



N° d'ordre:

UNIVERSITE * MOHAMED BOUDIAF * DE M'SILA
FACULTE DES SCIENCES ET DES SCIENCES DE L'INGENIEUR
DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de

Magister

Spécialité: *GENIE CIVIL*

Option: *MATERIAUX*

P a r

BENIA Mounir

Thème

**Influence de la surface spécifique des ciments aux
ajouts minéraux sur le comportement mécanique
du mortier et du béton à base de matériaux locaux**

Soutenu publiquement le/...../..... devant le jury composé de:

**M. BIBI
A. NACERI
Z. BOUDAUD
A. BENOUIS
L. BELAGRAA**

**Maître de conférences
Maître de conférences
Maître de conférences
Maître de conférences
M.A.C.C**

**Président
Rapporteur
Examineur
Examineur
Membre**

INFLUENCE DE LA SURFACE SPECIFIQUE DES CIMENTS AUX AJOUTS MINERAUX SUR LE COMPORTEMENT MECANIQUE DU MORTIER ET DU BETON A BASE DE MATERIAUX LOCAUX

RESUME

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

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

L'objectif de cette étude expérimentale consiste à étudier l'influence de la finesse (surface spécifique) et de la granulométrie (distribution des tailles de particules) des ciments aux ajouts minéraux 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 trois types de ciments (C.P.J-C.E.M II) de différentes cimenteries (ciments avec différents ajouts minéraux : laitier, tuf et pouzzolane-calcaire).

Les propriétés physiques des ciments (C.P.J-C.E.M II) 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 à leurs bases, telles que, le retrait, le gonflement et les réponses mécaniques (R_f , R_t et R_c pour le mortier et R_c pour le béton) ont été étudiées.

D'après les résultats expérimentaux obtenus, il ressort que l'augmentation de la surface spécifique et la composition (chimique et minéralogique) des ciments aux ajouts minéraux sont les principaux responsables à l'amélioration de la réactivité latente des additions minérales et de l'accroissement des résistances mécaniques des mortiers et bétons.

Mots-clés :

Finesse (surface spécifique), ajouts minéraux, ciment, mortier, béton, réponse mécanique.

THE EFFECT OF SPECIFIC SURFACE OF CEMENTS AT MINERAL ADDITIONS ON THE MECHANICAL BEHAVIOR OF MORTAR AND CONCRETE MADE WITH LOCAL MATERIALS

Abstract

Cements with mineral additions (C.P.J-C.E.M II) are used more and more for the manufacture of cementing materials (mortar and concrete) for several reasons, either ecological, economic, or to improve certain properties at fresh or hardened state.

This type of cement (C.P.J-C.E.M II) is characterized by a hardening slowed down at its initial period in comparison with ordinary cement without mineral addition (C.P.A-C.E.M I). This latent property (setting and hardening) of the C.P.J-C.E.M II requires the use of a good activation (chemical, thermal or mechanical).

The objective of this experimental study consists in studying the influence of the fineness (specific surface) and the granulometry (particle-size distribution) of cements with mineral additions on the mechanical strength of the mortar and the concrete. This work is a contribution to the improvement of the properties of the mortars and concretes by mechanical activation of three types of cements (C.P.J-C.E.M II) made up of various cement factories (cements with various mineral additions: slag, tuff and pozzolan-limestone).

The physical properties of cements (C.P.J-C.E.M II) activated mechanically at anhydrous state and the state hydrated (specific weight, consistency of the cement pastes and setting times) thus the characteristics of the mortars and the concretes made at their bases, such as, the shrinkage, swelling and the mechanical behavior (R_f , R_t and R_c for the mortar and R_c for the concrete) were studied.

According to the experimental results obtained, it comes that the increase of the specific surface and the composition (chemical and mineralogical) of cements to the mineral additions are the principal responsables to the improvement of the latent reactivity of mineral additions and increase the mechanical strengths of the mortars and concretes.

Key-words :

Fineness (specific surface), mineral additions, cement, mortar, concrete, mechanical response.

تأثير المساحة السطحية للإسمنت ذات الإضافات المعدنية على مقاومة المونة والخرسانة المصنوعة من مواد أولية محلية

ملخص :

لقد أصبح الإسمنت المركب أي الإسمنت ذات الإضافات المعدنية (C.P.J-C.E.M II) أكثر إستعمالا في تحضير المواد الإسمنتية (المونة و الخرسانة) و هذا لعدة أسباب ، منها البيئية ، الإقتصادية أو لتحسين بعض الخصائص في الحالة الطازجة أو الصلدة.

يتميز هذا النوع من الإسمنت بتصلد بطيء خلال المرحلة الإبتدائية ، مقارنة مع الإسمنت البورتلاندي العادي ، المصنوع بدون إضافة معدنية (C.P.A-C.E.M I). إن هذه الخاصية البطيئة خلال مرحلة الشك و التصلد للإسمنت (C.P.J-C.E.M II) تتطلب إستعمال منشط فعال (كيميائي ، حراري أو ميكانيكي).

الهدف الرئيسي من هذا العمل التجريبي هو دراسة مدى تأثير النعومة (المساحة السطحية) و كذلك التدرج الحبيبي (توزيع أبعاد الحبيبات) للإسمنت ذات الإضافات المعدنية على مقاومة المونة والخرسانة. يهدف هذا البحث إلى تحسين مميزات المونة و الخرسانة بإستعمال طريقة الطحن لثلاثة أنواع من الإسمنت (C.P.J-C.E.M II) مختلفة التحضير لمصانع متباينة (إسمنت ذات إضافات معدنية متنوعة : خبث ، صخرة بركانية و بوزولان-كلسيت).

إن الخصائص الفيزيائية لإسمنت (C.P.J-C.E.M II) المنشط ميكانيكيا في الحالة الجافة و المبللة (الوزن النوعي ، القوام القياسي للعجينة الإسمنتية و زمن الشك) و كذلك مميزات المونة و الخرسانة المحضرة من نفس أنواع الإسمنت المستعملة ، منها النقل ، الإنتفاخ و المقاومة الميكانيكية (مقاومة الشد ، الإنحناء و الضغط للمونة و مقاومة الضغط للخرسانة) تم تحديدهم خلال هذا العمل التجريبي.

من خلال النتائج التجريبية المحصل عليها نستنتج أن الزيادة في النعومة (المساحة السطحية النوعية) و كذلك التركيب الكيميائي و المعدني للإسمنت ذات الإضافات المعدنية يمثلان السبب الرئيسي في تحسين التفاعل البطيء لإضافات المعدنية و زيادة المقاومة الميكانيكية للمونة و الخرسانة.

مفتاح :

المساحة النوعية السطحية (النعومة) ، الإضافات المعدنية ، الإسمنت ، المونة ، الخرسانة ، المقاومة الميكانيكية.

REMERCIEMENTS

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

Je tiens à remercier :

Monsieur NACERI Abdelghani, Maître de conférences, qui a encadré ce travail, pour sa disponibilité, pour son écoute, pour ses grandes qualités pédagogiques, ainsi que pour sa rigueur scientifique, qu'il a su me communiquer pour mener au mieux ce travail de recherche.

Monsieur BIBI Mekki, Maître de conférences, de m'avoir fait l'honneur de présider mon jury de soutenance.

Monsieur BOUDAUD Zine-Eddine, Maître de conférences, pour l'honneur qu'il m'a fait d'être examinateur de ce travail

Monsieur BIBI Mekki, Maître de conférences d'avoir accepté d'être examinateur de ce mémoire de magister.

Je remercie également Monsieur BELAGRAA Larbi, Maître assistant chargé de cours d'avoir accepté de faire partie du jury.

Monsieur LOUNIS Abdelkader, responsable du Laboratoire de Génie Civil de l'université de M'sila pour son assistance dynamique et souriante.

Tous le personnel du laboratoire du Centre des Études Technologiques et de l'Industrie des Matériaux (CETIM) de la ville de Boumerdès en particulier, le chef de département d'avoir permis le bon déroulement de ce modeste travail.

Monsieur CHARA Amar, spécialiste en micro-granulométrie à laser au centre de recherche et développement de la SONATRACH, pour son accueil et son aide.

Les Responsables des Laboratoires des Cimenteries de Sour-El-Ghozlane, de Ain-El-Kébira et Hadjar-Soud.

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

RESUME	I
ABSTRACT	II
ملخص	III
INTRODUCTION	1

PREMIER CHAPITRE **SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE**

1.1 LES AJOUTS MINERAUX CIMENTAIRES.....	3
1.1.1 GENERALITES.....	3
1.1.1.1 AVANTAGES TECHNIQUES.....	3
1.1.1.2 AVANTAGES ECONOMIQUES.....	3
1.1.1.3 AVANTAGES ECOLOGIQUES.....	3
1.1.2 LES AJOUTS MINERAUX OU ADDITIONS MINERALES.....	4
1.2 LE CIMENT PORTLAND.....	7
1.2.1 GENERALITES	7
1.2.2 EQUATION POTENTIELLE	8
1.2.3 EFFETS DES AJOUTS MINERAUX.....	10
1.2.4 HYDRATATION DU CIMENT.....	11
1.2.5 THEORIE DE PRISE ET DURCISSEMENT DU CIMENT.....	14
1.2.5.1 THEORIE CRISTALLOIDALLES.....	14
1.2.5.1.1 LA PRISE.....	14
1.2.5.1.2 LE DURCISSEMENT.....	15
1.2.5.2 LA THEORIE COLLOIDALE.....	15
1.2.5.3 LA THEORIE MODERNE.....	15
1.3 LE BROYAGE.....	15
1.3.1 GENERALITES.....	15
1.3.2 BROYABILITE DU CLINKER.....	16
1.3.3 BROYABILITE DES AJOUTS MINERAUX.....	16
1.3.3.1 BENEFICES FONCTIONNELS.....	16
1.3.3.2 BENEFICES ECONOMIQUES.....	16
1.3.3.2 BENEFICES ECOLOGIQUES.....	16
1.3.4 AJOUT D'UN AGENT DE MOUTURE PENDANT LE BROYAGE.....	17
1.4 LA GRANULOMETRIE.....	18
1.4.1 METHODES DE DETERMINATION.....	18
1.1.4.1.1 MESURE PAR TAMISAGE.....	18
1.1.4.1.2 MESURE PAR DIFFRACTION AU GRANLOMETRE LAZER.....	18
1.1.4.1.3 MESURE DE LA SURFACE SPECIFIQUE.....	19
1.4.2 REPRESENTATION DE LA GRANULOMETRIE DU CIMENT.....	20
1.4.3 DISTRIBUTION DES PARTICULES ET LA COMPOSITION DES PHASES.....	21
1.4.4 GRANULOMETRIE ET DEMANDE EN EAU.....	21
1.4.5 GRANULOMETRIE ET DEVELOPPEMENT DES RESISTANCES.....	21
1.5 CHALEUR D'HYDRATATION DU CIMENT.....	22
1.6 LE RETRAIT.....	26

DEUXIEME CHAPITRE

EXPERIMENTATION

2.1	CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX UTILISES.....	28
2.1.1	LES CEMENTS UTILISE.....	28
2.1.1.1	LE CRU (FABRICATION DU CLINKER)	28
2.1.1.2	LE CLINKER	29
2.1.1.2.1	COMPOSITION CHIMIQUE.....	29
2.1.1.2.1	COMPOSITION MINERALOGIQUE	30
2.1.1.3	LES AJOUTS MINERAUX.....	32
2.1.1.4	ANALYSES CHIMIQUES DES CEMENTS ETUDIES.....	32
2.1.1.5	ANALYSE GRANULOMETRIQUE DES CEMENTS UTILISES.....	35
2.1.1.5.1	CIMENT COMPOSE DE SOUR EL GHOZLANE.....	37
2.1.1.5.2	CIMENT COMPOSE DE AIN- EL- KEBIRA.....	40
2.1.1.5.3	CIMENT COMPOSE DE HDJAR - SOUD	43
2.1.2	LES GRANULATS	48
2.1.2.1	CARACTERISTIQUES PHYSIQUES	48
2.1.2.1.1	LE SABLE (granulats fins)	48
2.1.2.1.2	LES PIERRES CONCASSES (gros granulats).....	48
2.1.2.2	ANALYSE GRANULOMETRIQUE (tamisage à sec).....	49
2.1.3	L'EAU DE GACHAGE	51
2.2	METHODE D'ESSAIS.....	52
2.2.1	ESSAI SUR LE CIMENT ANYDRE.....	52
2.2.1.1	MASSE VOLUMIQUE ABSOLUE	52
2.2.1.2	MESURE DE LA FINESSE.....	53
2.2.2	ESSAIS SUR LA PATE DE CIMENT.....	54
2.2.2.1	ESSAI DE CONSISTANCE	54
2.2.2.2	ESSAIS DE PRISE	55
2.2.3	ESSAIS SUR MORTIERS.....	56
2.2.3.1	MORTIER NORMAL.....	56
2.2.3.1.1	PROCEDE DE PREPARATION.....	56
2.2.3.1.2	MESURE DU RETRAIT SUR EPROUVETTES DE MORTIER NORMAL.....	57
2.2.3.2	MORTIER A BASE DE SABLE DE DUNE (BOUSSADA).....	58
2.2.3.2.1	RESISTANCES A LA COMPRESSION ET A LA TRACTION.....	58
2.2.4	ESSAIS SUR LE BETON A BASE DE MATERIAUX LOCAUX	59
2.2.4.1	COMPOSITION DU BETON	60
2.2.4.2	ESSAI DE CONSISTANCE	60
2.2.4.3	ESSAI DE COMPRESSION.....	61

TROISIEME CHAPITRE

RESULTATS EXPERIMENTAUX ET INTERPRETATION

3.1 INFLUENCE DE LA FINESSE SUR LE POIDS SPECIFIQUE DES CIMENTS	63
3.2 INFLUENCE DE LA FINESSE SUR LA PATE DE CIMENT.....	64
3.2.1 INFLUENCE DE LA FINESSE SUR LA CONSISTANCE ET LA PRISE.....	64
3.3 INFLUENCE DE LA FINESSE SUR LE MORTIER NORMAL.....	67
3.3.1 INFLUENCE DE LA FINESSE DU CIMENT SUR LE RETRAIT ET LE GONFLEMENT.....	67

3.4 COMPORTEMENT MECANIQUE DU MORTIER A BASE DE SABLE DE DUNE.....	72
3.4.1 INFLUENCE DE LA FINESSE DU CIMENT SUR LA RESISTANCE A LA COMPRESSION DU MORTIER.....	72
3.4.2 INFLUENCE DE LA FINESSE DU CIMENT SUR LA RESISTANCE A LA TRACTION DU MORTIER.....	75
3.4.2 INFLUENCE DE LA FINESSE DU CIMENT SUR LA RESISTANCE A LA FLEXION DU MORTIER.....	77
3.5 INFLUENCE DE LA FINESSE DU CIMENT SUR LA RESISTANCE A LA COMPRESSION DU BETON A BASE DE MATERIAUX LOCAUX	80

CONCLUSION GENERALE ET PESPECTIVES

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES.....	86
1. CONCLUSION GENERALE.....	86
2. PERSPECTIVES (FUTURS TRAVAUX)	87

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

INDEX DES TABLEAUX ET FIGURES

INDEX DES TABLEAUX ET DES FIGURES

1-INDEX DES TABLEAUX

N° Tableau	Intitulé	N° Page
	<i>PREMIER CHAPITRE</i>	
1.1	Désignation et composition des différents types de ciment.	6
1.2	Classification des différents ajouts minéraux selon leur réactivité.	7
1.3	Composition chimique d'un clinker et notation cimentière.	8
1.4	Composition minéralogique typique d'un ciment Portland.	9
1.5	Liste des principaux hydrates formés lors de l'hydratation du ciment.	14
1.6	Intensité de dégagement de chaleur des ciments.	25
1.7	Les principales étapes de l'hydratation d'un ciment.	25
	<i>DEUXIEME CHAPITRE</i>	
2.1	Constituants principaux du CRU des différents ciments étudiés	29
2.2	Composition chimique et modules caractéristiques des clinker étudiés.	29
2.3	Composition minéralogique des Clinkers selon la formule de Bogue.	30
2.4	Ajouts minéraux des trois composés étudiés.	32
2.5	Composition chimique des ajouts minéraux des ciments étudiés	32
2.6	Compositions chimiques des trois types de ciments étudiés	32
2.7	Evolution de la surface spécifique en fonction du temps de broyage des ciments étudiés	35
2.8	Analyse granulométrique au lazer du ciment SF1	37
2.9	Analyse granulométrique au lazer du ciment SF2	38
2.10	Analyse granulométrique au lazer du ciment SF3	39
2.11	Analyse granulométrique au lazer du ciment AF1	40
2.12	Analyse granulométrique au lazer du ciment AF2	41
2.13	Analyse granulométrique au lazer du ciment AF3	42
2.14	Analyse granulométrique au lazer du ciment HF1	43
2.15	Analyse granulométrique au lazer du ciment HF2	44
2.16	Analyse granulométrique au lazer du ciment HF3	45
2.17	Diamètres (D_{10} , $D_{\text{médian}}$, D_{90}) des ciments étudiés	46
2.18	Impuretés des pierres concassées testées	49
2.19	Analyse Granulométrique des granulats utilisés	50
2.20	Constitution du mélange des granulats.	50
2.21	Analyse chimique et minéralogique de l'eau de gâchage utilisée	51
	<i>TROISIEME CHAPITRE</i>	
3.1	Poids spécifiques et finesses des ciments étudiés	63
3.2	Consistances et délais de prise (début et fin) des ciments étudiés	65
3.3	Retrait et gonflement provoqués par CPJ.SG sur le mortier normal en fonction de la finesse.	68
3.4	Retrait et gonflement provoqués par CPJ.AK sur le mortier normal en fonction de la finesse.	69
3.5	Retrait et gonflement provoqués par CPJ.HS sur le mortier normal en fonction de la finesse.	70
3.6	Retrait et gonflement provoqués par les trois ciments étudiés sur le mortier normal en fonction de la finesse.	71
3.7	Résistance à la compression du mortier en fonction de la finesse du CPJ. SG	73
3.8	Résistance à la compression du mortier en fonction de la finesse du CPJ. AK	73
3.9	Résistance à la compression du mortier en fonction de la finesse du CPJ. HS	74
3.10	Résistance à la compression des mortiers en fonction de la finesse.	74

