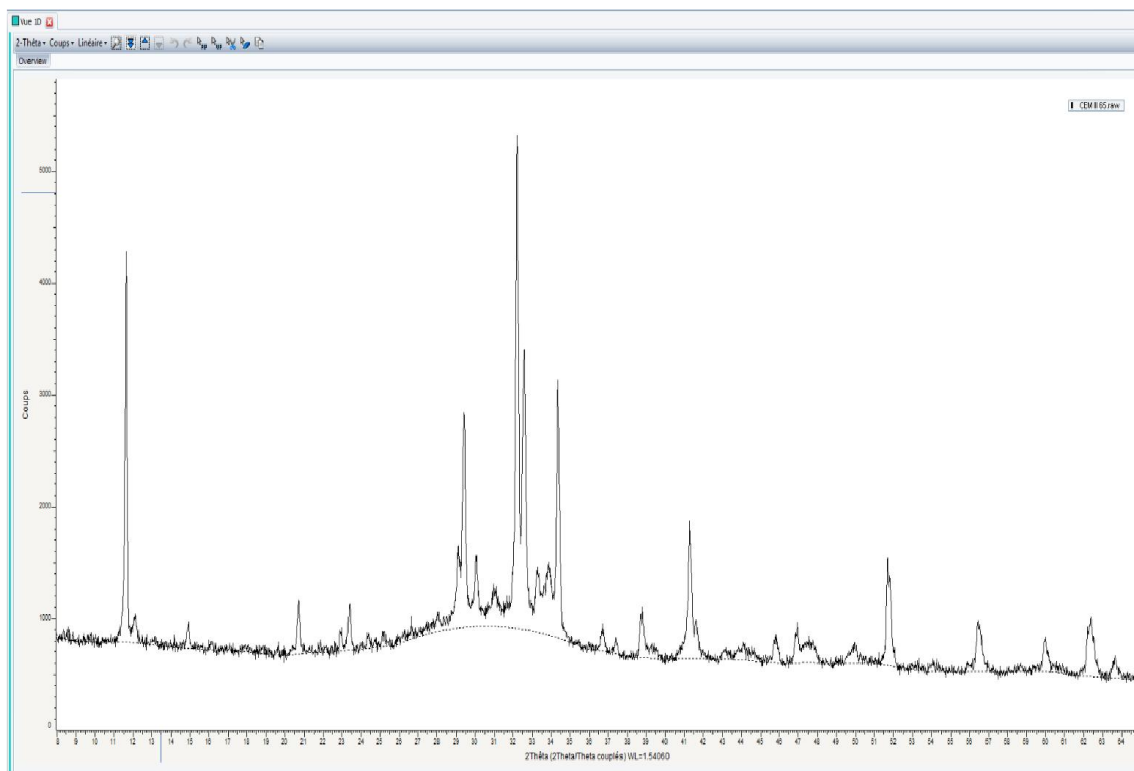


Figure 3-20 Composition minéralogique du CEM 10 ( 65% laitier )

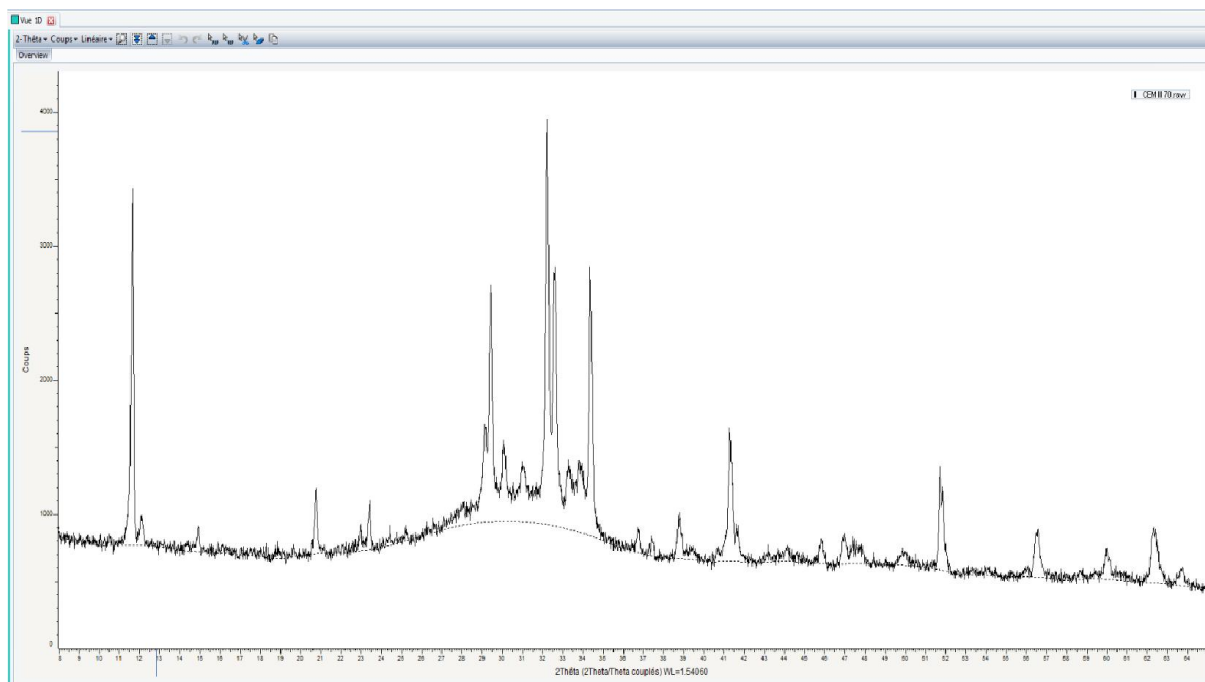


Figure 3-21 Composition minéralogique du CEM 11 ( 70% laitier )

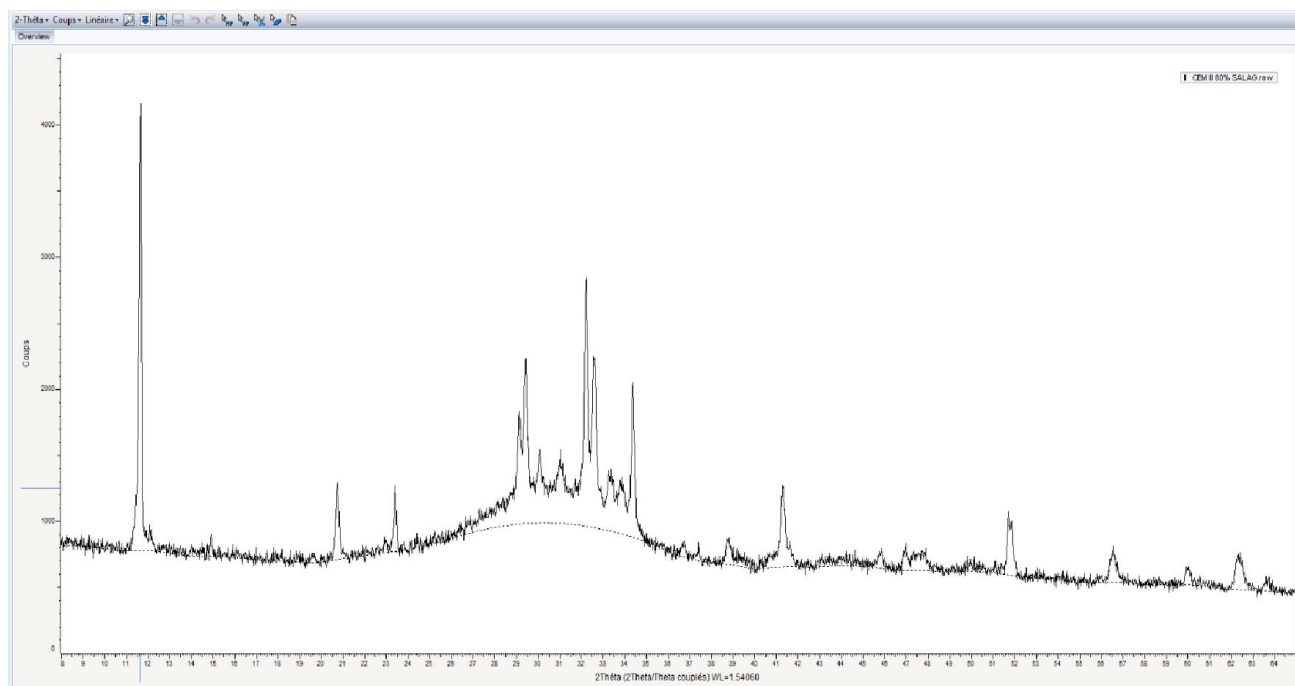
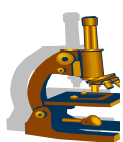


Figure 3-22 Composition minéralogique du CEM 12 ( 80% laitier )

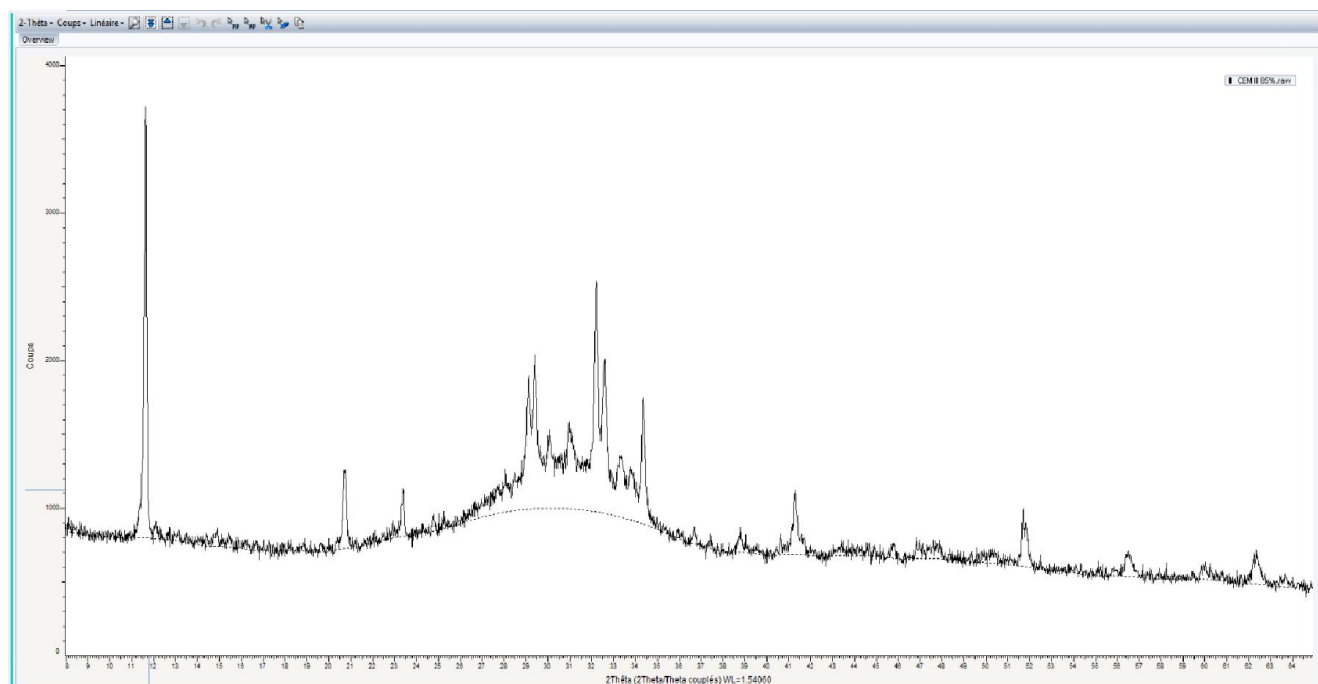


Figure 3-23 Composition minéralogique du CEM 13 ( 85% laitier )

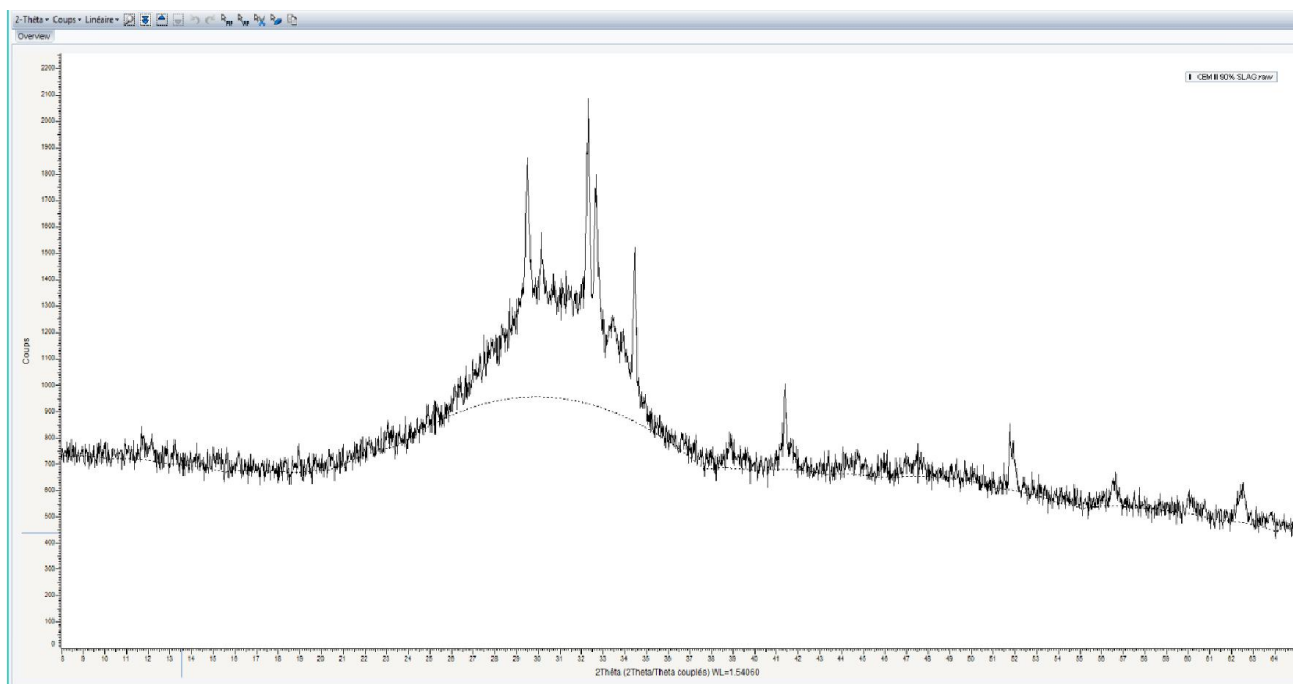
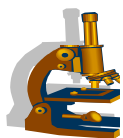


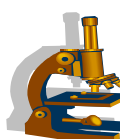
Figure 3-24 Composition minéralogique du CEM 14 ( 90% laitier )

### III-3 L'EAU DE GACHAGE :

L'eau utilisée pour la confection des mortiers est une eau distillé préparé au laboratoire de la cimenterie ( Lafargeholcim m'sila ) .



Figure 3-25 Distillateur ( Lafargeholcim laboratoire )

**III-4 LES GRANULATS FINS ( SABLE DE DUNE ) :**

Le sable utilisé dans cette étude provient des abords de l'oued Maïter (carrière de Lafarge).

Cet oued est situé entre les collines de Boussaâda, entre lesquelles souffle un vent provenant du sud chargé de grains fins.

L'avancée du désert a permis donc au fil des ans le dépôt du sable dans l'oued, qui par la suite a assuré son transport et son étalement.

Ce sable est d'origine éolienne, c'est un sable de dune, du moins ses grains fins.

Le sable de dune de Boussaâda, siliceux, ses grains roulés de formes arrondies et de surfaces lisses, est caractérisé par sa finesse, sa granulométrie et son diamètre maximal qui n'excède pas 3,0 mm.

Les caractéristiques physiques ont été déterminées au laboratoire de la cimenterie Lafargeholcim M'sila.

Les caractéristiques physiques du sable de dune testé sont présentées dans le Tableau ( 3-8 ).

Matériaux	Densité Absolue (g/cm <sup>3</sup> )	Densité apparente (g/cm <sup>3</sup> )	Compacité (%)	Porosité (%)	Equivalent de sable
Sable de dune (Boussaâda)	02.56	01.64	64.06	35.94	76/78

Tableau 3-12. Caractéristiques physiques du sable de dune.

**III-4-1 Caractéristique physique du sable****III-4-1-1 Masse volumique absolue :**

Elle est déterminée par la pesée hydrostatique (application de la loi d'Archimède : déplacement de liquide).

La masse spécifique est déterminée par la relation suivante :

$$\gamma = m/v = m(v_2 - v_1)$$

avec :

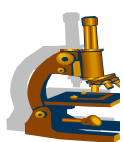
m : masse du sable

v : volume absolu du sable

v<sub>1</sub> : volume de l'eau ( volume initial).

v<sub>2</sub> : volume du sable + volume d'eau (volume final).

La valeur moyenne de la masse volumique absolue est de  $\gamma_s = 2,56 \text{ g/cm}^3$



### III-4-1-2 Masse volumique apparente :

La masse volumique apparente est déterminée suivant la relation :

$$\rho_{s \text{ able}} = m/v = (m_2 - m_1)/v$$

avec :

m : poids du sable dans le récipient

m<sub>1</sub> : masse du récipient vide

m<sub>2</sub> : masse du récipient et du sable

v : volume du récipient

La valeur moyenne de la masse volumique apparente est de  $\rho_s = 1,64 \text{ g/cm}^3$ .

### III-4-1-3 Equivalent de sable ( Norme NF P18-598) :

Dans le cas des sables cet essai consiste à plonger un poids défini de sable dans une solution flocculante.

Après agitation, on laisse décanter le mélange pendant 20 minutes.

Ensuite, on mesure la hauteur, dans l'éprouvette normalisée, du sédiment H<sub>1</sub>, et du sédiment + flocculat H<sub>2</sub>. Le résultat:

$$ES = (H_1/H_2) \times 100$$

La limite entre le sable brut et l'argile est maintenant visible.

Il est possible de mesurer à l'oeil et au réglé, la hauteur de sable total et la hauteur de sable brut pour en déterminer la proportion, l'E.S.

Il est aussi possible de prendre cette mesure à l'aide d'un piston normalisé qui traverse la couche d'argile pour se poser sur le sable brut.

La hauteur totale du sable se mesure comme précédemment ( figure 3.26 ).

Cet essai consiste à déterminer la proportion d'impuretés argileuse, limoneuse ou ultra -fine dans le sable.

Le principe de la mesure repose sur la différence de vitesse de sédimentation des grains contenus dans le sable.

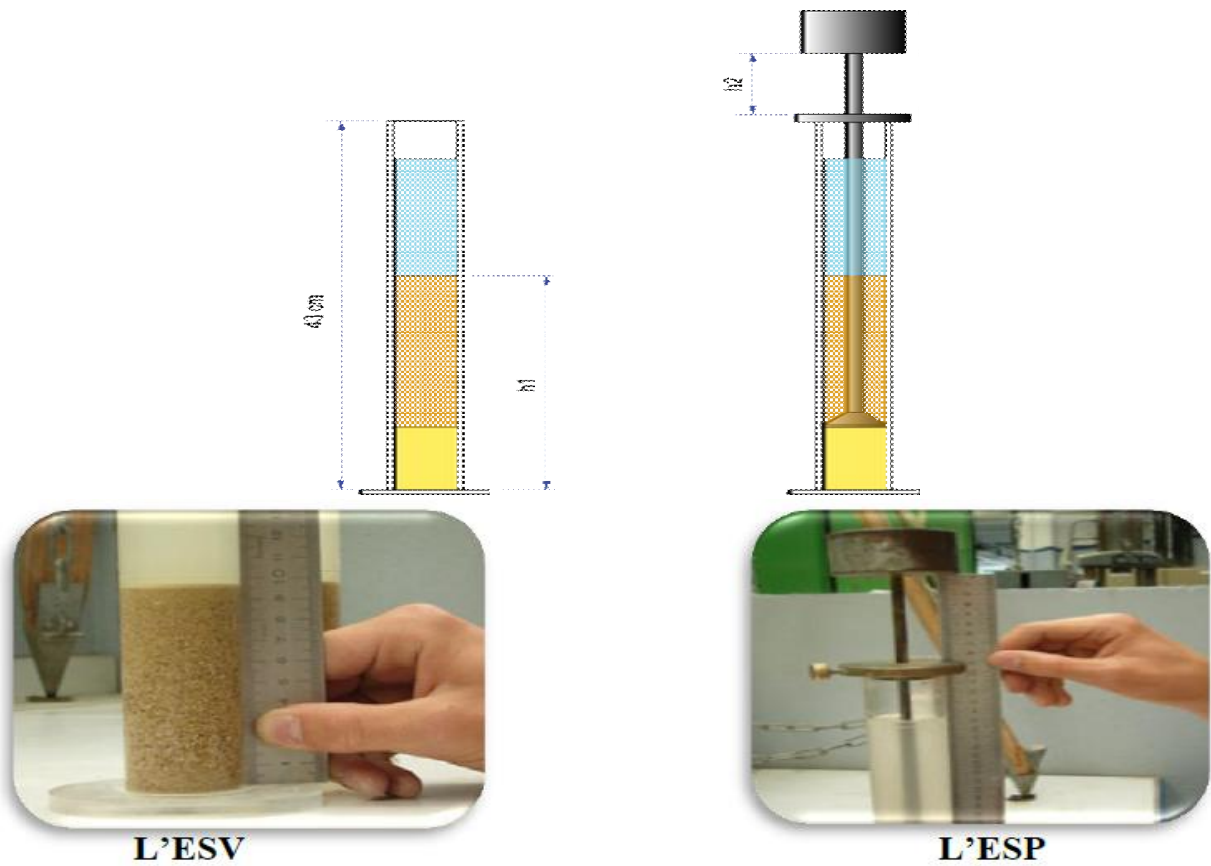
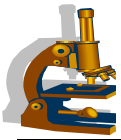


Figure 3-26 L'équivalent de sable

**Appareillage pour l'essai d'équivalent de sable :**

Ensuite on mesure la hauteur dans l'éprouvette normalisée du sédiment ( $H_1$ ) et du sédiment + le floculat ( $H_2$ ).

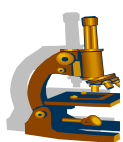
L'équivalent de sable est autant plus élevé que la teneur en argile est plus faible.

Dans notre cas

E.S à vue = 76%

E.S à piston = 78%

Le sable est propre et de faible pourcentage de fines et convient aux bétons de qualité (-Dreux G, 1985).



PS	Nature et qualité du sable
< 60	"Sable argileux" risque de retrait ou de gonflement, à rejeter pour des bétons de qualité
$60 \leq PS < 70$	"Sable légèrement argileux" de propreté admissible pour béton de qualité quand on ne craint pas particulièrement de retrait.
$70 \leq PS < 80$	"Sable propre" à faible pourcentage de fines argileuses convenant parfaitement pour les bétons de haute qualité.
$PS > 80$	"Sable très propre" l'absence presque totale de fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra rattraper par une augmentation du dosage en eau.

Tableau 3.13 Valeurs préconisées pour l'équivalent de sable par DREUX

**N.B****La solution flocculante:**

La solution flocculant est composée, pour une quantité de 1 litre de:

- 219 g de chlorure de calcium cristallin,  $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  ou
- 111 g de chlorure de calcium anhydre,  $\text{CaCl}_2$ .
- 450 g de glycérine à 99% de glycérol, de qualité de réactif pour laboratoire.
- 12,5 g formaldéhyde en solution, 40% en volume, de qualité de réactif pour laboratoire.
- 350 ml eau distillée ou déminéralisée.

**III-4-1-4 Essai au bleu de méthylène :**

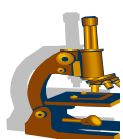
Il a pour objectif de déterminer la quantité et la nocivité des éléments argileux contenus dans les fines du granulats et est basé sur la capacité de ces éléments fins à adsorber du bleu de méthylène.

Le colorant étant préférentiellement adsorbé par les argiles, les matières organiques et les hydroxydes de fer, cette capacité rend compte globalement de l'activité de surface de ces éléments.

L'essai consiste à injecter successivement des doses élémentaires d'une solution de bleu dans un bain aqueux contenant la prise d'essai. L'adsorption est contrôlée après chaque ajout en effectuant une tache sur un papier filtre. La "valeur de bleu" des fines à la tache ( $V_{bta}$ ) est la quantité en grammes de bleu adsorbé par 100g de fines.

**III-4-1-5 Foisonnement :**

Le foisonnement est l'augmentation du volume total du granulats fin à l'état humide par rapport à l'état sec. La tension superficielle de l'humidité éloigne les particules, provoquant un accroissement de volume. Même compacté au préalable, un granulats fin humide



(tel le sable) foisonne lorsqu'on le manipule à la pelle ou qu'on le déplace lorsqu'il est humide.

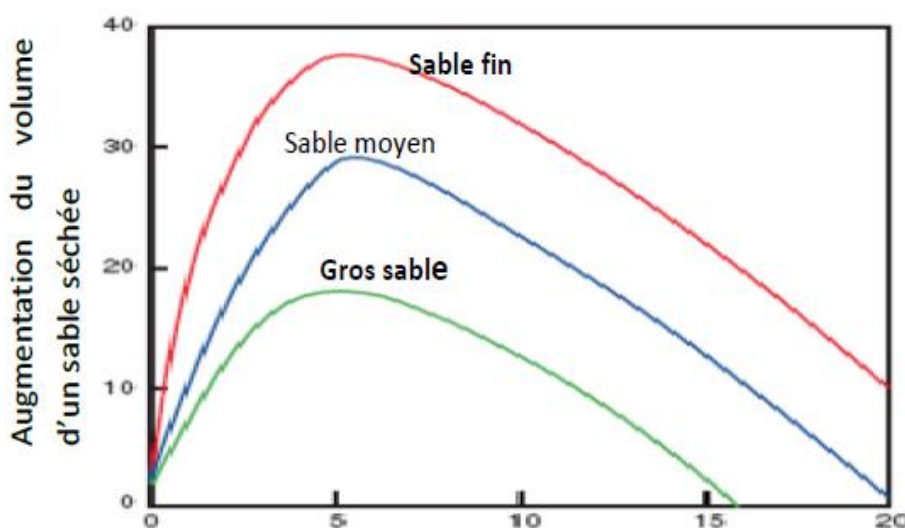


Figure 3.27 Foisonnement des différents sables en fonction de l'humidité

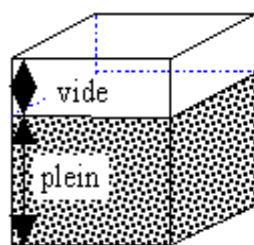
### III-4-1-6 La porosité :

La porosité d'un matériau est le rapport du volume des vides au volume total, elle est déterminée par la relation suivante:

$$P_s (\%) = (1 - (\rho/\gamma)) \times 100$$

Pour le cas de notre sable.

$$P_s = 35.94\%$$



$$p = \frac{\text{volume des vides}}{\text{volume total}}$$

Figure 3-28 la porosité.

### III-4-1-7 Analyse granulométrique :

L'analyse granulométrique a pour objet de déterminer la grosseur des grains qui constituent les granulats (dans notre cas le sable) et le pourcentage de chaque grosseur.

L'essai granulométrique consiste à fractionner au moyen d'une série de tamis ( en général les tamis de modules 20, 23, 26, 39, 32, 35, 38). ( tableau 3-14 )

Module	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Tamis (mm)	0.08	0.100	0.125	0.160	0.200	0.250	0.315	0.400	0.500	0.630	0.800
Module	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41
Tamis (mm)	1.00	1.25	1.60	2.00	2.50	3.15	4.00	5.00	6.30	8.00	10
Module	42	43	44	45	46	47	48	49	50		
Tamis (mm)	12.5	16	20	25	31.5	40	50	63	80		

Tableau 3-14 Dimension nominal des tamis

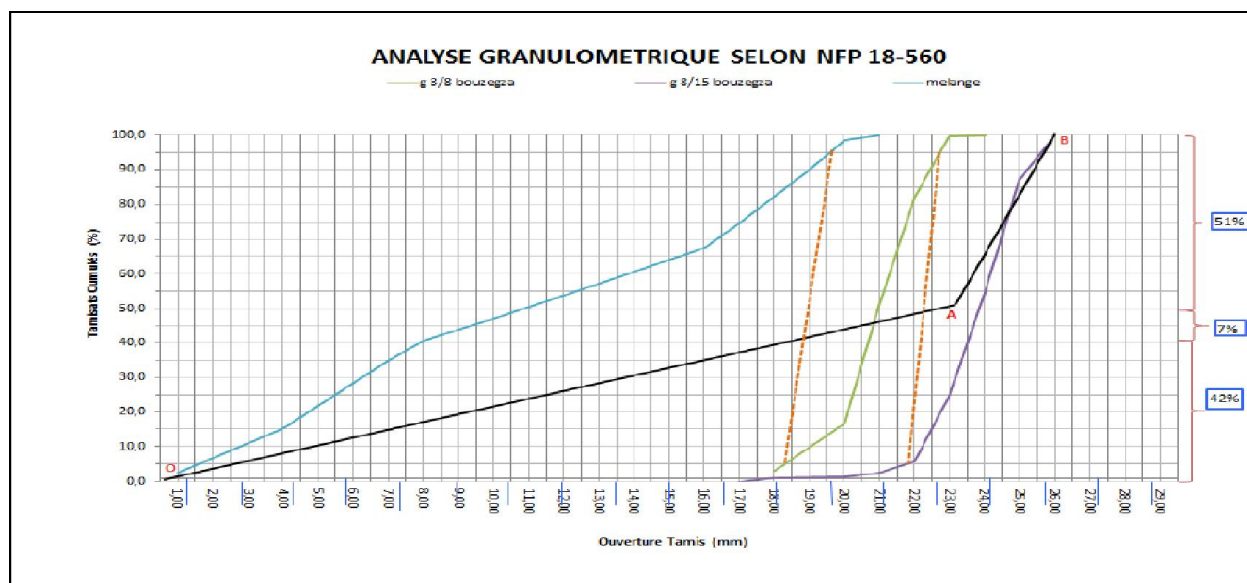
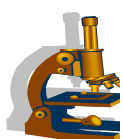


Figure 3-29 Courbe granulométriques dans différent cas

**Module de finesse ( norme NF P18-304) :**

Le module de finesse d'un sable est égale au 1/100 de la somme des refus exprimés en pourcentage sur les différents tamis de la série suivante : 0,08-0.16-0.315-0.63-1.25-2.5-5

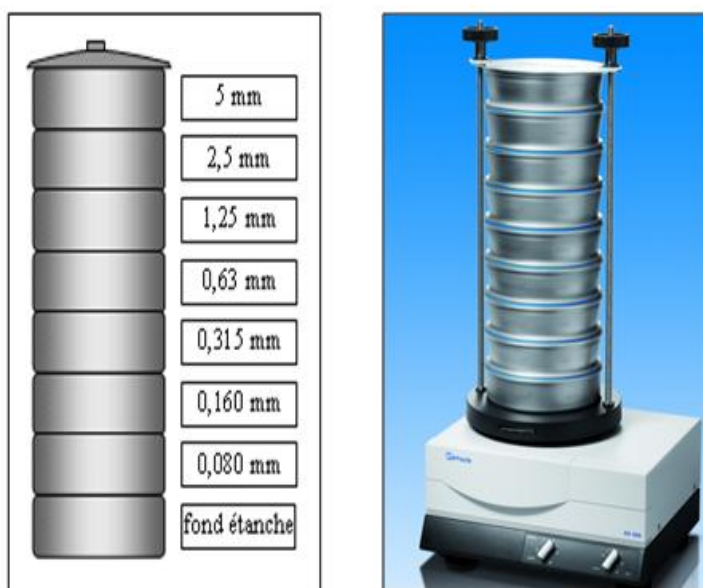
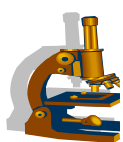


Figure 3-30 Tamiseuse électrique ( laboratoire Lafargeholcim M'sila )

pour notre cas on a trouvé un module de finesse de **1,76** ce qui correspond à un sable fin..



### III-4-2 Analyse chimique :

La composition chimique est déterminée sur des grains inférieurs à 80µm au laboratoire de Lafargeholcim (Cimenterie M'sila)

Les résultats de l'analyse chimique obtenue par la méthode d'essai "Fluorescence aux rayons X" sont donnés par le Tableau ( 3-15).

Eléments	Teneurs (%)
Silice ( SiO <sub>2</sub> )	97.6
Alumine ( Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	1.07
Oxyde ferrique ( Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0.89
Oxyde de magnésium ( MgO )	0.16
Oxyde de calcium ( CaO )	1.15
Perte au feu ( P.A.F )	2.17

Tableau 3-15. Composition chimique du sable de dune.

### III-5 METHODES D'ESSAIS

#### III-5-1 Essai sur ciment anhydre :

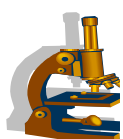
##### III-5-1-1 Masse volumique absolue :

Il s'agit de déterminer la masse volumique absolue des quatorze (14) types de ciments utilisés dans notre étude.

La technique expérimentale utilisée est celle de l'appareil appelé "le Densimètre de Le Chatelier". Les résultats sont présentés dans le Tableau ( 3-16 ).

##### \*Conduite de l'essai :

- Peser 64 g de ciment
- Introduire le benzène ou kérosène (liquide non réactif avec le ciment) jusqu'à la graduation inférieure trait marqué 0 soit V0
- Placer le densimètre dans un bain thermostatique à température constante (20±2°C)
- Attendre 20 minutes et corrigé le niveau si nécessaire après stabilisation de la température.
- Introduire la poudre de ciment dans le densimètre
- Agité doucement en faisant tourner le densimètre pour chasser l'air entraîné par la poudre
- Remettre le densimètre dans le bain thermostatique.
- Après stabilisation du niveau lire le volume après introduction du ciment dans le densimètre



soit  $V_1$

- Calcul de la masse volumique absolue par la relation :

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

Types des ciments	CEM I	CEM II/A-S	CEM II/A-S	CEM II/A-S	CEM II/B-S	CEM II/B-S	CEM II/B-S	CEM II/B-S	CEM III/A	CEM III/A	CEM III/A	CEM III/B	CEM III/B	CEM III/C	CEM III/C
Laitier (%)	0%	6%	10%	20%	25%	30%	35%	40%	50%	60%	70%	80%	85%	90%	
Masse volumique (g/cm <sup>3</sup> )	3.15	3.13	3.11	3.1	3.1	3.08	3.07	3.05	3.03	3.03	3.00	2.97	2.95	2.91	

Tableau 3-16 Masse volumique absolue des ciments.

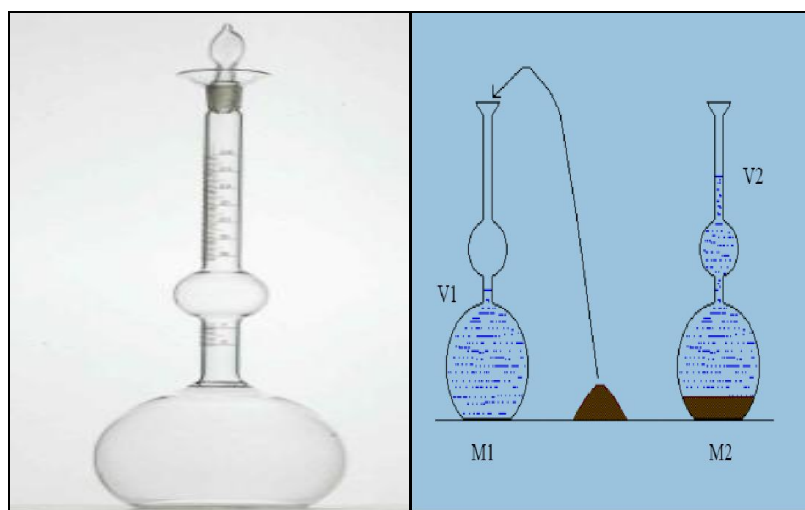


Figure 3-31 Le Chatelier flask

### III-5-1-2 Mesure de la finesse du ciment ( Norme NF P 15-442 -EN-196-6)

#### \* Principe de l'essai :

Elle consiste à mesurer le temps mis par une quantité fixée d'air pour traverser un lit de ciment compacté à une dimension et une porosité spécifiées. ( Figure 3-9 )

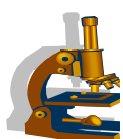
La surface massique est proportionnelle au temps mis pour traverser la couche de ciment.

#### \* Conduite de l'essai.

- Peser une quantité de ciment pour obtenir un lit de ciment de porosité  $e = 0.500$ .

- Mettre la poudre de ciment dans la cellule puis compacter à l'aide du piston

- Placer la surface conique de la cellule dans le rodage conique au sommet du manomètre



- Obturer le dessus du cylindre avec bouchon adéquat. Ouvrir le robinet d'arrêt en amenant le niveau du liquide a 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.

$$S = \frac{K}{\rho} \frac{\sqrt{e^3}}{(1-e)} \frac{\sqrt{t}}{\sqrt{0,1\eta}} \quad (cm^2 / g)$$

Avec:

K: constante de l'appareil ( K= 2,176)

$\gamma$ : Masse volumique du ciment en  $g/cm^3$

$\eta$  : Viscosité de l'air à la température de l'essai en poise

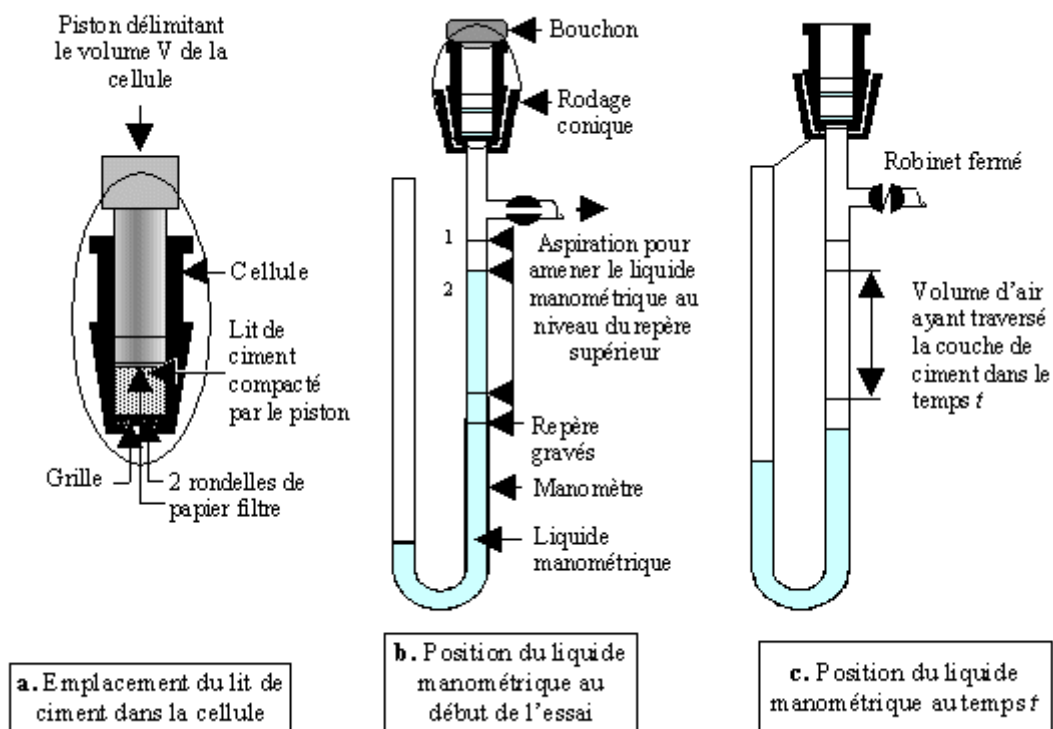
t : Temps de passage de l'air dans la couche de la poudre de ciment en seconde

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

$m = \gamma c.v.e$

v= 1.824 volume de la cellule

e = porosité du ciment dans la cellule



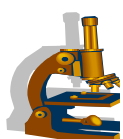


Figure 3-32 Perméabilimètre de Blaine.

Types des ciments	CEM I	CEM II/A-S	CEM II/A-S	CEM II/A-S	CEM II/B-S	CEM II/B-S	CEM II/B-S	CEM II/B-S	CEM III/A	CEM III/A	CEM III/A	CEM III/B	CEM III/B	CEM III/C	CEM III/C
Laitier (%)	0%	6%	10%	20%	25%	30%	35%	40%	50%	60%	70%	80%	85%	90%	90%
SSB (cm <sup>2</sup> /g)	4000	3950	3920	3900	3880	3820	3780	3740	3700	3680	3610	3500	3480	3380	3380

Tableau 3-17 SSB de défirment ciment préparé

### III-5-1-3 Analyse granulométrique :

L'analyse des échantillons des ciments composés a été réalisée au laboratoire de la cimenterie lafargeholcim (cimenterie M'sila) à l'aide d'un GRANULOMETRE A LASER DE TYPE MASTERSIZER « S » ( Figure 3-10)

qui est un kit composé des éléments suivants :

- \* Un analyseur de type (banc long) composé essentiellement d'un générateur de source LASER (He-Ne 633 nm).
- \*de différentes lentilles interchangeables relatives aux largeurs de gammes granulométriques (0.05µm à 900µm, 0.5µm à 900µm, 5µm à 3.5mm).
- \*44 détecteurs
- \*carte électronique d'interface.
- \*Deux échantillonneurs et deux chambres d'analyses (voie humide et voie sèche).
- \*Un logiciel MALVERN,pour le traitement des données .

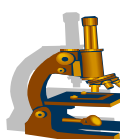


Figure 3.33 GRANULOMETRE A LASER DE TYPE MASTERSIZ

**\* Méthodologie :**

**- Paramètres utilisés :**

Les statistiques de la distribution sont calculés d'après les résultats, en utilisant les dérivés  $D[m,n]$ : **D(v,0.1)**, **D(v,0.5)** et **D(v,0.9)** sont des mesures standards de l'analyse.

**D(v,0.5)** est la taille de particules pour laquelle 50% de l'échantillon a une taille inférieure et 50% de l'échantillon a une taille supérieure à cette taille, et également connue sous le nom de MMD (Mass Médian Diameter).

**D(v,0.1)** est la taille de particules pour laquelle 10% de l'échantillon se trouve en dessous de cette dimension.

**D(v,0.9)** est la taille de particules pour laquelle 90% de l'échantillon se trouve en dessous de cette dimension.

**D(4.3)** est le diamètre moyen (volume).

**D(3.2)** est le diamètre moyen pondéré en surface.

Cette valeur est également connue sous le nom de diamètre de Sauter.

**Le span** est la mesure de la largeur de la distribution, plus cette valeur est faible plus la distribution est étroite.

La largeur se calcule par la formule suivante:

$$\text{Span} = \frac{D(0.9) - D(0.1)}{D(0.5)}$$

**Concentration** est la concentration volumique.

Elle se calcule selon la loi de Beer-Lambert et s'exprime sous forme de pourcentages.

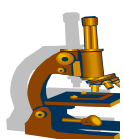
**Distribution** indique le type de distribution qui a été utilisée pour l'analyse.

**Obscurité** aide à fixer la concentration de l'échantillon lorsque celui-ci est ajouté au dispersant.

C'est une mesure de la qualité de lumière laser perdue, due à l'introduction de l'échantillon dans le faisceau laser.

La plage idéale s'étend de 10% à 30%.

**Uniformité** est une mesure de l'écart absolu à partir de la médiane.



**\*Résultats Lecture du rapport :**

Size Low ( $\mu\text{m}$ ) et In (%) : Représentent respectivement le diamètre des grains et les fractions équivalentes (fréquence).

Size High ( $\mu\text{m}$ ) et under (%) : Montrent le diamètre des grains et les pourcentages cumulés.

**\* Lecture de la courbe :**

Le graphe se présente en échelle logarithmique. L'abscisse(X) indique le diamètre des grains en  $\mu\text{m}$  et l'ordonnée (Y) avec deux échelles, dont l'échelle de gauche est relative aux pourcentages (%) des fractions lues sur la courbe de fréquence (forme de cloche); l'échelle de droite, indique le pourcentage (%) cumulé dans le cas où une courbe cumulative est représentée (forme de «S»).

**III-5-1-4 Analyse granulométrique ( Méthode alpine ) :**

**- Objet :**

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

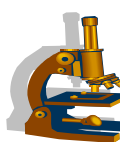
Nous allons décrire l'appareil et les étapes pour procéder à un tamisage de produits et nous préciserons les consignes à respecter.

**- Domaine d'application :**

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



**Figure 3-34 Tamiseuse Alpine ( Laboratoire de Lafargeholcim M'sila ).**



**- Mode opératoire :**

**- Appareillage :**

**- Description :**

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

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

L'ensemble de l'appareil comprend :

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

**-Détermination du rejet en utilisant un seul tamis :**

Voici les étapes à suivre :

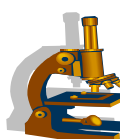
- faire sécher la matière à tamiser si nécessaire.
- placer le tamis à utiliser sur le bâti.
- peser 10g de matière et vider sur le tamis.
- mettre en place le couvercle en plexiglas.
- brancher l'appareil en tournant vers la droite le bouton de la minuterie jusqu'à la butée fixée d'avance sur 5 min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

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

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

Par la suite, la matière grossière soulevée par le courant d'air nettoie elle-même le couvercle.

L'ouverture d'aspiration dans le talon du bâti du tamis doit être absolument libre. On peut tirer le couvercle pour un court instant afin d'écraser des grumeaux éventuels.



- Du fait de l'aspiration, il ne se produit pas de perte de matière.
- Lorsque les 5 minutes sont écoulées, l'appareil s'arrête automatiquement.
- Couper alors l'aspiration.
- Peser la matière restant sur le tamis.
- Soit **P** le poids trouvé en grammes.

**Rejet = P × 10 (%)**. ( Voir Tableau 3-18 )

Types des ciments	CEM I	CEM II/A-S	CEM II/A-S	CEM II/A-S	CEM II/B-S	CEM II/B-S	CEM II/B-S	CEM III/A	CEM III/A	CEM III/A	CEM III/B	CEM III/B	CEM III/C	CEM III/C
Laitier (%)	0%	6%	10%	20%	25%	30%	35%	40%	50%	60%	70%	80%	85%	90%
32 µm (%)	12.5	12.8	13.1	13.4	13.7	14	14.3	14.6	15	15.3	15.6	15.9	16.2	16.5
45 µm (%)	4	4.2	4.4	4.6	4.8	5	5.2	5.4	5.6	5.8	6	6.2	6.4	6.6

Tableau 3-18 Caractéristiques de la granulométrie ( Refus 32& 45 µm ) des différents ciments.

### III-5-2 Essais sur ciment hydraté ( pâtes de ciment )

#### III-5-2-1 Essai De Consistance ( Norme EN 196-3 ) :

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

L'essai a été réalisé avec l'appareil de Vicat selon la norme EN 196-3 Figures ( 3-35).

#### \*Objectif de l'essai :

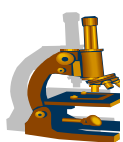
La consistance de la pâte de ciment est une caractéristique qui évolue au cours du temps.

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

#### - Principe de l'essai :

La consistance est évaluée en mesurant l'enfoncement d'une aiguille cylindrique de Ø = 10 mm sous l'effet d'une charge constante (300g).

L'enfoncement est d'autant plus rapide et important que la consistance est plus fluide.



- 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 15 s, faire le raclage de la pâte

\*Remettre le malaxeur en marche pendant 90s à vitesse lente

\*Introduire la pâte immédiatement dans le moule tronconique de hauteur 40mm et de diamètre 70 et 80 mm posé sur une plaque en verre huilée sans tassement ni vibration excessives

\*Enlever l'excès de la pâte par un mouvement de va et vient avec une truelle maintenue perpendiculairement à la surface du moule.

\*Placer l'ensemble sur la platine de l'appareil de Vicat.

\*La sonde de diamètre  $\varnothing = 10$  mm est amenée à la surface de la pâte et lâchée sans vitesse initiale. La sonde s'enfonce dans la pâte. Quand elle s'immobilise; ou au plus tard 30s après l'avoir relâchée,

\*Mesurer la distance  $d$  entre l'extrémité de la sonde et le fond du moule, cette distance  $d$  caractérise la consistance.

Si  $d = 6\text{mm} \pm 2$ ; c'est la consistance normalisée Si  $d$  est différente de cette valeur, on refait l'essai avec un nouveau rapport E/C jusqu'à l'obtention de la valeur recherchée.

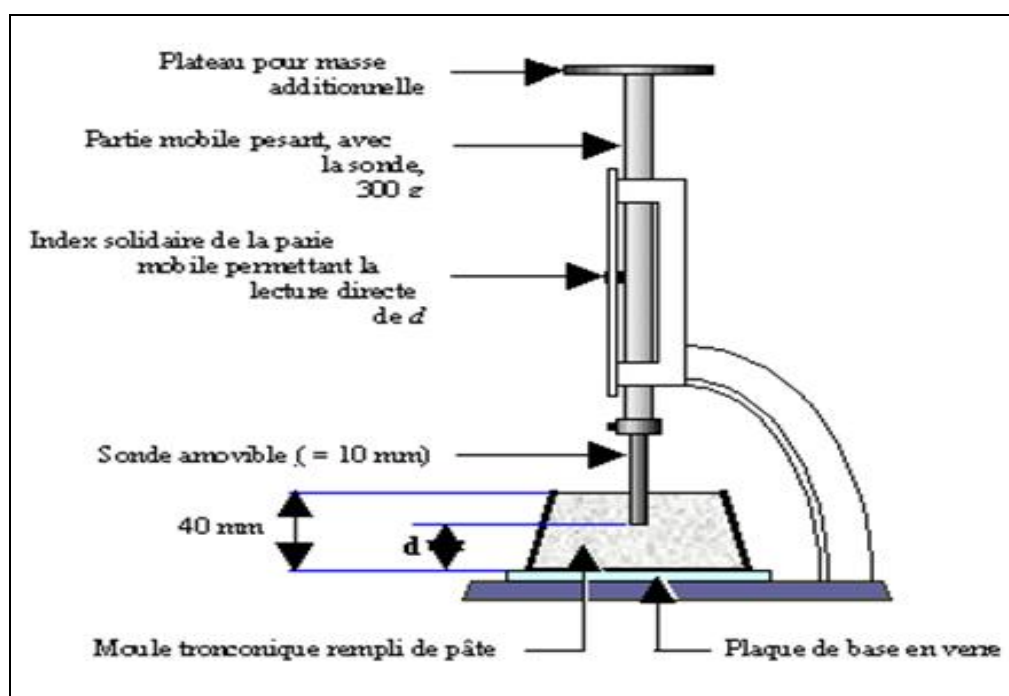


Figure 3.35 Appareil de Vicat ( Consistance % E/C)



III-5-2-2 ESSAI DE PRISE :

- Objectif de l'essai :

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

- Principe de l'essai :

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



Prisomètre (Vicat automatique)



Vicat Manuel

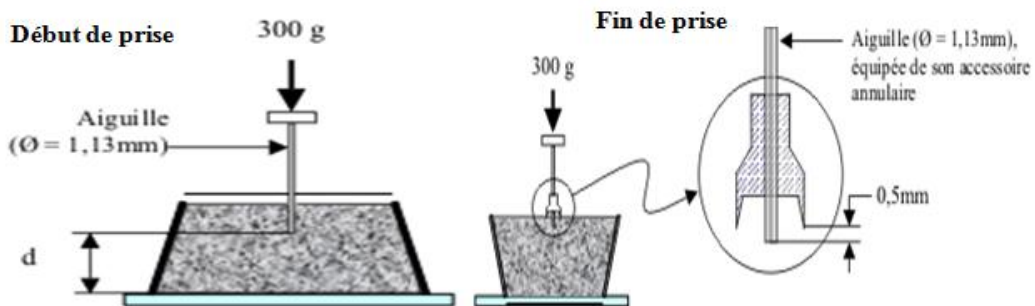


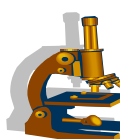
Figure 3.36 Appareil de vicat ( mesure de temps de prise DP& FP )

Le vicat manuel équipée d'une aiguille de 1.13mm de diamètre ; sous l'effet d'une charge de 300g l'aiguille s'enfonce à une distance d du fond du moule.

Si  $d = 6\text{mm} \pm 3$

On dit que c'est le début de prise, le temps est mesuré à partir du temps 0 du début de malaxage.

Si l'enfoncement de l'aiguille dans la pâte vaut  $d = 0.5\text{mm}$ . On dit que c'est la fin de prise, alors la pâte devient un bloc rigide.



**- Equipement utilisé :**

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

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

Il s'agit de confectionner une pâte de ciment normalisée comme indiqué au 2-5-2-1.

Le temps zéro est celui où le ciment a fini d'être ajouté à l'eau dans la cuve du malaxeur

L'aiguille est amenée à la surface de l'échantillon et relâchée sans vitesse initiale.

Lorsqu'elle s'immobilise (ou après 30s d'attente) .

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

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

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

**III-5-2-3 Essai de stabilité :**

**- Objectif de l'essai :**

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

**- Principe de l'essai :**

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

**- Equipement nécessaire :**

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

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

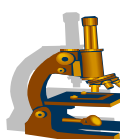
Ces moules sont fondus de façon à pouvoir s'ouvrir en cas d'augmentation de volume de la pâte.

**- Conduite de l'essai :**

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

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

Au bout de ce temps on mesure à 0.5mm près l'écartement **A** des pointes des aiguilles Le moule est entreposé dans la bouilloire pendant  $3\text{h} \pm 5\text{mn}$  à une température d'ébullition. Soit **B**



l'écartement au bout de ce temps des pointes des aiguilles et soit C l'écartement après refroidissement à 20°C La stabilité est caractérisée par la valeur C-A

Stabilité = C-A

Expansion = B-A

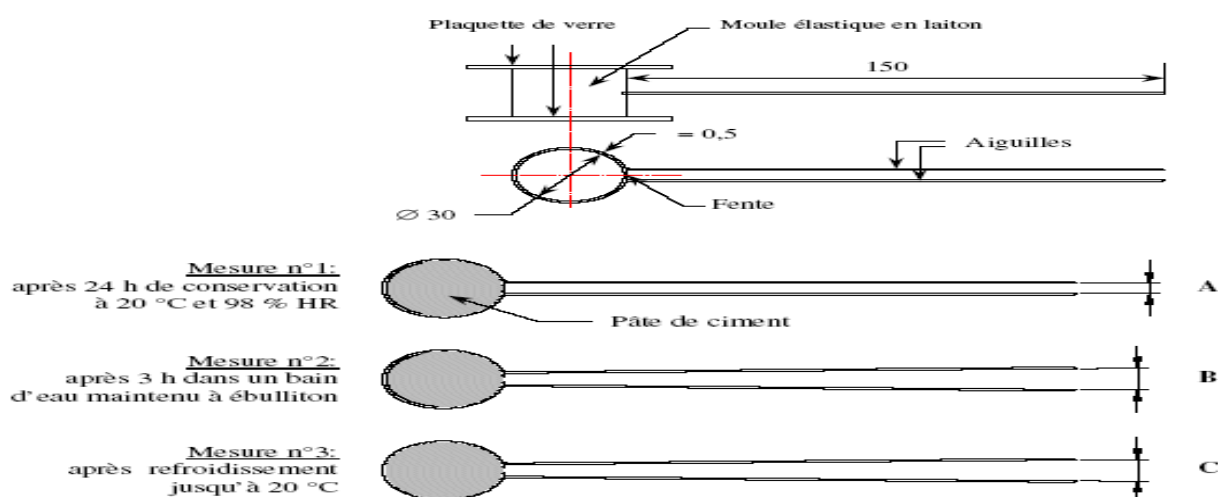


Figure 3-37 les Aiguillé de chatelier .

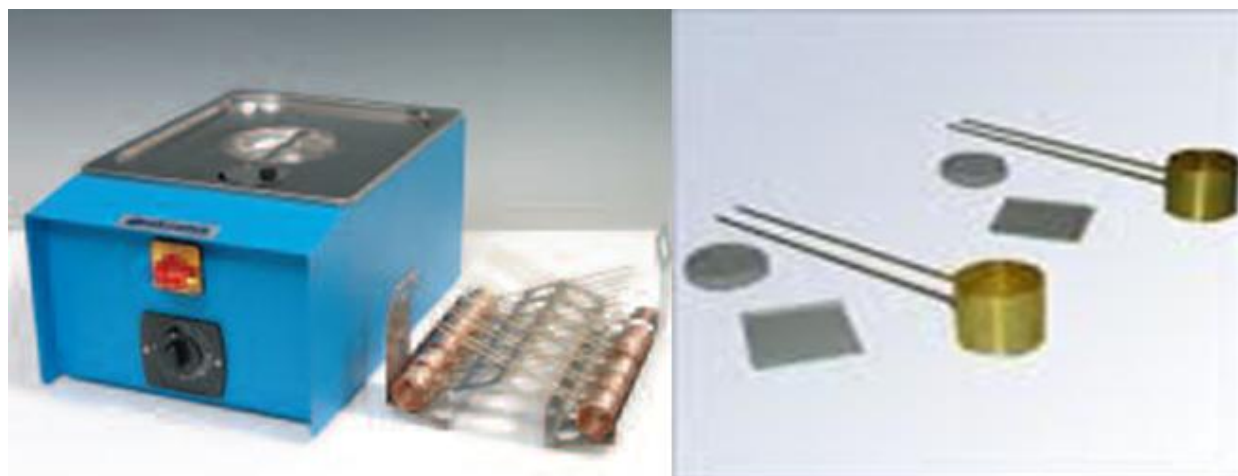
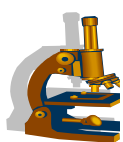


Figure 3-38 les Aiguillé et bain marie de chatelier

**III-5-3 Essai sur mortier :****III-5-3-1 Mortier normalisé :****a-La résistance mécanique .**

épreuves contenant un mélange ciment Portland et calcaire ont été coulés selon la norme EN 196-3 et EN 196-1 .

L'incorporation de laitier dans les ciments permet une meilleure hydratation des anhydres . Nous avons choisi un taux de substitution du ciment Portland au laitier et ciment de haut fourneau de (0%, 6%, 10%, 20%, 25%, 30%, 35%, 40%, 50%, 65%, 70%, 80%, 85% et 90%) selon la norme EN 196-1 NFP18-508 .

Type de ciment	Clinker ( % )	Gypse ( % )	laitier (%)	L'eau ( ml )	Sable normalisée ( g )
CEM I	95	5	0	225	1350
CEM II/A-S	89	5	6	225	1350
CEM II/A-S	85	5	10	225	1350
CEM II/A-S	75	5	20	225	1350
CEM II/B-S	70	5	25	225	1350
CEM II/B-S	65	5	30	225	1350
CEM II/B-S	60	5	35	225	1350
CEM III/A	55	5	40	225	1350
CEM III/A	45	5	50	225	1350
CEM III/A	35	5	60	225	1350
CEM III/B	25	5	70	225	1350
CEM III/B	15	5	80	225	1350
CEM III/C	10	5	85	225	1350
CEM III/C	5	5	90	225	1350

Tableau 3-19. Composition des mortiers

**III-5-3-2 Préparation des éprouvettes et déroulement des essais mécaniques.**

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

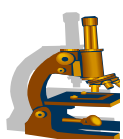


Figure 3-39 Malaxeur semi-automatique de mortier  
(Laboratoire de Lafargeholcim M'sila)



Figure 3-40 Epreuve Prismatique (4x4x16) cm<sup>3</sup>  
(Laboratoire de Lafargeholcim M'sila)

La Méthodes d'essai des ciments et compactés mécaniquement à l'aide d'une table vibrante ( Figure 3-41 ), ou table à choc ( Figure 3-42 ).

Les éprouvettes sont au nombre de trois par moule.

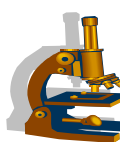


Figure 3-41 Table Vibrante  
(Laboratoire de Lafarge M'sila)



Figure 3-42 Table à Choc  
(Laboratoire de Lafarge M'sila)

Elle sont stockées dans leurs moules pendant 24 heures dans une chambre d'humidité de 20°C±2°C et une humidité de 90% ( Figure 3-43 )..



**Figure 3-43 La Chambre d'humidité  
( Laboratoire de lafargeholcim M'sila )**

Ensuite elles sont démoulées .

Les éprouvettes prismatiques sont plongées dans des bains saturés en chaux afin d'éviter la migration d'hydroxyde de calcium dans l'eau de température de  $20^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$  ( Figure 3-44 )



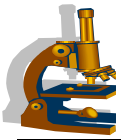
**Figure 3-44 Bains d'eau ( laboratoire de Lafargeholcim M'sila )**

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

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

Les essais de compression sont effectués par une presse de type Perrier d'une charge de 200KN asservie en chargement de  $2400\text{N/s} \pm 200\text{N/s}$ . ( Voir Figure 3-45)

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



**Figure 3-45 Machine de Compression  
(Laboratoire de Lafargeholcim M'sila )**

### **III-5-3-3 Mesure du Retrait sur éprouvette de mortier normal :**

#### **Objectif de l'essai :**

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

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

#### **Principe de l'essai :**

Après le démoulage de l'éprouvette de dimension ( $4 \times 4 \times 16$ )  $\text{cm}^3$ , on procède immédiatement à la mesure de sa longueur puis à 3,7 et 28 jours.

#### **Équipement nécessaire utilisé :**

Il est décrit dans 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 3-46 )

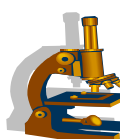


Figure 3-46 Moules ( 4x4x16) cm<sup>3</sup> Équipés de plots de Retrait

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  $\mu$ 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.

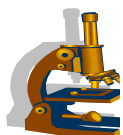


Figure 3-47 Comparateur de Retrait  
( Laboratoire de Lafargeholcim M'sila )

### Conduite de L'essai :

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

Soit  $d_l(t)$  la valeur lue sur le comparateur au temps  $t$  (3 ,7 et 28 jours), la longueur de



l'éprouvette est :

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

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

$\Delta l(t) = L(t) - L_0 = dl(t) - dl(t_0)$  La variation relative de la longueur est :

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

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

### III.5.3.4 Ouvrabilité :

L'ouvrabilité d'un mortier se mesure à l'aide de divers appareils.

Les plus connus sont:

#### a) La table à secousses:

le mortier, après avoir été mis en place et démoulé d'un moule tronconique, reçoit 15 chocs en 15 secondes.

On mesure le diamètre de la galette ainsi obtenue. L'étalement en % est donné par la formule:

$$E\% = 100 \frac{D_f - D_i}{D_i}$$

avec

$D_f$  = diamètre final et  $D_i$  = diamètre initial.

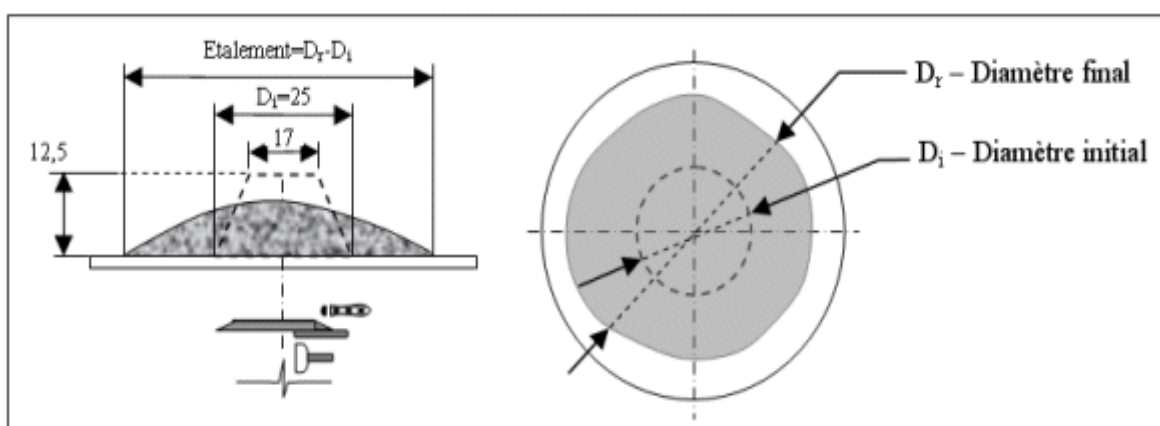
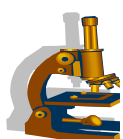


Figure 3-48 L'ouvrabilité



b) Le Maniabilimètre :

il est constitué d'un moule parallélépipédique comportant une paroi mobile et un vibreur.

Le principe de l'essai consiste, après avoir enlevé la paroi mobile, à mesurer le temps mis par le mortier sous vibrations pour atteindre un repère gravé sur la face intérieure du moule.