3.11	Résistance à la traction du mortier en fonction de la finesse du CPJ. SG	75
3.12	Résistance à la traction du mortier en fonction de la finesse du CPJ. AK	76
3.13	Résistance à la traction du mortier en fonction de la finesse du CPJ. HS	76
3.14	Résistance à la traction des mortiers en fonction de la finesse.	77
3.15	Résistance à la flexion du mortier en fonction de la finesse du CPJ. SG	78
3.16	Résistance à la flexion du mortier en fonction de la finesse du CPJ. AK	78
3.17	Résistance à la flexion du mortier en fonction de la finesse du CPJ. HS	79
3.18	Résistance à la flexion des mortiers en fonction de la finesse.	79
3.19	Résistance à la compression du béton en fonction de la finesse du CPJ. SG	83
3.20	Résistance à la compression du béton en fonction de la finesse du CPJ. AK	83
3.21	Résistance à la compression du béton en fonction de la finesse du CPJ. HS	84
3.22	Résistance à la compression des bétons en fonction de la finesse.	84
3.23	Evolution du taux de variation de la résistance à la compression des bétons testés.	85

2 - INDEX DES FIGURES

N° Figure	Intitulée <i>PREMIER CHAPITRE</i>	N° Page
1.1	Microphotographie d'un clinker.	5
1.2	Procédé technologique de fabrication du ciment.	10
1.3	Diagramme ternaire CaO-SiO ₂ - Al ₂ O ₃	10
1.4	Principe de fonctionnement du granulomètre laser.	19
1.5	Courbe de ROSIN -RAMMLER	20
1.6	Courbe calorimétrique relevée pendant l'hydratation d'un ciment.	22
1.7	Effet de la pouzzolane sur la chaleur d'hydratation du ciment.	24
1.8	Evolution de la résistance à la compression des ciments aux ajouts minéraux (pouzzolane, laitier).	26
	<i>DEUXIEME CHAPITRE</i>	
2. 1	Microphotographie du clinker du CPJ de Sour - El – Ghozlane.	31
2. 2	Microphotographie du clinker du CPJ de Ain - El – Kébira.	31
2. 3	Microphotographie du clinker du CPJ de Hadjar - Soud.	31
2. 4	Taux d'accroissement de la surface spécifique en fonction du temps de broyage.	35
2. 5	Courbe granulométrique du ciment SF1	37
2. 6	Courbe granulométrique du ciment SF2	38
2. 7	Courbe granulométrique du ciment SF3	39
2. 8	Courbe granulométrique du ciment AF1	40
2. 9	Courbe granulométrique du ciment AF2	41
2. 10	Courbe granulométrique du ciment AF3	42
2. 11	Courbe granulométrique du ciment HF1	43
2. 12	Courbe granulométrique du ciment HF2	44
2. 13	Courbe granulométrique du ciment HF3	45
2. 14	Distribution granulométrique des ciments Sour- el -Ghozlane SF1 ; SF2 ; SF3	46
2. 15	Distribution granulométrique des ciments Ain - el - Kébira AF1 ; AF2 ; AF3	47
2. 16	Distribution granulométrique des ciments Hadjar -Soud HF1 ; HF2 ; HF3	47
2. 17	Courbes granulométriques des granulats	50

	<i>TROISIEME CHAPITRE</i>	
3.1	Evolution du poids spécifique du ciment en fonction de la finesse de mouture	63
3.2	Evolution de la consistance normale de la pâte de ciment en fonction de la finesse de mouture	65
3.3	Evolution du temps de début de prise de la pâte de ciment en fonction de la finesse de mouture	66
3.4	Evolution du temps de fin de prise de la pâte de ciment en fonction de la finesse de mouture	66
3.5	Evolution du retrait du CPJ.SG en fonction de la finesse de mouture	68
3.6	Evolution du gonflement du CPJ.SG en fonction de la finesse de mouture	68
3.7	Evolution du retrait du CPJ.AK en fonction de la finesse de mouture	69
3.8	Evolution du gonflement du CPJ.AK en fonction de la finesse de mouture	69
3.9	Evolution du retrait du CPJ.HS en fonction de la finesse de mouture	70
3.10	Evolution du gonflement du CPJ.HS en fonction de la finesse de mouture	70
3.11	Evolution du retrait des ciments étudiés en fonction de la finesse de mouture	71
3.12	Evolution du gonflement des ciments étudiés en fonction de la finesse de mouture	71
3.13	Evolution de la résistance à la compression du mortier en fonction de la finesse de mouture du CPJ.SG	73
3.14	Evolution de la résistance à la compression du mortier en fonction de la finesse de mouture du CPJ.AK	73
3.15	Evolution de la résistance à la compression du mortier en fonction de la finesse de mouture du CPJ.HS	74
3.16	Evolution de la résistance à la compression des mortiers en fonction de la finesse de mouture	75
3.17	Evolution de la résistance à la traction du mortier en fonction de la finesse de mouture du CPJ.SG	75
3.18	Evolution de la résistance à la traction du mortier en fonction de la finesse de mouture du CPJ.AK	76
3.19	Evolution de la résistance à la traction du mortier en fonction de la finesse de mouture du CPJ.HS	76
3.20	Evolution de la résistance à la traction des mortiers en fonction de la finesse de mouture.	77
3.21	Evolution de la résistance à la flexion du mortier en fonction de la finesse de mouture du CPJ.SG	78
3.22	Evolution de la résistance à la flexion du mortier en fonction de la finesse de mouture du CPJ.AK	78
3.23	Evolution de la résistance à la flexion du mortier en fonction de la finesse de mouture du CPJ.HS	79
3.24	Evolution de la résistance à la flexion des mortiers en fonction de la finesse de mouture	80
3.25	Evolution de la résistance à la compression du béton en fonction de la finesse de mouture du CPJ.SG	83
3.26	Evolution de la résistance à la compression du béton en fonction de la finesse de mouture du CPJ.AK	83
3.27	Evolution de la résistance à la compression du béton en fonction de la finesse de mouture du CPJ.HS	84
3.28	Evolution de la résistance à la compression du béton en fonction de la finesse de mouture Des ciments étudiés.	85
3.29	Evolution du taux de variation de résistance à la compression des bétons testés.	85

INTRODUCTION

1. CONTEXTE

L'utilisation des ajouts minéraux dans la production des ciments Portlands composés (C.P.J-C.E.M II) 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 du ciment Portland composé (C.P.J-C.E.M II), du moment que la consommation en clinker baisse en fonction du taux d'ajout utilisé.

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

Le ciment portland composé (C.P.J-C.E.M II) avec ajout minéral se distingue par un durcissement ralenti à sa période initiale en comparaison avec un ciment Portland ordinaire sans ajout, c'est-à-dire sans constituant secondaire (C.P.A-C.E.M I). Cette propriété latente du ciment avec ajout minéral (C.P.J-C.E.M II), 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 (C.P.J-C.E.M II) ont des temps de prise un peu plus longs que les ciments Portlands purs (C.P.A-C.E.M I), surtout dans le cas de bétonnage par temps froid. On sait que les temps de prise peuvent être raccourcis :

- * grâce à une finesse (surface spécifique) plus grande,

- * grâce à l'emploi d'adjuvants accélérateurs (la soude, la potasse, les chlorures de sodium, ...).

2. OBJECTIFS

L'objectif de notre étude est d'évaluer expérimentalement l'influence de la finesse (surface spécifique) et de la granulométrie (distribution des tailles de particules) des ciments aux ajouts minéraux 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 trois types de ciments (C.P.J-C.E.M II) de différentes cimenteries (ciments fabriqués avec différents ajouts minéraux actifs et inertes : laitier, tuf et pouzzolane-calcaire).

3. METHODOLOGIE DU TRAVAIL

Le premier chapitre de ce travail est destiné à l'étude bibliographique. Dans cette partie nous avons exposé les travaux effectués par différents auteurs, notamment sur les ajouts minéraux, l'hydratation du ciment, le broyage, la finesse et la granulométrie du ciment ainsi que le retrait.

Le deuxième chapitre est consacré à l'expérimentation. Nous présentons dans cette partie les essais expérimentaux effectués sur les ciments aux ajouts minéraux à l'état anhydre et à l'état hydraté, le mortier et le béton.

Le troisième chapitre présente les résultats expérimentaux obtenus et les discussions tirées lors de cette étude.

Enfin, une conclusion générale reprend les principaux résultats dégagés lors de cette étude. Elle ouvre également de nouvelles perspectives en terme d'expérimentation pour une meilleure compréhension du phénomène d'hydratation des ciments composés.

PREMIER CHAPITRE

SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

1.1 LES AJOUTS MINERAUX CIMENTAIRES :

1.1.1 GENERALITES :

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. Les ajouts minéraux cimentaires typiques sont les cendres volantes (C.V), le laitier granulé de haut fourneau (L.G.H.F) et les fumées de silice (F.S). L'utilisation d'ajouts cimentaires dans les industries du ciment et du béton présente des avantages techniques, économiques et écologiques [1].

1.1.1.1 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 (sauf pour les matériaux de très grande surface active, comme les fumées de silice). Ensuite, les ajouts cimentaires améliorent généralement la résistance, l'imperméabilité et la ténacité aux attaques chimiques. Enfin, parce qu'ils permettent une moindre chaleur d'hydratation des ciments mélangés, les ajouts cimentaires améliorent la résistance à la fissuration.

1.1.1.2 AVANTAGES ECONOMIQUES :

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 CO₂. Et c'est bien le gaz carbonique (dioxyde de carbone) qui pourrait finalement décider de la valeur de ces denrées.

1.1.1.3 AVANTAGES ECOLOGIQUES :

La production d'une tonne de ciment Portland libère dans l'atmosphère une quantité quasi équivalente de gaz carbonique (CO₂). De fait, le remplacement du ciment Portland par des ajouts cimentaires réduit d'autant les émissions de CO₂. En général l'utilisation de cendres volantes (C.V) et de fumées de silice (F.S) comme ajouts cimentaires ne demande pas un traitement à forte intensité d'énergie. Le laitier, par contre, doit être granulé et sa granulation provoque l'émission d'environ 0,07 tonne de CO₂ par tonne de laitier granulé de

haut fourneau (L.G.H.F) produit. A cela, il faut ajouter les émissions de CO₂ causées par le transport des matériaux (ajouts) jusqu'au chantier de construction. Les études montrent que le transport (par camion et chemin de fer) d'une tonne d'ajouts cimentaires sur une distance de 1000 Km libère environ 0,022 tonne de CO₂. Il convient donc de considérer tous les paramètres avant d'établir les avantages écologiques des ajouts cimentaires sur le ciment.

1.1.2 LES AJOUTS MINERAUX OU ADDITIONS MINERALES :

Il existe une variété importante de ciments industriels qui se différencient principalement par les ajouts minéraux additionnés au clinker. Ces derniers peuvent être inertes ou avoir des propriétés d'hydraulicité ou de pouzzolanité [2].

Les ajouts sont des matériaux présentant une granulométrie très fine que l'on incorpore le plus souvent au ciment, quelques fois également au béton. Ils sont souvent meilleur marché que le ciment Portland et permettent d'obtenir un ciment composé ou divers plus économique. Contrairement aux adjuvants, les ajouts doivent être pris en compte dans le calcul de la composition du béton.

Les liants hydrauliques sont des poudres fines constituées de sels minéraux anhydres réactifs qui se transforment en présence d'eau en un matériau solide, véritable roche artificielle.

Les constituants du ciment présentent une ou plusieurs des propriétés suivantes [3] :

- * des **propriétés hydrauliques** : par réaction avec l'eau, ils forment des composés hydratés stables qui sont très peu solubles dans l'eau,

- * des **propriétés pouzzolaniques** : ils peuvent former à température ordinaire, en présence d'eau et par combinaison avec la chaux, des composés hydratés stables (combinaison à T° ordinaire de la chaux avec de l'eau : formation lente des constituants analogues à ceux du clinker et composés hydratés),

- * des **propriétés physiques** : améliorant certaines qualités du ciment (accroissement de la maniabilité et de la compacité . . .).

Le terme ciment désigne plusieurs catégories de produits, chacune étant définie par sa composition et des classes caractérisant les résistances mécaniques atteintes à des échéances données après le début d'hydratation [4].

Selon la norme française NF P 15-301, les ciments sont regroupés en cinq types principaux : le ciment Portland (type I), le ciment Portland composé (type II), le ciment de haut fourneau (type III), le ciment pouzzolanique (type IV) et le ciment au laitier et aux cendres (type V).

Les principaux constituants d'un ciment (industrie cimentière), définis d'après la norme NF P 15-301 [4] sont :

Le **clinker Portland (K)** : qui entre dans la composition de tous les ciment. Il présente des propriétés hydrauliques, c'est-à-dire qu'en présence d'eau, il forme une pâte qui fait prise et qui, après durcissement, conserve sa résistance et sa maniabilité même dans l'eau [5].

Le clinker est obtenu par cuisson (clinkérisation), constitué en majeure partie de silicates et d'aluminates de calcium anhydres (Figure 1.1) :

- le silicate tricalcique ($3\text{CaO}.\text{SiO}_2$), que l'on écrit C_3S ,
- le silicate bicalcique ($2\text{CaO}.\text{SiO}_2$), que l'on écrit C_2S ,
- l'aluminate tricalcique ($3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$), que l'on écrit C_3A ,
- l'alumino-ferrite tétracalcique ($4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$), que l'on écrit C_4AF .

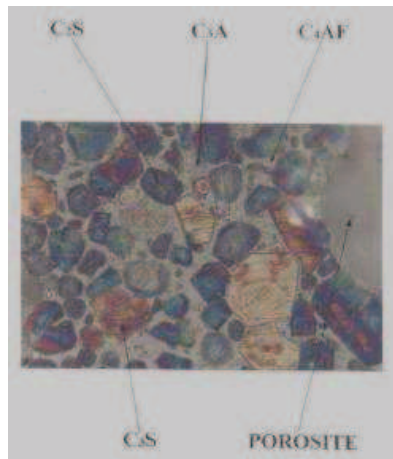


Figure 1.1. Microphotographie d'un clinker (grossissement 550) [5].

* Le **laitier granulé de haut fourneau (S)** : est obtenu par refroidissement rapide (brusque) de la scorie fondue de composition convenable provenant de la fusion du minerai de fer dans un haut fourneau. Pour convenir à son emploi en cimenterie, il doit présenter des propriétés hydrauliques latentes, c'est-à-dire qui se manifestent quand le laitier subit une activation convenable (par le clinker, la chaux ou des hydroxydes alcalins) [9]. Néanmoins, on le qualifie de matériau hydraulique latent, puisqu'en présence d'eau uniquement, il ne forme pas de matériau durci. Il se compose principalement de silice (SiO_2), chaux (CaO), alumine (Al_2O_3) et d'oxydes de magnésium (MgO).

* Les **pouzzolanes naturelles (Z)** ou **matériaux pouzzolaniques naturelles** (roches volcaniques, argiles . . .) : sont des produits composés de silice, d'alumine et d'oxyde de fer qui présentent naturellement des propriétés pouzzolaniques. Ils forment dans l'eau de chaux c'est-à-dire en présence d'eau et d'hydroxyde de calcium ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) des composés silicates ou aluminates semblables à ceux formés lors du durcissement des matières hydrauliques (réaction pouzzolanique lente) .

* Les **cendres volantes siliceuses (V)** ou **calciques (W)** ou **matériaux pouzzolaniques artificielles** : sont des particules pulvérulentes obtenues lors du dépoussiérage électrostatique ou mécanique des gaz de chaudières alimentées au charbon pulvérisé (résidu de la combustion en centrale thermique). Ils ne durcissent pas lorsqu'ils sont mélangés à l'eau.

* Les **calcaires (L)** résultent du broyage fin de roches naturelles présentant une teneur en carbonate de calcium (CaCO_3) supérieure à 75%. Ce sont principalement des «fillers» c'est-à-dire des calcaires inertes.

* Les **fumées de silice (D)** sont des particules sphériques très fine (typiquement de 100 µm de diamètre) ayant une forte teneur en silice amorphe, provenant de la réduction du quartz de grande pureté par du charbon dans des fours à arc électrique. Elles sont très réactives (réaction pouzzolanique très rapide) et elles accélèrent également les réactions d'hydratation des phases du clinker, et aussi elles diminuent la perméabilité du ciment et augmentent d'une manière générale les propriétés de résistances mécaniques des pâtes. Ce type de ciment aux fumées de silice est principalement utilisé dans les bétons dits à hautes performances (B.H.P).

* Le **sulfate de calcium** (gypse : $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ou anhydrite : CaSO_4) permet de régulariser la prise. Il est introduit ou ajouté au clinker à une proportion d'environ 5% (de l'ordre de 3 à 5%) de la masse du ciment. Cette ajout est fait de telle façon à ne pas dépasser une teneur en SO_3 de 3,5% dans le ciment. Pour chaque nature de clinker, il existe un pourcentage optimal de gypse qui donne à la fois les meilleures résistances et le retrait minimal.

La formule utilisée pour optimiser la teneur du ciment en SO_3 est la suivante [6] :

$$\text{SO}_3 \text{ Opt} = 0,093 \cdot \text{C}_3\text{A} + 1,71 \cdot \text{Na}_2\text{O} + 0,94 \cdot \text{K}_2\text{O} + 1,23$$

Les **additifs** : sont des constituants qui sont ajoutés pour améliorer la fabrication du ciment tels que les agent de mouture (qui facilitent le broyage du clinker), les adjuvants (qui modifient la rhéologie des pâtes), etc . . . Ils ne présentent pas plus de 1% de la masse totale du ciment.

Le tableau 1.1 ci-après illustre la composition des différents types de ciment et indique leur notation normalisée. Celle-ci est obtenue en faisant suivre le code de l'ancienne classification de la mention CEM puis du type de ciment. Ainsi le ciment Portland artificiel se note CPA-CEM I [7].

Désignation	Notation	Clinker	Laitier de Haut Fourneau	Fumée de silice	Pouzzolanes	Cendres volantes		Schistes calcinés	Calcaires	Constituants secondaires
						Siliceuses	Calciques			
		K	S	D	Z	V	W	T	L	
Ciment Portland	CPA-CEM I	95-100	-	-	-	-	-	-	-	0-5
Ciment Portland Composé	CPJ-CEM II/A	80 - 94	6- 20							
	CPJ-CEM II/B	65 - 79	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
	CPZ-CEM IV/B	45 - 64	-	36 - 65			-	-	-	0-5
Ciment au laitier et aux cendres	CLC-CEM V/A	40 - 64	18-30	-	18 - 30		-	-	-	0-5
	CLC-CEM V/B	20 - 39	31-50	-	31 - 50		-	-	-	0-5

Tableau 1.1. Désignation et composition des différents types de ciment [7].

Le tableau 1.2 présente la classification des principaux ajouts minéraux utilisés dans l'industrie cimentière selon leur degré de réactivité [8].

Type	Réactivité	Matériaux
Hydraulique	fortement réactif	ciments spéciaux, chaux hydraulique
Hydraulique latent	fortement réactif	laitier granulé (laitiers de haut fourneaux vitreux granulé), cendres riches en calcium (cendres volantes calciques)
pouzzolanique	fortement réactif	fumée de silice
pouzzolanique	moyennement réactif	cendres volantes pauvres en calcium (cendres volantes siliceuses), pouzzolanes naturelles (verres volcaniques, tufs volcaniques, trass, phonolithe, terres à diatomées)
pouzzolanique	faiblement réactif	scories cristallines
Inerte	pas réactif	filler (farine calcaire et poudre de quartz), fibres, pigments colorants, matières expansives, dispersions synthétiques

Tableau 1.2. Classification des différents ajouts minéraux selon leur réactivité [8].

1.2 LE CIMENT PORTLAND :

1.2.1 GENERALITES :

Le liant hydraulique le plus couramment utilisé est le ciment Portland artificiel CPA-CEM I. Il résulte du broyage du clinker (Figure 1.2), obtenu par la cuisson à 1450°C d'un mélange approprié de calcaire (80%) et d'argile (20%), avec environ 5% de gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) pour régulariser la prise [9].

Pendant la cuisson, les constituants de l'argile (principalement des silicates d'alumine et d'oxydes de fer) réagissent avec la chaux (CaO) provenant du calcaire (CaCO_3) pour donner des silicates et des aluminates de calcium, composant environ 95% des clinkers.

Les principales notations ou abréviations cimentière qui sont aussi utilisées dans la chimie des ciments sont [9] :

La chaux (CaO) :	C
La silice (SiO_2) :	S
L'alumine (Al_2O_3) :	A
La ferrite (Fe_2O_3) :	F
L'eau (H_2O) :	H
Le trioxide de soufre (SO_3) :	<u>S</u>
La magnésie (MgO) :	M
L'oxyde de potassium (K_2O) :	K
L'oxyde de sodium (Na_2O) :	N
Le dioxyde de carbone (CO_2) :	<u>C</u>

Composants du clinker	CaO	SiO₂	Al₂O₃	Fe₂O₃	MgO	SO₃	Na₂O + K₂O
Notation cimentière	C	S	A	F	M	<u>S</u>	N + K
% (en masse)	62-67	19-25	2-9	1-5	0-3	1-3	0-1,5

Tableau 1.3. Composition chimique du clinker et notation cimentière [9].

La composition minéralogique du clinker peut varier suivant les matières premières utilisés et le procédé de fabrication. Le clinker ne doit pas contenir plus de 2% de chaux libre (CaO), car celle-ci gonfle en s'hydratant.

Le tableau 1.4 présente les quatre constituants minéralogiques principaux du ciment Portland. Ces quatre constituants sont d'ailleurs présents en proportions variables dans les ciments [9]. Ainsi les ciments Portlands auront des propriétés différentes suivant les proportions de ces éléments.

1.2.2 COMPOSITION POTENTIELLE (Equations de Bogue) :

En se basant sur certaines hypothèses, Bogue a développé une méthode qui permet de connaître la composition potentielle en minéraux principaux C_3S , C_2S , C_3A et C_4AF (composition minéralogique) d'un clinker ou d'un ciment à partir de sa composition chimique [10].

Les hypothèses de départ de Bogue sont les suivantes :

- * Toutes les réactions chimiques dans le four sont complétées.
- * Tout le fer se combine avec l'alumine pour former le C_4AF .
- * Toute l'alumine se combine avec la chaux et avec le fer pour former le C_3A et le C_4AF .
- * Toute la chaux se combine avec le fer, l'alumine et la silice pour former le C_4AF , le C_3A , le C_2S et le C_3S .
- * La chaux combinée est la différence entre la chaux totale et la chaux libre.
- * La substitution élémentaire dans les phases cristallines est négligée.
- * Tout le SO_3 provient du gypse.

Les équations ou formules de Bogue

$$C_4AF = 3,04 \cdot Fe_2O_3$$

$$C_3A = 2,65 \cdot Al_2O_3 - 1,69 \cdot Fe_2O_3$$

$$C_2S = 8,6 \cdot SiO_2 + 1,08 \cdot Fe_2O_3 + 5,07 \cdot Al_2O_3 - 3,07 \cdot CaO$$

$$C_3S = 4,07 \cdot CaO - 7,6 \cdot SiO_2 - 1,43 \cdot Fe_2O_3 - 6,72 \cdot Al_2O_3 - 2,85 \cdot SO_3$$

On calcule, à partir de ces éléments simples, certains modules caractéristiques. Ces modules sont importants pour le bon contrôle de la régularité de la fabrication dans les cimenteries, afin d'obtenir un clinker de qualité constante [11].

- Module hydraulique (M_h), compris entre 1,7 et 2,3 :

$$M_h = \frac{C_a O}{SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3}$$

- Module silicique (M_s), compris entre 2 et 3 :

$$M_s = \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3}$$

- Module alumino-ferrique (M_{af}), compris entre 1,5 et 2,5 :

$$M_{af} = \frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3}$$

Le degré de saturation en chaux (M_{sat}), compris entre 0,90 et 0,95 :

$$M_{sat} = \frac{C_a O}{2,8SiO_2 + 1,18Al_2O_3 + 0,65Fe_2O_3}$$

C'est le rapport de la chaux (C_aO) totale présente à la chaux susceptible de se combiner totalement avec la silice (SiO_2), l'alumine (Al_2O_3) et l'oxyde ferrique (Fe_2O_3).

Constituants minéralogiques du clinker	Alite	Bélite	Célite I (Aluminate tricalcique)	Célite II (Alumino-ferrite tétracalcique)
Notation cimentière simplifiée	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
Notation cimentière détaillée	$3CaO.SiO_2$	$2CaO.SiO_2$	$3CaO.Al_2O_3$	$4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$
% étendue (en masse)	40-70	0-30	2-15	0-15
% moyen (en masse)	60	15	8	8

Tableau 1.4. Composition minéralogique typique d'un ciment Portland [9].

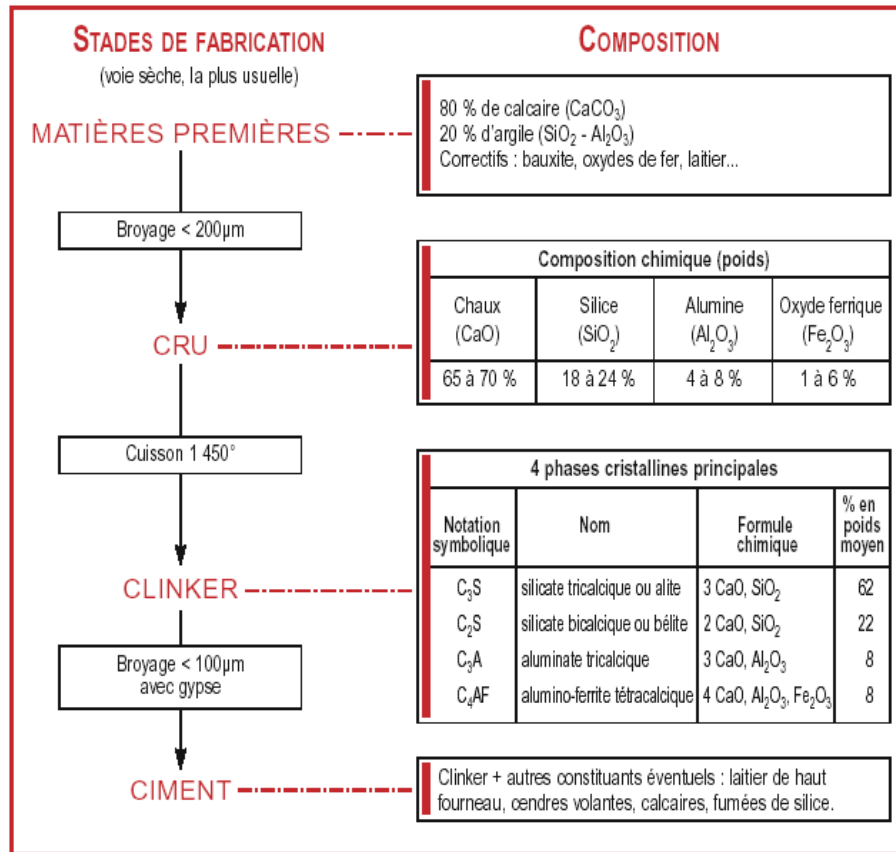


Figure 1.2. Procédé technologique de fabrication du ciment [5].

1.2.3 EFFET DES AJOUTS MINÉRAUX :

En principe les matériaux hydrauliques, hydrauliques latentes et pouzzolaniques contiennent les mêmes composants chimiques. Les proportions sont toutefois différentes [12]. Ceci est représenté dans le diagramme de phases suivant (figure 1.3) :

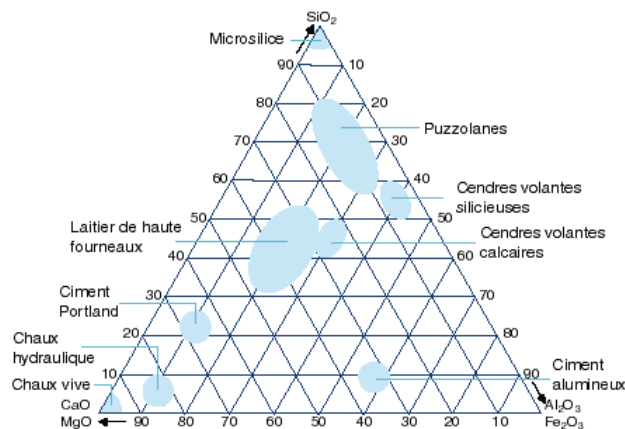


Figure 1.3. Diagramme ternaire $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ [12].

* Les **liants hydrauliques** sont des matières qui durcissent dans et avec de l'eau et qui sont ensuite insolubles dans l'eau (ciment Portland, chaux hydraulique).

* Les **substances hydrauliques latentes** contiennent moins d'oxyde de calcium que le ciment portland et ne réagissent de fait pas avec l'eau. Ce n'est que lorsque le ciment Portland a formé suffisamment d'hydroxyde de calcium que le laitier et les cendres volantes riches en chaux peuvent être rendues hydrophobes dans le milieu alcalin. On obtient alors les mêmes produits hydratés que le ciment Portland, seules les proportions sont différentes. Dans cette procédure, l'hydroxyde de calcium intervient en qualité d'activateur et non de partenaire réactif.

* Les **substances pouzzolaniques** contiennent encore moins d'oxyde de calcium. L'hydroxyde de calcium issu de l'hydratation du ciment Portland n'intervient par conséquent pas uniquement en qualité d'activateur, mais il est nécessaire en tant que réactif. Les substances pouzzolaniques peuvent réagir fortement, moyennement ou faiblement contribuant ainsi plus ou moins à la résistance et à l'étanchéité du béton. La fumée de silice représente dans ce groupe l'activité la plus importante, parce qu'elle possède la plus faible part cristalline et la plus grande surface spécifique.

* Les **substances inertes** ne réagissent pas avec les composants du ciment. La substance inerte la plus importante est la poudre de chaux, utilisée comme substitut de matériaux fins. L'adjonction de fibres améliore le comportement à la rupture du béton. Les pigments sont utilisés pour l'aspect esthétique.

1.2.4 HYDRATATION DU CIMENT :

L'hydratation du ciment met en jeu un nombre important de réactions chimiques complexes [13]. Toutes ces réactions conduisent à la formation de silicates ou d'aluminates calciques hydratés qui font prise et qui donnent les propriétés mécaniques des pâtes de ciment (ciment + eau), des mortiers (ciment + eau + sable) et des bétons (ciment + eau + fins et gros granulats).

L'hydratation regroupe l'ensemble des réactions chimiques qui se produisent entre le ciment et l'eau. Ces réactions d'hydratation sont très complexes et débutent dès la mise en contact de ces deux phases.

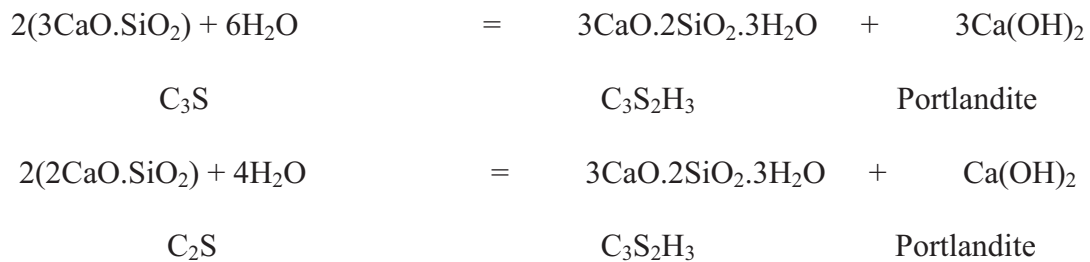
En présence d'eau, les constituants anhydres du ciment donnent naissance à des silicates, des aluminates de calcium hydratés et de la chaux hydratée appelée Portlandite, lesquels forment un gel micro-cristallin à l'origine du phénomène de prise. La multiplication des cristaux permet d'acquérir les résistances mécaniques. Le ciment durcit évolue dans le temps, suivant les conditions extérieures.

Avant d'atteindre son état final hydraté, le ciment évolue selon trois phases successives. La première phase est appelée phase d'induction ou phase I et correspond à la dissolution des constituants du ciment. La deuxième phase, appelée phase d'accélération ou phase II, est une étape où les solutions sont sursaturées par rapport aux différents hydrates. La dernière phase également appelée phase III ou phase de décroissance, correspond à une phase de précipitation et de cristallisation des hydrates formés dans les espaces inter-granulaires.

Les mécanismes de l'hydratation des ciments Portlands ont été les plus étudiés. Lorsque du ciment est mélangé avec de l'eau dans les proportions adéquates, les constituants anhydres se transforment en composés hydratés. Deux mécanismes d'hydratation peuvent être observés [13]. Le premier se passe en solution, les composés cimentiers se dissolvent en ions dans la solution et de nouveaux composés se forment par précipitation. Le second correspond à des réactions à l'état solide, les composés réagissent avec les précipités en phase solide. Les principales réactions d'hydratation sont :

* Silicates tri- ou bicalciques de calcium :

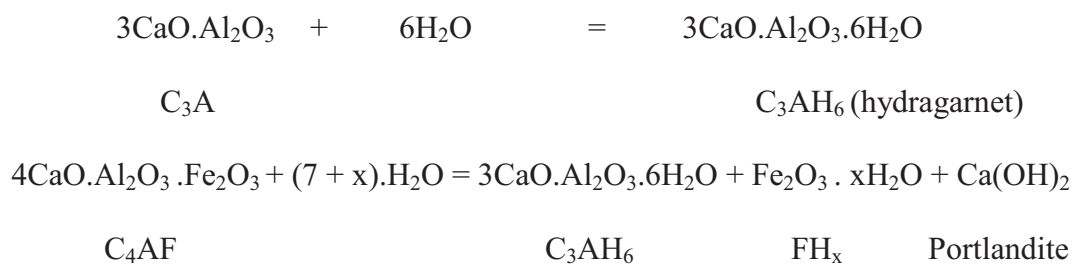
Au cours de la réaction d'hydratation des silicates tri- ou bicalciques de calcium (C_3S ou C_2S), des hydroxydes de calcium et un gel de silicate de calcium hydraté se forment.



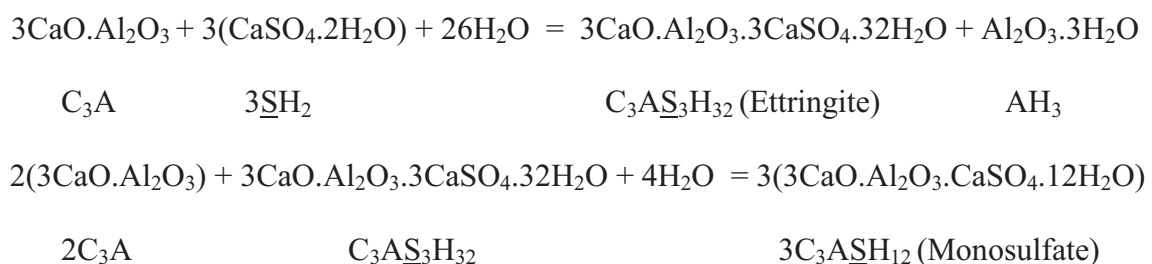
* Aluminates et Alumino-ferrites de calcium :

Les composés aluminates les plus courants sont l'aluminate tricalcique (C_3A) et l'alumino-ferrite tétracalcique (C_4AF). Ils réagissent avec l'eau de deux façons [13] :

En l'absence de gypse :



En présence de gypse :



A la fin de l'hydratation du ciment, les principaux produits hydratés sont :

* Les silicates de calcium hydraté ou C-S-H, généralement amorphes dont le ration Ca/Si varie, ils contiennent 60 à 70% en masse d'une pâte de ciment hydratée.

* L'hydroxyde de calcium ou Portlandite $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$, représente 5 à 15% en masse d'une pâte de ciment hydratée.

* Les sulfo-aluminates de calcium, l'ettringite et le monosulfate constituent 20 à 30% de l'amasse totale.

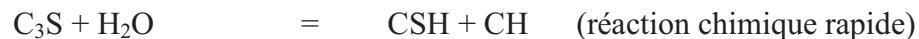
Les proportions citées ci-dessus correspondent aux CPA-CEM I, Dans les autres classes de ciments, elles peuvent être très différentes compte tenu des différents ajouts minéraux (laitier, cendres volantes, fumée de silice, . . .).

L'idéal serait de pouvoir transformer **CH** en **CSH** ou **CAH**. Pour cela, on recherche des sous-produits instables thermodynamiquement dont la constitution chimique apportera des oxydes acides (SiO_2 et Al_2O_3) pour réagir avec $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

On utilise alors :

- des laitiers de haut fourneau trempés,
- des pouzzolanes,
- des ajouts calcaires.