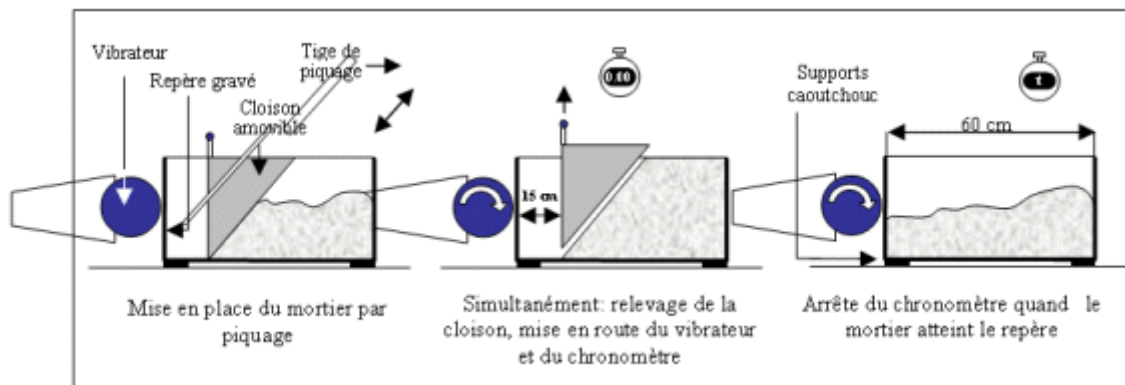
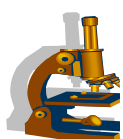


Figure 3-49 Maniabilimètre à mortier (Laboratoire de Lafargeholcim M'sila)

Classification	Temps en s.
Béton sec	$\geq 40$
Béton de bonne Ouvrabilité	$20 \leq t \leq 30$
Béton très plastique	$10 < t < 20$
Béton très fluide	$\leq 10$

Tableau 3-20 Classification de Maniabilimètre (NF P18-452).

c) **Le cône:** dans le cas d'un mortier fluide, on peut mesurer le temps d'écoulement d'une certaine quantité de mortier au travers d'un ajustage calibré situé à la partie inférieure d'un cône. Le cône peut aussi être muni d'un vibreur



### III.5.3.5 La chaleur d'hydratation : ( La méthode semi-adiabatique )

#### 1-Principe :

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

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

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

#### 2- Appareillage :

##### **2.1 Calorimètre :**

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

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

##### **a) un vase isotherme :**

(par exemple un vase Dewar), fait en verre borosilicate plaqué à l'argent ; de forme cylindrique avec un fond hémisphérique.

Ses dimensions intérieures doivent être d'environ 95 mm de diamètre et 280 mm de profondeur ; avec un diamètre extérieur de 120 mm environ.

Un disque de caoutchouc d'environ 85 mm de diamètre et 20 mm d'épaisseur, doit être placé au fond du vase afin de servir d'appui au récipient contenant l'échantillon et de répartir uniformément la charge sur la paroi du vase

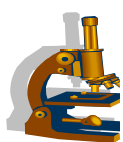
##### **b) une enveloppe très rigide :**

dont la base est suffisamment large pour assurer une bonne stabilité à l'ensemble (en duralumin de 3 mm d'épaisseur, par exemple).

Le vase doit être séparé de la paroi latérale de l'enveloppe par un espace d'air de 5 mm environ et doit reposer sur un appui de 40 mm à 50 mm d'épaisseur, en matériau de faible conductibilité thermique (polystyrène expansé, par exemple).

Le bord supérieur du vase doit être protégé par un joint de caoutchouc placé à son contact.

Ce joint doit être un anneau, épais d'au moins 5 mm, en matériau de faible conductibilité thermique, fixé à l'enveloppe du calorimètre.



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

**c) Un bouchon isolant :**

Constitué de trois parties :

- **la partie inférieure**, plongeant dans le vase et dont le rôle est de limiter au maximum les pertes de chaleur vers le milieu extérieur.

Elle doit être de forme cylindrique, de diamètre égal au diamètre intérieur du vase et d'une épaisseur de 50 mm environ.

Elle doit être réalisée en polystyrène expansé (classe 20 kg/m<sup>3</sup> environ) ou en un autre matériau de caractéristiques thermiques similaires.

Sa base peut être protégée par une plaque de plastique (par exemple, en polyméthylméthacrylate), de 2 mm d'épaisseur environ ;

- la partie centrale, qui sert à assurer l'étanchéité du calorimètre tout en contribuant à la réduction des pertes

de chaleur, doit être composée d'un disque de caoutchouc mousse de 120 mm de diamètre ;

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

**d) caractéristiques de performance :**

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

Cette valeur ainsi que la capacité thermique doivent être déterminées conformément à la méthode d'étalonnage présentée en Annexe A (voir A.3.1).

Le ré-étalonnage est nécessaire :

— au moins tous les quatre ans ou après 200 essais ;

— en cas de détérioration du calorimètre ou d'un composant isolant.

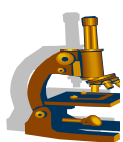
Afin d'éviter de dégrader l'isolation du calorimètre, la température du mortier soumis à l'essai ne doit pas

dépasser 75 °C.

**2.2 Calorimètre de référence :**

de même construction et caractéristiques que le calorimètre d'essai (voir 4.1).

Il doit comporter une boîte à mortier contenant un échantillon de mortier gâché au moins 12 mois auparavant (et considéré comme inerte).



### **2.3 Thermomètres à résistance de platine, pour le calorimètre de référence et chaque calorimètre d'essai,**

dont la graduation doit couvrir, au moins, l'échelle de 19 °C à 75 °C. Si les conducteurs de la résistance électrique sont en cuivre, ils ne doivent pas avoir, dans la partie qui traverse le bouchon, une section supérieure à 0,25 mm<sup>2</sup>.

S'ils sont en un autre métal, la résistance thermique totale par centimètre de conducteur doit être supérieure à 0,10 K.mW<sup>-1</sup> (résistance thermique équivalant à celle d'un conducteur en cuivre de 0,25 mm<sup>2</sup> de section et de 1 cm de longueur).

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

La température de l'échantillon d'essai doit être mesurée avec une précision de  $\pm 0,3$  °C.

Lorsque le calorimètre est étalonné in situ avec les conducteurs utilisés pour les essais de chaleur d'hydratation, la section totale des conducteurs sera au maximum de 0,80 mm<sup>2</sup> (quatre fils de 0,5 mm de diamètre), mais doit être telle que le coefficient de déperdition thermique du calorimètre soit inférieur à 100 J.h<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup> pour un échauffement de 20 K (voir A.3.1.1).

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

### **2.4 Boîte à mortier :**

consistant en 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.

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

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

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

Le diamètre intérieur de l'étui doit être légèrement supérieur à celui du thermomètre.

Sa longueur doit être comprise entre 100 mm et 120 mm environ afin de lui permettre d'atteindre le coeur de l'échantillon.

### **2.5 Appareil d'enregistrement de la température :**

capable d'enregistrer les mesures prises par chaque thermomètre.

### **2.6 Malaxeur à mortier,**

conforme à l'EN 196-1.

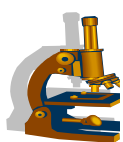


Figure 3-50 Malaxeur semi-automatique de mortier

### **3 Détermination de la chaleur d'hydratation :**

#### **3.1 Laboratoire**

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

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

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

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

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

#### **3.2 Mode opératoire :**

##### **3.2.1 Composition du mortier :**

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

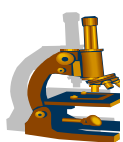
Chaque gâchée de mortier doit être constituée de :

$(360,0 \pm 0,5)$  g de ciment ;

$(1\ 080 \pm 1)$  g de sable normalisé CEN conforme aux exigences de l'EN 196-1

$(180,0 \pm 0,5)$  g d'eau distillée .

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



### 3.2.2 Malaxage :

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

Le malaxeur étant dans sa position de fonctionnement, verser le sable et ensuite le ciment dans le récipient du malaxeur ; homogénéiser le mélange de sable et de ciment pendant 30 s à petite vitesse ; verser l'eau, consigner le temps, et malaxer immédiatement à petite vitesse pendant 60 s ; régler le malaxeur sur la grande vitesse et malaxer à nouveau 60 s.

Afin d'éviter les déperditions thermiques, il est recommandé d'exécuter le malaxage dans un temps relativement court.

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

### 3.2.3 Mise en place de l'échantillon d'essai :

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

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

Remplir l'étui pour thermomètre de ( $2,5 \pm 0,5$ ) cm<sup>3</sup> d'huile (par exemple de l'huile minérale fluide), afin d'améliorer le contact thermique entre l'échantillon d'essai et le thermomètre.

Peser la boîte à mortier à  $\pm 0,5$  g pour pouvoir contrôler, en fin d'essai, toute perte de vapeur d'eau éventuelle.

Aussitôt après, l'introduire dans le calorimètre d'essai et le refermer immédiatement avec le bouchon.

Mettre aussitôt le thermomètre en place dans l'étui pour thermomètre de manière à ce qu'il soit approximativement au coeur de l'échantillon d'essai. Sceller l'orifice de passage à travers le bouchon au moyen d'un dispositif de fermeture.

Le bouchon peut être également obturé au moyen d'un matériau d'étanchéité, malléable, ou de mastic.

Le malaxage et la mise en place de l'échantillon d'essai ne doivent pas prendre plus de 6 min.

En fin d'essai, peser à nouveau la boîte à mortier à  $\pm 0,5$  g.

En cas de réduction de masse supérieure à 2 g, l'essai n'est pas valable et doit être recommencé.

### 3.3 Mesure de l'échauffement :

Prendre le moment où l'on verse de l'eau comme origine des temps.

La mesure de l'échauffement consiste à relever, à des instants déterminés, la température de l'échantillon d'essai et celle de l'échantillon inerte placé dans le calorimètre de référence .

Faire au moins un relevé au cours des 30 premières minutes, suivi par des relevés effectués au moins toutes les :

1 h pendant les premières 24 h

4 h au cours du deuxième jour

6 h jusqu'à la fin de la période d'essai.



La fréquence de ces mesures peut être accrue en fonction des caractéristiques du ciment étudié. Consigner l'instant de chaque relevé de température en heures et minutes.

À chaque relevé de température déterminer l'échauffement de l'échantillon d'essai,  $ht$ , comme la différence entre la température de l'échantillon d'essai,  $T_s$ , et celle de l'échantillon inerte,  $Tr0$ , placé dans le calorimètre de référence.

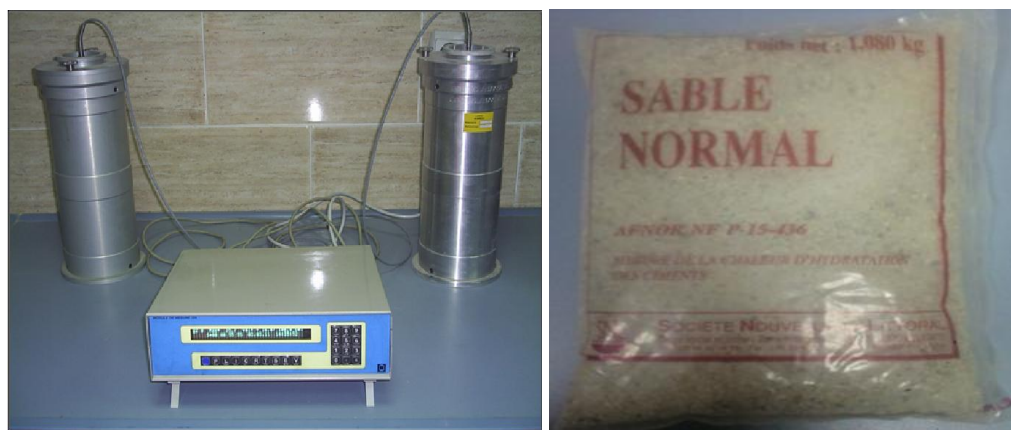


Figure 3-51 Calorimètre sable normalisé ( chaleur )

### 3.4 Chaleur d'hydratation

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

La finesse de mouture: plus le ciment est broyé fin, plus la chaleur d'hydratation est élevée

La nature des constituants: les ciments CPA comportant presque exclusivement du clinker dégagent plus de chaleur que des ciments avec constituants secondaires

La nature minéralogique du clinker: plus les teneurs en aluminat tricalcique ( $C_3A$ ) et silicate tricalcique ( $C_3A$  et  $C_3S$ ) sont élevées, plus la chaleur d'hydratation est forte

La température extérieure.

### 3.5 Evolution de l'hydratation

Le dégagement de chaleur qui accompagne les réactions d'hydratation peut être mesuré par calorimétrie. La chaleur dégagée donne une indication sur l'avancement du processus d'hydratation. La courbe du flux de chaleur d'hydratation présente généralement trois pics qui correspondent à trois maxima comme l'indique la figure ( 3.52).

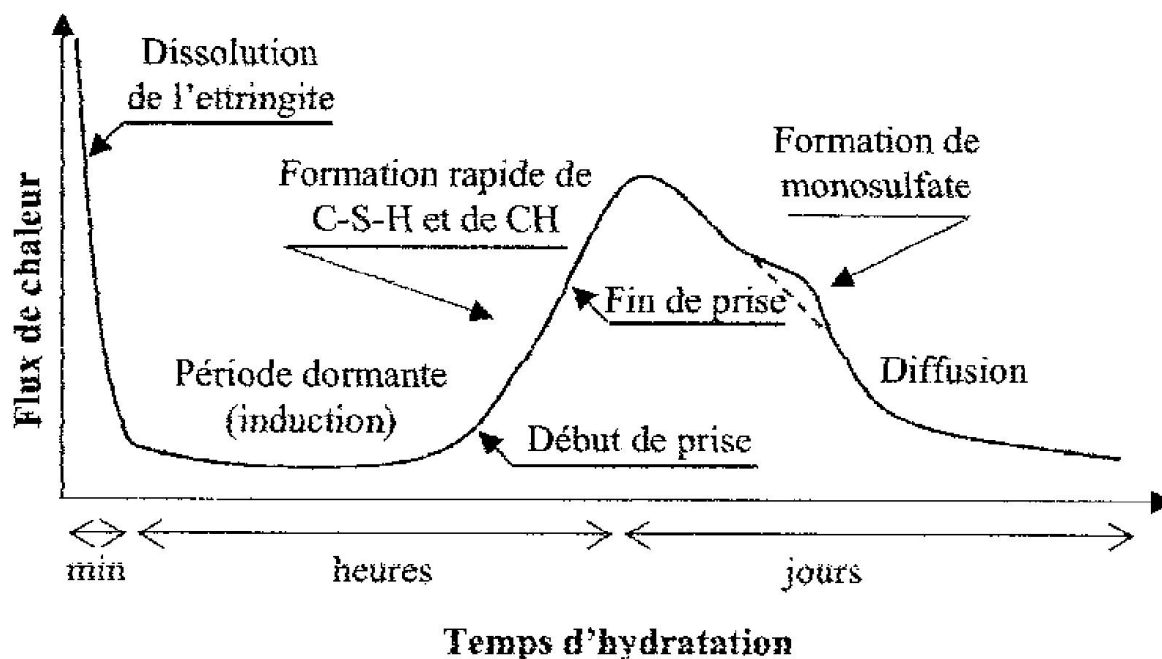
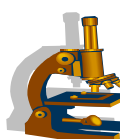


Figure 3-52 dégagement de chaleur lors de l'hydratation du ciment en fonction du temps.

#### Premier pic :

Il s'agit de plus haut, mais il est de courte durée. Au cours de cette période ( $\approx 10$ min), le  $C_3S$  et le  $C_3A$  réagissent immédiatement avec l'eau, formant des C-S-H et de l'ettringite. Ce pic est suivi d'une « période dormante » au cours de laquelle le dégagement de chaleur est relativement faible (sans jamais être nul). Durant cette période des ions  $Ca^{2+}$  et  $OH^-$  sont libérés. Ceci augmente alors le PH de la solution, ralentissant la dissolution des constituants. Le dégagement de chaleur est alors faible.

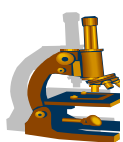
Les transformations physiques dans cette période sont détectées par l'augmentation du raidissement de la pâte.

Les phénomènes physico-chimiques régissant cette phase (période dormante) sont, d'un point de vue pratique, très importants car ils ont un effet sur l'ouvrabilité du béton. Par exemple, pour un rapport  $E/C = 0.5$ , on devra couler le béton dans la structure au plus tard au milieu de la « période dormante ».

#### Deuxième pic :

La « période dormante » prend fin avec l'accélération du dégagement de chaleur. Le second pic atteint son maximum (pour un ciment ordinaire à  $200^\circ C$ ) entre 9 heures et 10 heures. Cette phase d'accélération débute lorsque la concentration en ions  $Ca^{2+}$  et  $OH^-$  de la solution devient critique. Cette sursaturation induit la précipitation de la portlandite.

Il s'ensuit alors les mécanismes de dissolution, de nucléation et de précipitation des différentes phases, permettant la formation des hydrates (C-S-H) et des phases cristallines (ettringite, portlandite). Cette grande activité chimique dégage beaucoup de chaleur, augmentant la



température du matériau. Les hydrates formés commencent à s'enchevêtrer et permettent alors la formation d'un solide d'un solide rigide.

**Troisième pic :**

tous les ciments ne présentent pas de troisième pic de dégagement de chaleur. Lorsqu'il se présente, son intensité et le moment de son apparition varient beaucoup d'un ciment à un autre.

Pour comprendre les réactions qui se déroulent lors de l'hydratation du ciment, et faire un lien avec sa prise et le développement des résistances, il faut s'intéresser à :

- \*L'effet de l'hydratation de chaque phase du ciment sur la chaleur d'hydratation ;
- \*Les raisons des variations considérables du dégagement de chaleur dans le temps ;
- \*Le processus d'agglomération des produits d'hydratation pour remplir l'espace poreux ;
- \*La nature des liens entre les produits d'hydratation dans la pâte durcie.

**EXEMPLE DE DETERMINATION DE LA CHALEUR D'HYDRATATION**

Ciment :

CPA 45

température de gâchée : 20.1°C

Caractéristiques du calorimètre :

$$x \text{ (J.h-1.}^\circ\text{C)} = 63.0 + 0.216 \quad u = 384 \text{ J.}^\circ\text{C-1}$$

Capacité thermique :

$$C = 0.75 (350 + 1050) + (3.76 \times 175) + (0.50 \times 138) + 384 = 2161 \text{ J.}^\circ\text{C-1}$$

$$C/MC = 6161/350 = 6,17 \text{ J,}\zeta$$

**III-5-4 Détermination de la rhéologie du mortier et béton :**

**III-5-4-1 Essai micro béton équivalent M.B.E :**

**III-5-4-1-1 Objectif d'essai M.B.E :**

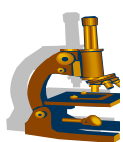
L'essai de micro béton équivalent MBE créé par groupe lafargeholcim pour choisi une formulation béton stable et confortable avec le temps et développement des ciments de haute performance avec des matières locales l'essai suivre deux axes principale :

- E/C.

- suivre la qualité et la quantité d'adjuvant.

Si on utilise à chaque fois une formule béton ca prendre du temps et main d'œuvre et pour ce la on a pense à un micro béton équivalent MBE, en remplant les gravier par le sable et ca en prend en compte la surface spécifique des graviers.

Il faut toujours garde la même quantité de pate.



le but d'essai MBE tracé des limité stable pour la rhéologie des ciments (limite du temps d'écoulement et l'étalement du micro béton équivalent),

à base des résultats d'écoulement et l'étalement du mortier (rhéologie mortier) facilement de voir la rhéologie des bétons (mortier béton équivalent MBE), et suivre une formulation béton stable avec le temps.

#### A-Matériels :

- Malaxeur mortier à 2 vitesses
- Eprouvettes graduées
- Balance de précision à 0,01g près
- Balance de précision à 0,1g près
- Chronomètres
- Main écope
- Plaque de verre (dimensions 50x50 cm environ)
- Mini cône tronconique avec une base inférieure de 10 cm et une base supérieure de 5 cm
- Règle graduée de 50 cm avec une précision de (1 mm±)
- Thermomètre
- Récipients en inox
- Réglet d'arasement
- Mini O'funnel pour mesure de la viscosité ]

#### B-Mode opératoire :

- 1- Introduction des sables dans le bol du malaxeur préalablement humidifié à l'aide d'une éponge essorée.
- 2- De 0 à 30 secondes, début du malaxage à petite vitesse, introduction de l'eau de pré-mouillage en 30 secondes.
- 3- De 30 secondes à 1 minute, malaxage des sables + eau de pré-mouillage pendant 30 secondes.
- 4- De 1 min à 5 min, repos de 4 minutes.
- 5- Entre 5 min et 6 min, introduction des liants (ciment + ajout). Idéalement le plus proche des 6 min.
- 6- De 6 min à 6 min 30, malaxage pendant 30 secondes à petite vitesse.
- 7- De 6 min 30 à 7 min, introduction de l'eau de gâchage adjuvantée à petite vitesse.  
T'0 = 6 min 30 è dès que l'eau de gâchage entre en contact avec le mélange liant-granulat
- 8- De 7 min à 9 min, malaxage pendant 2 minutes à grande vitesse.
- 9- Vérifier l'homogénéité du MBE de manière visuelle (absence de composant non mélangé) en raclant avec la palette le bol. Vous pouvez laisser reposer le mélange pendant 2 min 20 en couvrant avec un linge humide. Remalaxer 10 sec avant les essais pour les réaliser à 5 min après T'0.
- 10- Réhomogénéiser avec la main écope le cas échéant.
- 11- Noter toutes remarques concernant l'aspect du MBE (ressuage, ségrégation, bullage....).

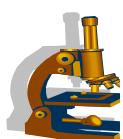
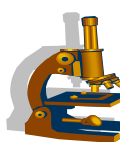


Figure 3-53 Equipement pour mesuré la rhéologie des Ciments MBE ( écoulement et étalement )

C-Les états d'écoulement et d'étalement d' MBE :

T d'écoulement (s)	Etat	Etalement (cm)	Etat
0 - 4	Critique	< 24	Critique
05 - 08	A surveiller	25 - 27	A surveiller
09 - 14	Idéal	28 - 33	Idéal
15 - 20	A surveiller	34 - 38	A surveiller
> 21	Critique	> 39	Critique

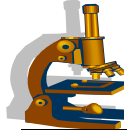
Tableau 3-21 états d'écoulement et d'étalement d' MBE



## III-5-4-1-2 Formulation MBE Ciments préparés :

<b>MBE CIMENT CHF 65% de laitier</b>	
	E/C= 0,47 (47%)
<b>Matériaux</b>	Dosage/g
<b>Ciment</b>	818.21
<b>Eau Pre Mouillage</b>	85.51
<b>Tail Water</b>	297.7
<b>Sable 0/1</b>	394.86
<b>Sable 0/4</b>	1030.26
<b>Tempo 12</b>	0.5 %
<b>MBE CIMENT CHF ( 50% Laitier )</b>	
	E/C= 0,48 (48%)
<b>Matériaux</b>	Dosage/g
<b>Ciment</b>	765.34
<b>Eau Pre Mouillage</b>	89.21
<b>Tail Water</b>	288.58
<b>Sable 0/1</b>	148.85
<b>Sable 0/4</b>	1337.95
<b>Tempo 12</b>	0.52 %

Tableau 3-22 Formulation MBE Ciments préparés



## Chapitre IV : Résultats et Interprétation

### IV-1 Introduction :

Dans ce chapitre; on présente les différents résultats expérimentaux des essais effectués sur les différents composants du ciment anhydre, les mortiers et les essais sur le béton frais et durci, suivi par des discussions et interprétations basés sur la littérature.

### IV-2 Facteurs de Qualité du Clinker :

#### IV-2-1 Broyabilité du clinker :

D'après le Tableau (4-1), le clinker de la cimenterie Lafargeholcim M'sila de Hamam Dalaâ a une broyabilité plus aisée (plus le coefficient est grand plus la broyabilité demande moins d'énergie) ce qui favorise l'obtention d'une granulométrie plus fine avec un rendement énergétique favorable.

Nature du clinker	Clinker de Lafarge de M'sila H/Dalaâ
Broyabilité	3200 ±100

Tableau 4-1 Coefficient de Broyabilité.

#### IV-2-2 Qualité du clinker :

D'après le Tableau (4-2), on constate que le coefficient de saturation en chaux vaut 0.985 (LSF) (proche de 1) donc presque toute la chaux est consommée et par conséquent on obtient un ciment qui ne présente aucun risque d'expansion. Donc notre clinker est de bonne qualité.

Nature du clinker	Clinker de Lafarge de M'sila H/Dalaâ
Coefficient de qualité ( LSF )	98,5

Tableau 4-2 Coefficient de saturation en chaux du clinker.

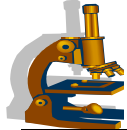
#### IV-2-3 Résistance au choc Clinker ( Essai Los Angeles ) :

##### Principe de l'essai :

Faire rouler dans un tambour rotatif un échantillon de granulat mélangé à des boulets d'acier. À la fin, on évalue la quantité de matériau retenu sur le tamis de 1,6 mm.

##### Préparation de l'échantillon à essayer :

La masse de l'échantillon doit être égale à 15 kg au minimum de la classe granulaire 10mm à 14 mm.



L'essai doit être effectué sur un granulat passant au tamis de 14 mm et retenu sur celui de 10 mm. En plus la courbe granulométrique de l'échantillon doit répondre à l'une des exigences suivantes :

- a) 60 % à 70 % de passant sur un tamis de 12,5 mm ; ou
- b) 30 % à 40 % de passant sur un tamis de 11,2 mm.

Tamiser l'échantillon pour laboratoire sur les tamis de 10 mm, 11,2 mm (ou 12,5 mm) et 14 mm pour obtenir des classes granulaires séparées 10 mm à 11,2 mm (ou 12,5 mm) et 11,2 mm

(ou 12,5 mm) à 14 mm. Laver chaque fraction séparément, conformément à l'article 6 de l'EN (933-1:1997), et sécher les dans l'étuve à  $(110 \pm 5)$  °C jusqu'à masse constante.

Laisser refroidir à température ambiante. Mélanger les deux fractions pour obtenir un échantillon pour laboratoire modifié 10 mm à 14 mm conforme aux proportions données ci-dessus.

La masse de l'échantillon pour essai doit être égale à  $(5\ 000 \pm 5)$  g.

### **Mode opératoire :**

Vérifier que le tambour soit propre avant d'y mettre l'échantillon. Placer avec précaution les boulets dans la machine, puis y introduire la prise d'essai. Remettre le couvercle et faire faire 500 tours à la machine, à une vitesse constante de 31 tr/min à 33 tr/min.

Verser le granulat sur un plateau placé sous l'appareil en veillant à éviter toute perte de matériau. Vider le tambour et le nettoyer soigneusement en éliminant toutes les fines, surtout autour de la plaque saillante. Enlever soigneusement les boulets du plateau en veillant à ne perdre aucune particule du granulat.

Analyser le matériau recueilli sur le plateau conformément à l'EN 933-1:1997, par lavage et tamisage au tamis à 1,6 mm. Sécher le refus à 1,6 mm à une température de  $(110 \pm 5)$  °C, jusqu'à obtention d'une masse constante.

### **Calcul et expression des résultats :**

Calculer le coefficient Los Angeles LA à partir de l'équation suivante :

$$LA = \frac{5000 - m}{50}$$

où :

m est la masse du refus à 1,6 mm, en grammes.

Enregistrer le résultat arrondi à l'unité la plus proche.



Figure 4-1 Appareil pour Essai Los Angeles.

Désignation de l'essai	Fraction testée	Résultats obtenus	observation
Essai los Angeles	Clinker	LA = 37 %	Dureté moyenne

Tableau 4-3 Analyse de granulats clinker

D'après le Tableau (4-3), on constate que le clinker utilisé dans cette étude présente une bonne facilité de broyage (dureté moyenne).

### IV-3 Influence du Taux d'ajout laitier Sur le Poids Spécifique du Ciment :

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

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

- Une réduction du poids spécifique avec l'augmentation du pourcentage d'ajout laitier dans le ciment.
- Augmentation des temps (début et fin) de prise.

Selon les résultats obtenus, on note que l'augmentation de la quantité de l'ajout laitier incorporé dans le ciment à un effet significatif sur le poids spécifique de ciment.

Ceci peut être dû à la porosité créée par la substitution partielle du clinker par laitier (taux de substitution de laitier) et la faible densité de laitier (densité de laitier =  $2.8 \pm 0.1 \text{ g/cm}^3$ ) inférieur à la densité de clinker ( $3.15 \pm 0.1 \text{ g/cm}^3$ ).

Types des ciments	CEM I	CEM II/A-S	CEM II/A-S	CEM II/A-S	CEM II/B-S	CEM II/B-S	CEM II/B-S	CEM III/A	CEM III/A	CEM III/A	CEM III/B	CEM III/B	CEM III/C	CEM III/C
Laitier (%)	0%	6%	10%	20%	25%	30%	35%	40%	50%	65%	70%	80%	85%	90%
Masse volumique ( $\text{g/cm}^3$ )	3.15	3.13	3.11	3.1	3.1	3.08	3.07	3.05	3.03	3.03	3.00	2.97	2.95	2.91

Tableau 4-4 Poids spécifique des ciments préparés.

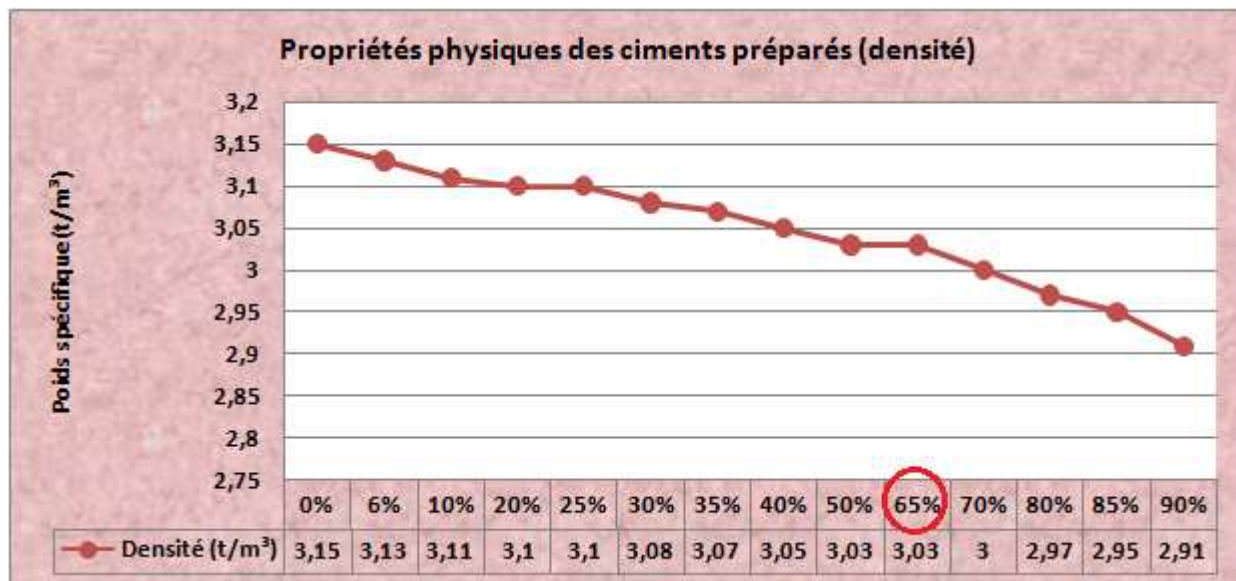
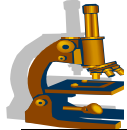


Figure 4-2 Variation du poids spécifique de ciment en fonction de taux d'ajout (laitier).

**IV-4 Influence du Taux d'ajout laitier Sur la Surface Spécifique du Ciment :**

Les résultats du Tableau (4-5) et la Figure (4-3) présentent l'effet de l'addition d'ajout laitier sur la surface spécifique du ciment.

Les Conclusions suivantes peuvent être tirées :

- Une diminution de la surface spécifique avec l'augmentation du pourcentage d'ajout laitier dans le ciment. Selon les résultats obtenus, voir tableau (4-5), on note que l'augmentation de la quantité de l'ajout laitier incorporé dans le ciment à un effet significatif sur le surface spécifique (Blaine) de ciment.

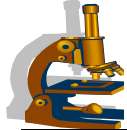
Types des ciments	CEM I	CEM II/A-S	CEM II/A-S	CEM II/A-S	CEM II/B-S	CEM II/B-S	CEM II/B-S	CEM III/A	CEM III/A	CEM III/A	CEM III/B	CEM III/B	CEM III/C	CEM III/C
Laitier (%)	0%	6%	10%	20%	25%	30%	35%	40%	50%	65%	70%	80%	85%	90%
SSB (cm <sup>2</sup> /g)	4000	3950	3920	3900	3880	3820	3780	3740	3700	3680	3610	3500	3480	3380

Tableau 4-5 Surface spécifique des ciments préparés.

Ceci peut être dû à la porosité créée par la substitution partielle du clinker par laitier (taux de substitution de laitier) et la densité de l'ajout.

(Densité de laitier =  $2.8 \pm 0.1 \text{ g/cm}^3$ ) et broyabilité de l'ajout laitier (difficile à broyé) de  $(2400 \pm 100)$  par rapport le clinker facile à broyé de  $(3200 \pm 100)$  et densité clinker  $(3.15 \pm 0.1 \text{ g/cm}^3)$ .

La finesse du ciment joue un rôle essentiel dans la compacité du béton est par conséquent, dans le développement de sa résistance mécanique.