Les réactions d'hydratation du ciment et de la pouzzolane donnent [14] :



Le comportement du ciment avec ajout minéral est déterminé par trois caractéristiques de la réaction pouzzolanique de l'ajout [14] :

- 1 - La réaction est lente, le dégagement de chaleur et le développement des résistances seront également lents.
- 2 - Au lieu de fournir de la chaux, comme dans le cas du ciment Portland, la réaction pouzzolanique en consomme et améliore la résistance du béton en milieu acide.
- 3 - Les produits d'hydratation remplissent les pores capillaires et augmentent la résistance et l'imperméabilité des bétons par affinage de ces pores capillaires et par transformation des gros cristaux de CH en un produit d'hydratation faiblement cristallisé (affinage es grains).

Dénomination	Formule chimique	Notation cimlentielle
Portlandite (CH) Ou Hydroxyde de calcium	Ca(OH)_2	CH
Silicate de calcium hydraté (CSH)	$3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	CSH
Tri-sulfo-aluminate de calcium hydraté (TSA) ou Ettringite	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$	$\text{C}_3\text{A}\underline{\text{S}}_3\text{H}_{32}$
Mono-sulfo-aluminate de calcium hydraté (MSA)	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$	$\text{C}_3\text{A}\underline{\text{S}}\text{H}_{12}$
Aluminate dicalcique hydraté	$2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$	C_2AH_8
Aluminate tricalcique hydraté	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	C_3AH_6

Tableau 1.5. Liste des principaux hydrates formés lors de l'hydratation du ciment [13].

1.2.5 THEORIE DE LA PRISE ET DU DURCISSEMENT DU CIMENT :

Le mélange ciment et eau forme une pâte possédant une viscosité augmentant exponentiellement après une période dormante. Les valeurs de viscosité du mélange lors du début et de la fin de prise sont fixées arbitrairement [15].

Le *début de prise* correspond à l'augmentation brusque de la viscosité de la pâte de ciment et à une élévation de sa température.

La *fin de prise* correspond à la transformation régulière et progressive de la pâte de ciment en un bloc rigide. C'est le début de durcissement.

Les deux théories qui expliquent le phénomène de la prise et du durcissement du ciment sont [15] :

* La théorie cristalloïdale de LECHATelier (1887).

* La théorie colloïdale de MICHAELIS (1893).

1.2.5.1 LA THEORIE CRISTALLOIDALE :

1.2.5.1.1 LA PRISE :

Lors du contact de l'eau avec du ciment anhydre, ce dernier va d'abord se dissoudre dans l'eau. La solution devient saturée et des sels hydratés cristallisent.

Comme la solubilité des sels hydratés est beaucoup plus faible que celle des cristaux anhydres, les sels hydratés précipitent sous forme de cristaux à partir de la solution sursaturée. La solution restante, peut dissoudre de nouvelles particules anhydres.

1.2.5.1.2 LE DURCISSEMENT :

Après la prise, commence un phénomène de durcissement mécanique qui se développe par multiplication et par adhérence.

La nucléation et la croissance des cristaux sont fonction du degré de dissolution des phases anhydres.

1.2.5.2 LA THEORIE COLLOIDALE :

Lors du contact de l'eau avec du ciment anhydre, ce dernier va d'abord se dissoudre dans l'eau. Les grains de ciment augmentent de volume (gonflement) et il y'a apparition d'une solution très concentrée en chaux.

La solution de chaux agit sur les silicates et donne formation à un gel de silicate de calcium hydraté (CSH) insoluble.

Cette masse gélatineuse augmente peu à peu de volume par absorption de la chaux. Le CSH devient dense et imperméable. La masse gélatineuse enserre les grains de ciment qui continuent à s'hydrater par succession de l'eau contenue dans le gel.

Le gel s'appauvrit en eau et ses résistances augmentent (explication de la prise sous l'eau). Le gel constitue une masse protectrice, durcissable et nourricière pour les grains de ciment.

1.2.5.3 LA THEORIE MODERNE :

On peut admettre qu'il se produit à la fois de très fins cristaux qui précipitent peu à peu en une masse colloïdale.

1.3 LE BROYAGE :

1.3.1 GENERALITES :

Les broyeurs utilisés sont analogues dans leur principe à ceux servant à la fabrication de la farine crue. Ils sont alimentés par les bascules doseuses délivrant le clinker, le gypse et les autres constituants.

Le broyage a pour but de réduire les éléments en une poudre suffisamment fine afin de rendre la matière plus réactive (plus la surface spécifique est élevée, plus la réactivité chimique est importante).

Les broyeurs les plus utilisés sont les broyeurs à boulets, fonctionnant soit en circuit ouvert (la matière ne passe qu'une seule fois dans le broyeur), soit en circuit fermé qui présente deux avantages pour la qualité du ciment, la matière parcourant en moyenne de l'ordre de quatre à cinq cycles, la poudre est mieux mélangée et peut être mieux ventilée, la ventilation limite l'échauffement et réduit le risque de fausse prise du ciment dus à la déshydratation partielle du gypse [16].

1.3.2 BROYABILITE DU CLINKER :

Jusqu'à une finesse de $2000 \text{ cm}^2/\text{g}$, il existe une bonne corrélation entre la broyabilité et la porosité. Ensuite, l'augmentation des finesses en fonction du temps va dépendre de [28] :

- * La dimension et la nature des cristaux du clinker.
- * La microfissuration du clinker (choc thermique lors du refroidissement), sachant qu'une meilleure trempe donne un clinker plus facile à broyer grâce à une forte microfissuration.

En général, le broyage est plus facile quand le clinker possède [16] :

- plus de C_3S ,
- moins de C_3A ,
- le plus possible de petits cristaux.

Selon certains chercheurs, plus le rapport $[(\text{C}_3\text{S} + \text{C}_2\text{S}) / (\text{C}_3\text{A} + \text{C}_4\text{AF})]$ est élevé, plus facile est le broyage [17].

1.3.3 BROYABILITE DES AJOUTS MINERAUX :

Les bénéfices d'utilisation des ajouts minéraux sont [18] :

- * Fonctionnels.
- * Economiques.
- * Ecologiques .

1.3.3.1 BENEFICES FONCTIONNELS :

- Incorporation des particules fines améliore la maniabilité et réduit la demande en eau (à l'exception des ajouts d'une grande finesse).
- Amélioration des propriétés mécaniques et de la durabilité du béton
- Diminution de la chaleur d'hydratation dégagée du béton, ce qui diminue la fissuration d'origine thermique.

1.3.3.2 BENEFICES ECONOMIQUES :

- la plupart des ajouts minéraux sont des sous-produits de différents industries et leur coût est souvent égal au coût du transport et de la manipulation).
- comme la production du ciment est un grand consommateur d'énergie, son remplacement par des ajouts minéraux réduit le prix du béton pour le coût du combustible.

1.3.3.3 BENEFICES ECOLOGIQUES :

- Diminution de l'émission du CO_2 par l'industrie cimentière.
- Elimination des sous-produits de la nature.

*** LE LAITIER DE HAUT FOURNEAU :**

Jusqu'à une finesse de $2500 \text{ cm}^2/\text{g}$, il est plus dur à broyer que le clinker. Ensuite, il se broie plus facilement et peut donner des finesse élevées (de l'ordre de $6\ 000 \text{ cm}^2/\text{g}$).

*** LES CENDRES VOLANTES :**

Elles sont assez fines au départ, avec des finesse variant de 2500 à $4000 \text{ cm}^2/\text{g}$. Leur broyabilité est analogue à celle du clinker. Elles présentent l'avantage d'augmenter le débit du broyeur à ciment.

*** LES FILLERS :**

A cause de leurs natures différentes (siliceux, calcaires), ils présentent des broyabilités différentes.

*** LE GYPSE :**

* Il se broie très facilement, mais a tendance à s'agglomérer.

* Dans le ciment, la température du broyage élevée peut causer la déshydratation du gypse et la formation de l'hémihydrate de calcium qui se dissout beaucoup plus rapidement et en plus grande quantité que du gypse.

* Par suite, le comportement à la prise du ciment peut varier (fausse prise, prise rapide) dépendant de la quantité et de la forme de C3A présent dans le clinker.

* Pour cette raison, on utilise souvent un mélange du gypse et de l'anhydrite pour sulfater le ciment.

1.3.4 AJOUT D'UN AGENT DE MOUTURE PENDANT LE BROYAGE :

Le phénomène d'agglomération a amené depuis longtemps les cimentiers à rechercher les moyens de le limiter ou de l'éviter. Le premier produit qui a été utilisé fut le *charbon*. En 1930 des résines ont été employées mais elles entraînent trop d'air dans les bétons. C'est en 1931, que le premier agent de mouture fut utilisé aux USA [19].

Les agents de mouture possèdent une fonction tensioactive :

* l'eau : disperse les charges électriques en augmentant l'humidité dans le broyeur et en rendant l'air plus conducteur,

* les cendres volantes,

* les sous-produits de la fabrication du papier (lignosulfonates),

* les amines (triéthanolamine) des sels d'amines (acétate de triéthanolamine),

* des acides (acétique, oléique, stéarique, formique),

* l'acétone,

* les polyols (glycols, monopropylène glycol, éthylène glycol).

L'agent de mouture a pour effet [19] :

- * Augmentation du débit.
- * Augmentation de la production.
- * Augmentation de la SSB.
- * Diminution d'énergie.
- * Meilleure qualité de ciment.

Les tensio- actifs des molécules amphiles qui fixent facilement à la surface des grains empêchant toute force d'attraction.

Les particules se trouvent ainsi séparées d'une fluidité plus importante, et les frottements sont alors amortis. Grâce à cet effet séparateur et fluidifiant, les agents de mouture, offrent une possibilité de production optimale, et une qualité de produit meilleur entre autres :

- * Amélioration de l'effet d'impact par nettoyage des boulets et plaques.
- * Augmentation de la capacité de stockage.
- * Diminution de la température du ciment à l'intérieur du broyeur.
- * Réduction du phénomène de pack set de l'éventement.

1.4 LA GRANULOMETRIE :

Un produit morcelé, granulé ou pulvérulent est constitué par un ensemble de grains de formes généralement irrégulières et de dimensions variables. L'étude de la granulométrie d'un tel ensemble permet de préciser la répartition des tailles des grains.

Plusieurs méthodes peuvent être utilisées, mais nous ne citerons que les trois les plus fréquentes [20].

1.4.1 METHODES DE DETERMINATION :

1.4.1.1 MESURE PAR TAMISAGE :

Le tamisage au travers de tamis de sections de passage décroissantes est la technique la plus répandue. Elle permet de distinguer le «passant», quantité de produit qui passe dans les mailles du tamis, du «refus», quantité qui reste dans le tamis. La somme du passant et du refus pour un tamis donné est égale à la somme totale du produit testé.

Les séries de tamis sont normalisés. En France la norme AFNOR NF X 11-501 définit les dimensions des mailles de tamis suivant une progression géométrique de base 1 et de raison $10^{1/10} = 1,259$. Chaque pays possède sa norme propre.

1.4.1.2 MESURE PAR DIFFRACTION AU GRANULOMETRE A LASER :

L'essai consiste à envoyer un rayon laser (He-Ne) sur les particules de ciment dispersés à l'aide de l'ultrason qui sédimentent dans une solution et passant à travers un champ. La particule qui passe à travers ce champ, c'est-à-dire la particule frappée par un rayon va diffracter le rayon en un angle qui dépend de son propre diamètre (grosseur de la particule).

Les grosses particules diffractent la lumière dans un angle faible, tandis que les petites particules diffractent le rayon en un angle plus grand.

Cette technique repose sur un modèle où les particules sont périphériques car c'est la seule géométrie caractérisable par une seule grandeur dans les trois dimensions. Elle s'appuie sur l'analyse de la figure de la diffraction engendrée par la particule pour déterminer sa taille.

Les résultats donnés par une telle analyse apportent de nombreuses informations : la taille des particules, leur répartition en nombre, appelée distribution granulaire, l'étalement de cette distribution, la présence d'une ou plusieurs populations de grains qui souvent nécessite une déconvolution de la courbe obtenue.

La mesure de la granulométrie par diffraction consiste à faire traverser l'échantillon de produit par faisceau de lumière monochromatique émis par un laser (Figure 1.4). La connaissance de la répartition de la lumière diffractée permet de déterminer la courbe granulométrique.

Les granulomètres laser classiques autorisent une distribution de classes granulaires allant de 1 à 192 μm en 16 tranches, certains appareils permettent d'analyser les grains de 0.1 μm jusqu'à 315 μm [21].

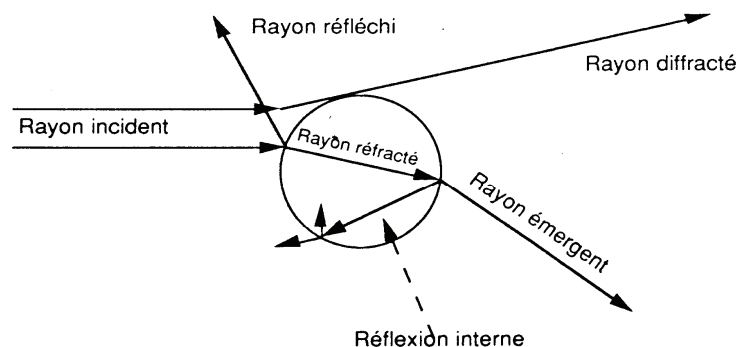


Figure 1.4. Principe de fonctionnement du granulomètre laser [21].

1.4.1.3 MESURE DE LA SURFACE SPECIFIQUE :

L'état de division d'un produit solide peut aussi être quantifié par la valeur de sa surface spécifique, c'est à dire par sa valeur de la surface totale des grains contenus dans une unité de masse de l'ensemble. Le perméabilimètre de Blaine est un appareil d'un maniement simple et rapide, très répandu dans l'industrie cimentière, qui permet d'approcher cette grandeur [22].

Le principe de la mesure de la surface spécifique de Blaine repose sur le fait que le temps nécessaire pour faire traverser une couche de poudre par un volume d'air donné est fonction de la surface totale des particules composant la poudre [22].

Le perméabilimètre de Blaine mesure la perméabilité à l'air d'une couche de poudre tassée selon une procédure définie, l'air étant à la pression atmosphérique et à température connue.

1.4.2 REPRESENTATION DE LA GRANULOMETRIE DU CIMENT :

La meilleure méthode de présenter la granulométrie du ciment (Figure 1.5) est d'utiliser l'équation de Rosin-Rammler-Sperling-Bennett (RRSB) [23].

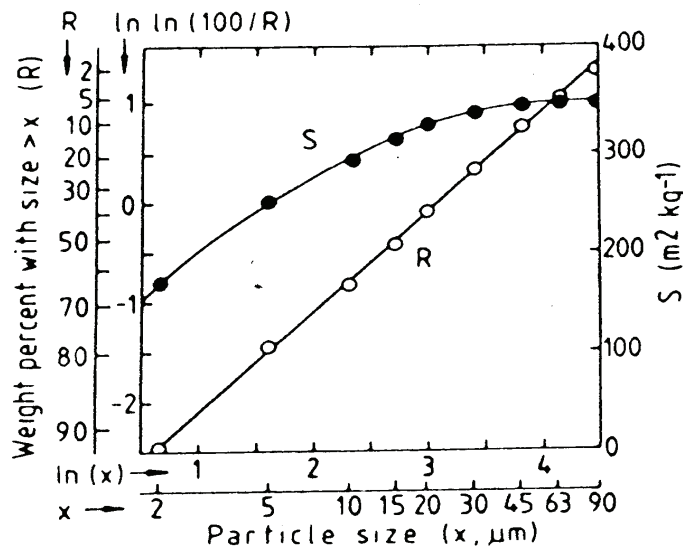


Figure 1.5. Courbe de ROSIN –RAMMLER [23].

$$\ln \ln (100/R) = n (\ln x - \ln x')$$

- R** : Pourcentage (masse) de toutes les particules $> x$.
- x'** : Dimension moyenne des particules (36,79 % des particules sont supérieures à x').
- n** : Inclinaison de la droite (pente), qui représente la largeur de la distribution granulométrique.
- x'** et **n** : sont les paramètres qui caractérisent la distribution granulométrique.

La courbe de distribution granulométrique permet de calculer la surface spécifique. Il y a une corrélation linéaire entre la granulométrie et la surface spécifique (Blaine).

$$S = 6 \cdot 106 \cdot F \cdot S \cdot \Sigma f / (d \cdot r)$$

- S** : Surface spécifique.
- F** : Constante empirique qui caractérise la forme des particules = 1,13.
- f** : Pourcentage (masse) des particules de diamètre d (mm).
- r** : Densité du ciment en kg/m^3 .

1.4.3 DISTRIBUTION DES PARTICULES ET COMPOSITION DES PHASES :

- * Toutes les phases de ciment n'ont pas la même broyabilité, alors différentes fractions n'ont pas la même composition.
- * Les sulfates de calcium sont concentrés dans les fractions fines. Environ 15 % de la surface spécifique du ciment est due aux sulfates de calcium.
- * Avec l'augmentation de la taille des particules, le contenu en alite diminue et celui en bélite augmente, tandis que le contenu en phase intersticielle ne change pas.

1.4.4 GRANULOMETRIE ET DEMANDE EN EAU (Consistance normale) :

La demande en eau est la quantité d'eau nécessaire pour obtenir une consistance normale de la pâte de ciment. Elle varie de 23 à 35 % [23].

- * La granulométrie a une influence prédominante sur la demande en eau du ciment.
- * Plus la distribution granulométrique est "serrée", avec peu de particules de petite et de grosse dimensions, plus la demande en eau est élevée.
- * Ce ciment comporte une grande proportion de vides que l'eau devra remplir avant de participer à la maniabilité de la pâte de ciment.
- * Donc, pour diminuer la demande en eau du ciment, il faut augmenter les proportions en petites et grosses particules afin de diminuer le vide intergranulaire.

1.4.5 GRANULOMETRIE ET DEVELOPPEMENT DES RESISTANCES :

Avec l'augmentation de la demande en eau, la granulométrie a aussi un effet sur le développement des résistances du ciment [23].

Donc, on peut conclure que :

- * Avec une granulométrie "serrée" (n élevé), on peut obtenir des résistances élevées sans pour autant augmenter la surface spécifique du ciment.
- * Dans ce cas, la demande en eau augmente considérablement.
- * Dans les bétons, la résistance à la compression est mesurée pour un affaissement donné, la demande en eau élevée a donc tendance à diminuer sa résistance.

Ce problème peut être évité par l'ajout de fillers qui vont remplir les vides intergranulaires et diminuer la demande en eau.