Une finesse élevée assure un contact plus grand des grains de ciment, ce qui permet une forte réactivité et donne des résistances mécaniques élevées à long terme.

En augmentant la surface spécifique du laitier de 2400 cm<sup>2</sup>/g à 4000 cm<sup>2</sup>/g, l'activité du ciment au laitier augmente et par suite la résistance mécanique augmente aussi.

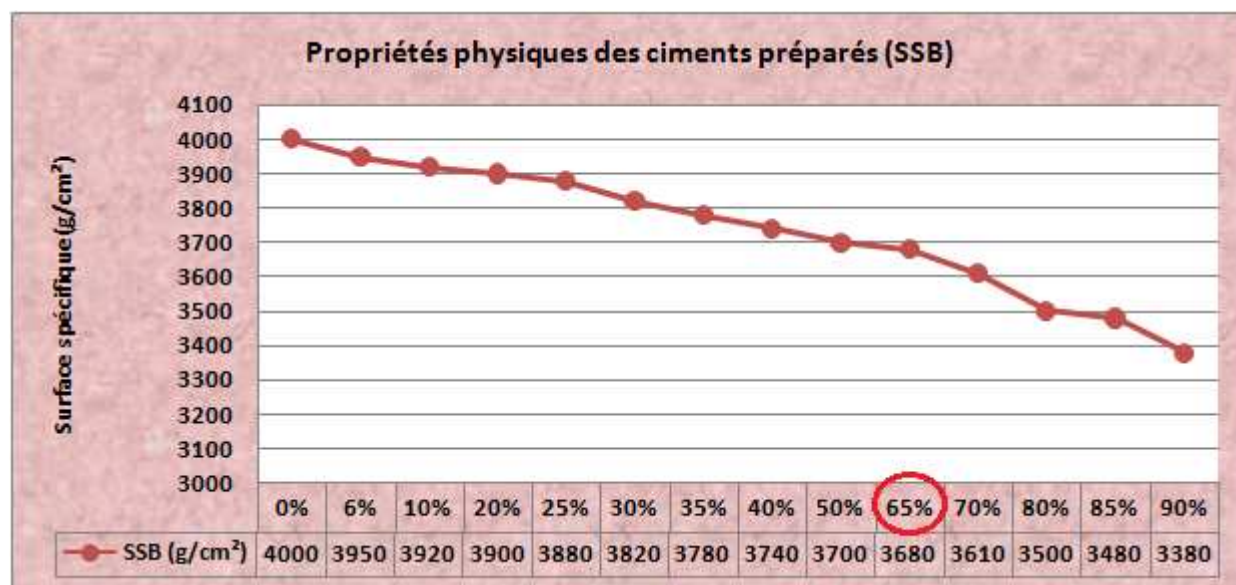


Figure 4-3 Variation de la surface spécifique de ciment en fonction de taux d'ajout ( laitier ).

#### IV-5 Influence du Taux d'ajout laitier Sur la Pâte de Ciment :

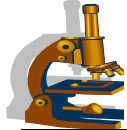
##### IV-5-1 Influence du taux d'ajout laitier Sur la Consistance Normale :

Les résultats expérimentaux obtenus ( Tableau 4-6 et Figures 4-4) présentent l'effet du taux d'ajout ( laitier ) sur la consistance normale de ciment.

La demande de l'eau des pâtes de ciments préparées avec les différents pourcentages d'ajout laitier : (0%, 6%, 10%, 20%, 25%, 30%, 35%, 40%, 50%, 65%, 70%, 80%, 85% et 90%) est mesurée en utilisant l'essai d'aiguille de Vicat manuel. L'influence de la quantité de l'ajout (laitier) sur la pâte de ciment est exprimée par les variations du rapport de demande en eau pour obtenir une consistance normale.

Selon les résultats obtenus (Figures 4-4), on note que l'augmentation du pourcentage de l'ajout ( laitier) incorporé dans le ciment a l'effet suivant:

- Diminution de la quantité d'eau requise pour avoir une consistance normale de la pâte de ciment.



Types des ciments	CEM I	CEM II/A-S	CEM II/A-S	CEM II/A-S	CEM II/B-S	CEM II/B-S	CEM II/B-S	CEM II/B-S	CEM III/A	CEM III/A	CEM III/A	CEM III/B	CEM III/B	CEM III/C	CEM III/C
Laitier (%)	0%	6%	10%	20%	25%	30%	35%	40%	50%	65%	70%	80%	85%	90%	
Consistance Normale E/C (%)	35	34.7	34.2	34	33.8	33.5	33.5	33.2	33	32.5	31.7	31	29.6	28	

Tableau 4-6 Propriétés physiques des ciments préparés ( consistance normale).

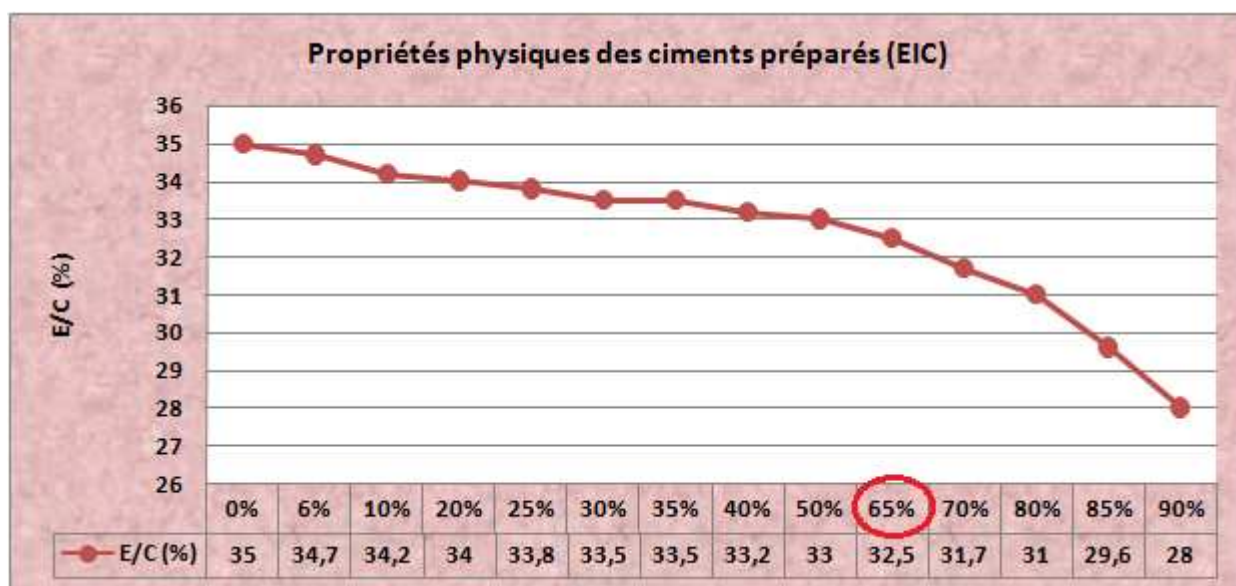


Figure 4-4 Variation du Rapport E/C ( Consistance normale ) en fonction du taux d'ajout (laitier).

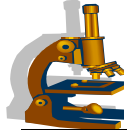
#### IV-5-2 Influence du Taux d'ajout laitier sur le Temps de Prise :

Les résultats expérimentaux obtenus ( Tableau 4-7 et Figures 4-5 ) présentent l'effet du taux d'ajout ( laitier ) sur le temps de prise de la pâte de ciment.

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

Selon les résultats obtenus ( Figures 4-5 ), on note que l'augmentation du pourcentage de l'ajout ( laitier ) incorporé dans le ciment a l'effet suivant:

- augmentation des temps de début et fin de prise.



Types des ciments	CEM I	CEM II/A-S	CEM II/A-S	CEM II/A-S	CEM II/B-S	CEM II/B-S	CEM II/B-S	CEM II/B-S	CEM III/A	CEM III/A	CEM III/A	CEM III/B	CEM III/B	CEM III/C	CEM III/C
Laitier (%)	0%	6%	10%	20%	25%	30%	35%	40%	50%	65%	70%	80%	85%	90%	
Début de prise (min)	120	130	140	148	153	160	165	170	175	180	190	202	215	230	
Fin de prise (min)	180	200	220	230	235	247	253	260	270	275	280	294	300	320	

Tableau 4-7 Propriétés physiques des ciments préparés ( Temps de Prise ).

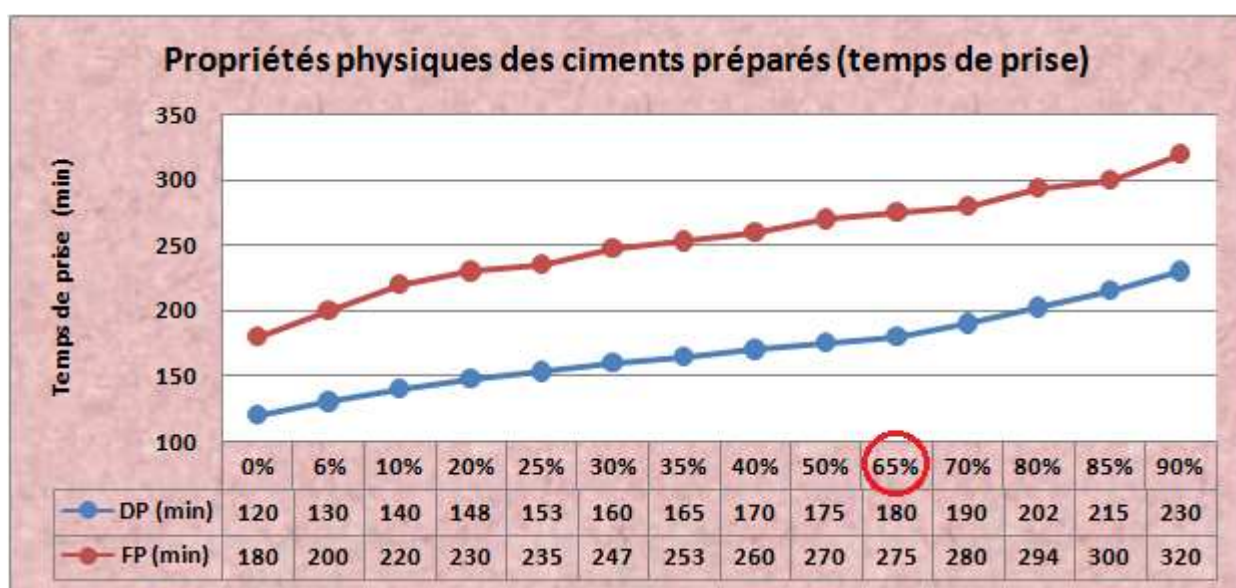
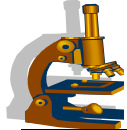


Figure 4-5 Variation des Temps de prises en fonction de taux d'ajout ( laitier ).

#### IV-5-3 Influence du Taux d'ajout laitier Sur la Stabilité du Ciment :

Les résultats du ( Tableau 4-8 et la Figure 4-6 ) indiquent que l'expansion à chaud (hydratation accéléré par traitement thermique à 100c°) augmente avec l'augmentation du taux de laitier d'une façon relativement linéaire 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.

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



Types des ciments	CEM I	CEM II/A-S	CEM II/A-S	CEM II/A-S	CEM II/B-S	CEM II/B-S	CEM II/B-S	CEM III/A	CEM III/A	CEM III/A	CEM III/B	CEM III/B	CEM III/C	CEM III/C
Laitier (%)	0%	6%	10%	20%	25%	30%	35%	40%	50%	65%	70%	80%	85%	90%
Expansion à chaud (mm)	0.5	0.5	0.5	1	1	1	1.5	1.5	1.9	2.0	2.0	2.4	2.4	2.4

Tableau 4-8 Propriétés physiques des ciments préparés ( Expansion de Chatelier ).

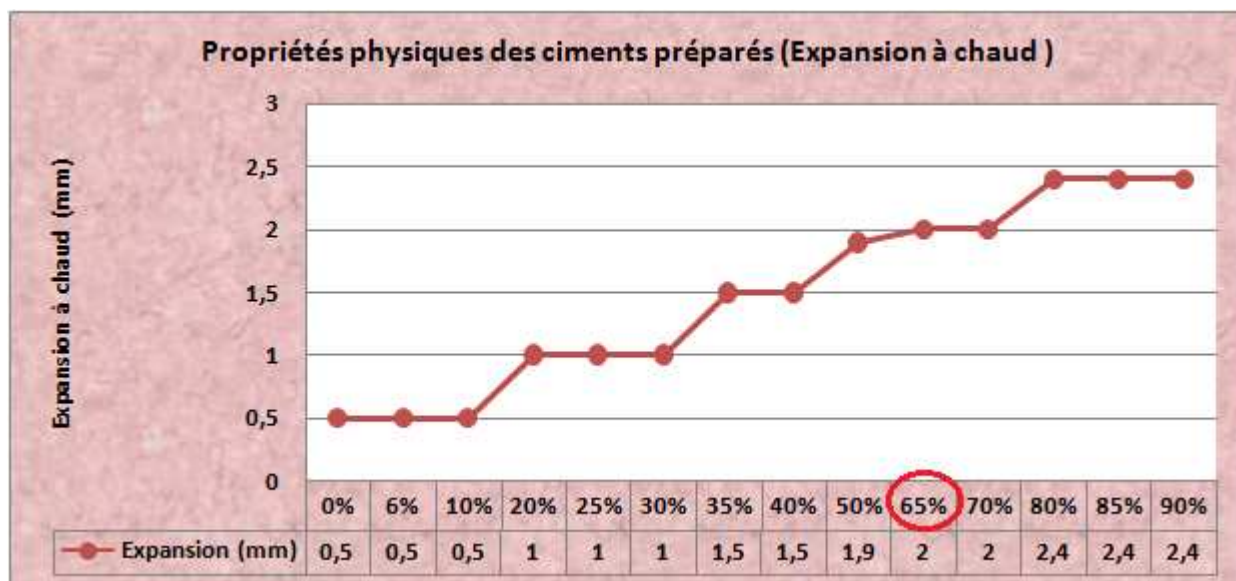


Figure 4-6 Effet du taux d'ajout laitier sur l'expansion du ciment.

#### IV-5-4 Influence du Taux d'ajout laitier sur les Teneurs en Oxydes :

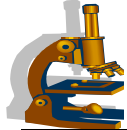
Le Tableau ( 4-9 ) et la Figure (4-7, 4-8 et 4-9) représentent la variation des taux des principaux oxydes (la silice, la chaux, le fer, l'alumine, le magnésium) ainsi que la perte au feu dans le ciment en fonction du taux d'ajout laitier.

Le taux d'oxyde de fer ( $Fe_2O_3$ ) et la chaux (CaO), la perte au feu (P.F) diminuent.

Le taux d'oxyde de ( $SiO_2$ ,  $AlO_3$ ,  $MgO$ ,  $SO_3$ ) augmentent et ce proportionnellement avec l'augmentation du taux d'ajout laitier.

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

Les oxydes ( $Al_2O_3$ ) et (CaO) augmentent l'activité hydraulique du laitier, tandis que la ( $SiO_2$ ) la fait diminuer.



L'augmentation du ( MgO ) jusqu'à 05 % est favorable; contrairement au ciment Portland, il n'y a pas de risque de gonflement engendré par le ( MgO ) libre pendant l'hydratation .

La teneur en ( Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ) n'a pas d'effet considérable sur la qualité du laitier.

Taux de laitier (%)	Ciment	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>	LOI
0	CEM I	21,95	5,12	4,12	69,64	1,84	2,25	1,61
6	CEM II/A-S	22,75	5,63	4,09	65,27	2,28	2,28	1,58
10	CEM II/A-S	23,23	5,97	4,00	61,50	2,58	2,31	1,55
20	CEM II/A-S	24,39	6,78	3,89	61,06	3,27	2,32	1,48
25	CEM II/B-S	25,04	7,20	3,79	60,07	3,63	2,35	1,46
30	CEM II/B-S	25,55	7,58	3,68	60,00	3,93	2,41	1,43
35	CEM II/B-S	26,56	8,06	3,57	59,96	4,28	2,42	1,40
40	CEM III/A	27,41	8,51	3,54	59,88	4,64	2,43	1,38
50	CEM III/A	28,02	8,89	3,33	59,73	4,72	2,48	1,31
65	CEM III/A	28,62	9,32	3,28	59,52	4,75	2,52	1,19
70	CEM III/B	29,01	9,55	3,22	59,38	4,81	2,58	0,99
80	CEM III/B	29,62	9,68	3,19	59,21	4,86	2,62	0,85
85	CEM III/C	29,82	9,74	3,15	59,12	4,89	2,69	0,81
90	CEM III/C	30,20	9,87	3,11	59,03	4,93	2,72	0,76

Tableau 4-9 Influence du taux d'ajout laitier sur les Teneurs en Oxydes

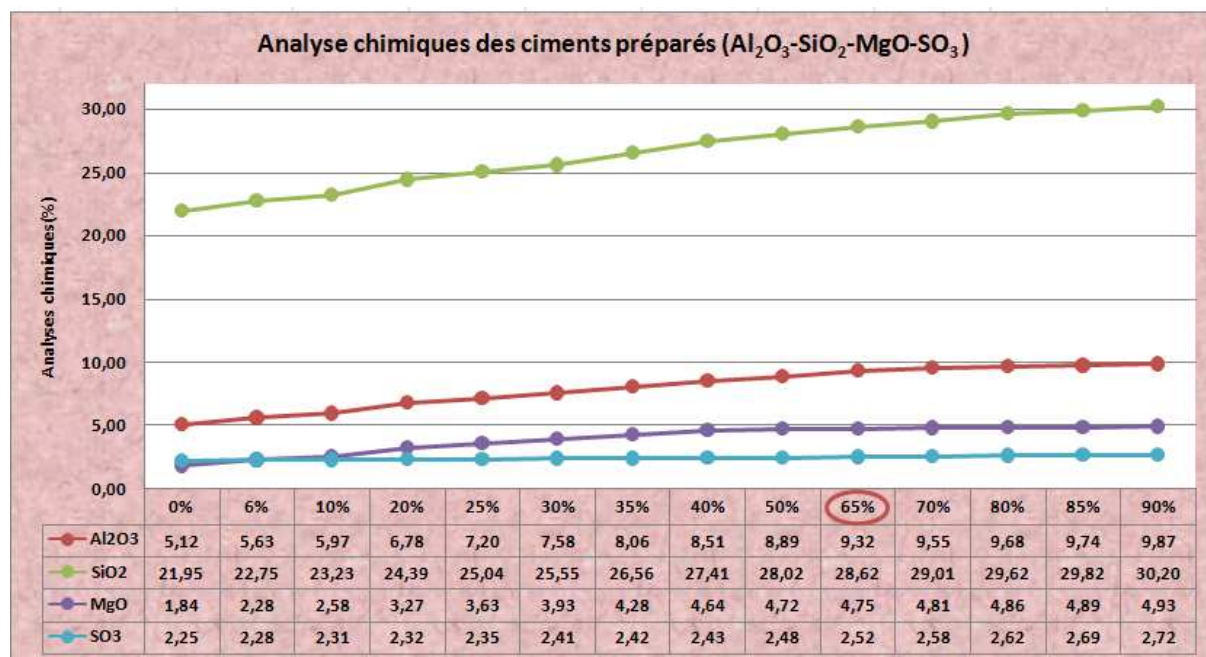


Figure 4-7 Variation de la teneur des oxydes (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>, MgO, SO<sub>3</sub> ) en fonction du taux d'ajout de laitier

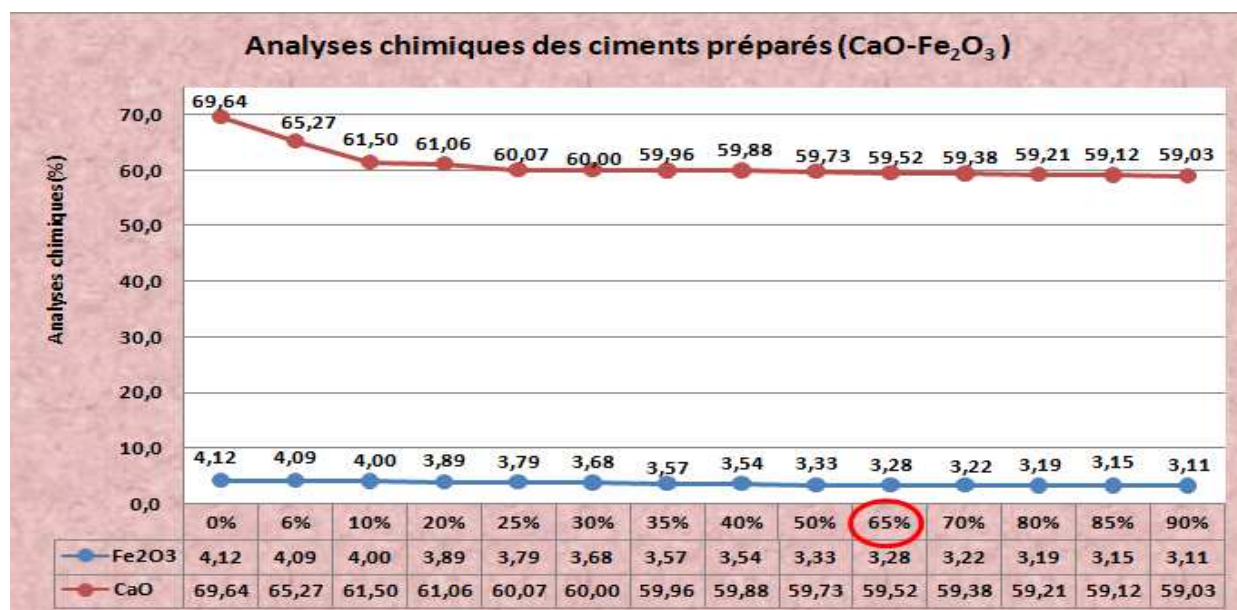
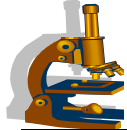


Figure 4-8 Variation de la teneur des oxydes ( CaO,Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ) en fonction du taux d'ajout de laitier

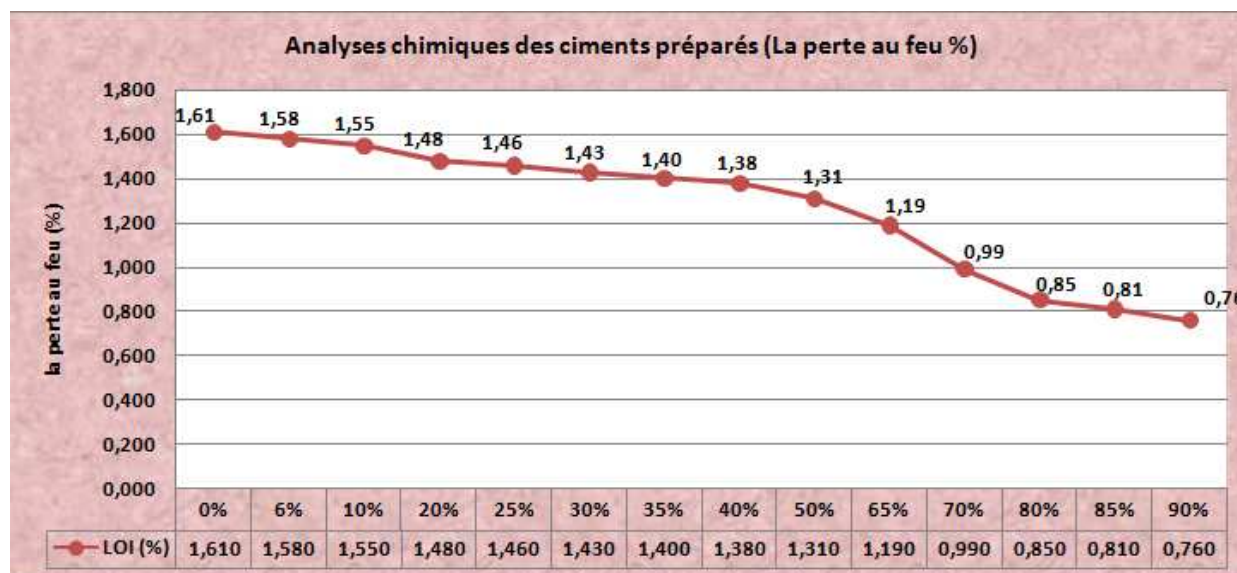


Figure 4-9 Variation de la teneur des oxydes ( perte au feu ) en fonction du taux d'ajout de laitier

**IV-5-5 Influence du Taux d'ajout laitier sur les Analyses minéralogiques des différents ciments préparés :**

Le Tableau ( 4-10 ) et les Figures (4-10 et 4-11 ) représentent la variation des principaux phases minéralogiques major (Alite (C<sub>3</sub>S) et Blaste fournaise slag (phase amorphous)) et les phases minéralogiques mineur ( Belite (C<sub>2</sub>S) – Aluminate (C<sub>3</sub>A) – Ferrite (C<sub>4</sub>AF) ) dans les ciments préparé en fonction du taux d'ajout laitier .

On note que l'augmentation du pourcentage de l'ajout (laitier) incorporé dans les ciments préparé les effets suivants :

- Diminution des phases (Alite (C<sub>3</sub>S) – Belite (C<sub>2</sub>S) – Aluminate (C<sub>3</sub>A) - Ferrite (C<sub>4</sub>AF)).



- Augmentation de La phase blaste fourneaux slag (la phase amorphous ).

Les caractéristiques physico-mécaniques (temps de prise - résistance mécanique – chaleur d’hydratation) des matériaux (mortier –béton) sont le reflet des compositions minéralogiques.

L’influence de cette composition minéralogique sur la réactivité des ciments au laitier et par conséquent, sur leur comportement mécanique, est très complexe.

Nous avons constaté que :

- les phases principales et responsables a la résistance mécanique a 2jours (belite et aluminates), diminuent avec l’accroissement du pourcentage de laitier.
- la phase principales et responsables a la résistance mécanique a 28jours (**Alite**), diminue avec l’accroissement du pourcentage de laitier.
- la phase principale et responsables a la résistance mécanique a 28jours sur les ciments de haut fourneau CEM III (**phase BFS amorphous**) caractérisé par réactivité pouzolanique , augment avec l’accroissement du pourcentage de laitier.
- la phase principale et responsables a la résistance mécanique a 28jours sur les ciments au laitier CEM II (**Alite**) et compensé par la phase réactive phase amorphous .
- les ciments portland au laitier ( CEM II/A-S / CEM II/B-S ) et ciment de haut fourneau (CEM III/A- CEM III/B et CEM III/C) caractérisé par une faible résistance à 02jours sous l’effet de la diminution du pourcentage de clinker (diminution d’alite et belite et d’aluminates) avec augmentation du laitier et caractérisé par une fort résistance à 28jours et 90jours(durabilité) sous l’effet de BFS amorphous (phase réactive / réactivité pouzolanique ).

Ciment	Laitier (%)	Alite(C <sub>3</sub> S)	Belite(C <sub>2</sub> S)	Alum(C <sub>3</sub> A)	Ferrite(C <sub>4</sub> AF)	BFS amorphous
CEM I	0%	63,10	11,40	3,36	13,20	3,10
CEM II/A-S	6%	59,40	11,20	3,29	12,80	6,88
CEM II/A-S	10%	58,10	10,20	3,16	12,00	10,90
CEM II/A-S	20%	50,90	9,54	2,99	10,10	22,10
CEM II/B-S	25%	48,20	8,58	2,48	9,67	25,20
CEM II/B-S	30%	46,30	7,73	2,37	9,34	29,60
CEM II/B-S	35%	41,40	6,82	2,23	8,37	36,00
CEM III/A	40%	38,30	6,29	2,02	7,73	41,00
CEM III/A	50%	31,80	5,67	1,99	6,35	51,30
CEM III/A	65%	24,70	5,02	1,43	5,42	59,90
CEM III/B	70%	18,70	4,37	0,98	4,26	68,70
CEM III/B	80%	10,70	3,17	0,96	2,32	79,70
CEM III/C	85%	7,86	1,99	0,74	1,83	84,50
CEM III/C	90%	4,81	0,88	0,52	1,21	92,20

Tableau 4-10 Influence du taux d’ajout laitier sur les Composition minéralogique des ciments préparés (DRX).

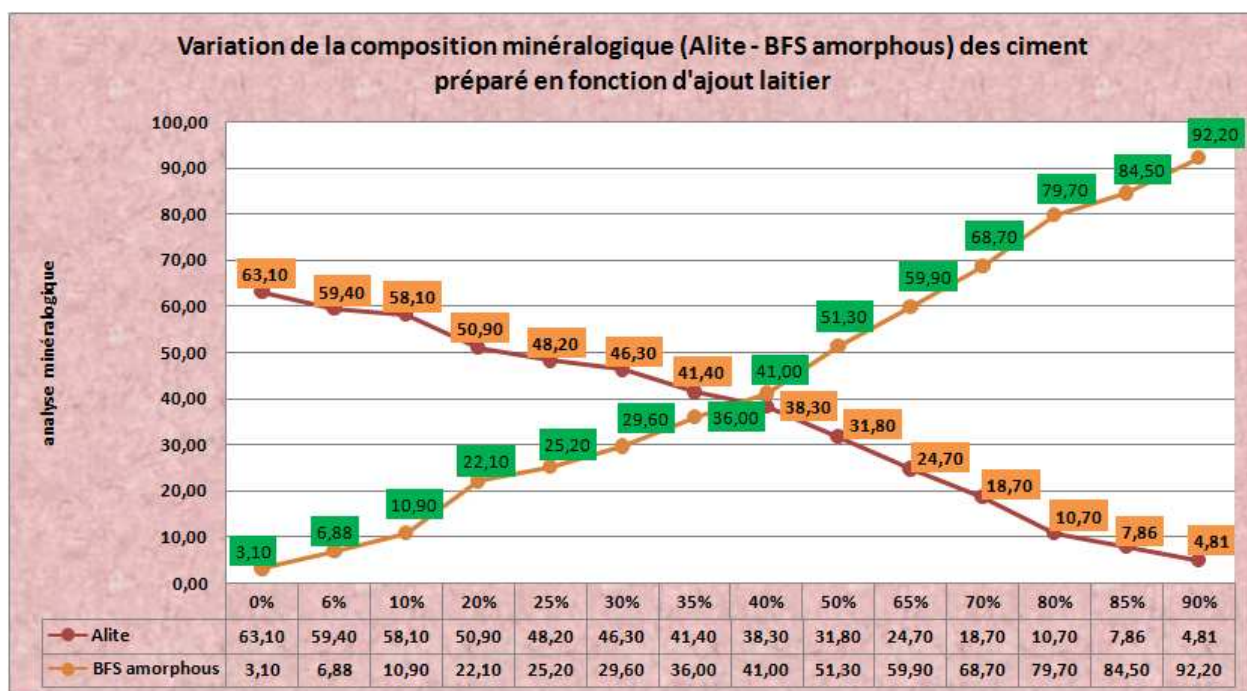
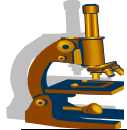


Figure 4-10 Influence du taux d'ajout laitier sur les Composition minéralogique (Alite – BFS amorphous) des ciments préparés (DRX).

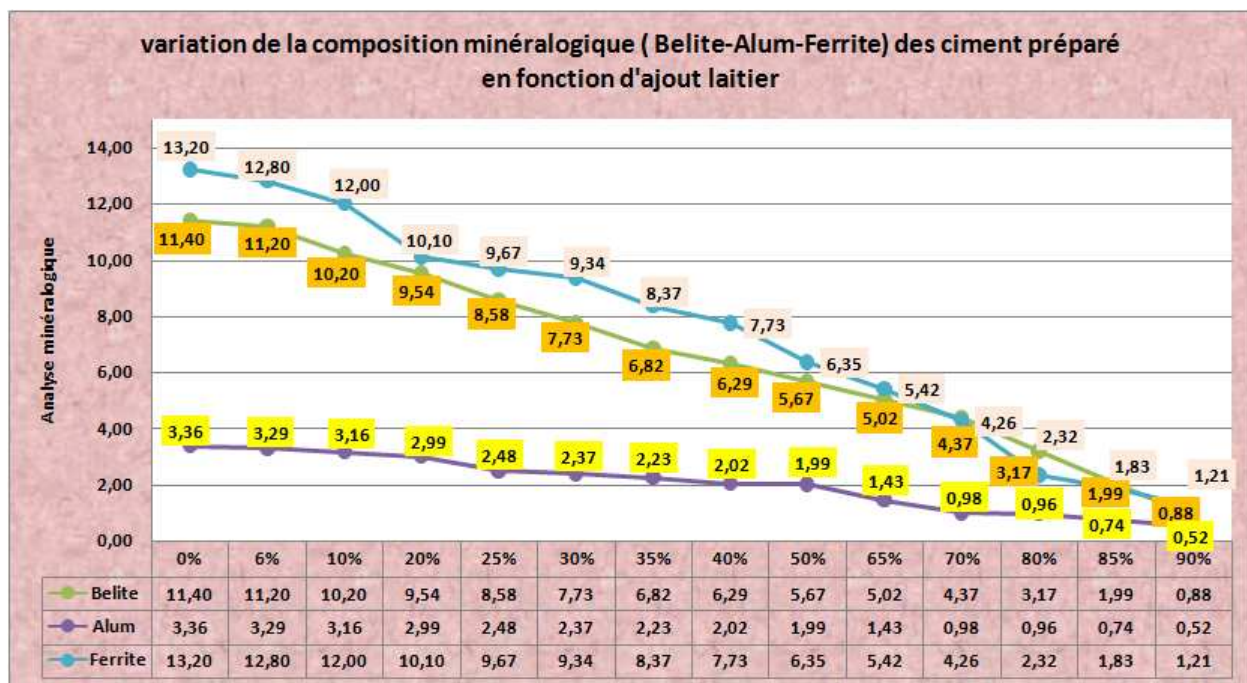
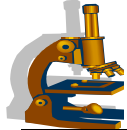


Figure 4-11 Influence du taux d'ajout laitier sur les Composition minéralogique ( Belite-Alum-Ferrite ) des ciments préparés ( DRX ).



**IV-6 Influence du Taux d'ajout laitier Sur Le Mortier à base de sable Normalisé :**

**IV-6-1 Résistance à la flexion et Compression:**

Le Tableau (4-11) et la Figure (4-12) montrent le développement des performances des mortiers contenant différents pourcentages du taux d'ajout ( laitier ) par substitution (remplacement partiel du ciment par le laitier) dans le ciment (effet chimique) en fonction des différents âges.

Types des ciments	CEM I	CEM II/A-S	CEM II/A-S	CEM II/A-S	CEM II/B-S	CEM II/B-S	CEM II/B-S	CEM II/B-S	CEM III/A	CEM III/A	CEM III/A	CEM III/B	CEM III/B	CEM III/C	CEM III/C
Laitier (%)	0%	6%	10%	20%	25%	30%	35%	40%	50%	65%	70%	80%	85%	90%	
Flex 02j ( MPa )	6.0	5.5	5	4.8	4.5	4.2	4	3.7	3.5	3.3	3	2.9	2.8	2.5	
Rc 02j ( MPa )	28.5	26.81	25.13	23.44	21.75	20.06	18.38	16.69	16.10	15	12.84	10.68	9.30	8.50	
Flex 07j ( MPa )	6.9	6.8	6.6	6.4	6.1	6	5.9	5.8	5.7	5.5	5.1	4.5	4.1	3.8	
Rc 07j ( MPa )	44.50	42.81	41.13	39.44	37.75	36.06	34.38	32.69	31.50	31.0	25.80	20.60	15.40	15.50	
Flex 14j ( MPa )	7.6	7.5	7.3	7.2	7	6.8	6.6	6.4	6.2	6	5.9	5.6	5.2	5	
Rc 14j ( MPa )	49.50	48.63	47.75	46.88	46	45.13	44.25	43.38	43	42.50	35.5	28.50	21.5	21.40	
Flex 28j ( MPa )	8.8	8.1	8.2	8.1	8	7.8	7.6	7.4	7.1	6.8	6.7	6.5	6.2	6.1	
Rc 28j ( MPa )	59.50	58.44	57.38	56.31	55.25	54.19	53.13	52.06	51.40	51	45.10	39.20	35.40	33.30	
Flex 90j ( MPa )	9.9	9.2	9	8.9	8.7	8.5	8.4	8.3	8.1	7.9	7.8	7.5	7.4	7.2	
Rc 90j ( MPa )	70.80	69.83	68.85	67.88	66.90	65.93	64.95	63.98	63.20	63.0	60.7	58.40	56.10	44.20	
Classe de résistance.	52.5							42.5					32.5		

**Tableau 4-11 Evolution des Résistances à la Compression du Mortier en fonction du taux d'ajout laitier ( avec sable normalisé ).**

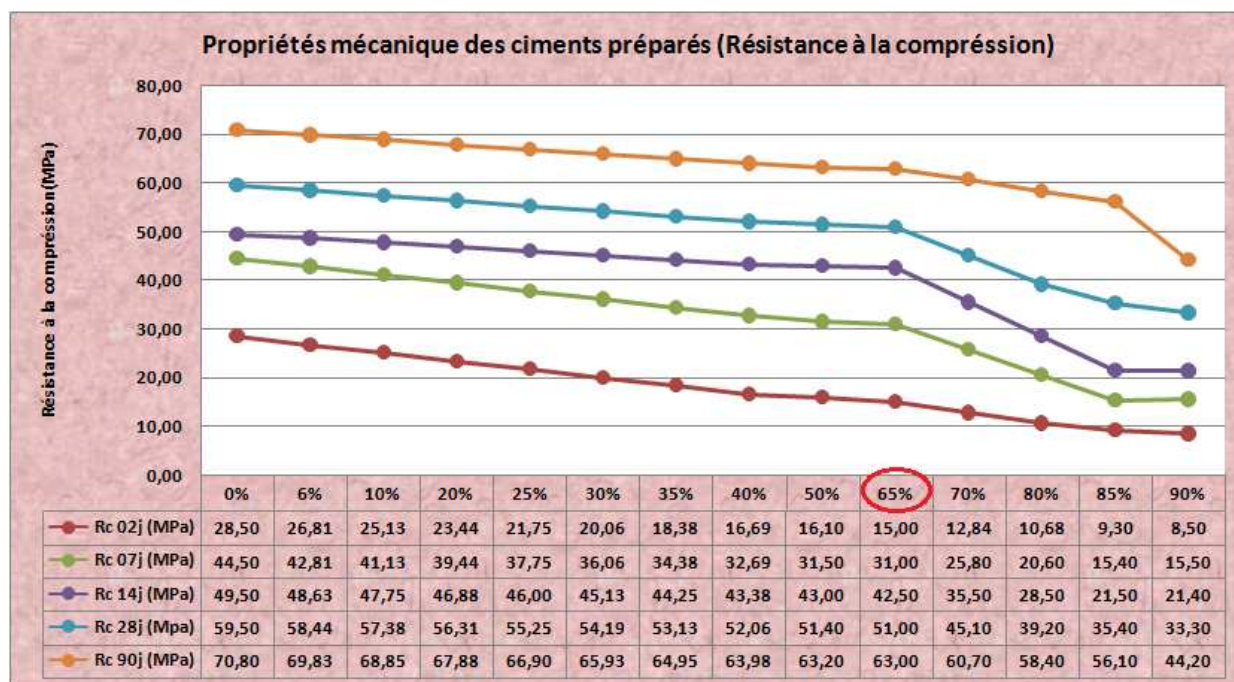
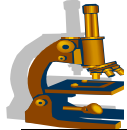


Figure 4-12 Effet du Taux d'ajout laitier sur la Résistance à la Compression.

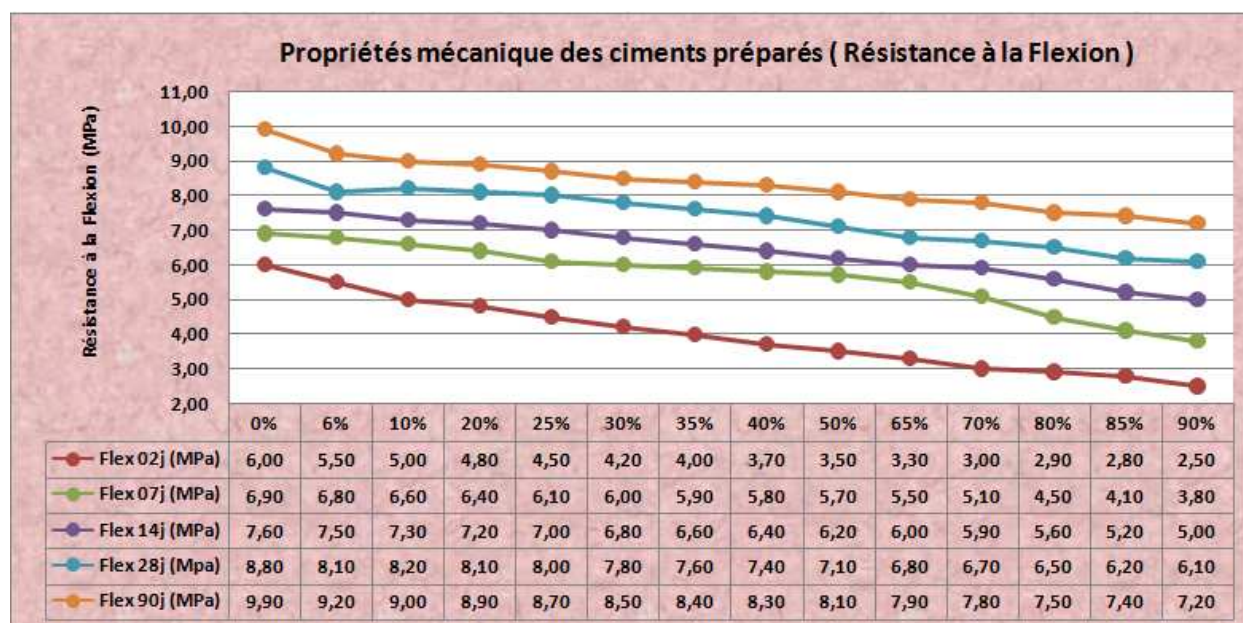
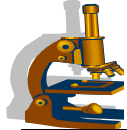


Figure 4-13 Effet du Taux d'ajout laitier sur la Résistance à la Flexion .

On remarque que les résistances (compression et flexion) de tous les mortiers diminué régulièrement (02 j ; 07j ; 14j ; 28j ; 90j ) .

Cette diminution de la résistance est due au fait que la réaction chimique n'est pas prédominante aux jeunes âges, ceci mène à une hydratation du minerai  $C_3S$  (silicate tricalcique) et  $C_2S$  (silicate bi calcique) moins intense aux jeunes âges en induisant de faibles résistances. Et pour la diminution de la résistance à 28j et 90j Vs le taux d'ajout laitier ( la cause principale ( substitué de clinker par le laitier )) le clinker c'est le premier responsable (alite) sur le développement des résistances ...



**IV-7 Effet du Taux d'ajout laitier (effet chimique) Sur Le Retrait et Le Gonflement :**

La variation du retrait et du gonflement du mortier normal en fonction de l'ajout laitier sont représentées dans les Tableaux ( 4-12 et 4-13 ) et le Figure ( 4-14 et 4-15).

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

Types des ciments	CEM I	CEM II/A-S	CEM II/A-S	CEM II/A-S	CEM II/B-S	CEM II/B-S	CEM II/B-S	CEM II/B-S	CEM III/A	CEM III/A	CEM III/A	CEM III/B	CEM III/B	CEM III/C	CEM III/C
Laitier (%)	0%	6%	10%	20%	25%	30%	35%	40%	50%	65%	70%	80%	85%	90%	
Retrait à 03 Jours (µm/m)	151	172,16	193,32	214,48	235,64	256,8	277,96	299,12	320,28	341,44	362,6	383,76	404,92	405,2	
Retrait à 07 Jours (µm/m)	344	364,08	384,16	404,24	424,32	444,4	464,48	484,56	504,64	524,72	544,8	564,88	584,96	585,14	
Retrait à 28 Jours (µm/m)	536	554,67	573,34	592,01	610,68	629,35	648,02	666,69	685,36	704,03	722,7	741,37	760,04	760	

Tableau 4-12 Retrait du Mortier normal en fonction du taux d'ajout ( laitier ).

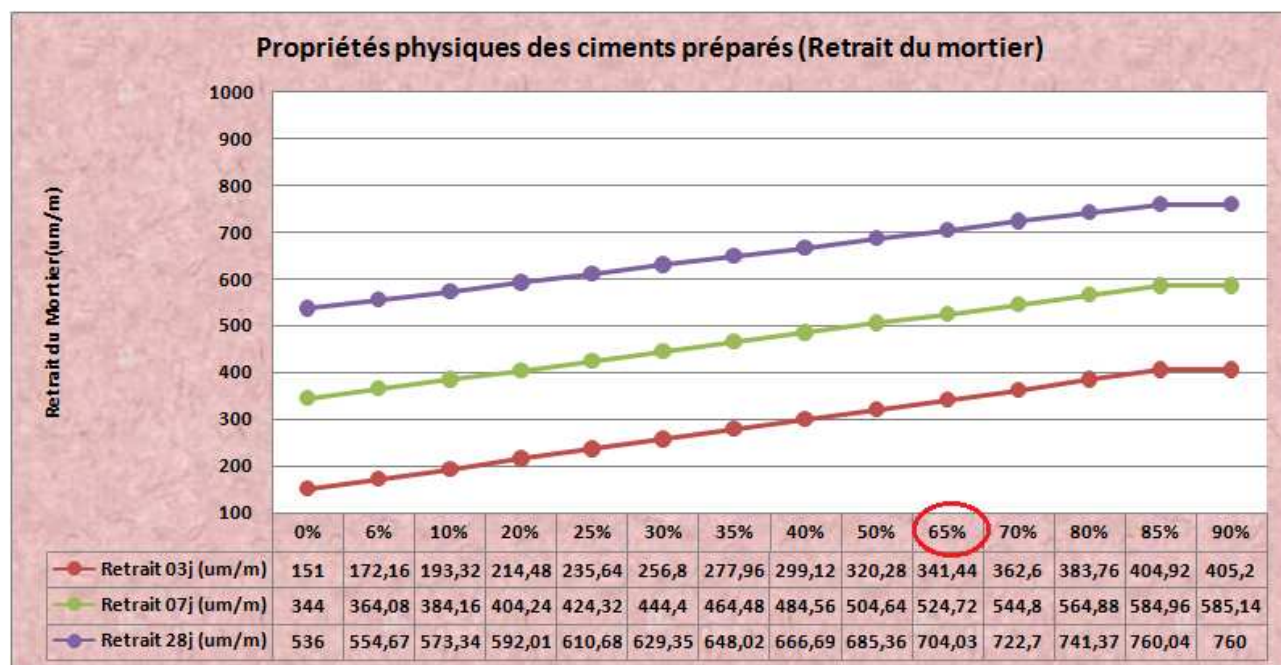
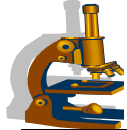


Figure 4-14 Evolution du Retrait du mortier en fonction du taux d'ajout laitier.



Types des ciments	CEM I	CEM II/A-S	CEM II/A-S	CEM II/A-S	CEM II/B-S	CEM II/B-S	CEM II/B-S	CEM II/B-S	CEM III/A	CEM III/A	CEM III/A	CEM III/B	CEM III/B	CEM III/C	CEM III/C
Laitier (%)	0%	6%	10%	20%	25%	30%	35%	40%	50%	65%	70%	80%	85%	90%	
Gonflement à 03 Jours (µm/m)	38.20	36,984	35,768	34,552	33,336	32,12	30,904	29,688	28,472	27,256	26,04	24,824	23,608	23,6	
Gonflement à 07 Jours (µm/m)	71.10	69,45	67,8	66,15	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)	98.70	96,925	95,15	93,375	91,6	89,825	88,05	86,275	84,5	82,725	80,949	79,174	77,39	77,4	

Tableau 4-13 Gonflement du mortier normal en fonction du taux d'ajout ( laitier ).

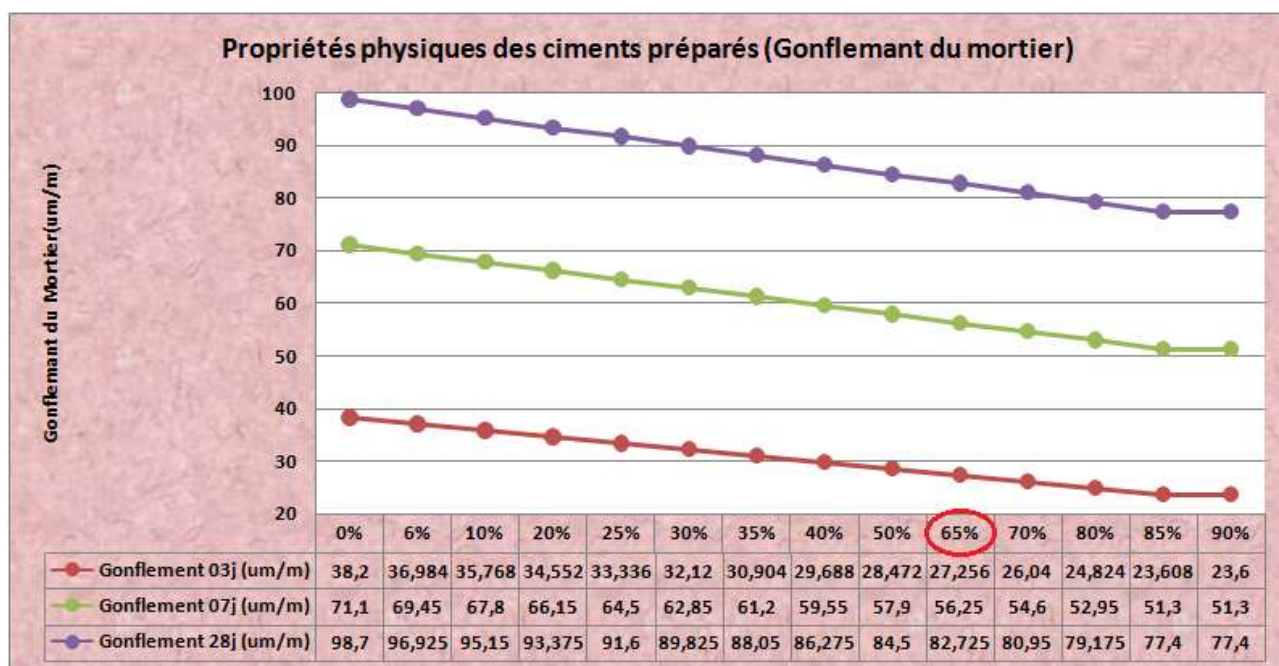
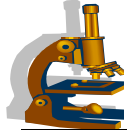


Figure 4-15 Evolution du gonflement du mortier en fonction du taux d'ajout ( laitier ).

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

- ≤ 800 µm/m pour la classe 32,5.
- ≤ 1000 µm/m pour la classe 42,5 et 52.5.

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



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

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

La Figure (4-12) illustre la variation des déformations de retrait des ciments; on remarque que la vitesse de retrait est lente jusqu'à 7 jours et rapide entre l'âge de 7 à 28 jours .

Cette cinétique de retrait est due à l'hydratation tardive de l'ajout laitier

Le gonflement observé sur les éprouvettes contenant comme ajout de laitier est inférieur au gonflement dû au ciment Portland, ceci est dû à la consommation de la portlandite  $\text{Ca(OH)}_2$  et à la combinaison de l'oxyde de magnésium 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 (4-15) illustre la variation des déformations du gonflement des ciments; on remarque que la vitesse de gonflement est relativement linéaire entre 3 et 28 jours.

#### IV -8 Effet du Taux d'ajout laitier Sur Le Mortier ( La Maniabilité ) :

##### Interprétation des résultats :

Les résultats expérimentaux obtenus (Tableau 4-14 et Figures 4-16) présentent l'effet du taux d'ajout ( laitier ) dans le ciment sur le mortier ( La Maniabilité ).

On remarque que plus le mortier est plastique, maniable et de bonne ouvrabilité et plus le temps  $t$  est court.

Le mortier de sept (07) ciments préparé CEM III/A-B-C de très plastique.

Types des ciments	CEM I	CEM II/A-S	CEM II/A-S	CEM II/A-S	CEM II/B-S	CEM II/B-S	CEM II/B-S	CEM III/A	CEM III/A	CEM III/A	CEM III/B	CEM III/B	CEM III/C	CEM III/C
Laitier (%)	0%	6%	10%	20%	25%	30%	35%	40%	50%	65%	70%	80%	85%	90%
Temps en (s)	20.0	19.50	19.0	17.0	17.0	16.50	16.0	16.0	15.50	15.0	14.5	14.0	14.0	13.0

Tableau 4-14 La Maniabilité de Mortier.

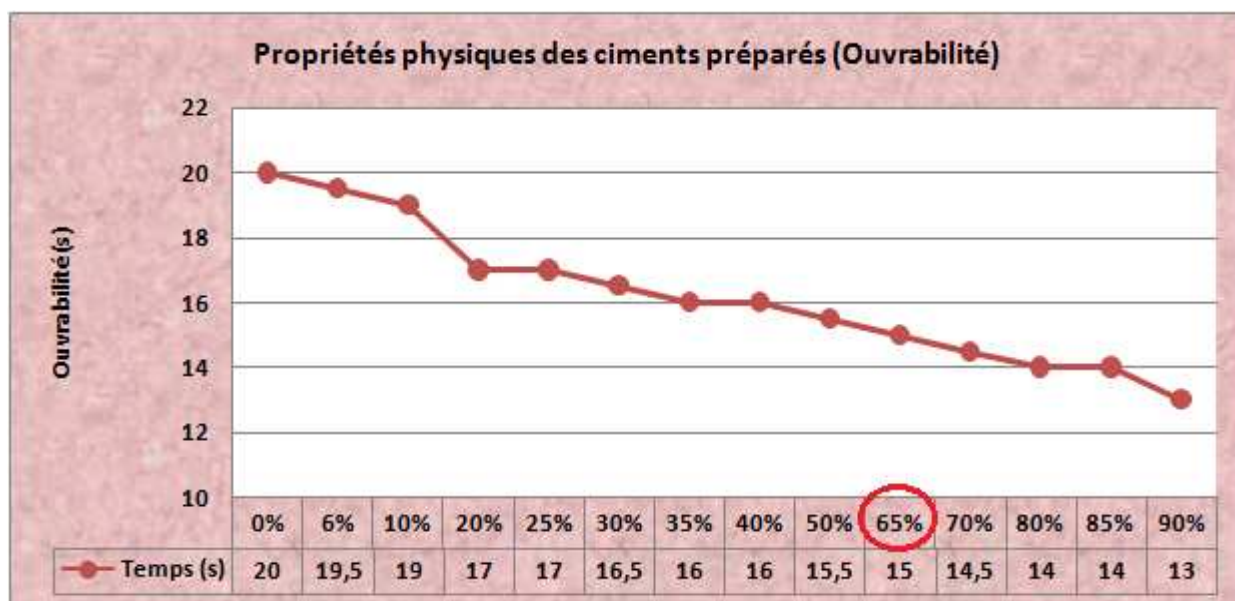
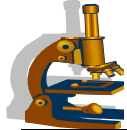


Figure 4-16 Influence du Taux d'ajout laitier dans le ciment sur le mortier (ouvrabilité).

#### IV-9 Effet du Taux d'ajout Laitier (effet chimique) Sur La Chaleur d'hydratation :

Les résultats expérimentaux obtenus (Tableau 4-15 et Figure 4-17) présentent l'effet du taux d'ajout ( laitier ) sur la chaleur d'hydratation des échantillons de mortier normalise.

L'essai consiste à suivre le dégagement de chaleur de mortier en utilisant l'appareil de langavant (semi-adiabatique).

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

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

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

- la nature et taux d'ajout utilisé dans le ciment dans notre cas le laitier importé.
- 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.

Types des ciments	CEM I	CEM II/A-S	CEM II/A-S	CEM II/A-S	CEM II/B-S	CEM II/B-S	CEM II/B-S	CEM III/A	CEM III/A	CEM III/A	CEM III/B	CEM III/B	CEM III/C	CEM III/C
Laitier ( % )	0%	6%	10%	20%	25%	30%	35%	40%	50%	65%	70%	80%	85%	90%
Chaleur d'hydratation (j/g)	244	237	230	223	216	209	202	194	187	180	173	166	159	159

Tableau 4-15 La chaleur d'hydratation de mortier normal en fonction du taux d'ajout ( laitier ).

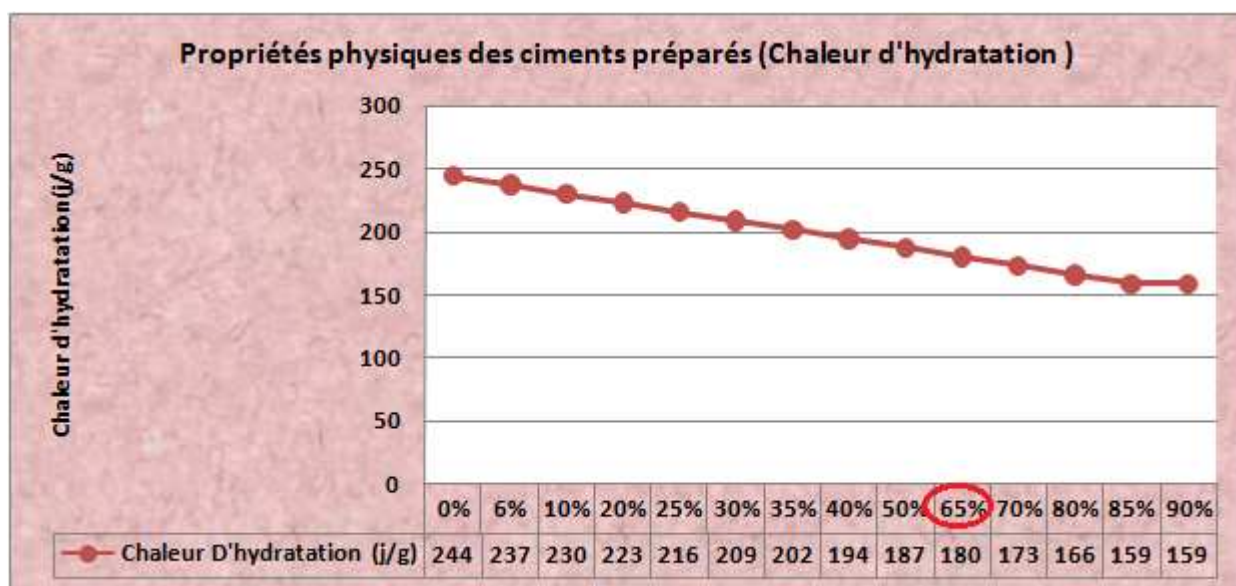
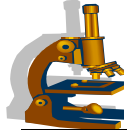


Figure 4-17 Effet du taux d'ajout laitier sur la chaleur d'hydratation.

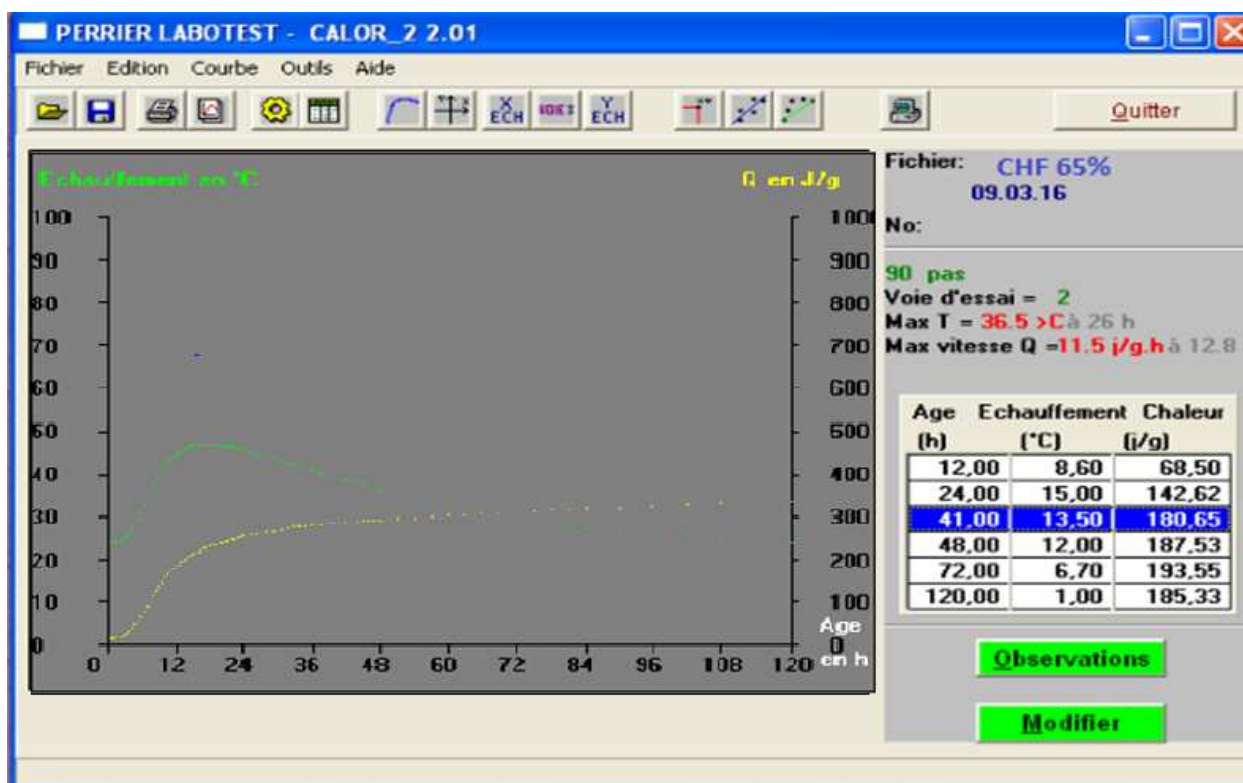
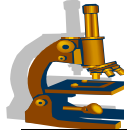


Figure 4-18 Courbe de chaleur d'hydratation et d'échauffement ( CHF 65% ).



IV-9-1 Effet du Chaleur d'hydratation Sur le Temps de Prise :

IV-9-1-1 Début de prise Vs Chaleur d'hydratation :

Types des ciments	CEM I	CEM II/A-S	CEM II/A-S	CEM II/A-S	CEM II/B-S	CEM II/B-S	CEM II/B-S	CEM III/A	CEM III/A	CEM III/A	CEM III/B	CEM III/B	CEM III/C	CEM III/C
Laitier (%)	0%	6%	10%	20%	25%	30%	35%	40%	50%	65%	70%	80%	85%	90%
Chaleur d'hydratation (j/g)	244	237	230	223	216	209	202	194	187	180	173	166	159	159
Début de prise (min)	120	130	140	148	153	160	165	170	175	180	190	202	215	230

Tableau 4-16 Chaleur d'hydratation en fonction du temps de prise.

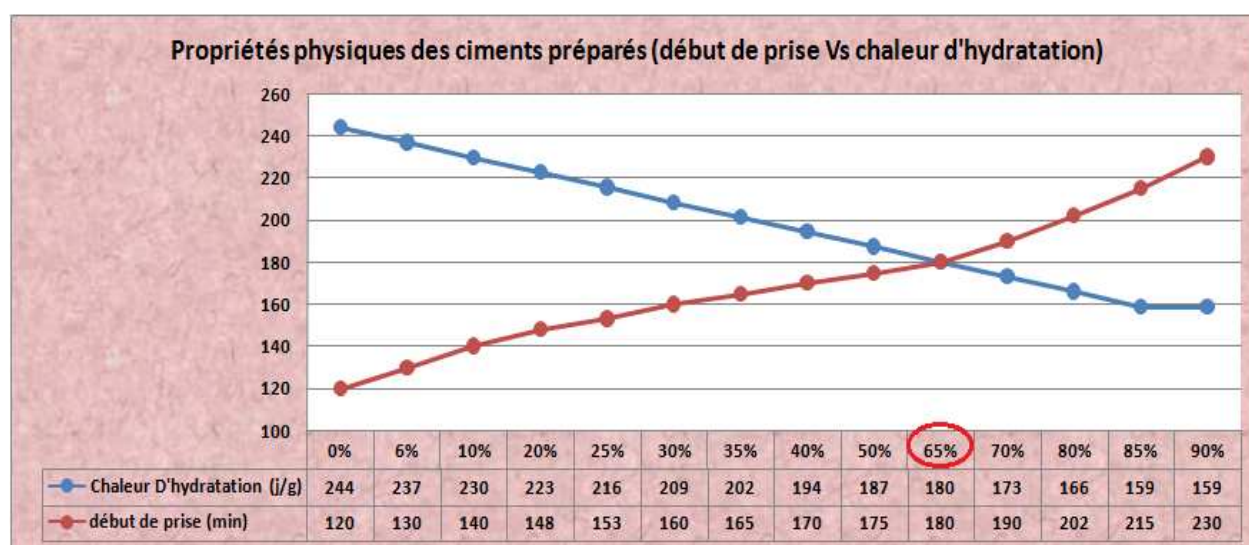


Figure 4-19 Effet chaleur d'hydratation en fonction du temps de prise

IV-9-1-2 Fin de prise Vs Chaleur d'hydratation :

Types des ciments	CEM I	CEM II/A-S	CEM II/A-S	CEM II/A-S	CEM II/B-S	CEM II/B-S	CEM II/B-S	CEM III/A	CEM III/A	CEM III/A	CEM III/B	CEM III/B	CEM III/C	CEM III/C
Laitier (%)	0%	6%	10%	20%	25%	30%	35%	40%	50%	65%	70%	80%	85%	90%
Chaleur d'hydratation (j/g)	244	237	230	223	216	209	202	194	187	180	173	166	159	159
Fin de prise (min)	180	200	220	230	235	247	253	260	270	275	280	294	300	320

Tableau 4-17 Début de prise en fonction du chaleur d'hydratation.