1.5 CHALEUR D'HYDRATATION DU CIMENT :

Quand le ciment portland réagit avec l'eau, il y a dégagement de chaleur qui peut être mesurée par le calorimètre à conduction thermique (isotherme).

Donc, le dégagement de chaleur et ainsi l'évolution de l'hydratation pourront être suivis dans le temps [24].

Les étapes successives de l'hydratation du ciment pendant 24 à 48 heures peuvent être suivies grâce à un calorimètre, par la courbe d'évolution de la chaleur dégagée par les réactions qui sont exothermiques (au cours du temps, ce qui traduit l'avancement de la réaction d'hydratation du ciment).

Il existe trois pics-trois maximums de dégagement de chaleur (Figure 1.6) :

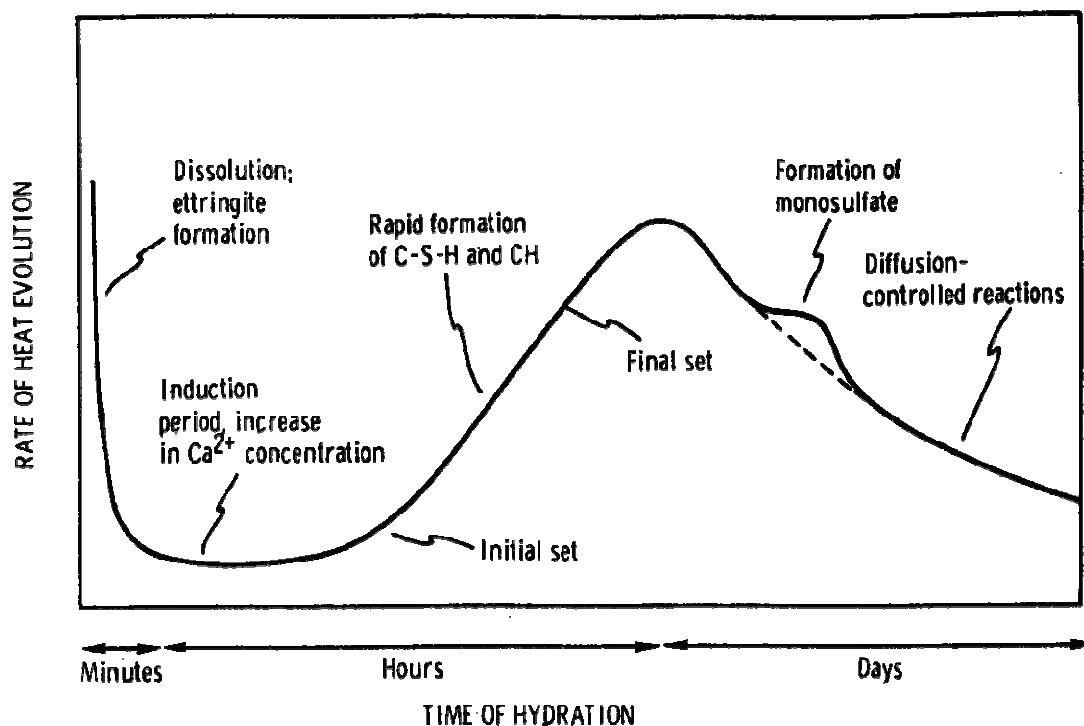


Figure 1.6. Courbe calorimétrique relevée pendant l'hydratation d'un ciment [24].

* Le premier pic :

Dans les conditions d'hydratation d'une pâte de ciment dans l'eau, c'est le pic de flux le plus intense mais de durée plus brève.

C'est le plus haut, mais il est de courte durée. Il est suivi d'une "*période dormante*" dans laquelle le dégagement de chaleur est relativement faible (sans jamais être nul).

Les transformations physiques dans cette période sont détectées par l'augmentation du raidissement de la pâte.

Les phénomènes physiques et chimiques régissant cette phase (période dormante) sont du point de vue pratique très importants, car ils ont un effet sur l'ouvrabilité du béton.

Pour un rapport E/C = 0,5, on devra placer le béton dans la structure au plus tard au milieu de la "période dormante".

Il correspond au mouillage du solide, au début des réactions de dissolution de toutes les phases et sulfate) et la précipitation des hydrates tels que l'hydro silicate de calcium (C-S-H) et l'étringite ($C_3A \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$) par rapport auxquels la solution de gâchage est très rapidement sursaturée à cause de son faible volume en regard de la quantité de solide.

La dissolution et la précipitation étant des phénomènes respectivement exo et endothermique, la variation du flux total traduit simplement la différence de vitesse relative des deux réactions.

A l'issue de ce premier pic commence une période de faible activité thermique. Sa durée est liée au nombre de germes de (C-S-H) précipitées pendant la nucléation compte tenu du fait que l'évolution du flux thermique lié à l'hydratation des aluminates à cet instant est faible.

*** Le second pic :**

Est attribué le plus généralement à l'hydratation du silicate tricalcique. Par rapport au premier pic, il est moins intense et beaucoup plus large, ce qui témoigne d'une réaction cinétiquement plus lente mais de durée supérieure.

La "période dormante" prend fin avec l'accélération du dégagement de chaleur et de la prise du ciment. Le second pic atteint son maximum (pour un ciment ordinaire à 20 °C) entre 9 heures et 10 heures.

Très schématiquement, l'accélération de l'hydratation du C_3S représentée par la partie ascendante du second pic est due à la croissance des (C-S-H) qui sont nucléés à la surface au cours du premier pic. Le ralentissement qui survient ensuite traduit le recouvrement total de cette surface par les hydrates et met en évidence que la réaction est limitée par un processus diffusionnel.

*** Le troisième pic :**

Ce ne sont pas tous les ciments qui présentent un 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. Quand il est visible, le troisième pic apparaît généralement comme un épaulement dans le second pic tel que le montre la figure x.

La première attribue ce pic à la transformation de l'étringite au moment où la quantité de sulfate initiale présente est totalement épuisée. A cet instant, devenant sous-saturée par rapport à cet hydrate, l'étringite se dissout et forme avec le C_3A restant le monosulfoaluminate de calcium hydraté. Cette transformation, appelée aussi conversion, ne serait visible que pour le taux de C_3A dans un ciment supérieur à 12% ou à une teneur en sulfate supérieure à 3% pour 10% de C_3A .

La seconde, qui apparaît comme la plus répandue dans la littérature, identifie le pic comme étant une reprise de l'hydratation de C_3A . des observations microscopiques sur des grains de ciment hydratés semblent montrer qu'elle s'accompagnerait d'une formation secondaire d'étringite dont la morphologie est de type aiguille.

Des expériences récentes menées au Laboratoire de Recherche sur la réactivité des solides à l'université de bourgogne (Dijon) sur le sujet montrent que chaque hypothèse comporte une part de vérité. En effet, le suivi des concentrations ioniques des espèces présentes dans le système $C_3A-CaSO_4-Ca(OH)_2$ établie sur le pic de flux thermique enregistré coïncide avec disparition de sulfate en solution simultanément à la réapparition d'ions aluminates. Il semblerait donc qu'il ait arrêt de la précipitation d'étringite tandis que le C_3A continue à se dissoudre. Le dégagement de chaleur ne serait la conséquence alors que de cette réaction fortement exothermique [25].

Les réactions chimiques d'hydratation des liants hydrauliques se font avec un certain dégagement de chaleur qui commence avec le début de prise.

De grandes différences existent entre les chaleurs dégagées par les différents liants hydrauliques (Tableau 1.6). Elles proviennent [25] :

* **des constituants minéralogiques** : le C_3A et le C_3S dégagent le plus de chaleur, une addition de laitier ou de cendres volantes diminue cette chaleur au moins aux premiers âges,

* **De la finesse de mouture** : plus le ciment est broyé finement et plus la chaleur d'hydratation est élevée (corrélativement, plus ses résistances mécaniques sont élevées).

Pratiquement, 25 % de la chaleur se dégage entre le début et la fin de prise.

Le remplacement du ciment par une pouzzolane diminue de façon significative la chaleur d'hydratation du ciment (Figure 1.7).

La chaleur d'hydratation des ajouts pouzzolaniques est égale à environ la moitié de celle du ciment Portland sans ajouts. Les cendres volantes et le laitier sont souvent utilisés dans les bétons de masse lors de la construction de barrages ou d'ouvrages massifs [25].

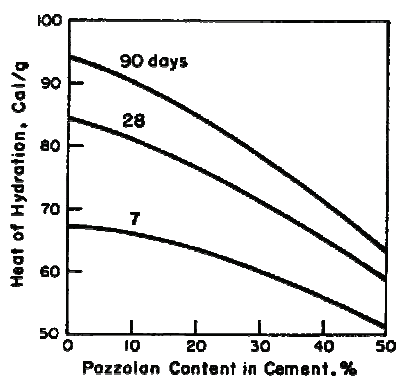


Figure 1.7. Effet de la pouzzolane sur la chaleur d'hydratation du ciment [25].

Constituants	Quantité de chaleur degage (J/g)
C ₃ S	500
C ₂ S	250
C ₃ A	1340
C ₄ AF	420
Ciment Portland ordinaire	375-525
Ciment pouzzolanique	315-420

Tableau 1.6. Intensité de dégagement de la chaleur des ciments [25].

Période	Processus chimique	Processus physique
Gâchage	Dissolution rapide des constituants du ciment, formation du CSH et d'ettringite.	Fort dégagement de chaleur (1 ^{er} pic thermique)
Dormante	Augmentation rapide du pH et de la teneur en Ca ²⁺ de l'eau de gâchage, ce qui induit un ralentissement de la dissolution des constituants du ciment. Formation lente de CSH et d'ettringite et sursaturation en chaux de la phase aqueuse.	Inertie thermique et augmentation lente de la viscosité
Prise	Accélération de la dissolution des constituants du ciment grâce à la diminution de la teneur en Ca ²⁺ par la formation de Ca(OH) ₂ . Hydratation de C ₃ S pour donner du CSH et de la portlandite.	Augmentation du flux thermique, solidification et diminution de la porosité
Ralentissement	Epuisement du gypse et formation du monosulfo-aluminate de calcium par la réaction des ions sulfates (provenant de l'ettringite) avec le reste des aluminates. Accélération de l'hydratation des C ₃ S et C ₂ S.	Deuxième pic thermique et diminution de la porosité
Durcissement	Ralentissement des réactions du fait que les grains anhydres sont recouverts d'hydrate de plus en plus épais.	Diminution du flux thermique et de la porosité

Tableau 1.7. Les principales étapes de l'hydratation d'un ciment [26].

Bien que le développement des résistances mécaniques à la compression soit lent, les résistances à long terme dépassent quelques fois celles du ciment Portland sans ajouts, à condition d'optimiser la quantité d'ajout (Figure 1.8). Cette augmentation des résistances est due à l'affinage des pores et des grains ainsi qu'à l'augmentation de la quantité de CSH [27].

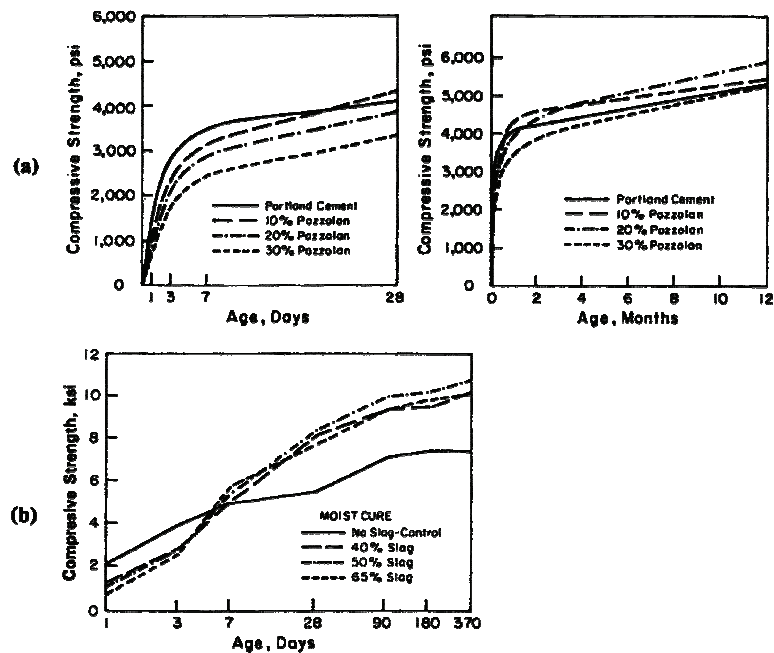


Figure 1.8. Evolution de la résistance à la compression des ciments aux ajouts minéraux (pouzzolane, laitier) [27].

1.6 LE RETRAIT :

Il est clair qu'avec l'augmentation de la surface spécifique, la quantité du gypse nécessaire au contrôle de l'hydratation va augmenter. L'accélération des réactions initiales aura un effet négatif sur le développement des résistances à 28 jours [28].

Lors de la mise en œuvre du ciment, il y a une variation dimensionnelle spontanée (phénomène de retrait).

Il y a une diminution absolue du volume de la matière sans que le volume apparent ne varie beaucoup : il y a donc une mise en contrainte du béton.

$$V(\text{constituants hydratés}) < V(\text{constituants anhydres}) + V(\text{eau})$$

La pâte de ciment est un milieu poreux contenant de l'eau (porosité ouverte) en communication avec le milieu extérieur non-saturé en eau. On a donc un déséquilibre thermodynamique : le milieu extérieur pompe de l'eau, ce qui crée le phénomène de retrait par phénomènes capillaires au niveau de la porosité ouverte.

La pâte de ciment crée un retrait, ce qui met les granulats en compression, et donc le ciment en traction. Il y a donc une fissuration de la pâte, ce qui diminue la résistance mécanique et augmente l'acheminement des agents extérieurs. Il faut donc prévoir des joints thermiques et de retraits. En terme général, plus la pâte contient de C_3S et de C_3A , plus le retrait est important.

La pâte de ciment est sujette à des changements de volumes dont les causes peuvent avoir plusieurs origines. Parmi les principales, on trouve [28] :

- * les changements de température,
- * la formation de produits expansifs,
- * le retrait (réduction dimensionnelle).

La cause la plus fréquente des changements de volume de la pâte de ciment est le retrait qui, en fait, est une contraction de la pâte de ciment (ou du béton).

Le retrait est très souvent à l'origine des fissures que l'on trouve très fréquemment dans presque tous les types d'ouvrages en béton.

Il y'a trois (03) principaux types de retrait [28] :

- * le retrait plastique ou retrait exogène : évaporation trop rapide de l'eau en surface (il dépend essentiellement du climat environnant : température et humidité),
- * le retrait endogène (ou retrait chimique) : le volume des hydrates formés est légèrement inférieur au volume des composants initiaux (eau-ciment),
- * le retrait de séchage ou retrait exogène : faible taux d'humidité ou conservation dans l'air donc assèchement progressif de la pâte de ciment (il dépend essentiellement du climat environnant : température et humidité).

DEUXIEME CHAPITRE

EXPERIMENTATION

2.1 CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX UTILISES

2.1.1 LES CIMENTS UTILISES :

Trois types de ciments composés «CPJ-CEM II» de différentes cimenteries algériennes ont été utilisés dans notre étude expérimentale qui sont :

CPJ-CEM II de Sour-El-Ghozlane (Wilaya de Bouira).
CPJ-CEM II de Ain-El –Kébira (Wilaya de Sétif).
CPJ-CEM II de Hadjar-Soud (Wilaya de Skikda).

Ces trois types de ciments aux ajouts minéraux étudiés sont des CPJ-CEM II/ A et CPJ-CEM II/B, qui présentent des compositions chimiques différentes (clinkers et ajouts minéraux différents).

Chaque type de ciment composé utilisé a été broyé dans un broyeur à boulets afin d'obtenir différentes finesses de mouture (différentes surfaces spécifiques) en faisant varier le temps de broyage de 15 à 30 minutes :

1^{ère} finesse (F1) : t = 0 min (finesse initiale de sortie de la cimenterie : finesse commercialisée du ciment).

2^{ème} finesse (F2) : t = 15 min (temps de broyage est égal à 15 minutes).

3^{ème} finesse (F3) : t = 30 min (temps de broyage est égal à 30 minutes).

La détermination des caractéristiques physiques (poids spécifiques, surfaces spécifiques de Blaine, retraits et gonflements) des différents ciments ont été effectuées au centre des études technologiques et de l'industrie des matériaux (CETIM) situé dans la ville de Boumerdès. Par contre les essais de détermination de la consistance normale des pâtes de ciments composés analysés ainsi que les délais de prise (début et fin de prise) ont été réalisés à la cimenterie de Sour-El-Ghozlane. Les compositions chimiques ont été déterminées à la cimenterie de Ain-El-Kébira. au moyen de la méthode d'essai «Spectrométrie à fluorescence aux rayons x».

2.1.1.1 LE CRU (FABRICATION DU CLINKER) :

La composition en oxydes du cru détermine la composition minéralogique du clinker et donc son hydraulicité, c'est-à-dire sa capacité de réagir avec l'eau pour former des composés hydratés. Cela explique le soin qu'on doit apporter pour que la matière introduite dans le four ait une composition chimique constante vis à vis des quatre oxydes fondamentaux $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3$.

Les matériaux (matières premières) utilisés pour la fabrication du clinker pour chaque type de ciment étudié sont présentés dans le tableau 2.1.

Clinkers des Ciments composés étudiés	Clinker 1 CPJ-CEM II/A Sour-El-Ghozlane «SG»	Clinker 2 CPJ-CEM II/A Ain-El-Kébira «AK»	Clinker 3 CPJ-CEM II/B Hadjar-Soud «HS»
Matériaux	Calcaire	Calcaire	Calcaire
	Argile	Argile	Argile
	Minerai de fer	Minerai de fer	Minerai de fer
	Sable	-	Sable

Tableau 2.1 Constituants principaux du cru de clinker des différents ciments étudiés.

Au-delà de l'argile et du calcaire, les roches naturelles susceptibles de servir à la fabrication du clinker sont, en fait assez variées. Le point important est que l'on puisse atteindre une bonne composition chimique en oxydes du clinker. Cela peut conduire à ajouter des matières correctives telles que : le sable siliceux, les oxydes de fer (minerai de fer).

2.1.1.2 LE CLINKER

2.1.1.2.1 COMPOSITION CHIMIQUE

La composition chimique ainsi que les quatre modules caractéristiques des trois clinkers des différents ciments utilisés sont indiqués dans le tableau 2.2.