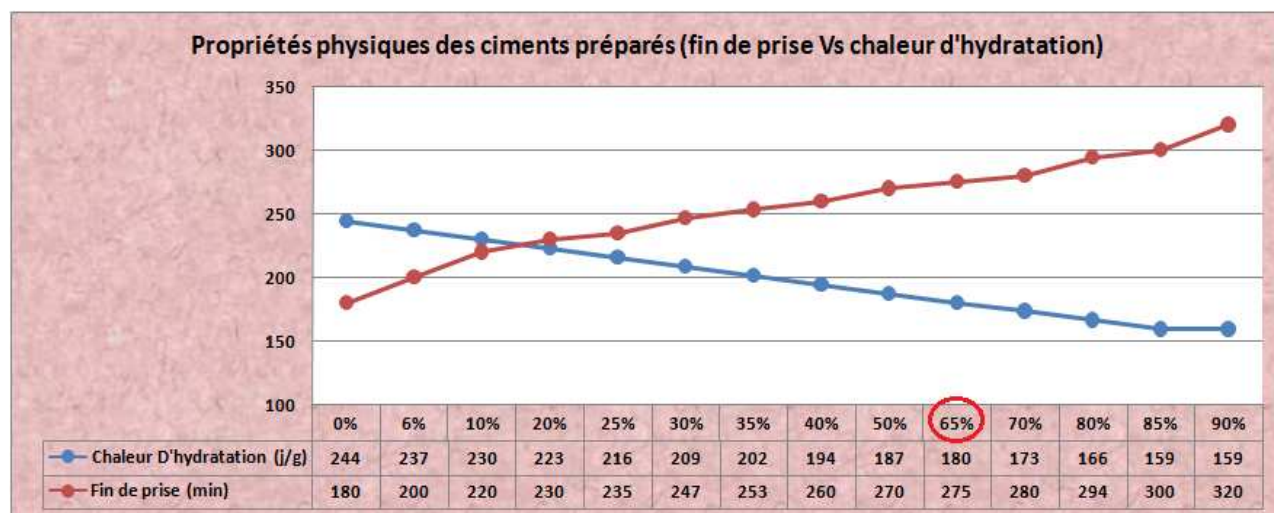
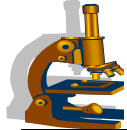


Figure 4-20 Effet chaleur d'hydratation en fonction du débit de prise

On remarque que la chaleur d'hydratation diminue par rapport à l'augmentation du taux d'ajout laitier et le temps de prise augment. (figure 4-19 et 4-20) .

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 d'ajout laitier (0%, 6%, 10%, 20%, 25%, 30%, 35%, 40%, 50%, 65%, 70%, 80%, 85% et 90%) c'est un ciment à faible chaleur d'hydratation .

#### IV -10 Analyse Granulométrique :

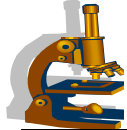
##### IV -10-1 Granulométrie à Laser :

Les courbes granulométriques des (14) types des ciments préparés avec le courbe globale des ciments, clinker, laitier

On remarque que pour les ciments contenant le laitier, trois paramètres principaux caractérisent la distribution de la taille des grains :

- Temps de broyage.
- Poids spécifique.
- Finesse de Blaine (surface spécifique).

Les Figures montrent que la distribution des dimensions des particules obtenues par le Granulométrie à laser des ciments utilisés dans notre étude varie entre (2 µm à 100 µm ) pour le plus gros grain.



Types des ciments	CEM I	CEM II/A-S	CEM II/A-S	CEM II/A-S	CEM II/B-S	CEM II/B-S	CEM II/B-S	CEM III/A	CEM III/A	CEM III/A	CEM III/B	CEM III/B	CEM III/C	CEM III/C
Laitier (%)	0%	6%	10%	20%	25%	30%	35%	40%	50%	65%	70%	80%	85%	90%
2	90.02	90.55	90.62	90.69	90.71	90.81	90.85	90.93	91.02	91.16	91.21	91.31	91.42	91.53
4	82.25	82.65	82.72	82.75	82.81	82.93	82.95	83.01	83.35	84.24	85.25	86.25	86.52	87.25
8	70.15	70.25	71.25	71.36	71.42	72.85	73.36	74.24	75.25	76.36	77.24	78.24	78.52	79.25
12	61.01	61.12	61.13	61.20	62.52	63.35	63.41	64.25	65.35	66.35	67.01	67.25	67.35	68.25
16	51.18	51.25	51.31	52.25	53.65	54.55	55.12	56.36	57.45	58.25	59.02	59.35	59.36	60.32
20	40.15	40.25	40.42	40.63	41.21	42.24	43.24	43.31	43.85	44.52	45.00	45.23	45.52	46.25
25	35.20	33.25	34.02	36.25	37.54	38.35	39.25	40.25	41.25	42.85	43.21	44.63	44.78	44.98
32	12.92	13.35	13.40	13.53	13.85	14.25	14.63	14.85	15.36	15.82	16.12	16.22	16.52	16.63
45	4.05	4.26	4.46	4.68	4.82	5.05	5.26	5.41	5.63	5.89	6.02	6.25	6.46	6.66
64	3.12	3.85	3.01	5.12	5.52	6.25	7.32	8.25	9.24	10.52	11.96	12.05	12.52	13.52
90	2.05	1.58	1.63	1.66	1.71	1.93	2.02	2.25	2.36	2.54	2.63	2.66	2.71	3.02
100	0.21	0,62	0.69	0.70	0.82	0.89	0.93	1.02	1.11	1.52	1.69	1.70	1.82	2.02
SSB(cm <sup>2</sup> /g)	4000	3950	3920	3900	3880	3820	3780	3740	3700	3680	3610	3500	3480	3380

Tableau 4-18 Caractéristiques de la granulométrie a laser des différents ciments.

-Lecture de la courbe :

Le graphe se présente sous forme d'échelle logarithmique.

L'abscisse (X) indique le diamètre des grains en µm et l'ordonnée (Y) avec deux échelles :

L'échelle de droite est relative aux % des fractions lus sur la courbe de fréquence L'échelle de gauche, indiquant le % cumulé dans le cas où une courbe cumulative est représentée.

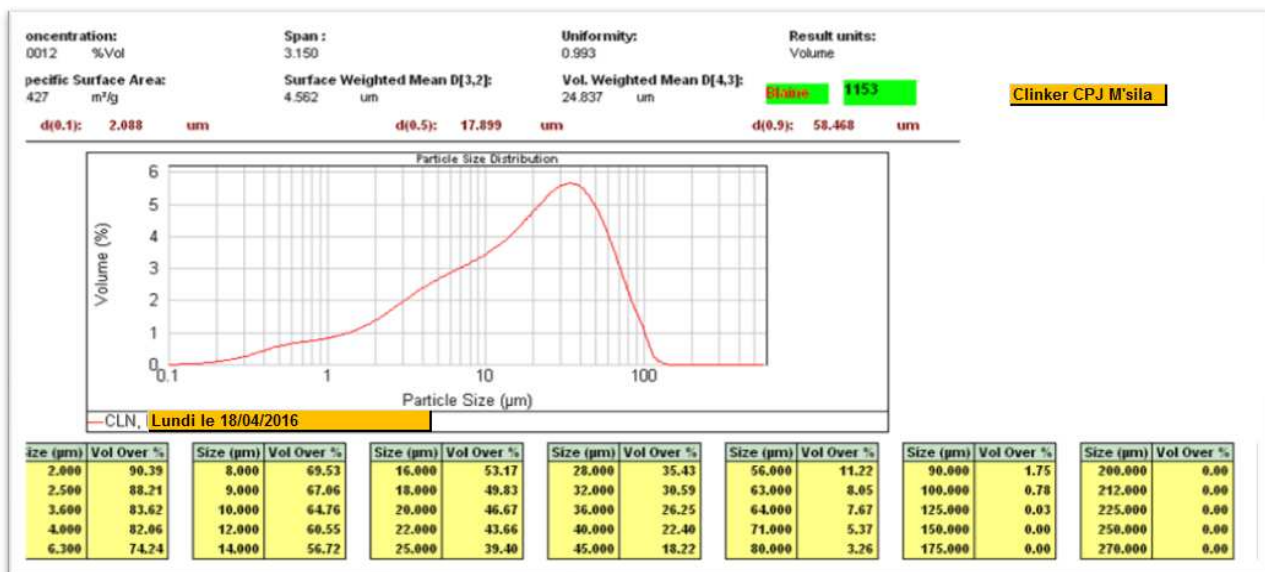


Figure 4-21 Courbe granulométrique de Clinker

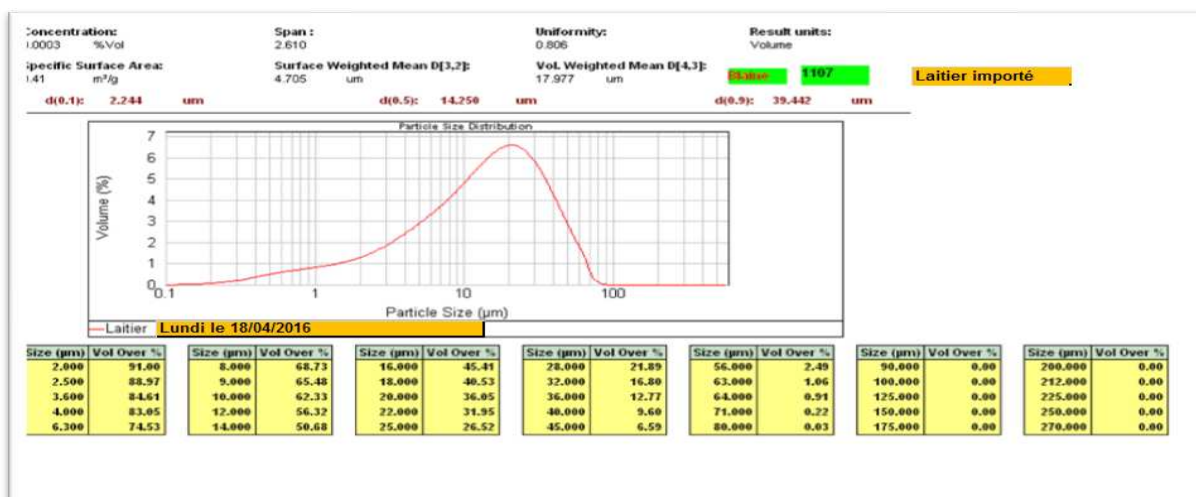
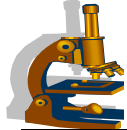


Figure 4-22 Courbe granulométrique de Laitier

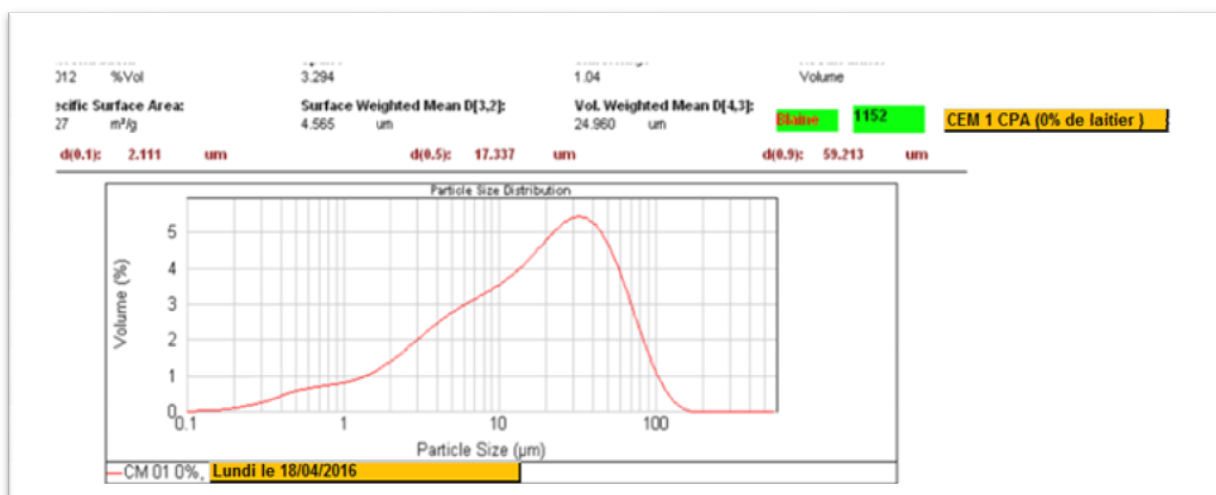


Figure 4-23 Courbe granulométrique de CEM 01 CPA ( 0%)

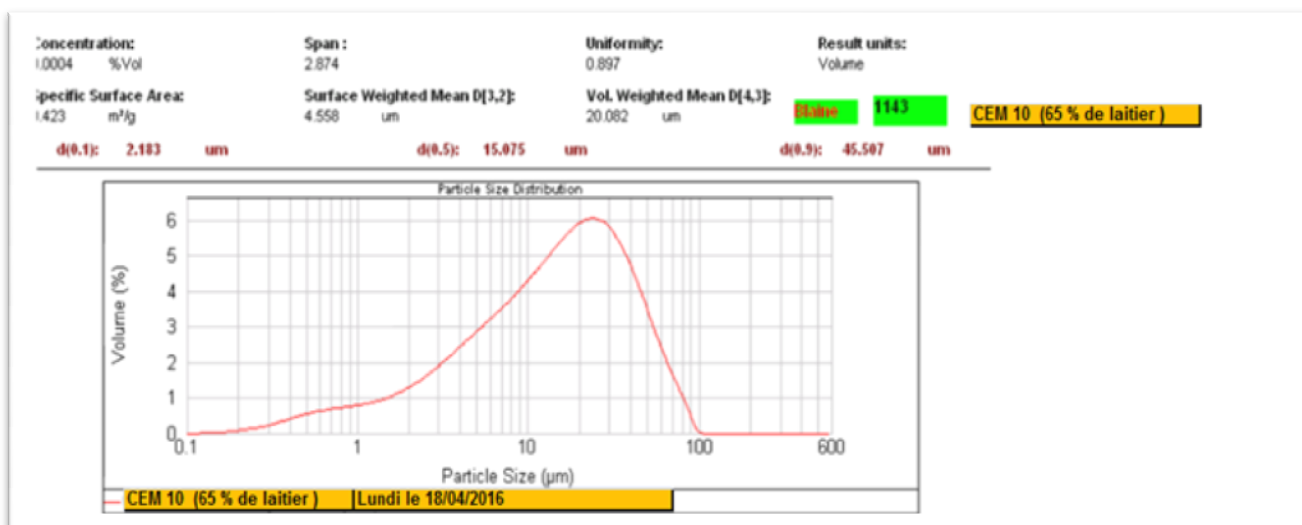


Figure 4-24 Courbe granulométrique de CEM 10 ( 65% de laitier )

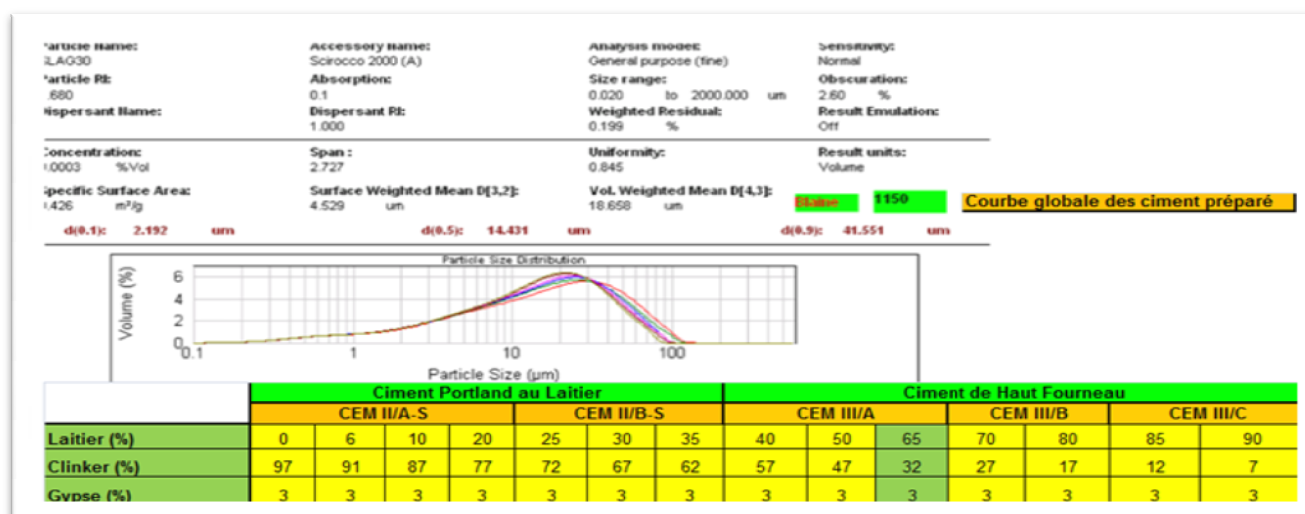
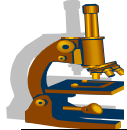


Figure 4-25 Courbe globale des ciments préparés

IV -10-2 Granulométrie à Méthode Alpine :

Les résultats expérimentaux obtenus ( Tableau 4-19 et Figures 4-26 ) présentent l'effet du taux d'ajout ( laitier ) sur l'analyse granulométrique à 32 µm et 45µm .

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

Types des ciments	CEM I	CEM II/A-S	CEM II/A-S	CEM II/A-S	CEM II/B-S	CEM II/B-S	CEM II/B-S	CEM III/A	CEM III/A	CEM III/A	CEM III/B	CEM III/B	CEM III/C	CEM III/C
Laitier (%)	0%	6%	10%	20%	25%	30%	35%	40%	50%	65%	70%	80%	85%	90%
32 µm	12.5	12.8	13.10	13.4	13.7	14	14.3	14.6	15	15.3	15.6	15.9	16.2	16.5
45 µm	4.0	4.2	4.4	4.6	4.8	5.0	5.2	5.4	5.6	5.8	6.0	6.2	6.4	6.6
SSB (cm <sup>2</sup> /g)	4000	3950	3920	3900	3880	3820	3780	3740	3700	3680	3610	3500	3480	3380
<b>Vol Over (%)</b>														

Tableau 4-19 Analyse granulométrique de ciment préparé (ALPINE).

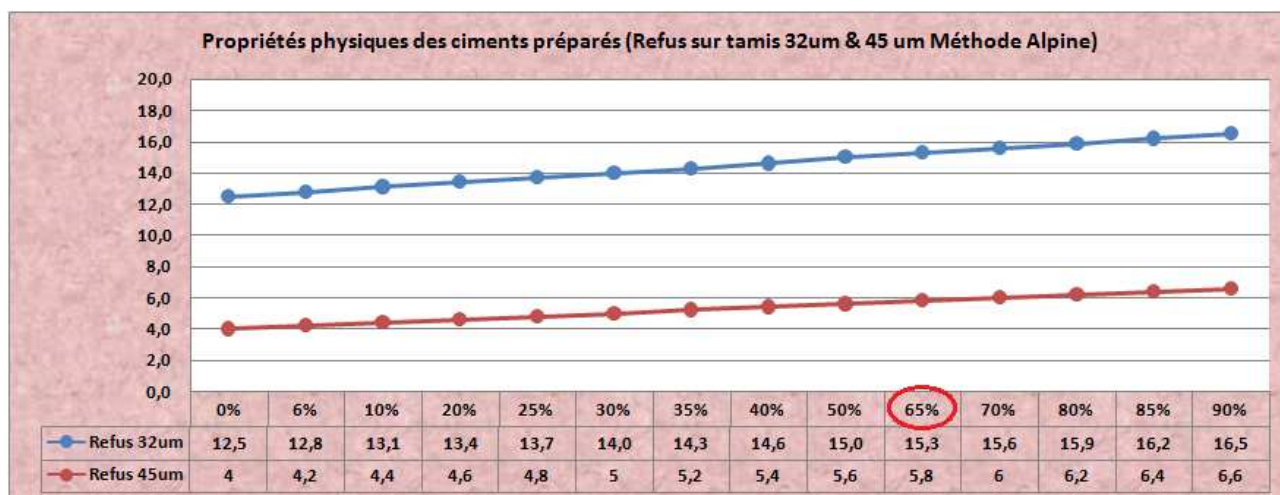


Figure 4-26 Analyse granulométriques de ciment préparé (ALPINE)

IV -10-3 Comparaison :

Dans cette étude, nous comparons le ciment préparée (CEM 10, 65%) avec le ciment (CHF) de cimenterie M'sila ( Lafargeholcim ) de même pourcentage de l'ajout ( laitier ).

	CEM 10 (65%)	CEM CHF Lafargeholcim (M'sila)	CEM CRS LAFARGEHOLCIM (M'sila)	Tolérance (±)
Poids spécifique ( g/cm <sup>3</sup> )	3.03	3.01	3.02	0.02
Surface spécifique ( g/cm <sup>2</sup> )	3680	3620	3700	80
Consistance normale (% E/C)	32.50	32.80	32.2	0.7
Début de prise ( min )	180	168	170	20
Fin de prise ( min )	275	265	270	-
Expansion ( mm )	2.0	2.0	1.5	0.8
Résistance de compression à 02j ( MPa )	15	12.6	14.5	1.5
Résistance de compression à 28j ( MPa )	51	48.9	48.5	2.5
Retrait à 03j ( µm/m )	344.41	355.72	361.25	-
Retrait à 28j ( µm/m )	704.03	726.33	715.24	-
Gonflement à 03j ( µm/m )	27.256	37.70	40.21	-
Gonflement à 28j ( µm/m )	82.725	98.26	100.12	-
Chaleur hydratation ( j/g )	180	197.3	201.21	-
Refus 32 µm ( % )	13.7	14.2	15.2	2.2
Refus 45 µm ( % )	4.80	5.4	6.21	2.2

Tableau 4-20 Comparaison (CEM-10 ( 65% laitier ) & Ciment CHF & Ciment CRS de M'sila )



D'après le tableau (4-20) On remarque que les résultats obtenu est égale ou inférieur à la tolérance sauf :

- la différence de la résistance à 02j est égale 2.4 Vs Rc ciment CHF supérieur a la tolérance parce que le broyage ( finesse) de notre ciment ( broyeur BB10) ne pas le même que la production dans la cimenterie Lafargeholcim M'sila (grand broyeur a boulée) et le refus 32um ne pas le même.

(Le ciment préparé de 65% de laitier c'est mieux par apport le ciment CHF de et ciment CRS de lafargeholcim M'sila).

**IV-10-4 La Relation entre la surface spécifique et les analyses granulométriques :**

Selon la Figures ( 4-27 ), on note que la relation de surface spécifique et l'analyse granulométrique est une relation inverse avec l'augmentation du taux d'ajout laitier.

L'augmentation du taux d'ajout laitier diminue la surface spécifique et augmente la granulométrie des ciments préparé ( à 32um).

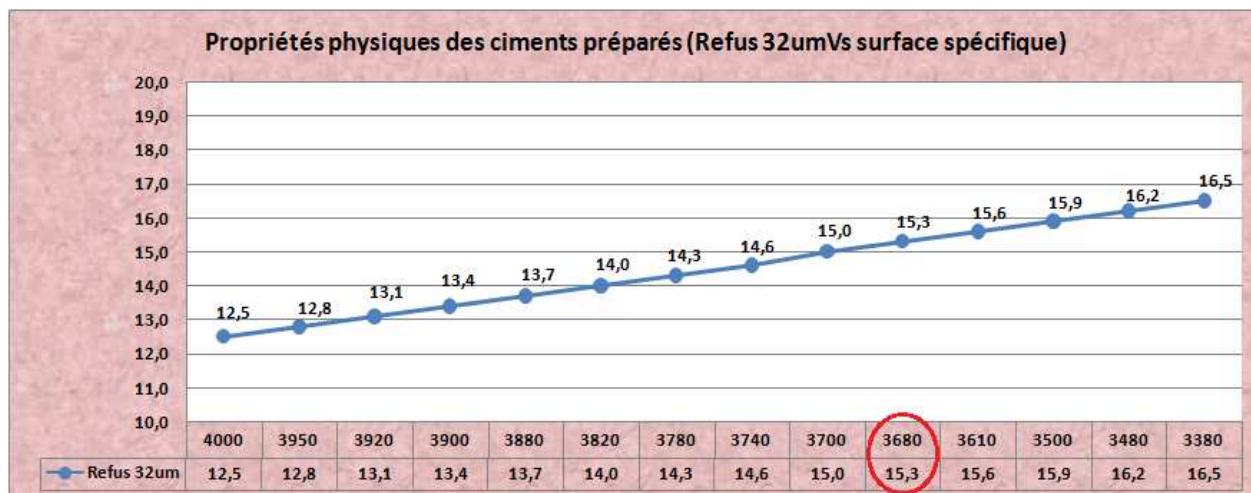


Figure 4-27 Effet de surface spécifique sur l'analyse granulométriques de ciment (ALPINE).

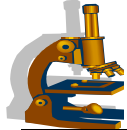
**IV-11 Influence du Taux d'ajout Laitier dans le Ciment Sur Le Béton à base de Matériaux Locaux :**

**IV-11-1 Résultats des Essais Sur Béton Frais :**

**IV-11-1-1 l'affaissement :**

Les résultats expérimentaux obtenus ( Tableau 4-21 ) présentent l'effet du taux d'ajout ( laitier ) dans le ciment sur l'affaissement ( la consistance ) du béton préparé.

L'affaissement de béton préparé avec les différents pourcentages d'ajout laitier : (0%, 6%, 10%, 20%, 25%, 30%, 35%, 40%, 50%, 65%, 70%, 80%, 85% et 90%) est mesuré en utilisant l'essai de cône d'abrams.



L'influence de la quantité de l'ajout ( laitier ) sur le béton est exprimée par les variations du rapport de demande en eau pour obtenir une consistance plastique.

Selon les résultats obtenus ( Figures 4-28 ), on note que l'augmentation du pourcentage du taux d'ajout ( laitier ) sur le béton frais a un effet :

-Augmentation de la quantité d'eau dans le mortier (consistance normale) diminue l'affaissement de béton préparé.

Types des ciments	CEM I	CEM II/A-S	CEM II/A-S	CEM II/A-S	CEM II/B-S	CEM II/B-S	CEM II/B-S	CEM III/A	CEM III/A	CEM III/A	CEM III/B	CEM III/B	CEM III/C	CEM III/C
Laitier (%)	0%	6%	10%	20%	25%	30%	35%	40%	50%	65%	70%	80%	85%	90%
Affaissement (cm)	14	14	13	13	12	12	12	11	11	10	10	9	9	8

Tableau 4-21 L'affaissement de béton frais.

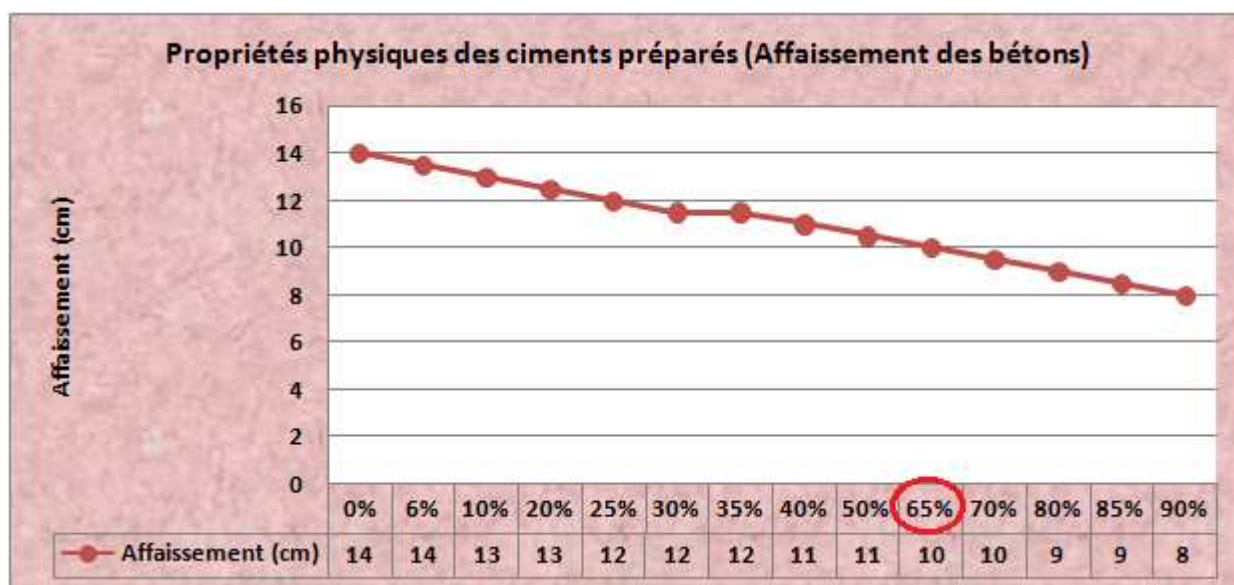
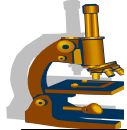


Figure 4-28 Influence du Taux d'ajout laitier dans le ciment sur le Béton frais ( l'affaissement )

On remarque que l'affaissement de béton testé en état plastique (S3).

Classification	Temps en s.
Béton sec	$\geq 40$
Béton de bonne Ouvrabilité	$20 \leq t \leq 30$
Béton très plastique	$10 < t < 20$
Béton très fluide	$\leq 10$

Tableau 4-22 Classification de Maniabilimètre (NF P18-452) .



#### IV-12 Influence du Taux d'ajout Laitier dans le Ciment Sur La Résistance à la Compression de Béton à base de Matériaux Locaux :

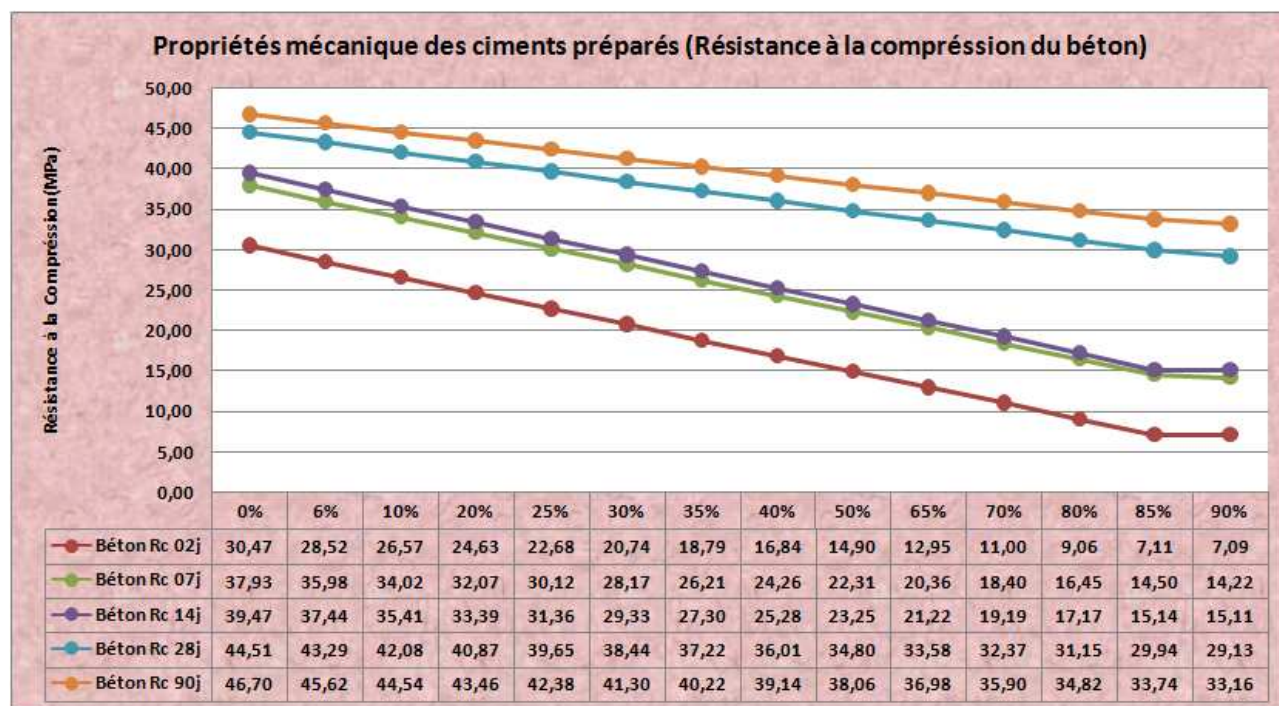
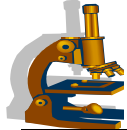
Les résultats des essais mécaniques de compression réalisés sur des éprouvettes, cylindrique (32\*16) cm<sup>3</sup> de béton à base de matériaux locaux (sable de dune et pierres concassées d'El-Euch) en fonction du taux d'ajout laitier dans le ciment composé aux différents âges de durcissement ( 02j , 07j , 14j , 28j et 90 jours) sont présentés dans les tableaux( 4.23) et représentés respectivement par les figures ( 4.29 ) .