On remarque que les quatre éléments chimiques essentiels (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO) des trois clinkers des ciments composés étudiés ainsi que les quatre modules caractéristiques calculés sont presque identiques (différence négligeable).

Eléments (Oxydes)	Clinker 1 du CPJ-SG (%)	Clinker 2 du CPJ-AK (%)	Clinker 3 du CPJ-HS (%)	Exigences (%)
SiO_2	21,12	21,75	21,57	19 à 25
Al_2O_3	5,54	5,32	5,80	2 à 9
Fe_2O_3	2,75	2,78	2,88	1 à 5
CaO	62,94	63,84	64,35	62 à 67
MgO	1,18	1,17	1,12	0 à 3
SO_3	0,54	0,62	0,57	1 à 3
K_2O	0,73	0,65	0,58	0 à 1,5
Na_2O	0,22	0,23	0,25	0 à 1,5
Cl^-	0,002	0,001	0,001	< 0.10
$\text{CaO}_{\text{Libre}}$	1,28	0,74	1,18	< 2
Modules caractéristiques				
M_h	2,14	2,14	2,13	1,7 à 2,3
M_{sat}	2,55	2,69	2,49	0.90 à 0.95
M_s	2,01	1,91	2,01	2 à 3
M_{af}	0,93	0,93	0,93	1,5 à 2,5

Tableau 2.2 : Composition chimique et modules caractéristiques des clinkers étudiés.

2.1.1.2.2 COMPOSITION MINÉRALOGIQUE

La composition minéralogique des trois clinkers des ciments étudiés est présentée dans le tableau 2.3.

Alite :

C_3S Silicate tricalcique dans les proportions allant de 40 à 70%

Bélite :

C_2S Silicate bicalcique dans les proportions allant de 10 à 30%

Célite :

C_3A Aluminate tricalcique dans les proportions allant de 2 à 15%

Férite :

C_4AF Alumino-férrite-tétracalcique dans les proportions allant de 0 à 15%

On a déterminé la composition potentielle du clinker selon le calcul de Bogue qui est largement utilisé dans l'industrie cimentière dans la mesure où il permet d'estimer à partir de son analyse chimique élémentaire des majeurs (calcium, silice, alumine et fer), la composition minéralogique du clinker. L'application du calcul de Bogue aux trois clinkers utilisés de différentes cimenteries permet de tirer les principales conclusions suivantes :

* Composition chimique et minéralogique quasiment identiques pour les trois clinkers étudiés.

* Qualité acceptable des trois clinkers analysés (modules caractéristiques et proportion des quatre phases principales obtenue en appliquant les formules de Bogue).

Constituants minéralogiques du clinker	Teneur en % rapportée au clinker		
	Clinker du CPJ-SG	Clinker du CPJ-AK	Clinker du CPJ-HS
C_3S	53	53	53
C_2S	19	21	20
C_3A	10	09	11
C_4AF	08	08	09

Tableau 2.3 Composition minéralogique des clinkers selon la formule de Bogue.

L'observation microstructurale des trois clinkers étudiés à l'aide d'un microscope optique a été réalisée au laboratoire de CETIM. Les photographies obtenues sous un grossissement de 400 montrent les quatre phases minérales du clinker (figure 2.1, figure 2.2 et figure 2.3).



Figure 2.1 Microphotographie du clinker du CPJ de Sour-El-Ghozlane (Grossissement 400).

On voit que la microstructure du clinker de Sour-El-Ghozlane est peu cristallisée (mauvaise cristallisation du clinker, ceci est dû à un refroidissement brusque du clinker). Le C_3A se présente en gris, le C_4AF en blanc et le C_2S en bleu. De plus on remarque la présence d'une zone de saturation en chaux très élevée et l'existence exclusive de C_3S en jaune sous forme de cristaux polygonaux.

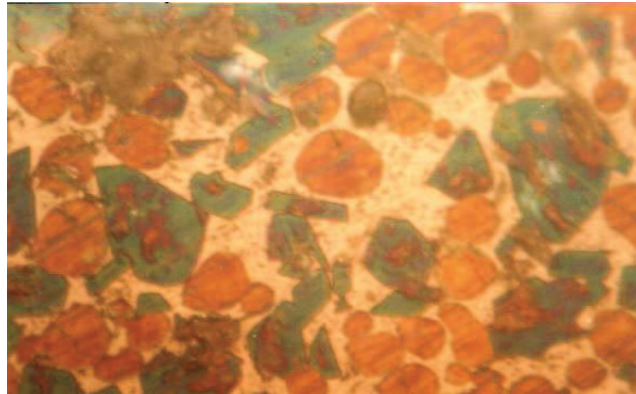


Figure 2.2 Microphotographie du clinker du CPJ de Ain-El-Kébira (Grossissement 400).

L'observation micrographique réalisée sur le grain de clinker testé montre les quatre phases principales : le C_3A en petits points gris, le C_4AF en blanc, le C_3S en cristaux polygonaux orange à contours très nets et enfin le C_2S à cristaux arrondis en bleu.

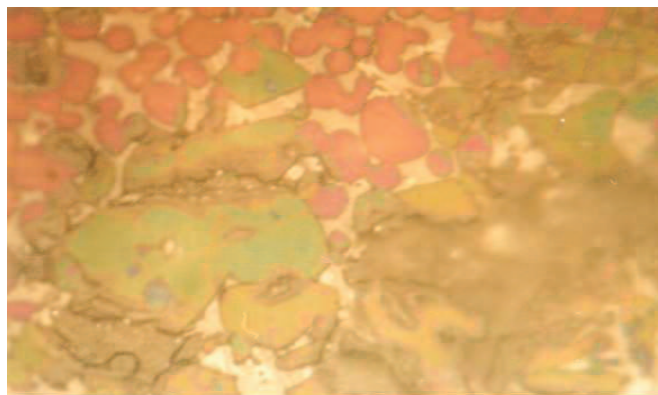


Figure 2.3 Microphotographie du clinker du CPJ de Hadjar-Soud (Grossissement 400).

On observe d'après les micrographies obtenues : le C_3A en gris, le C_4AF en blanc, le C_3S en cristaux polygonaux verdâtre et le C_2S à cristaux arrondis en marron.

2.1.1.3 LES AJOUTS MINÉRAUX

Le pourcentage d'ajout des trois ciments utilisés est inférieur à 35 % conformément à la norme NF-EN-197-1 qui stipule que les ciments composés «CPJ-CEM II» doivent contenir au minimum 65% de clinker.

Les tableaux 2.4 et 2.5 présentent le type et la composition chimique des différentes additions minérales cimentaires utilisées pour les trois ciments composés étudiés.

Ciments composés	Régulateur de prise	Teneurs (%)	Ajouts	Teneurs (%)
CPJ-CEM II				
Sour-El_Ghozlane	Gypse	5%	Tuf	10
Ain-El-Kébira			Calcaire	8
			Pouzzolane	5
Hdjar-Soud			Laitier	30

Tableau 2. 4 Ajouts minéraux des trois ciments composés étudiés.

Eléments	CPJ -SG		CPJ -AK		CPJ-HS	
	Gypse	Tuf	Gypse	Pouzzolane + calcaire	Gypse	Laitier
SiO ₂	10,57	54,92	9,74	36,61	8,06	36,00
Al ₂ O ₃	3,49	13.94	3.23	11.42	2.53	7.37
Fe ₂ O ₃	1,60	4.69	1.02	5.88	1.04	4.44
CaO	28,54	13.96	28.43	27.20	30.97	42.73
MgO	3,42	1.47	3.75	4.23	2.58	4.15
SO ₃	31.41	0.65	29.05	0.44	32.64	1.37
K ₂ O	0.47	4.05	0.23	0.58	0.38	0.41
Na ₂ O	0.13	1.75	0.07	1.02	0.07	0.16
P.F	21,32	4.77	22.64	11.79	21.86	1.01
Cl ⁻	0.010	0.0033	0.006	0.010	0.0013	0.005
H ₂ O	13,42	-	13,21	-	14,92	-

Tableau 2. 5 Composition chimique des ajouts minéraux des ciments étudiés.

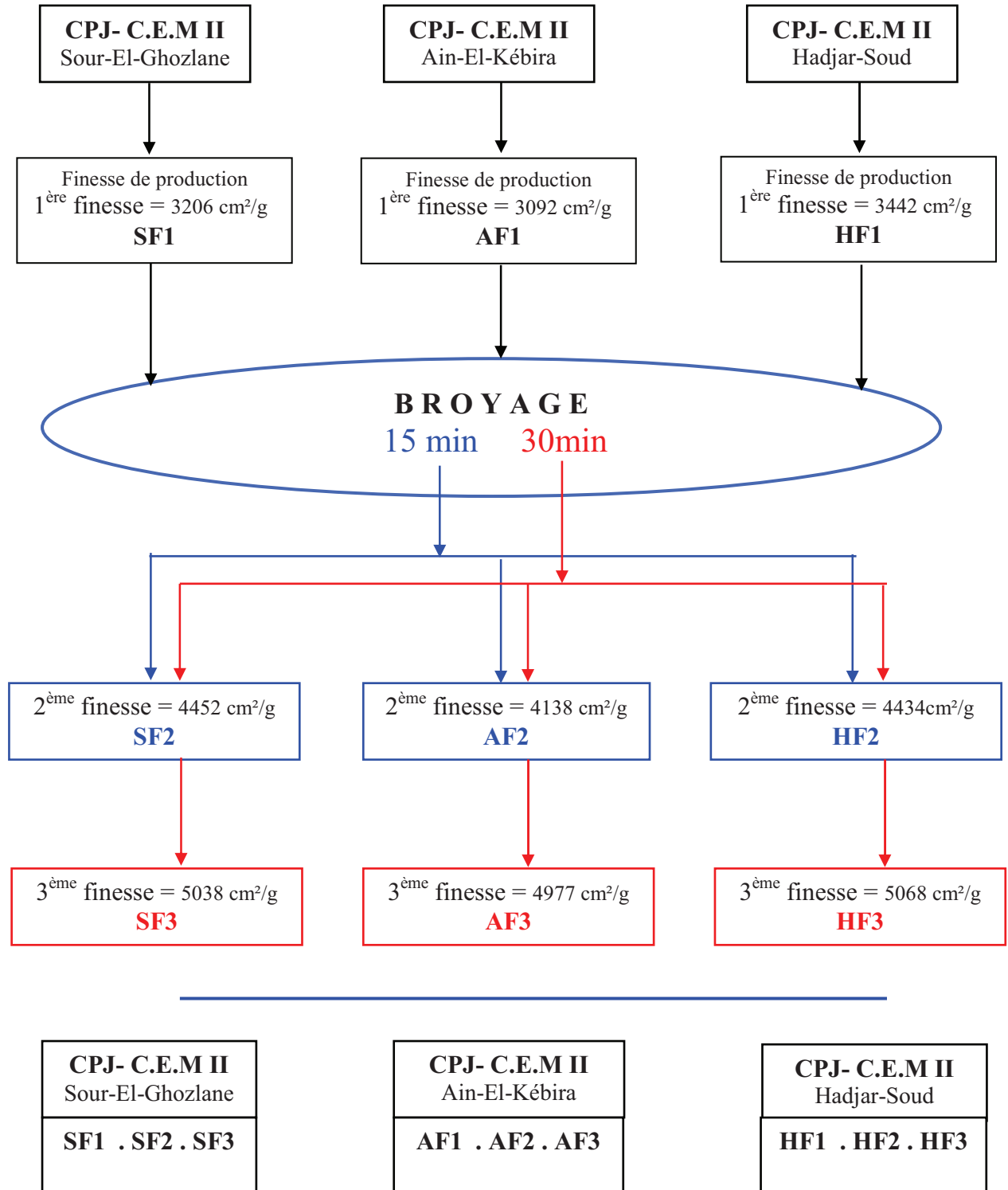
2.1.1.4 ANALYSES CHIMIQUES DES CEMENTS ETUDIÉS

La composition chimique des trois (03) types de ciments utilisés dans notre travail expérimental a été déterminée au moyen de la méthode d'essai «Fluorescence aux rayons x». Le tableau 2.6 donne la composition chimique des trois ciments retenus dans notre étude expérimentale.

Types de Ciments	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	K ₂ O (%)	Na ₂ O (%)	SO ₃ (%)	Cl ⁻ (%)
CPJ-SG	23,48	5,63	3,28	60,60	1,38	0,97	0.19	1,18	0.012
CPJ-AK	24,15	5,54	3,42	62,72	1,43	0,88	0,21	1,11	0.008
CPJ-HS	24,77	5,81	3,68	64,03	1,19	0,93	0.19	1,19	0.008

Tableau 2.6 Composition chimique des trois types de ciments étudiés.

**PROCEDE DE BROYAGE DES CIMENTS ETUDIES A DIFFERENTES
FINESSES (Notations des symboles utilisés)**



Nous avons retenu trois types de ciments composés CPJ-CEM II de composition différente fabriqué à base d'ajouts minéraux différents (tuf, pouzzolane-calcaire et laitier) ceci dans le but d'analyser l'influence de la surface spécifique et de la granulométrie des ciments composés à différents ajouts cimentaires sur les caractéristiques physiques des ciments à l'état anhydre et à l'état hydraté et aussi sur le comportement mécanique du mortier et du béton.

On rappelle que la surface spécifique Blaine (S.S.B) caractérise la finesse des ciments. La finesse est une caractéristique très importante : lors du gâchage, plus la surface de ciment en contact avec l'eau est grande et plus l'hydratation est rapide et complète. La finesse d'un ciment peut être caractérisée par sa surface massique. C'est la surface totale des grains (cm^2) dans un gramme (g) de ciment, elle est mesurée à l'aide de l'appareil appelé « perméabilimètre de Blaine ».

La fragmentation fine, c'est-à-dire le broyage des ciments à différents temps de broyage (0, 15 et 30 minutes) a été effectuée par un broyeur à boulets dont la charge maximale ne peut excéder quatre (04) Kg.

Le broyage ainsi que la mesure des surfaces spécifiques ont été effectuées au centre des études technologiques et de l'industrie des matériaux (CETIM) situé dans la ville de Boumerdès.

On constate d'après le tableau 2.7 que la surface spécifique du ciment croît en fonction du temps du broyage par contre le taux d'accroissement de la finesse diminue :

► Pour la première durée de broyage (15 minutes), la surface spécifique du CPJ-SG (ciment composé à base de tuff) croît de $3206 \text{ cm}^2/\text{g}$ à $4452 \text{ cm}^2/\text{g}$ et de $4452 \text{ cm}^2/\text{g}$ à $5038 \text{ cm}^2/\text{g}$ pour la deuxième durée de broyage (30 minutes) avec des taux d'accroissement de la finesse de 38 % (15 min) à 13 % (30 min).

► Accroissement de la surface spécifique de $3092 \text{ cm}^2/\text{g}$ à $4138 \text{ cm}^2/\text{g}$ pour la première durée de broyage (15 min) et de $4138 \text{ cm}^2/\text{g}$ à $4977 \text{ cm}^2/\text{g}$ pour la deuxième durée de broyage (30 min) du CPJ-AK (ciment composé à base de calcaire-pouzzolane) avec des taux d'accroissement de la finesse de 34 % (15 min) à 20 % (30 min).

► Accroissement de la surface spécifique de $3442 \text{ cm}^2/\text{g}$ à $4434 \text{ cm}^2/\text{g}$ pour la première durée de broyage (15 min) et de $4434 \text{ cm}^2/\text{g}$ à $5067 \text{ cm}^2/\text{g}$ pour la deuxième durée de broyage (30 min) du CPJ-HS (ciment composé à base de laitier) avec des taux d'accroissement de la finesse de 29 % (15 min) à 14 % (30 min).

On constate d'après les résultats obtenus que :

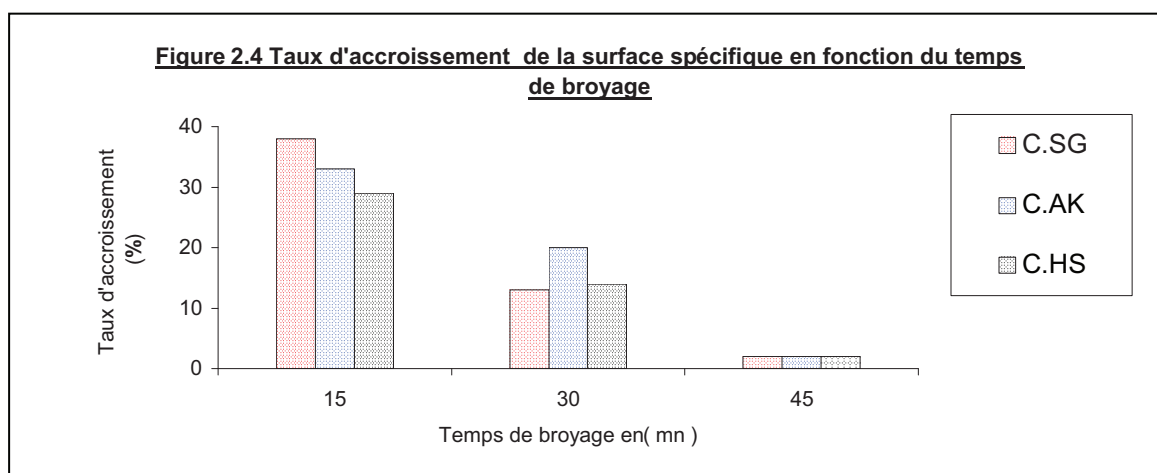
* La consommation d'énergie pour la broyabilité des ajouts minéraux diffère d'un ajout à un autre et ceci peut être dû principalement à la différence de dureté des ajouts utilisés (calcaire = 12.8 kWh/t et laitier = 22.7 kWh/t).

* Le laitier plus il devient fin, plus il est facile à broyer.

Pour bien confirmer la loi de RETTINGER sur les ciments étudiés, on a procédé à un broyage plus poussé jusqu'à 45 minutes. On constate dans ce cas que le taux d'accroissement de 30 min à 45 min est de 2%, ce qui fait qu'on dépense de l'énergie sans qu'il y ait de broyage.

Types de ciments	Surfaces spécifiques en (cm ² /g)						
	0 mn	Taux	15 mn	Taux	30mn	Taux	45mn
CPJ-SG	3206	39%	4452	13%	5038	2%	5159
CPJ-AK	3092	34%	4138	15%	4977	2%	5099
CPJ-HS	3442	29%	4434	14%	5068	2%	5172

Tableau 2. 7 : Evolution de la surface spécifique en fonction du temps de broyage des ciments utilisés.