La résistance à la compression diminue avec l'augmentation du pourcentage d'ajout ( laitier ) .

#### Résultats des essais mécaniques sur béton durci :

Type de ciment	Taux de Laitier (%)	Béton Rc 02j ( MPa )	Béton Rc 07j ( MPa )	Béton Rc 14j ( MPa )	Béton Rc 28j ( MPa )	Béton Rc 90j ( MPa )
CEM 1	0%	30,47	37,93	39,47	44,51	46,70
CEM 2	6%	28,52	35,98	37,44	43,29	45,62
CEM 3	10%	26,57	34,02	35,41	42,08	44,54
CEM 4	20%	24,63	32,07	33,39	40,87	43,46
CEM 5	25%	22,68	30,12	31,36	39,65	42,38
CEM 6	30%	20,74	28,17	29,33	38,44	41,30
CEM 7	35%	18,79	26,21	27,30	37,22	40,22
CEM 8	40%	16,84	24,26	25,28	36,01	39,14
CEM 9	50%	14,90	22,31	23,25	34,80	38,06
CEM 10	65%	12,95	20,36	21,22	33,58	36,98
CEM 11	70%	11,00	18,40	19,19	32,37	35,90
CEM 12	80%	9,06	16,45	17,17	31,15	34,82
CEM 13	85%	7,11	14,50	15,14	29,94	33,74
CEM 14	90%	7,09	14,22	15,11	29,13	33,16

**Tableau 4-23 Evolution des résistances à la compression du béton en fonction du taux d'ajout laitier dans le ciment.**



**Figure 4-29 Influence du Taux d'ajout laitier dans le ciment sur la Résistance à la compression du Béton durci.**

#### IV-13 La rhéologie du mortier et béton (écoulement – étalement) :

##### IV-13-1 Influence du Taux d'ajout Laitier dans le Ciment Sur Le micro Béton à base de Matériaux Locaux (sable 0/1 et 0/4) :

##### IV-13-1-1 l'écoulement – l'étalement :

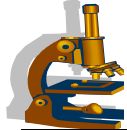
Les résultats expérimentaux obtenus ( Tableau 4-24) présentent l'effet du taux d'ajout (laitier) dans le ciment sur l'écoulement et l'étalement du micro béton préparé.

l'écoulement de micro béton préparé avec les différents pourcentages d'ajout laitier : ( 0%, 6%, 10%, 20%, 25%, 30%, 35%, 40%, 50%, 65%, 70%, 80%, 85% et 90% ) est mesuré en utilisant l'essai de cône l'écoulement.

L'influence de la quantité de l'ajout (laitier) sur l'écoulement de micro béton est exprimée par les variations du rapport de demande en eau pour obtenir un écoulement idéal.

Selon les résultats obtenus ( Figures 4-30 ), on note que l'augmentation du pourcentage du taux d'ajout (laitier) sur le micro béton frais a des effets suivants :

- diminution de la quantité d'eau dans le micro béton (consistance normale) diminue l'écoulement de micro béton préparé.
- diminution de la quantité d'eau et la quantité d'adjuvant ajouté (super plastifiant Tempo 12) dans le micro béton diminue l'étalement de micro béton préparé.



\* Résultats des Essais Sur micro béton Frai :

Ciment	Laitier (%)	T d'écoulement (s)	Étalement (cm)
CEM 1	0%	14,9	33
CEM 2	6%	14,6	32,5
CEM 3	10%	14,2	32,2
CEM 4	20%	14	32
CEM 5	25%	13,9	31,6
CEM 6	30%	13,7	31,2
CEM 7	35%	13,6	30,4
CEM 8	40%	13,4	30
CEM 9	50%	13	29,7
CEM 10	65%	12,5	29,4
CEM 11	70%	12,2	29,1
CEM 12	80%	11,9	28,6
CEM 13	85%	11,5	28,4
CEM 14	90%	11,3	28,4

Tableau 4-24 Résultats d'écoulement et d'étalement du micro béton en fonction du taux d'ajout laitier dans le ciment.

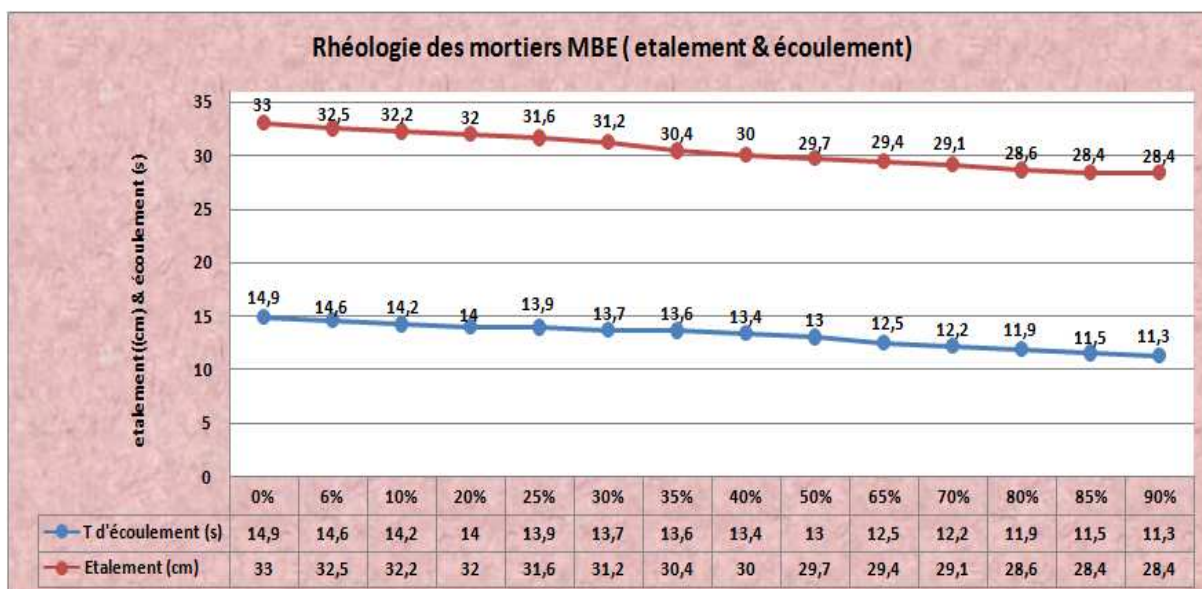
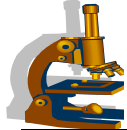


Figure 4-30 Influence du Taux d'ajout laitier dans le ciment sur l'écoulement et l'étalement du micro béton frais.



#### IV-13-1-2 La Relation entre E/C ciment et E/C MBE et l'écoulement et l'étalement du micro béton frais :

Selon la Figures (4-31 ) et tableau (4-25), on note que l'augmentation du pourcentage du taux d'ajout ( laitier ) sur le micro béton frais a des effets suivants :

- l'augmentation du pourcentage du taux d'ajout ( laitier ) diminue E/C ciment et diminue E/C micro-béton préparé.
- diminution de la quantité d'eau dans le micro béton (consistance normale) diminue l'écoulement de micro béton préparé.
- diminution de la quantité d'eau et la quantité d'adjuvant ajouté (super plastifiant T12) dans le micro béton diminue l'étalement de micro béton préparé.

<b>Rhéologie MBE Ciments préparés</b>					
<b>Ciment</b>	<b>Laitier (%)</b>	<b>E/C Ciment (%)</b>	<b>E/C (%) MBE</b>	<b>T d'écoulement (s)</b>	<b>Etalement (cm)</b>
<b>CEM 1</b>	0%	35	55	<b>14,9</b>	<b>33</b>
<b>CEM 2</b>	6%	34,7	54	<b>14,6</b>	<b>32,5</b>
<b>CEM 3</b>	10%	34,2	54	<b>14,2</b>	<b>32,2</b>
<b>CEM 4</b>	20%	34	52	<b>14</b>	<b>32</b>
<b>CEM 5</b>	25%	33,8	52	<b>13,9</b>	<b>31,6</b>
<b>CEM 6</b>	30%	33,5	51	<b>13,7</b>	<b>31,2</b>
<b>CEM 7</b>	35%	33,5	51	<b>13,6</b>	<b>30,4</b>
<b>CEM 8</b>	40%	33,2	50	<b>13,4</b>	<b>30</b>
<b>CEM 9</b>	50%	33	48	<b>13</b>	<b>29,7</b>
<b>CEM 10</b>	65%	32,5	47	<b>12,5</b>	<b>29,4</b>
<b>CEM 11</b>	70%	31,7	47	<b>12,2</b>	<b>29,1</b>
<b>CEM 12</b>	80%	31	45	<b>11,9</b>	<b>28,6</b>
<b>CEM 13</b>	85%	29,6	45	<b>11,5</b>	<b>28,4</b>
<b>CEM 14</b>	90%	28	42	<b>11,3</b>	<b>28,4</b>

**Tableau 4-25 résultats d'écoulement et d'étalement du micro béton en fonction du taux d'ajout laitier et E/C ciment et E/C micro-béton.**

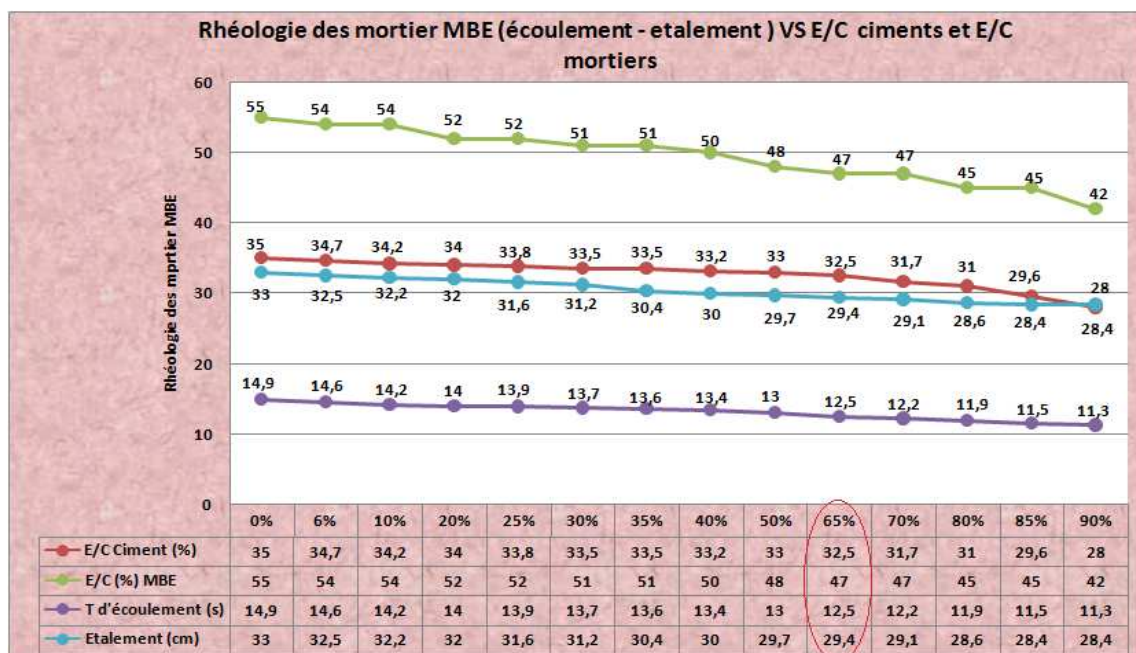
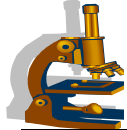


Figure 4-31 l'écoulement et l'étalement du micro béton en fonction du taux d'ajout laitier et E/C ciment et E/C micro-béton.

**IV-13-1-3 La relation entre E/C ciment avec E/C M.B.E :**

Selon la Figures (4-32 ) et tableau (4-26), on note que l'augmentation du pourcentage du taux d'ajout ( laitier ) sur le micro béton frais a un effet :

- l'augmentation du pourcentage du taux d'ajout ( laitier ) diminue E/C ciment et diminue E/C micro-béton préparé.

Ciment	Laitier (%)	E/C Ciment (%)	E/C (%) MBE
CEM 1	0%	35	55
CEM 2	6%	34,7	54
CEM 3	10%	34,2	54
CEM 4	20%	34	52
CEM 5	25%	33,8	52
CEM 6	30%	33,5	51
CEM 7	35%	33,5	51
CEM 8	40%	33,2	50
CEM 9	50%	33	48
CEM 10	65%	32,5	47
CEM 11	70%	31,7	47
CEM 12	80%	31	45
CEM 13	85%	29,6	45
CEM 14	90%	28	42

Tableau 4-26 résultats E/C ciment et E/C du micro béton en fonction du taux d'ajout laitier dans le ciment.

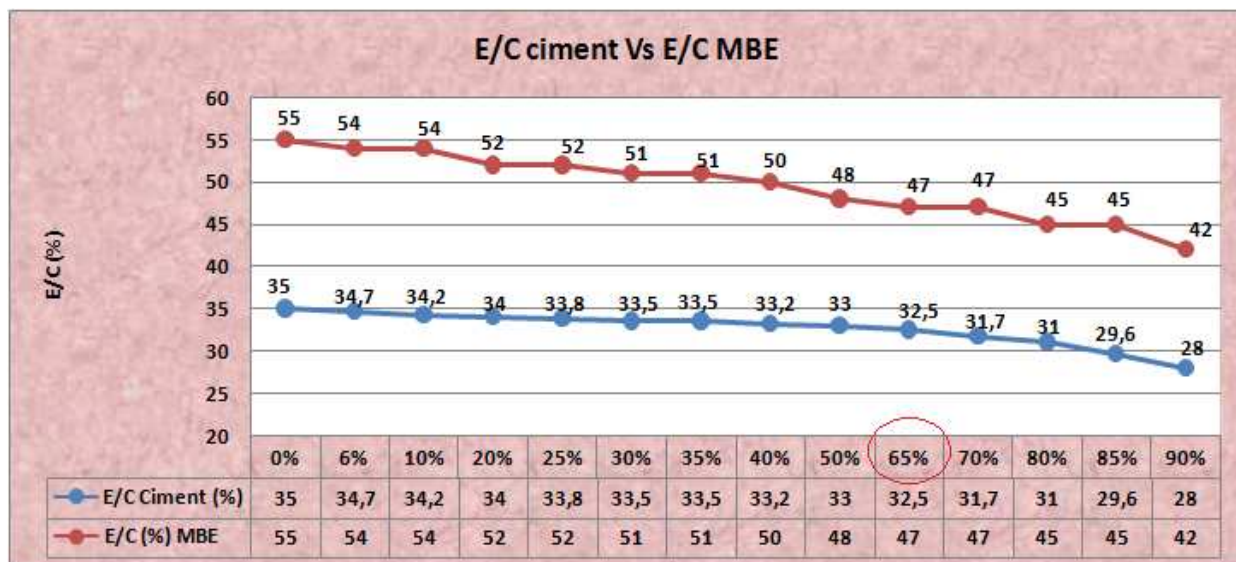
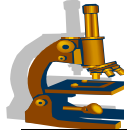
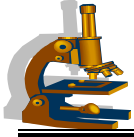


Figure 4-32 Relation entre E/C ciment Vs E/C M.B.E



## Chapitre V : La durabilité du Mortier

### V-1 Introduction :

La définition et les spécifications des bétons sont fixées par le prescripteur ; elles doivent entre autre prendre en compte :

- les agressions liées à la carbonatation et à la pénétration des chlorures (en présence de sels).
- la prévention des désordres dus aux gonflements internes du béton (alcali-réaction et réaction sulfatique interne).
- la durabilité des bétons durcis soumis au gel en présence ou non de sels de déverglaçage.

### V-2 Durabilité des mortiers par la maîtrise de l'absorption d'eau :

La durabilité des bétons et des mortiers de ciment ; exige un contrôle efficace de tous les facteurs susceptible d'affecter son comportement dans le temps.

L'expérience montre que les facteurs influent sur la durabilité et qui doivent donc faire l'objet d'un contrôle suivi sont :

- \* La composition du béton (teneur en ciment et rapport eau/ciment).
- \* L'enrobage des armatures.
- \* La compacité du béton.
- \* La protection du béton frais en cours de durcissement.

#### V-2-1 La détermination du coefficient d'absorption capillaire d'eau :

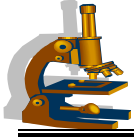
Dans le but d'étudier l'absorption capillaire d'eau initiale des mortiers à 28 jours du durcissement, Nous avons adopté un essai généralement appliqué à des terres cuites et des pierres calcaires NF P10-502. Chaque série comprend trois échantillons prismatiques de côté.

Une face d'about de l'échantillon est placée au contact d'une nappe d'eau à 1 cm de profondeur et la quantité d'eau absorbée est évaluée en mesurant la variation de masse de l'échantillon (Figure 5-1).

La seule précaution à prendre consiste à éliminer la pellicule d'eau retenue à la face inférieure de l'échantillon, avant chaque pesée, à l'aide d'un papier absorbant [42].

La quantité d'eau absorbée au bout d'une heure par unité de surface est retenue comme grandeur représentative de volume des plus gros capillaires présents dans la zone de peau, ces capillaires étant les plus efficaces [43].

Les faces latérales sont imperméabilisées à l'aide d'un film plastique (un ruban plastique adhésive) qui force l'eau à adopter un cheminement uniaxial et éviter l'évaporation au même temps.



La masse d'eau absorbée est déterminée par des pesées successives des éprouvettes. Les essais sont réalisés dans des conditions normalisés ( $T= 20 \pm 2^{\circ}\text{C}$  et  $\text{HR} \geq 50 \%$ ).

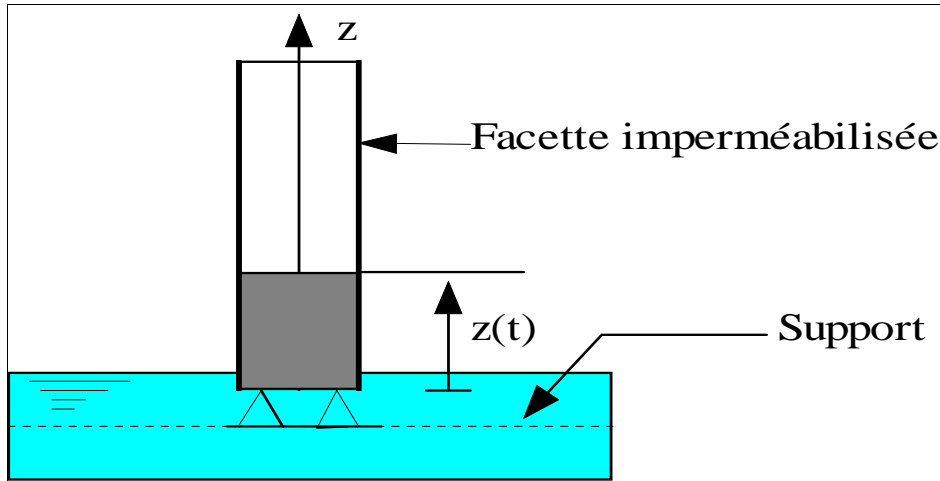


Figure 5-1 Dispositif expérimental de l'essai d'absorption capillaire

Le coefficient d'absorption d'eau initial paraît être un bon indicateur de la durabilité du mortier, puisqu'il caractérise les plus gros capillaires [44]. Ce coefficient sera noté après un temps de succion d'une heure et six heures après :

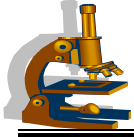
$$\text{Coefficient d'absorption d'eau (\%)} \text{ CA} = [(M_2 - M_1) / M_1] \times 100$$

Avec :

$M_1$  : masse des éprouvettes avant immersion dans 01cm d'eau.

$M_2$  : masses des éprouvettes après immersion dans 01cm d'eau.

Les résultats expérimentaux obtenus sont résumés dans les Tableaux (5-1& 5-2) ; et les Figures (5-2&5-3) présentent l'effet du taux d'ajout (laitier) sur l'absorption capillaire ; concernant le tableau (5-2) il représente Les coefficients d'absorption d'eaux obtenues pour la totalité des échantillons.



Ciment	Laitier (%)	Absorption d'eau 01 h (g)	Absorption d'eau 06 h (g)	Absorption d'eau 24 h (g)	Absorption d'eau 21 j (g)	Absorption d'eau 28 j (g)
CEM 1	0%	4,7	5,1	6,60	7,10	7,30
CEM 2	6%	4,2	4,5	6,00	6,50	6,70
CEM 3	10%	3,8	4,1	5,60	6,10	6,30
CEM 4	20%	3,5	3,7	5,20	5,70	5,90
CEM 5	25%	3,1	3,4	4,90	5,40	5,60
CEM 6	30%	3	3,3	4,80	5,30	5,50
CEM 7	35%	2,8	3,1	4,60	5,10	5,30
CEM 8	40%	2,5	2,8	4,30	4,80	5,00
CEM 9	50%	2,2	2,5	4,00	4,50	4,70
CEM 10	65%	1,5	1,7	3,20	3,70	3,90
CEM 11	70%	1,3	1,4	2,90	3,40	3,60
CEM 12	80%	1,1	1,2	2,70	3,20	3,40
CEM 13	85%	0,9	1,1	2,60	3,10	3,30
CEM 14	90%	0,9	1	2,50	3,00	3,20

Tableau 5.1 Absorption d'eau des mortiers préparés en (g)

Ciment	Laitier (%)	Absorption d'eau 01 h (%)	Absorption d'eau 06 h (%)	Absorption d'eau 24 h (%)	Absorption d'eau 21 j (%)	Absorption d'eau 28 j (%)
CEM 1	0%	0,80	0,87	1,13	1,21	1,25
CEM 2	6%	0,72	0,77	1,03	1,11	1,15
CEM 3	10%	0,65	0,70	0,96	1,05	1,08
CEM 4	20%	0,60	0,64	0,89	0,98	1,01
CEM 5	25%	0,53	0,59	0,84	0,93	0,97
CEM 6	30%	0,52	0,57	0,83	0,92	0,95
CEM 7	35%	0,48	0,54	0,80	0,88	0,92
CEM 8	40%	0,43	0,49	0,75	0,83	0,87
CEM 9	50%	0,38	0,43	0,69	0,78	0,82
CEM 10	65%	0,26	0,30	0,56	0,64	0,68
CEM 11	70%	0,23	0,24	0,51	0,59	0,63
CEM 12	80%	0,19	0,21	0,47	0,56	0,60
CEM 13	85%	0,16	0,19	0,46	0,54	0,58
CEM 14	90%	0,16	0,18	0,44	0,53	0,56

Tableau 5.2 Les Coefficients d'absorption d'eau (%)

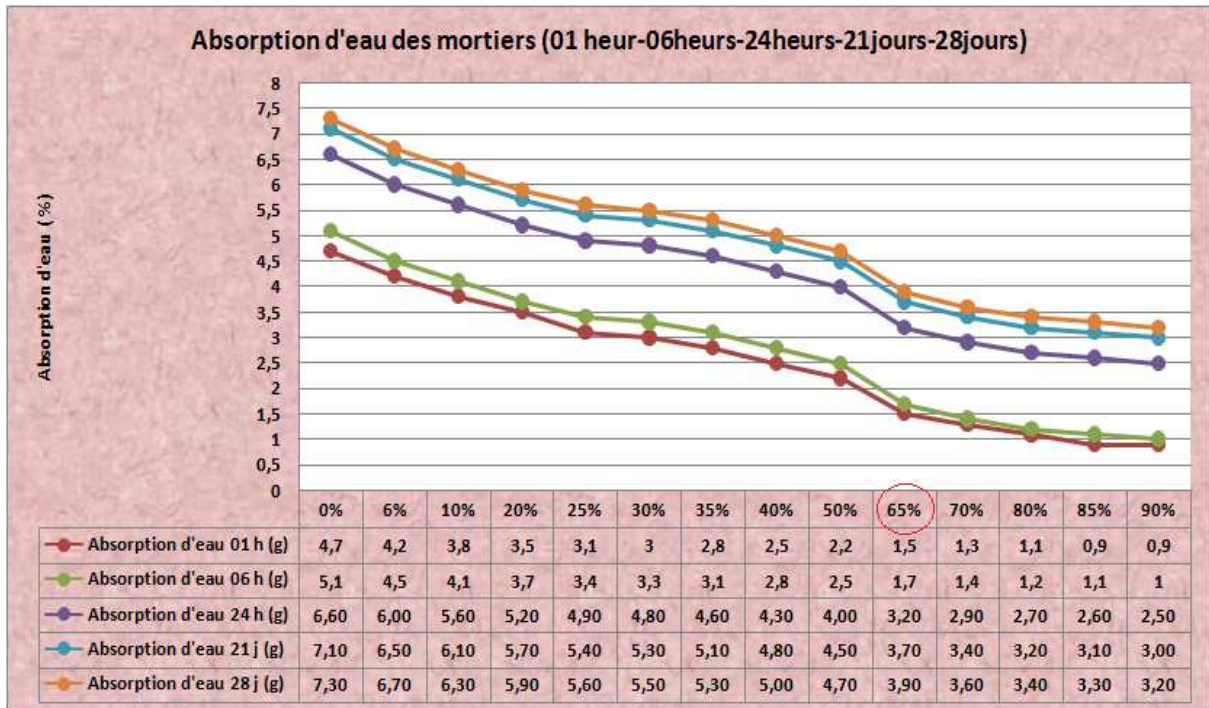
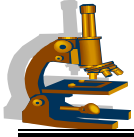


Figure 5-2 Effet du taux d'ajout laitier sur l'absorption d'eau (en gramme).

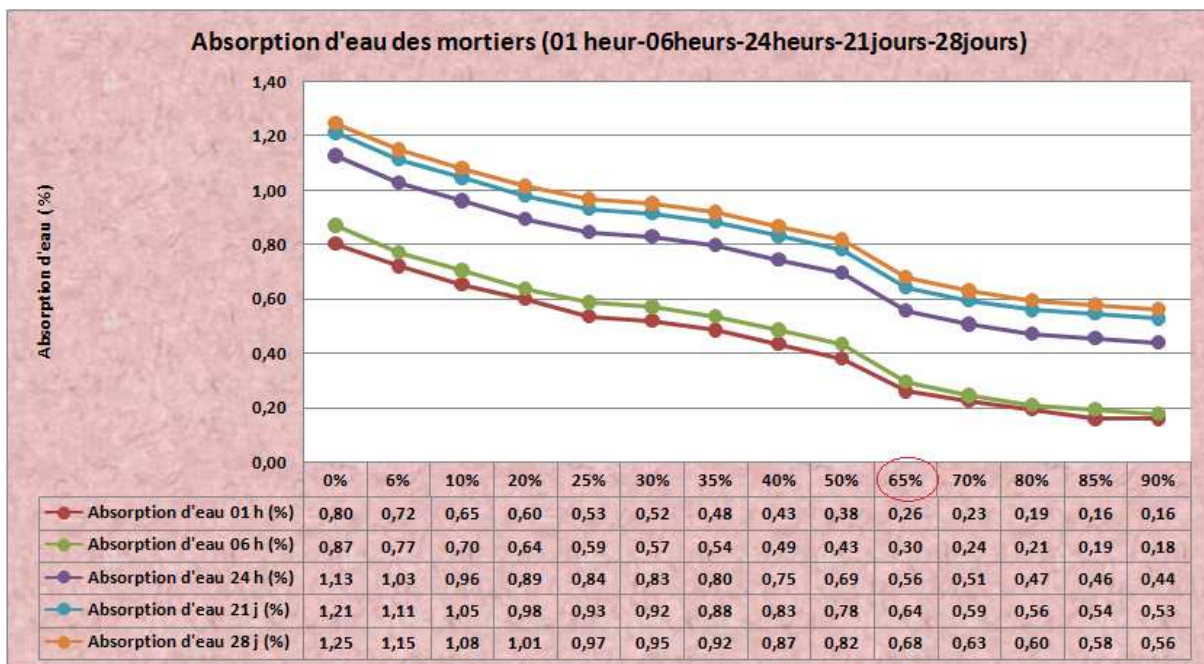
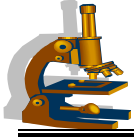


Figure 5-3 Effet du taux d'ajout laitier sur l'absorption d'eau (coefficient d'absorption (%)).



V-2-2 Effet du Taux d'ajout Laitier Sur la porosité (absorption capillaire d'eau):

L'essai consiste à suivre l'absorption capillaire d'eau dans le mortier.

- Selon la Figures (5-4), On note que l'augmentation du pourcentage de l'ajout (laitier) incorporé dans le mortier engendre une Diminution de la quantité d'eau absorbée.

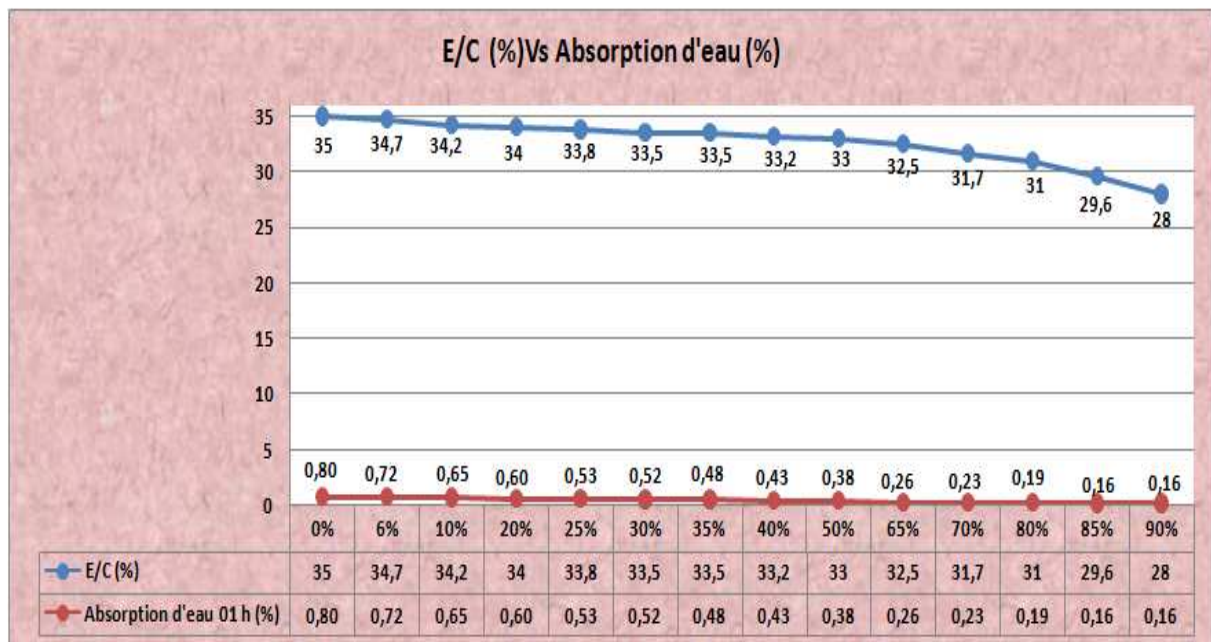


Figure 5.4 Effet du rapport E/C Ciment sur l'absorption d'eau.

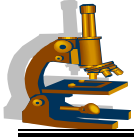
On note que la relation entre le (rapport E/C) et l'absorption capillaire d'eau est inverse avec l'augmentation du taux d'ajout laitier.

- La porosité du mortier gouverne plusieurs propriétés.
  - la perméabilité (eau, ions, gaz).
  - Presque toutes les caractéristiques mécaniques.
  - Durabilité.
- Plus la porosité diminue, plus les propriétés mécaniques augmentent et plus la perméabilité diminue.

Les mortiers faiblement poreux sont en général plus durables puisque leur faible perméabilité retarde la pénétration de l'eau, et des autres agents potentiellement agressifs (sulfates, CO<sub>2</sub>, Cl<sup>-</sup>, etc).

- La porosité du béton est constituée de plusieurs familles de vides dont les dimensions sont comprises entre quelques mm et quelques dizaines d'angstrom (Å).  
Les petits vides du béton sont donc 1 millions de fois plus petits que les vides les plus gros.

- Par ordre décroissant de diamètre on retrouve:



- Les vides d'air occlus et dû au défaut de compactage (diamètre > 1mm) Ces vides ne sont généralement pas remplis d'eau.
- Les bulles d'air entraînées ( $10\ \mu\text{m} < \text{diamètre} < 1\ \text{mm}$ )
- Les pores capillaires ( $0,01\ \mu\text{m} < \text{diamètre} < 5\ \mu\text{m}$ ) ; Si le béton est constamment conservé à l'humidité, on peut considérer que les pores capillaires sont pratiquement remplis d'eau. Si le béton est soumis au séchage, les pores capillaires commencent à se vider graduellement en commençant par les plus gros.