2.1.1.5 ANALYSE GRANULOMETRIQUE DES CEMENTS UTILISES

L'analyse des échantillons (ciments composés utilisés) a été réalisée au centre de recherche et du développement de la SONATRCH situé dans la ville de Boumerdes à l'aide d'un **GRANULOMETRE A LASER DE TYPE MASTERSIZER** qui est un kit composé d'éléments suivants :

- Un banc optique (analyseur) comprenant principalement :
 - * Un générateur d'émission (émetteur) : source laser.
 - * Différentes lentilles interchangeables en fonction de la plage étudiée :
 - * Cellules de mesure (voie sèche et voie humide)
 - * Récepteur : ensemble de photodiodes.
 - * Détecteurs (Capteurs).
 - * Carte électronique d'interface.
- Les accessoires de préparation :
 - * Voie sèche (dispersion est assurée par de l'air).
 - * Voie humide (circulation des particules dans un dispersant).
- Le système informatique avec logiciel assurant le traitement des données brutes.

Les statistiques de distribution sont calculées d'après les résultats obtenus en utilisant les dérivés **D[m,n] :**

D(v, 0.5) , D(v, 0.1) , 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, est également connue sous le nom de diamètre médian (MMD : Mass Médian Diamètre).

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 de distribution se calcule par la formule suivante :

$$\text{Span} = [D(v, 0.9) - D(v, 0.1)] / D(v, 0.5)$$

L'aire de surface spécifique (SSA) = surface totale des particules / poids total
(Il faut fixer la densité de l'échantillon)

Concentration : est la concentration volumique. Elle se calcule selon la loi de Beer – Lambert et s'exprime sous forme de pourcentage.

Distribution : indique le type de distribution qui a été utilisé pour l'analyse.

Obscuration : aide à fixer la concentration de l'échantillon lorsque celui-ci est ajouté au dispersant. C'est une mesure de la quantité de lumière laser perdue, dû à l'introduction de l'échantillon dans le faisceau laser. La plage idéale s'étend de 10% à 30%.

L'uniformité : est la mesure de l'écart absolu à partir de la médiane.

Lecture du rapport :

Size low (µm) et ln % : représentant le diamètre des grains et les fractions équivalentes (Fréquence).

Size high (µm) et Under % : montrent le diamètre des grains et les pourcentages cumulés.

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.

2.1.1.5.1 CIMENT COMPOSE DE SOUR-EL-GHOZLANE : Analyse et courbe granulométrique de la première finesse : SF1

Result: Analysis Table

ID: SF1	Run No: 3	Measured: 12/1/2004 08:21
File: MSILA	Rec. No: 1	Analysed: 23/3/2004 18:36
Path: C:\SIZERS\DATA\DATA\		Source: Analysed
Range: 300RF mm	Beam: 2.40 mm	Sampler: MS17
Presentation: 3OHD	Analysis: Polydisperse	Obs': 14.9 %
Modifications: None		Residual: 0.564 %
Conc. = 0.0123 %Vol	Density = 3.137 g/cm ³	S.S.A. = 0.8090 m ² /g
Distribution: Volume	D[4, 3] = 32.09 μ m	D[3, 2] = 2.36 μ m
D(v, 0.1) = 0.70 μ m	D(v, 0.5) = 19.14 μ m	D(v, 0.9) = 79.08 μ m
Span = 4.096E+00	Uniformity = 1.287E+00	

Size (um)	Volume Under%	Size (um)	Volume Under%	Size (um)	Volume Under%	Size (um)	Volume Under%
0.05	0.00	0.67	9.84	9.00	30.30	120.67	96.04
0.06	0.00	0.78	10.40	10.48	33.80	140.58	97.41
0.07	0.01	0.91	10.87	12.21	37.58	163.77	98.45
0.08	0.01	1.06	11.28	14.22	41.60	190.80	99.23
0.09	0.03	1.24	11.66	16.57	45.84	222.28	99.75
0.11	0.07	1.44	12.04	19.31	50.26	258.95	100.00
0.13	0.16	1.68	12.46	22.49	54.83	301.68	100.00
0.15	0.33	1.95	12.94	26.20	59.50	351.46	100.00
0.17	0.63	2.28	13.52	30.53	64.22	409.45	100.00
0.20	1.14	2.65	14.25	35.56	68.95	477.01	100.00
0.23	1.93	3.09	15.17	41.43	73.65	555.71	100.00
0.27	3.03	3.60	16.33	48.27	78.14	647.41	100.00
0.31	4.36	4.19	17.79	56.23	82.32	754.23	100.00
0.36	5.73	4.88	19.58	65.51	86.06	878.67	100.00
0.42	7.00	5.69	21.73	76.32	89.32		
0.49	8.13	6.63	24.24	88.91	92.05		
0.58	9.09	7.72	27.11	103.58	94.28		

Tableau 2.8 Analyse granulométrique au laser du ciment SF1.

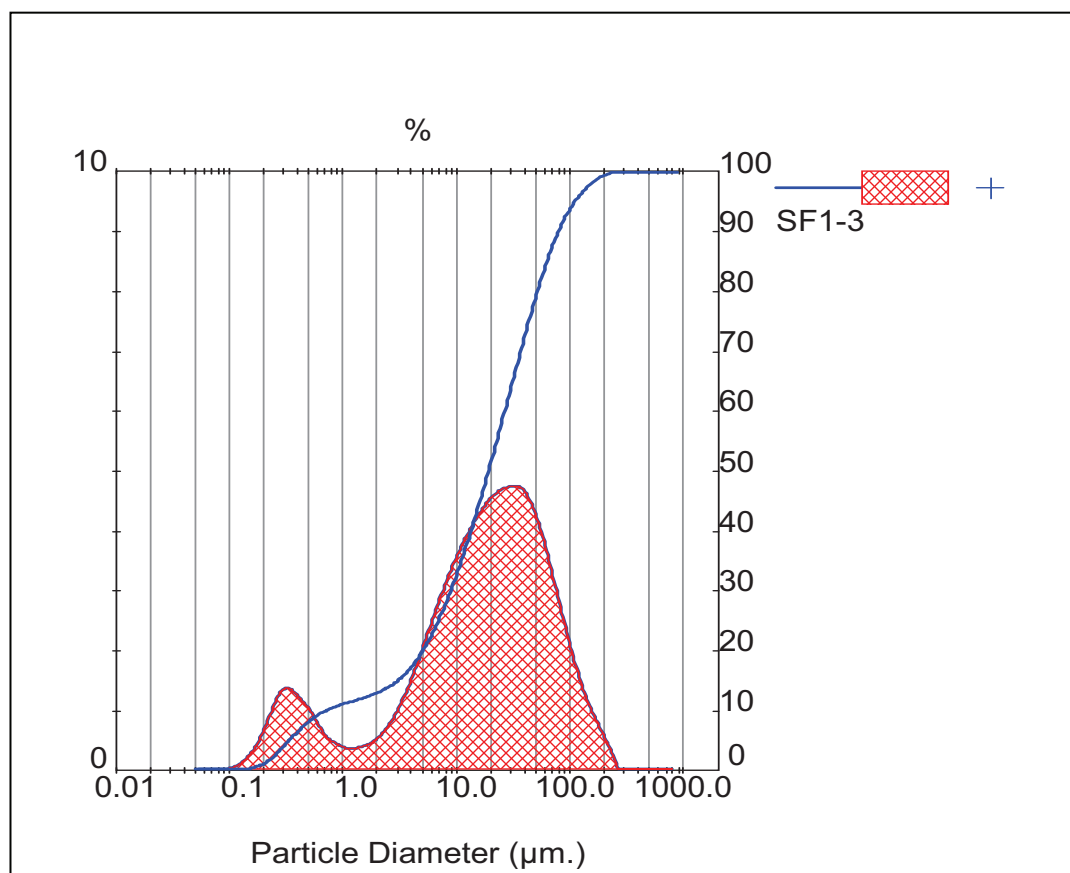


Figure 2.5 Courbe granulométrique du ciment SF1.

Analyse et courbe granulométrique de la deuxième finesse : SF2

Result: Analysis Table

ID: SF2	Run No: 5	Measured: 12/1/2004 08:26
File: MSILA	Rec. No: 2	Analysed: 23/3/2004 18:37
Path: C:\SIZERS\DATA\DATA\		Source: Analysed

Range: 300RF mm	Beam: 2.40 mm	Sampler: MS17	Obs': 15.6 %
Presentation: 3OHD		Analysis: Polydisperse	Residual: 0.556 %
Modifications: None			

Conc. = 0.0116 %Vol	Density = 3.152 g/cm ³	S.S.A. = 0.8706 m ² /g
Distribution: Volume	D[4, 3] = 24.20 μ m	D[3, 2] = 2.19 μ m
D(v, 0.1) = 0.57 μ m	D(v, 0.5) = 15.72 μ m	D(v, 0.9) = 54.69 μ m
Span = 3.441E+00	Uniformity = 1.138E+00	

Size (μ m)	Volume Under%	Size (μ m)	Volume Under%	Size (μ m)	Volume Under%	Size (μ m)	Volume Under%
0.05	0.00	0.67	10.88	9.00	33.80	120.67	98.47
0.06	0.00	0.78	11.49	10.48	37.84	140.58	98.90
0.07	0.00	0.91	12.00	12.21	42.20	163.77	99.24
0.08	0.01	1.06	12.44	14.22	46.83	190.80	99.53
0.09	0.02	1.24	12.85	16.57	51.69	222.28	99.77
0.11	0.05	1.44	13.28	19.31	56.74	258.95	99.92
0.13	0.12	1.68	13.75	22.49	61.92	301.68	100.00
0.15	0.27	1.95	14.28	26.20	67.20	351.46	100.00
0.17	0.56	2.28	14.94	30.53	72.56	409.45	100.00
0.20	1.07	2.65	15.75	35.56	77.77	477.01	100.00
0.23	1.91	3.09	16.77	41.43	82.63	555.71	100.00
0.27	3.13	3.60	18.05	48.27	86.97	647.41	100.00
0.31	4.63	4.19	19.66	56.23	90.61	754.23	100.00
0.36	6.21	4.88	21.64	65.51	93.46	878.67	100.00
0.42	7.66	5.69	24.04	76.32	95.54		
0.49	8.96	6.63	26.87	88.91	96.95		
0.58	10.05	7.72	30.13	103.58	97.87		

Tableau 2. 9 Analyse granulométrique au laser du ciment SF2.

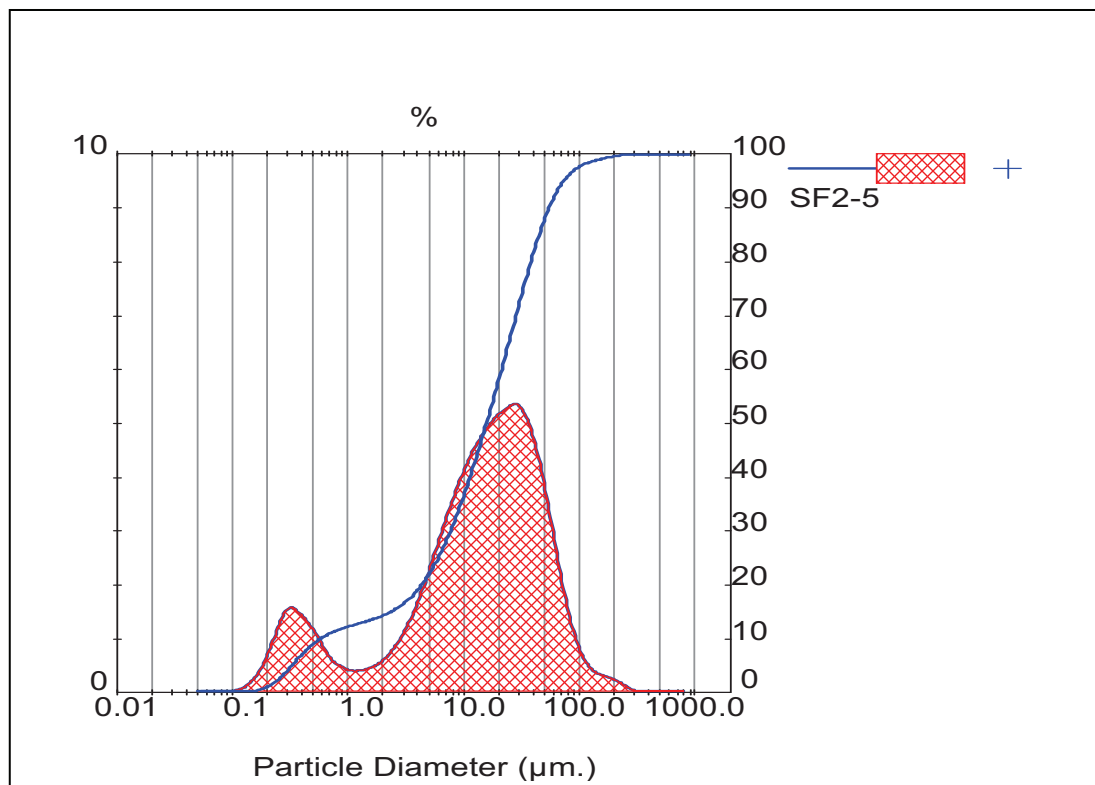


Figure 2.6 Courbe granulométrique du ciment SF2.

Analyse et courbe granulométrique de la troisième finesse : SF3

Result: Analysis Table

ID: SF3	Run No: 7	Measured: 12/1/2004 08:31
File: MSILA	Rec. No: 3	Analysed: 23/3/2004 18:39
Path: C:\SIZERS\DATA\DATA\		Source: Analysed
Range: 300RF mm	Beam: 2.40 mm	Sampler: MS17
Presentation: 3OHD	Analysis: Polydisperse	Obs': 15.2 %
Modifications: None		Residual: 0.435 %
Conc. = 0.0101 %Vol	Density = 3.156 g/cm ³	S.S.A = 0.9402 m ² /g
Distribution: Volume	D[4, 3] = 20.80 μ m	D[3, 2] = 2.02 μ m
D(v, 0.1) = 0.48 μ m	D(v, 0.5) = 12.72 μ m	D(v, 0.9) = 48.12 μ m
Span = 3.745E+00	Uniformity = 1.236E+00	

Size (um)	Volume Under%	Size (um)	Volume Under%	Size (um)	Volume Under%	Size (um)	Volume Under%
0.05	0.00	0.67	12.43	9.00	39.56	120.67	98.96
0.06	0.00	0.78	13.07	10.48	44.06	140.58	99.09
0.07	0.00	0.91	13.56	12.21	48.73	163.77	99.28
0.08	0.00	1.06	13.96	14.22	53.51	190.80	99.49
0.09	0.01	1.24	14.32	16.57	58.34	222.28	99.71
0.11	0.02	1.44	14.77	19.31	63.19	258.95	99.88
0.13	0.05	1.68	15.27	22.49	68.05	301.68	99.97
0.15	0.13	1.95	15.85	26.20	72.90	351.46	100.00
0.17	0.33	2.28	16.59	30.53	77.65	409.45	100.00
0.20	0.77	2.65	17.54	35.56	82.19	477.01	100.00
0.23	1.61	3.09	18.78	41.43	86.38	555.71	100.00
0.27	2.99	3.60	20.38	48.27	90.07	647.41	100.00
0.31	4.84	4.19	22.41	56.23	93.13	754.23	100.00
0.36	6.82	4.88	24.91	65.51	95.48	878.67	100.00
0.42	8.64	5.69	27.92	76.32	97.12		
0.49	10.22	6.63	31.40	88.91	98.14		
0.58	11.51	7.72	35.31	103.58	98.69		

Tableau 2.10 Analyse granulométrique au laser du ciment SF3

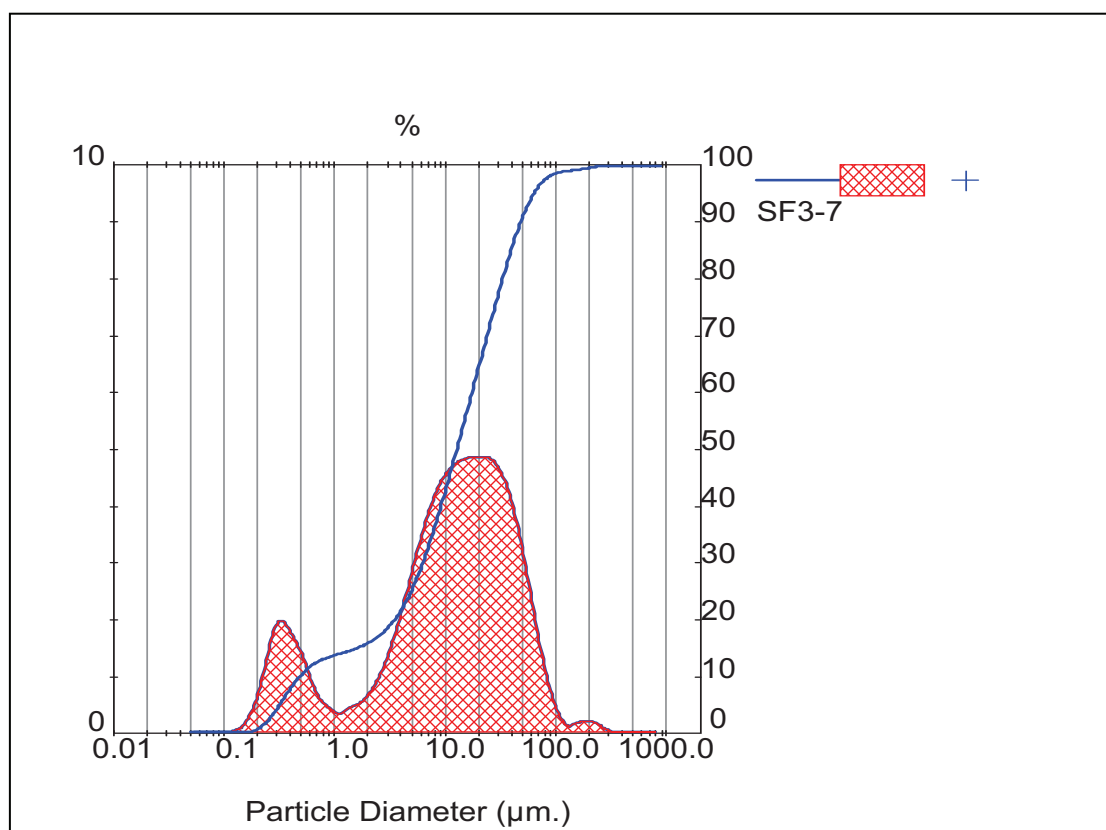


Figure 2.7 Courbe granulométrique du ciment SF3.