Ce sont surtout le volume total et la dimension des pores capillaires qui influencent le plus la perméabilité du béton.

- Les pores de gel (diamètre <  $40\ \text{Å}$ ) contiennent de l'eau qui est en partie absorbée à la surface des feuillettes de C-S-H ; Cette eau est relativement stable et il est difficile de l'extraire par séchage ; et ces pores n'ont pas une grande influence sur la perméabilité.

### V-2-2-1 Le rapport eau/ciment et son influence sur la porosité :

• Le rapport eau/ciment exerce une grande influence sur la porosité de la pâte de ciment hydraté car il gouverne directement l'espacement initial entre les grains de ciment en suspension dans l'eau de gâchage.

Sur la figure (5-4), on voit clairement que plus le rapport E/C est faible, et plus l'absorption d'eau est faible (porosité faible) (initialement, les grains de ciment sont rapprochés les uns des autres ; L'espace à combler entre les grains de ciment est moins grand et il y a moins de chance d'avoir un grand vide qu'il ne peut pas être complètement rempli par les hydrates).

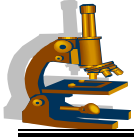
Même une très faible quantité d'hydrates peut permettre de combler l'espace inter-granulaire.

C'est en partie ce qui explique que les mortiers développent très rapidement leurs résistances avec un rapport E/C faible.

• On peut se poser cette question :

Quelle est l'influence du rapport E/C sur la porosité capillaire ?

- Supposons que l'on utilise une très **grande quantité d'eau** pour une très faible masse de ciment (E/C élevé) alors :
  - \*Les grains de ciment seront donc très éloignés les uns des autres et, après s'être complètement hydratés, il restera un surplus d'eau important, donc une porosité capillaire très importante.
  - \*La perméabilité du mortier sera très grande et ses propriétés mécaniques seront très faibles.
- Inversement, si la quantité d'eau est **très faible** par rapport à la masse de ciment (E/C faible) alors :
  - \* Les grains de ciment sont **très près** les uns des autres. Toute l'eau pourra réagir avec le ciment et il ne restera que très **peu de porosité capillaire**.
  - \*La perméabilité du mortier sera très faible et les propriétés du mortier seront très élevées.



### V-2-2-2 Influence de la porosité de la pâte du ciment :

La porosité de la pâte du ciment durci est dû essentiellement à la présence d'une quantité d'eau. Après durcissement du ciment, le reste de l'espace occupé par l'eau dans la pâte fraîche devient des pores. Ces pores sont devisés en :

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

Le volume de ces pores à un effet inverse sur la résistance mécanique du ciment ; Plus ce volume augmente et plus la résistance diminue.

Cela est dû à la création de discontinuité dans la matière, qui engendre une concentration des contraintes dans des points singuliers et par suite la rupture de l'éprouvette ou de l'élément structurale, avant l'atteinte de la résistance mécanique réelle du ciment.

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

### V-3 Attaque des mortiers par les acides :

#### V-3-1 Processus expérimental :

Les échantillons d'essais ont été confectionnés conformément à la Norme EN 197-1. Après 28 jours de cure, les éprouvettes sont pesées pour déterminer leurs masses avant l'attaque chimique ; ils sont partiellement immergés dans la solution d'acide sulfurique ( $H_2SO_4$ ) pendant 21 jours de façon à maintenir un pH constant et égale à 4 (voir figure 5-5).

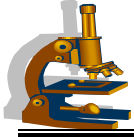
- La résistance du aux agressions chimiques des éprouvettes immergées dans la solution acide est évaluée selon la Norme ASTM C 267-96.
- Les éprouvettes sont nettoyées 3 fois ; avec l'eau douce pour éliminer le mortier altéré puis laissées sécher pendant 30 min ; Ensuite on procède à la pesée des éprouvettes avec une balance de précision de 0.1g.
- Le degré de l'attaque est évalué par la formule de perte de masse suivante :

$$\text{Perte de masse (\%)} \text{ PM} = [(M_1 - M_2) / M_1] \times 100$$

Avec :

$M_1$  : masses des éprouvettes avant immersion dans la solution d'acide ( $H_2SO_4$ ).

$M_2$  : masses des éprouvettes après immersion dans la solution d'acide ( $H_2SO_4$ ).



**Figure 5.5 Eprouvettes prismatiques (40x40x160) mm<sup>3</sup> immergées dans la solution d'acide sulfurique**

### V-3-2 Observations visuelles des mortiers attaqués par l'acide sulfurique ( $H_2SO_4$ ) :

L'observation visuelle ; c'est un moyen d'évaluer la détérioration et la dégradation de l'aspect extérieur des spécimens.

Après 21 jours de conservation dans la solution d'acide sulfurique, les échantillons ont un aspect plus ou moins dégradé comparativement aux échantillons conservés en eau douce (voir Figure 5.7).

En effet la surface des mortiers est un peu décapée et recouverte d'une couche blanchâtre plus tapissante (formation gypseuse) et les grains de sable sont un peu déchaussés.



**Figure 5.6 éprouvette avant et après immersion dans la solution (acide sulfurique  $H_2SO_4$  )**

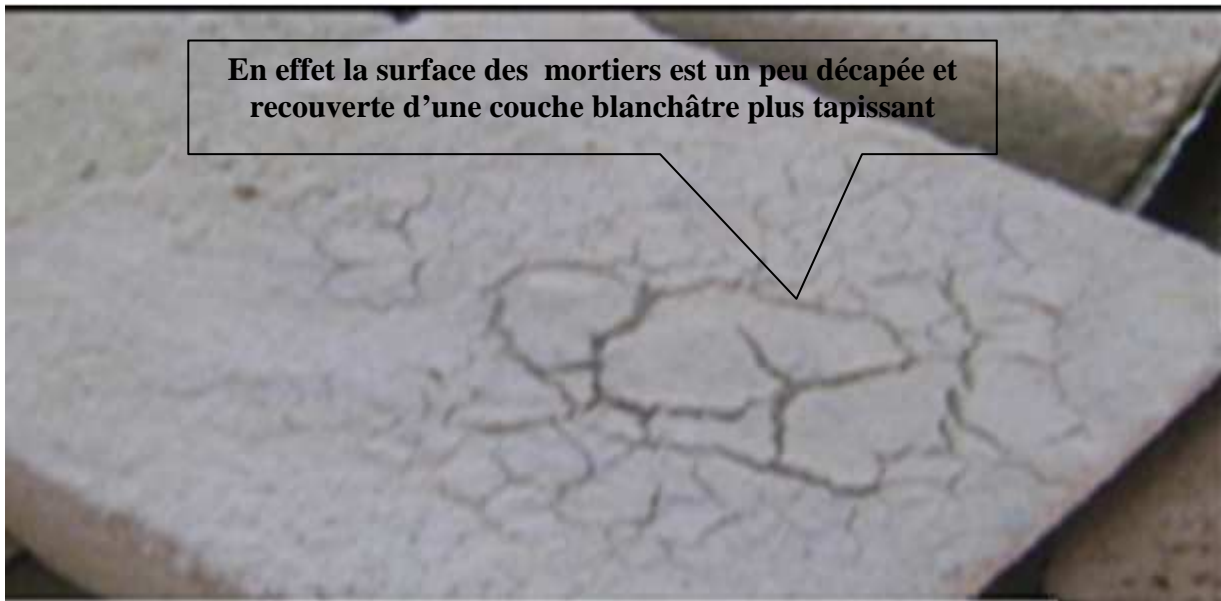
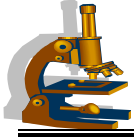


Figure 5.7 Mortier CEM 06 (65% de laitier) après 21 jours d'immersion dans l'acide sulfurique ( $H_2SO_4$ ).

### V.3.3 Influence de la durée de cure ( 21jours d'immersion dans $H_2SO_4$ ) sur la perte de masse des mortiers :

	Laitier (%)	$M_1$	$M_2$	Perte de Masse (%)	Perte de Masse (g)
CEM 1	0%	586	583	0,60	3,5
CEM 2	6%	584	581	0,57	3,3
CEM 3	10%	583	580	0,53	3,1
CEM 4	20%	582	579	0,50	2,9
CEM 5	25%	580	577	0,47	2,7
CEM 6	30%	579	576	0,45	2,6
CEM 7	35%	578	576	0,43	2,5
CEM 8	40%	577	575	0,40	2,3
CEM 9	50%	576	574	0,35	2
CEM 10	65%	575	573	0,30	1,7
CEM 11	70%	573	572	0,26	1,5
CEM 12	80%	571	570	0,25	1,4
CEM 13	85%	569	568	0,25	1,4
CEM 14	90%	568	567	0,23	1,3

Tableau 5.3 Variation de la perte de masse des mortiers immergées dans la solution acide sulfurique pendant 21 jours des différents mortiers

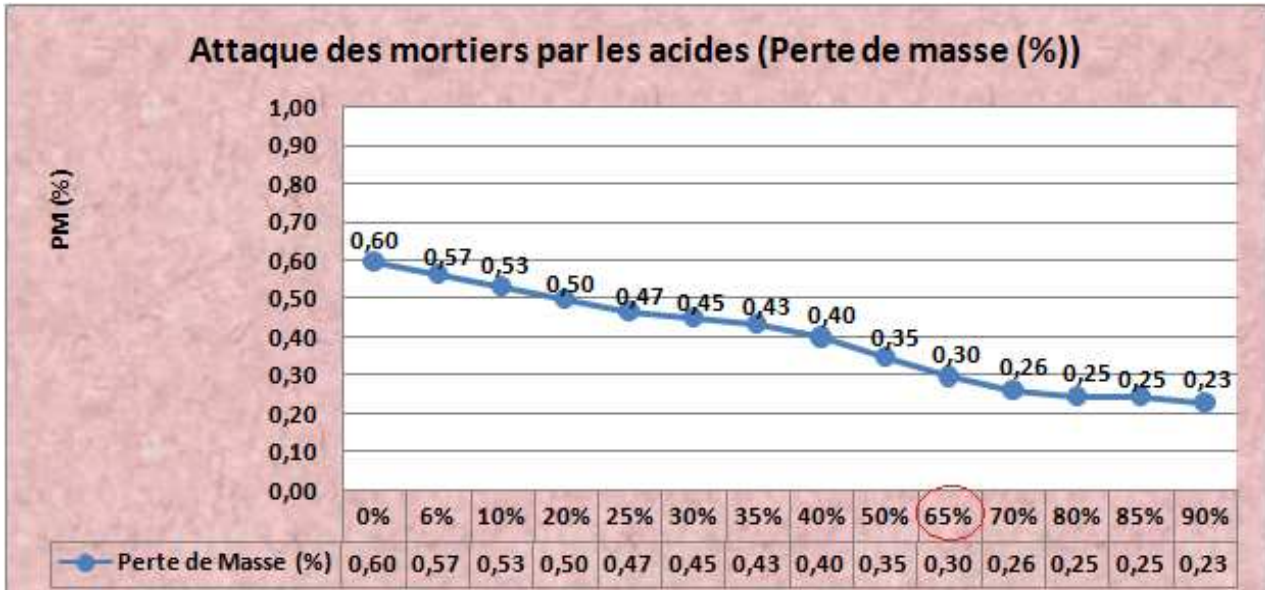


Figure 5.8 Variation de la perte de masse (%) des mortiers immergés dans la solution acide sulfurique pendant 21 jours des différents mortiers.

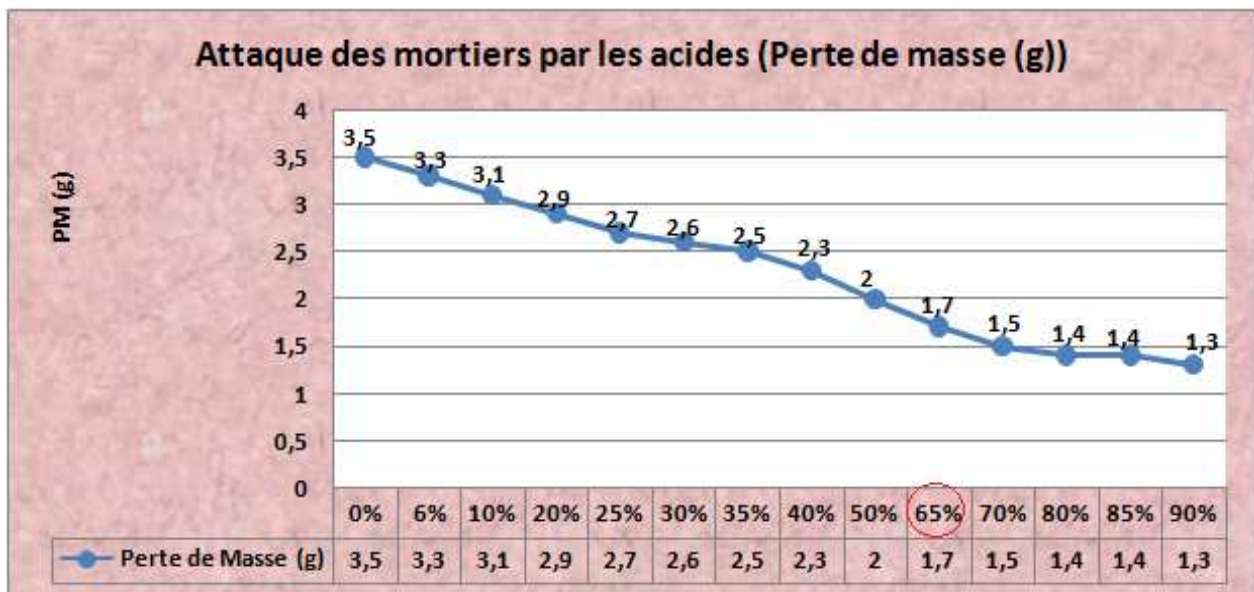
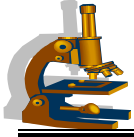


Figure 5.9 Variation de la perte de masse (g) des mortiers immergés dans la solution acide sulfurique pendant 21 jours des différents mortiers

Les résultats expérimentaux obtenus (Tableau 5-3 et Figure 5-9) présentent l'effet d'attaque acide sur la perte de masse des mortiers en fonction de variation des taux d'ajout (laitier).

L'essai consiste à suivre la perte de masse des mortiers ou on note que l'augmentation du pourcentage de l'ajout laitier dans les ciments préparé pendant la durée de cure (21 jours d'immersion dans H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) incorporé dans le mortier a un effet :

- perte de masse des mortiers (diminuée avec l'augmentation d'ajout laitier).



#### V-4 Conclusion :

A la lumière des essais réalisés dans le cadre de cette étude (étude de durabilité basé sur l'absorption capillaire d'eau et l'attaque acide) ; nous a permis d'extraire certains nombres de points majeurs méritent d'être soulignés:

- L'absorption initiale (pendant 01 heure et 06heurs) est une fonction décroissante par apport l'augmentation d'ajout laitier. Autrement dit, plus le taux d'ajout laitier augmente, plus le rapport E/C diminué et plus le taux d'absorption initiale diminué et plus la résistance aux attaques acides sulfuriques diminue.

Enfin, des corrélations entre la quantité d'eau absorbée à une heure ou six heures ou l'absorption initiale, qui permet de prendre en compte à la fois les facteurs de composition des ciments préparé et les conditions de conservation, pourrait donc être un élément à considérer dans la prévision de la durabilité.

Du fait de leur teneur en chaux faible ou nulle, les ciments CHF sont peu sensibles à l'attaque des eaux acides, et des eaux très pures.

Ils sont donc recommandés pour les ouvrages marins, les égouts, les travaux dans la nappe phréatique.



## CONCLUSION

Les ciments aux ajouts minéraux laitier (CEM II – CEM III) classe A et B ou C sont de plus en plus utilisés pour la confection des matériaux cimentaires (mortier et béton) pour plusieurs raisons, écologiques, économiques, ou pour améliorer certaines propriétés à l'état frais ou durci pour la durabilité.

Le ciment de laitier (CEM II – CEM III) avec ajout laitier se distingue par un durcissement ralenti à sa période initiale en comparaison avec un ciment Portland ordinaire sans ajout, c'est-à-dire sans constituant secondaire (CPA - CEM I).

Cette propriété latente du ciment avec ajout laitier (CEM II – CEM III), nécessite l'emploi d'un bon activant, chimique (utilisation des solutions (adjuvant chloré) qui modifient la prise et le durcissement, et augmente les résistances à jeune âge par ce que les ciments de haut fourneau faible résistance à 02 jours), mécanique (broyage poussé 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 (laitier),
- Etudier l'influence de différentes finesses (surface spécifique),
- Etudier l'influence des différentes granulométries (distribution des tailles de particules) de ciments préparés au laboratoire (BB10) sur la résistance mécanique du mortier et du béton.

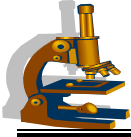
Ce travail est une contribution à l'amélioration des propriétés des mortiers et des bétons par activation mécanique de cinq types de ciments

(CEM II/A-S – CEM II/B-S – CEM III/A – CEM III/B – CEM III/C)  
de trois différentes classes de résistances (52.5 - 42,5- 32.5).

Les propriétés physiques des ciments (CEM II – CEM III) activés mécaniquement à l'état anhydre et à l'état hydraté (poids spécifique, consistance des pâtes de ciments et délais de prise) ainsi que les caractéristiques des mortiers et des bétons confectionnés (le retrait, le gonflement et la chaleur d'hydratation) de mortier ont été étudiées.

D'après les résultats expérimentaux obtenus, il ressort que l'augmentation de laitier par différents pourcentages et les propriétés physiques (surface spécifique et la granulométrie) des ciments aux ajouts (laitier) sont les principaux responsables à l'amélioration de la réactivité latente des additions minérales et résistances mécaniques des mortiers et bétons.

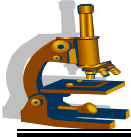
Les divers résultats présentés dans ce mémoire précisent clairement les influences majeures de l'activation mécanique (taux d'ajout laitier et broyage poussé sur BB10) des ciments aux ajouts laitier (CEM II – CEM III) sur la cinétique d'hydratation des ciments (consistance - délais de prise et chaleur d'hydratation), sur les propriétés mécaniques des mortiers et bétons 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 d'ajout ( laitier ) dans le ciment influe sensiblement sur le besoin en eau nécessaire pour avoir une consistance normale.
- \* Les demandes en eau ( E/C ) diminué proportionnellement avec l'augmentation du taux d'ajout laitier.
- \* L'augmentation du taux d'ajout ( laitier ) dans le ciment influe sensiblement sur la finesse (surface spécifique) des ciments.
  
- \* Les temps de début et de fin de prise augmentent proportionnellement avec L'augmentation du taux d'ajout laitier.
- \* L'activation mécanique ( broyage poussé sur BB10 ) des ciments aux ajouts laitiers présents deux avantages essentiels :
  - Une bonne résistance mécanique du mortier et du béton à jeune âge et résistance à long terme ainsi qu'une cinétique d'hydratation.
  - 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'influence du taux d'ajouts cimentaires ( laitier ) sur la chaleur d'hydratation (propriétés physiques et mécaniques) des matériaux (ciment) donne des ciments a faible chaleur d'hydratation utilise comme ciment spéciaux.
- \* les résistances à la compression de tous les tests de mortier et bétons augmentent régulièrement avec l'âge.
- \* La résistance à la compression diminue avec l'augmentation du pourcentage d'ajout (laitier).
- \* L'influence du taux d'ajout (laitier) sur les propriétés physiques et mécaniques des matériaux (mortiers et bétons) donne un changement de type et classe de ciment ( CEM II/A vers CEM II/B et vers CEM III/A vers CEM III/B et vers CEM III/C ).
- \* les ciments aux ajouts laitier doivent être finement broyés entre (3400 cm<sup>2</sup>/g – 4000 cm<sup>2</sup>/g) et poids spécifique entre ( 2,90 g/cm<sup>3</sup> - 3,15 g/cm<sup>3</sup> ) afin d'accélérer la cinétique d'hydratation des ciments à court terme (amélioration de la réactivité de laitier) et assurer une bonne résistance mécanique du matériau :



- L'activation mécanique (broyage poussé) des ciments aux ajouts laitiers accélère fortement la cinétique d'hydratation à 2 jours de durcissement (réactivité très rapide de la réaction d'hydratation).

Le laitier en général amène à une diminution de la vitesse d'hydratation du ciment et donc :

- A une augmentation du début de prise et fin de prise.
- A une diminution des résistances initiales.

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

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

- Les Retraits augmentent avec l'âge du mortier.
- Les Retraits des ciments avec ajouts de laitier sont supérieurs à ceux du ciment Portland (sans ajout).

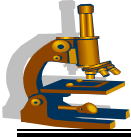
\*Le gonflement sur les éprouvettes contenant comme ajout de laitier est inférieur au gonflement dû au ciment Portland.

\*La maniabilité des mortiers et béton est améliorée avec l'augmentation de laitier plus le mortier est plastique, maniable et de bonne ouvrabilité et plus le temps  $t$  est court.

(Le mortier de très plastique).

-Enfin pour assurer une bonne qualité des ciments avec différents pourcentage d'ajout laitier (CEM II/A - CEM II/B – CEM III/A - CEM III/B - CEM III/C) avec différents classe des résistances il faut utiliser :

- Un clinker a bonne broyabilité et des bonnes réactivités stockées dans un endroit à l'abri de l'humidité.
- Un laitier de dureté moyenne (facile à broyer) .
- Un laitier de bonne réactivité ( laitier riche en chlore ).
- Bonne qualité de gypse  $\text{SO}_3 > 38\%$ .
- Assure un bon broyage de ciment (broyage poussé).



## **Conclusion générale :**

L'utilisation du ciment CHF (65 % de laitier) dans les mortiers et bétons à hautes performances (béton de résistance au sulfate – béton utilisé au milieu agressif ...) nous a permis d'apprécier les vertus du ciment au laitier sur les propriétés du mortier et béton et de tirer les conclusions suivantes :

L'utilisation de ciment au laitier contribue à l'amélioration de la performance du béton dans la plupart des applications.

En ce qui concerne les propriétés du béton frais, l'utilisation du ciment CHF se traduit généralement par l'amélioration de l'ouvrabilité, de la palpabilité et de la mise en place du béton. L'ajout cimentaire laitier font augmenter la cohésion.

Ils entraînent également une réduction de la chaleur d'hydratation et, par conséquent, du risque de fissuration thermique .

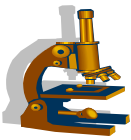
En ce qui concerne les propriétés mécaniques du béton durci, l'utilisation de ciment au laitier entraîne généralement une diminution de la résistance initiale (jusqu'à 14 jours, mais une augmentation de la résistance à long terme 28 j – 60j – 90j... ).

L'utilisation des ajouts cimentaire va nous permettre de gagner sur plan économique car le laitier sont des sous produit, un gain aussi au niveau technique puisque on ils nous ont donné des résistances importantes et surtout un gain sur le plan écologique puisque on va utiliser ces déchets, en plus on va diminuer la production de ciment ce qui diminue le dégagement du CO<sub>2</sub> des cimenteries .

- **Recommandations et perspectives :**

Les recommandations envisagées pour améliorer les différentes caractéristiques des mortiers et béton à base d'ajouts cimentaires laitier sont:

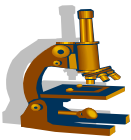
- Cherché une laitier de bonne réactivité riche en chlore.
- Chercher des optimum SSB de laitier (broyabilité plus élevées).



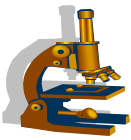
---

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

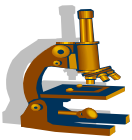
- [01]-BARRON J. SAUTEREY R. Le béton hydraulique .Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées Paris.p559.
- [02]- MASSAZZA F. Chimie des additions pouzzolaniques et des ciments mélangés. II Cemento,
- [03]- SOROKA I, Concrete in hot environment, Ed. E and FN SPON, London, 1993.
- [04]-CAMILLE DEFOSSE, Chimie du ciment, valorisation des déchets en cimenterie, Université libre de Bruvelles, site "CHIM 315 Partie 32004".
- [05]- PELRIER R, PASQUET A. bulletin de liaison des laboratoires routiers spécial O. LCPC, juin 1970.
- [6]- L. PLISKIN : « La fabrication du ciment » - Edition Eyrolles – 217p- Paris1993.
- [7]- Kiran Pokkuluri « Effect of admixtures, chlorides, and moisture on dielectric properties of Portland cement concrete in the low microwave frequency range» - Master thesis – Virginia University – 210p - October 1998.
- [8]- M. Regourd, H. Hornain, « Applications de la microscopie électronique à balayage » Revue des matériaux de construction, 693 : 73–87- 1975.
- [9]-E. Guillon, « Durabilité des matériaux cimentaires –Modélisation de l'influence des équilibres physico-chimiques sur la microstructure et les propriétés mécaniques résiduelles », thèse de doctorat, ENS Cachan/ CNRS/ Université Paris 6, France-2004.
- [10]-Y. Older , « Hydratation, setting and hardening of Portland cement », dans Lea's - Chemistry of Cement and Concrete, chap.6, Arnold, 4th éd- 1998.
- [11]- R. Gané « Cours de durabilité et Réparation des bétons » - Chapitre 2- Université de Sherbrooke – p32 - Canada 2002.
- [12]- M Venuat – La pratique des ciments, mortiers et bétons – Tome 1 : « Caractéristiques des liants et des bétons, mise en oeuvre des coulis et mortiers » - édition2 – Collection Moniteur. – 277p-1989.
- [13]- R. SERSALE, “Structure et caractérisation des pouzzolanes et des cendres volantes » thème VI- 17ème Congrè International de la chimie des ciments - Volume 1- Partis 1980.



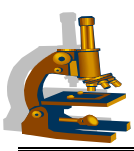
- [14]- H. PICHON, P. Gaudon, A. Benhassain, O. Eteradossi, «Caractérisation et quantification de la fraction réactive dans les pouzzolanes naturelles », Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées, N° 201- Jan-Fev 1996.
- [15]- P.C. AITCIN, C. jolicoeur et J. macgregor, « superplasticizers : how they word and why they accasionnelly don't », concrete international, pp 45-52 – Mai 1994.
- [16]- P.C. AITCIN«les propriétés minéralogiques des sables de laitier de haut fourneau de fonte thomas et leur utilisation dans les mortiers en béton » . Revue des matériaux de construction, pp 185-194 - Mai 1968.
- [17]- P.C. AITCIN, C., F. Autefage, A. carles-Macgreues., A. Vaquier., « comparative study of the cementitious of différent fly ashe », pp 91-114 - 1994.
- [18]- S. Chabi. Etude de l'influence des additions minérales actives sur les caractéristiques physico-mécaniques des ciments et bétons pour les fondations immergées (cas du sud algérien). Mémoire de magister en génie civil. Université de Biskra, 2004. 165 p.
- [19]- M. Burteaux. Laitiers de haut fourneau. Technique de l'ingénieur, M 7 425. 1995. pp. 1- 9.
- [20]- F.M. Léa. The chemistry of cement and concrete. «La chimie du ciment et du béton». Chemical publishing co. Inc. New York, N.Y. 1971.
- [21]-I. Messaoudene et A. Naceri. Effet de l'activation mécanique du laitier de haut fourneau sur la réponse mécanique du mortier. Proceeding du 1<sup>er</sup> congrès international sur la technologie et la durabilité du béton. Faculté de génie civil. Laboratoire du bâti dans l'environnement. Université des sciences et de la technologie – Houari Boumediene. Du 24 au 26 Mai 2004.
- [22]- R. Dron. Mécanisme de la prise du laitier granulé sous activation alcaline. Thèse universitaire, Paris VI, rapport de recherche No. 38, LCPC Paris, 1973.
- [23]- H. Kühl et E. Schleicher. Gipsschlackenzement. «Ciment de scories au plâtre». Fachbuchverlag GmbH, Leipzig, 1952.
- [24]- J. Stark. Sulfathüttenzement. «Ciment du haut fourneau au sulfate». Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule für Architektur und Bauwesen Weimar, 1995, 41, No. 6/7. pp. 7-15.
- [25]-H.G. Smolczyk. Die Hydratationsprodukte Hüttensandreicher Zemente. «Produits d'hydrataton du ciment du haut fourneau». Zement-Kalk-Gips,1965, 23, No. 5. pp. 238246.
- [26]- J. Stark, U. Frohburg et I. Mielke. Super sulfated cement with and without cement clinker. «Le ciment sur-sulfaté avec et sans clinker». Proceedings of the Conference of Non-Traditional Cement and Concrete. Brno, 2001.



- [27]-H. E. Schweitem U. Ludwig et P. Otto. Untersuchungen an Sulfathüttenzementen. «Études des ciments du haut fourneau au sulfate». Forschungsberichte des Landes Nordrhein-Westfalen. No. 2227. Westdeutscher Verlag, Köln and Opladen, 1971.
- [28]- I. A. Voinovitch et R. Dron. Action des différents activants sur l'hydratation du laitier granulé. Bulletin - liaison LCPC. 83, mai - juin 1976.
- [29]- C. Shi et R. L. Day. A calorimetry study of early hydration fly ashes. «Étude calorimétrique de l'hydratation des cendres volantes au jeune âge». A cement for the future. Cement and Concrete Research 29, 1995. pp. 1333-1346.
- [30]- F. Puertas, S. Martínez-Ramírez, S. Alonso et T. Vázquez. Alkali-activated fly ash/slag cement. Strength behaviour and hydration products. «Ciment Alkali-activé de cendres volantes/laitier. Comportement mécanique et produits d'hydratation». Cement and Concrete Research 30, 2000. pp. 1625-1632.
- [31]- L. Zeghichi, B. Mezghiche et R. Chebili. Study of the effect of alkalis on the slag cement systems. «Étude de l'effet des alcalis sur les systèmes de ciment de laitier». Canadian Journal of Civil Engineering 32, 2005. pp. 934-939.
- [32]- B. Mezghiche, M. Bouabaz et M. Chebah. High strength concrete. «Le béton de haute performance». Proceedings of the international conference (concrete in the service of mankind). Dundee, Scotland, June 27-28<sup>th</sup>, 1996.
- [33]: B. Mezghiche. Technologie des bétons aux laitiers basiques pour RADP. Thèse de doctorat en sciences techniques. Institut de Minerais de Krivoi Rog, Kiev, 1989. 136 p.
- [34]- L. Zeghichi. Etude des bétons basiques à base des différents granulats. Thèse de doctorat en génie civil. Université de Biskra, 2006. 168 pages.
- [35]- J. Bijen. Blast furnace slag cement for durable marine structures. «Le ciment au laitier du haut fourneau pour les structures maritimes durables». Netherlands, 1996.
- [36]-M. Mellas. Quelques aspects de la qualité du béton in situ par le microscope électronique à balayage. Thèse de doctorat en génie civil. Université de Biskra, 2003. 131 pages.
- [37]-A. Naceri. L'influence de la teneur en laitier et sa surface spécifique sur la résistance du mortier durci. First international conference on environmental engineering. Ain Shams University, April 9-11<sup>th</sup>, 2005. pp. 1232-2241.



- [38]- A. Nacéri et I. Messaoudene. The chemical and physical effects of the granulated blast furnace slag on concrete compressive strength. «Les effets chimiques et physiques du laitier du haut fourneau sur la résistance à la compression du béton». World Journal of Engineering 3(3), 2006. pp. 45-51.
- [39]- L. Zeghichi, B. Mezghiche et A. Merzougui. La valorisation du laitier d'El-Hadjar dans la confection des ciments. Actes du séminaire international de géomatériaux GEOMAT 02. Université de M'sila, 10-11 mars 2003. pp.433-473.
- [40]- T. Matschei, F. Bellmann et J. Stark. Hydration behaviour of sulfate-activated slag cement. «Comportement d'hydratation du ciment de laitier activé par les sulfates». Advances in Cement Research. October 2005, 17, No. 4. pp. 167-178.
- [41]- L. Zeghichi, B. Mezghiche et A. Merzougui. Etude de l'influence des solutions basiques sur le ciment au laitier. 11<sup>th</sup> international conference for building and construction. Cairo, Egypt, June 17<sup>th</sup>-21<sup>st</sup>, 2004. pp. 523-530.
- [42]- Castel et al., 2001.
- [43]- (Hall, 1989 ; Schonlin et al., 1989; Parrott L. J.,1993; J. -P. Balayssac et al.,1993; Lucija Hanzic et al.,2010; M. Rabehi et al., 2012)
- [44]- ( Parrott L. J.,1993; J. -P. Balayssac et al.,1993; Lucija Hanzic et al.,2010; M. Rabehi et al., 2012)



## **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 220.
- 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**

**Dé livré 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  
Vérification effectuée par : J. MESSAGER  
Date d'émission : 14 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.



**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**

**Dé livré 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