2.1.1.5.2 CIMENT COMPOSE DE AIN-EL-KEBIRA :

Analyse et courbe granulométrique de la première finesse : AF1

Result: Analysis Table

ID: AF1	Run No: 9	Measured: 12/1/2004 08:38
File: MSILA	Rec. No: 4	Analysed: 23/3/2004 18:40
Path: C:\SIZERS\DATA\DATA\		Source: Analysed
Range: 300RF mm	Beam: 2.40 mm	Sampler: MS17
Presentation: 3OHD	Analysis: Polydisperse	Obs': 19.2 %
Modifications: None		Residual: 0.456 %
Conc. = 0.0179 %Vol	Density = 3.177 g/cm ³	S.S.A = 0.7221 m ² /g
Distribution: Volume	D[4, 3] = 38.85 μ m	D[3, 2] = 2.62 μ m
D(v, 0.1) = 1.01 μ m	D(v, 0.5) = 22.60 μ m	D(v, 0.9) = 99.49 μ m
Span = 4.357E+00	Uniformity = 1.326E+00	

Size (um)	Volume Under%	Size (um)	Volume Under%	Size (um)	Volume Under%	Size (um)	Volume Under%
0.05	0.00	0.67	8.84	9.00	26.99	120.67	92.87
0.06	0.00	0.78	9.35	10.48	30.08	140.58	94.86
0.07	0.01	0.91	9.76	12.21	33.44	163.77	96.59
0.08	0.01	1.06	10.11	14.22	37.10	190.80	98.02
0.09	0.03	1.24	10.42	16.57	41.06	222.28	99.08
0.11	0.08	1.44	10.73	19.31	45.31	258.95	99.74
0.13	0.16	1.68	11.07	22.49	49.85	301.68	100.00
0.15	0.32	1.95	11.47	26.20	54.60	351.46	100.00
0.17	0.60	2.28	11.97	30.53	59.48	409.45	100.00
0.20	1.06	2.65	12.61	35.56	64.39	477.01	100.00
0.23	1.77	3.09	13.44	41.43	69.23	555.71	100.00
0.27	2.75	3.60	14.51	48.27	73.94	647.41	100.00
0.31	3.93	4.19	15.84	56.23	78.22	754.23	100.00
0.36	5.16	4.88	17.47	65.51	82.00	878.67	100.00
0.42	6.29	5.69	19.40	76.32	85.28		
0.49	7.30	6.63	21.64	88.91	88.13		
0.58	8.17	7.72	24.18	103.58	90.63		

Tableau 2.11 Analyse granulométrique au laser du ciment AF1.

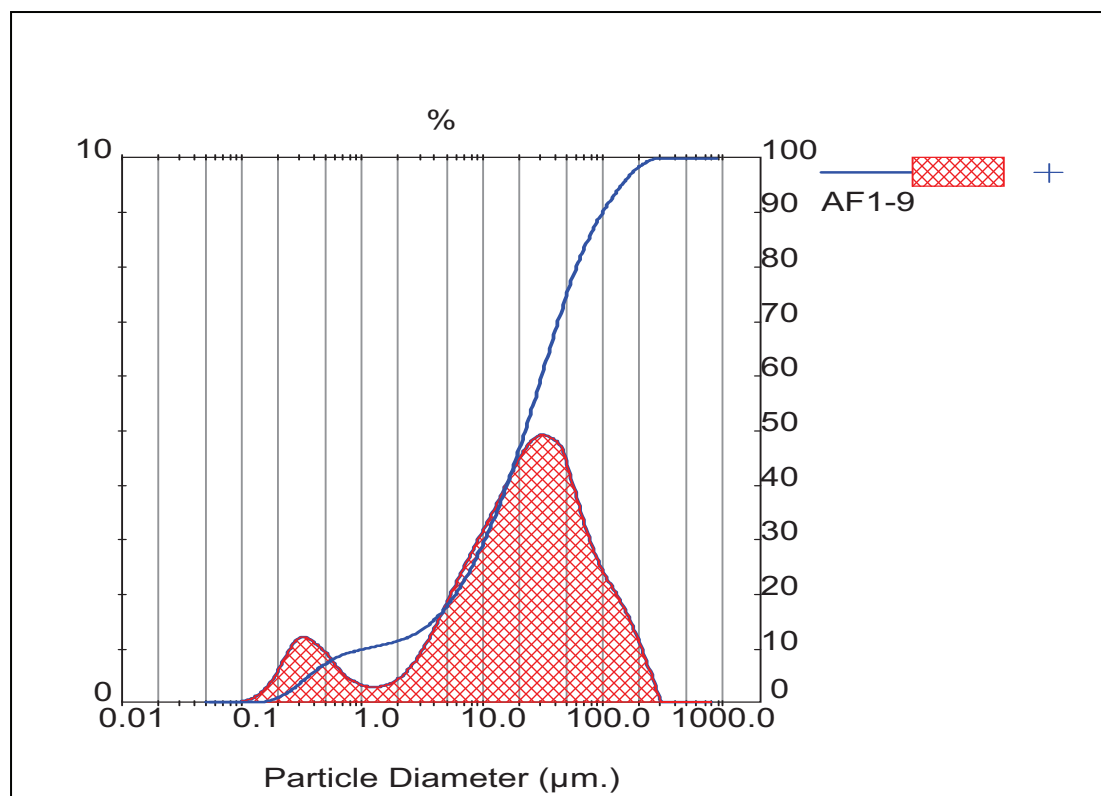


Figure 2.8 Courbe granulométrique du ciment AF1.

Analyse et courbe granulométrique de la deuxième finesse : AF2

Result: Analysis Table

ID: AF2	Run No: 11	Measured: 12/1/2004 08:42
File: MSILA	Rec. No: 5	Analysed: 23/3/2004 18:42
Path: C:\SIZERS\DATA\DATA\		Source: Analysed
Range: 300RF mm	Beam: 2.40 mm	Sampler: MS17
Presentation: 3OHD	Analysis: Polydisperse	Obs': 20.5 %
Modifications: None		Residual: 0.310 %
Conc. = 0.0149 %Vol	Density = 3.166 g/cm ³	S.S.A.= 0.8678 m ² /g
Distribution: Volume	D[4, 3] = 22.87 μ m	D[3, 2] = 2.18 μ m
D(v, 0.1) = 0.54 μ m	D(v, 0.5) = 14.57 μ m	D(v, 0.9) = 51.47 μ m
Span = 3.494E+00	Uniformity = 1.178E+00	

Size (um)	Volume Under%	Size (um)	Volume Under%	Size (um)	Volume Under%	Size (um)	Volume Under%
0.05	0.00	0.67	11.35	9.00	36.54	120.67	98.74
0.06	0.00	0.78	12.00	10.48	40.58	140.58	98.93
0.07	0.00	0.91	12.53	12.21	44.84	163.77	99.10
0.08	0.00	1.06	12.96	14.22	49.28	190.80	99.33
0.09	0.01	1.24	13.35	16.57	53.89	222.28	99.59
0.11	0.02	1.44	13.81	19.31	58.67	258.95	99.82
0.13	0.05	1.68	14.32	22.49	63.64	301.68	99.95
0.15	0.13	1.95	14.90	26.20	68.78	351.46	100.00
0.17	0.33	2.28	15.63	30.53	74.01	409.45	100.00
0.20	0.73	2.65	16.56	35.56	79.16	477.01	100.00
0.23	1.49	3.09	17.75	41.43	84.02	555.71	100.00
0.27	2.72	3.60	19.25	48.27	88.38	647.41	100.00
0.31	4.37	4.19	21.13	56.23	92.01	754.23	100.00
0.36	6.14	4.88	23.43	65.51	94.80	878.67	100.00
0.42	7.78	5.69	26.14	76.32	96.72		
0.49	9.23	6.63	29.26	88.91	97.88		
0.58	10.45	7.72	32.74	103.58	98.48		

Tableau 2.12 Analyse granulométrique au laser du ciment AF2.

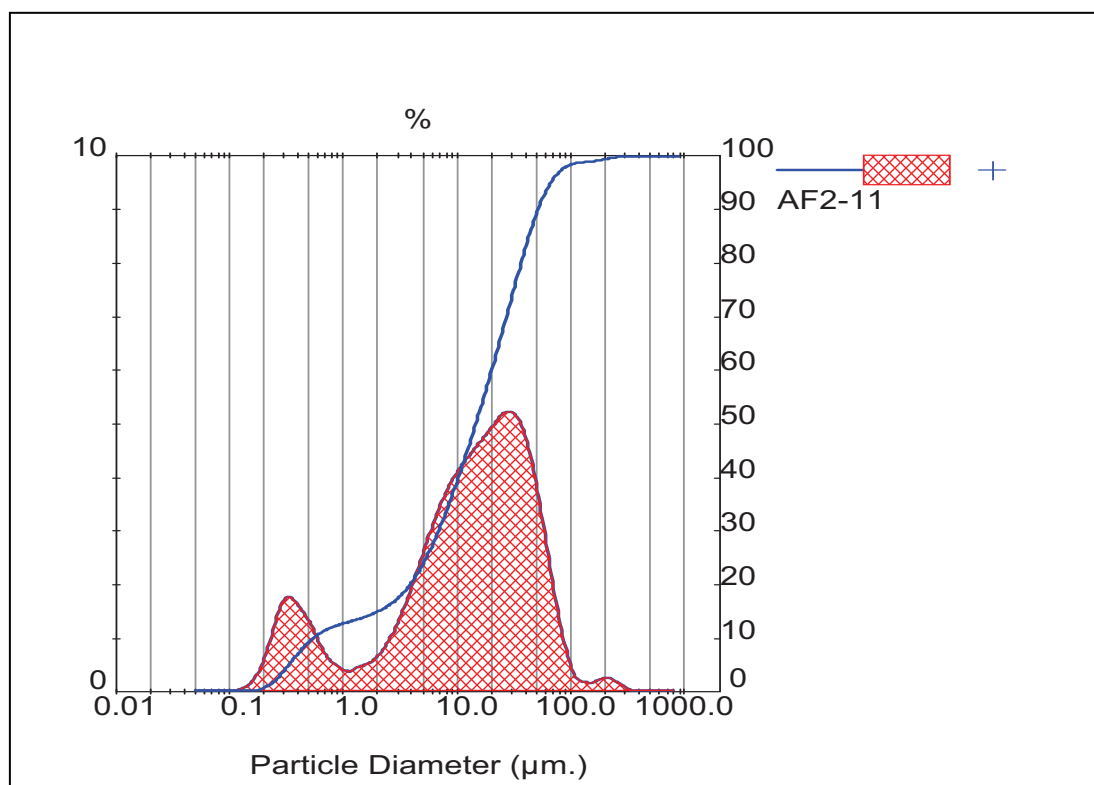


Figure 2.9 Courbe granulométrique du ciment AF2.

Analyse et courbe granulométrique de la troisième finesse : AF3

Result: Analysis Table

ID: AF3	Run No: 14	Measured: 12/1/2004 09:06
File: MSILA	Rec. No: 6	Analysed: 23/3/2004 18:44
Path: C:\SIZERS\DATA\DATA\		Source: Analysed
Range: 300RF mm	Beam: 2.40 mm	Sampler: MS17
Presentation: 3OHD	Analysis: Polydisperse	Obs': 26.7 %
Modifications: None		Residual: 0.411 %
Conc. = 0.0175 %Vol	Density = 3.152 g/cm ³	S.S.A. = 1.0593 m ² /g
Distribution: Volume	D[4, 3] = 21.12 μ m	D[3, 2] = 1.80 μ m
D(v, 0.1) = 0.44 μ m	D(v, 0.5) = 12.03 μ m	D(v, 0.9) = 46.81 μ m
Span = 3.855E+00	Uniformity = 1.373E+00	

Size (um)	Volume Under%	Size (um)	Volume Under%	Size (um)	Volume Under%	Size (um)	Volume Under%
0.05	0.00	0.67	13.92	9.00	41.14	120.67	98.52
0.06	0.00	0.78	14.74	10.48	45.70	140.58	98.52
0.07	0.00	0.91	15.41	12.21	50.47	163.77	98.57
0.08	0.00	1.06	15.99	14.22	55.35	190.80	98.77
0.09	0.01	1.24	16.53	16.57	60.24	222.28	99.10
0.11	0.03	1.44	17.15	19.31	65.09	258.95	99.46
0.13	0.09	1.68	17.80	22.49	69.87	301.68	99.77
0.15	0.21	1.95	18.51	26.20	74.52	351.46	99.95
0.17	0.49	2.28	19.31	30.53	78.99	409.45	100.00
0.20	1.05	2.65	20.28	35.56	83.24	477.01	100.00
0.23	2.03	3.09	21.45	41.43	87.17	555.71	100.00
0.27	3.57	3.60	22.92	48.27	90.66	647.41	100.00
0.31	5.57	4.19	24.76	56.23	93.55	754.23	100.00
0.36	7.69	4.88	27.04	65.51	95.75	878.67	100.00
0.42	9.65	5.69	29.82	76.32	97.23		
0.49	11.38	6.63	33.12	88.91	98.07		
0.58	12.83	7.72	36.91	103.58	98.43		

Tableau 2.13 Analyse granulométrique au laser du ciment AF3.

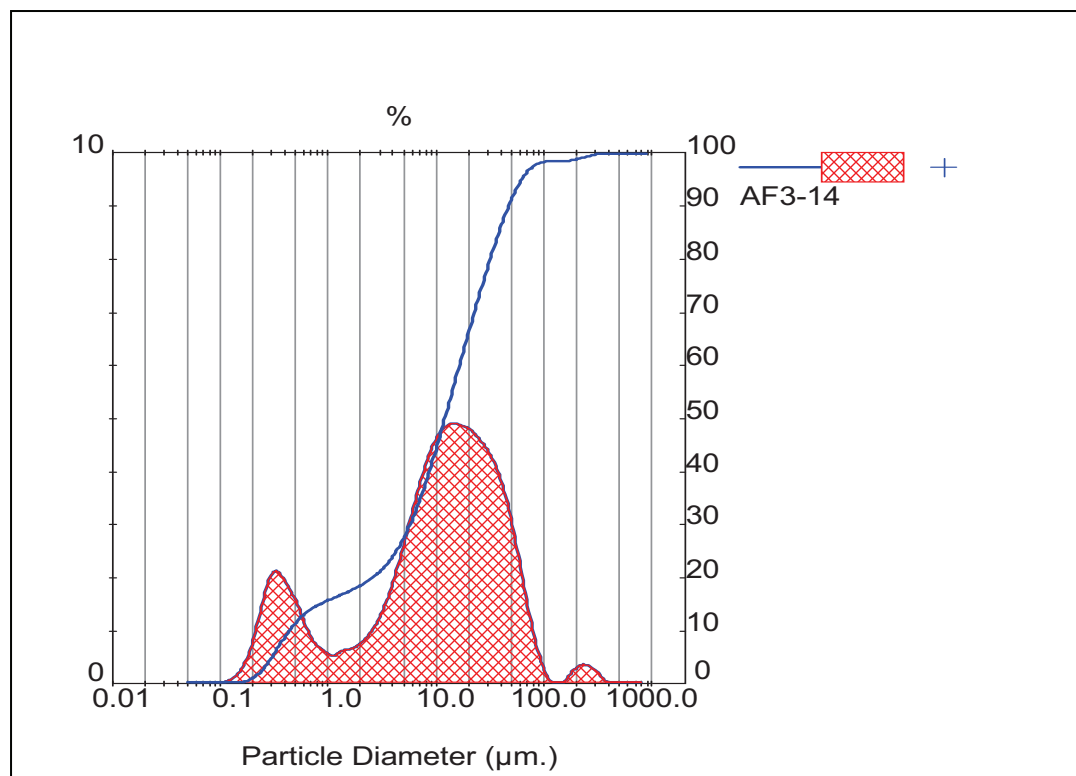


Figure 2.10 Courbe granulométrique du ciment AF3.

2.1.1.5.3 CIMENT COMPOSE DE HADJAR-SOUD

Analyse et courbe granulométrique de la première finesse : HF1

Result: Analysis Table

ID: HF1	Run No: 16	Measured: 12/1/2004 09:12
File: MSILA	Rec. No: 7	Analysed: 23/3/2004 18:45
Path: C:\SIZERS\DATA\DATA\		Source: Analysed
Range: 300RF mm	Beam: 2.40 mm	Sampler: MS17
Presentation: 3OHD	Analysis: Polydisperse	Obs': 18.7 %
Modifications: None		Residual: 0.615 %
Conc. = 0.0145 %Vol	Density = 3.121 g/cm ³	S.S.A = 0.9057 m ² /g
Distribution: Volume	D[4, 3] = 25.67 μ m	D[3, 2] = 2.12 μ m
D(v, 0.1) = 0.54 μ m	D(v, 0.5) = 16.98 μ m	D(v, 0.9) = 60.28 μ m
Span = 3.518E+00	Uniformity = 1.114E+00	

Size (um)	Volume Under%	Size (um)	Volume Under%	Size (um)	Volume Under%	Size (um)	Volume Under%
0.05	0.00	0.67	11.27	9.00	31.89	120.67	98.45
0.06	0.00	0.78	11.90	10.48	35.72	140.58	99.11
0.07	0.00	0.91	12.41	12.21	39.91	163.77	99.58
0.08	0.01	1.06	12.84	14.22	44.42	190.80	99.88
0.09	0.03	1.24	13.22	16.57	49.21	222.28	100.00
0.11	0.07	1.44	13.59	19.31	54.22	258.95	100.00
0.13	0.17	1.68	13.98	22.49	59.39	301.68	100.00
0.15	0.35	1.95	14.42	26.20	64.67	351.46	100.00
0.17	0.69	2.28	14.95	30.53	70.03	409.45	100.00
0.20	1.26	2.65	15.62	35.56	75.23	477.01	100.00
0.23	2.16	3.09	16.48	41.43	80.13	555.71	100.00
0.27	3.42	3.60	17.57	48.27	84.57	647.41	100.00
0.31	4.95	4.19	18.97	56.23	88.45	754.23	100.00
0.36	6.54	4.88	20.72	65.51	91.67	878.67	100.00
0.42	8.01	5.69	22.87	76.32	94.22		
0.49	9.31	6.63	25.45	88.91	96.13		
0.58	10.42	7.72	28.46	103.58	97.50		

Tableau 2.14 Analyse granulométrique au laser du ciment HF1.

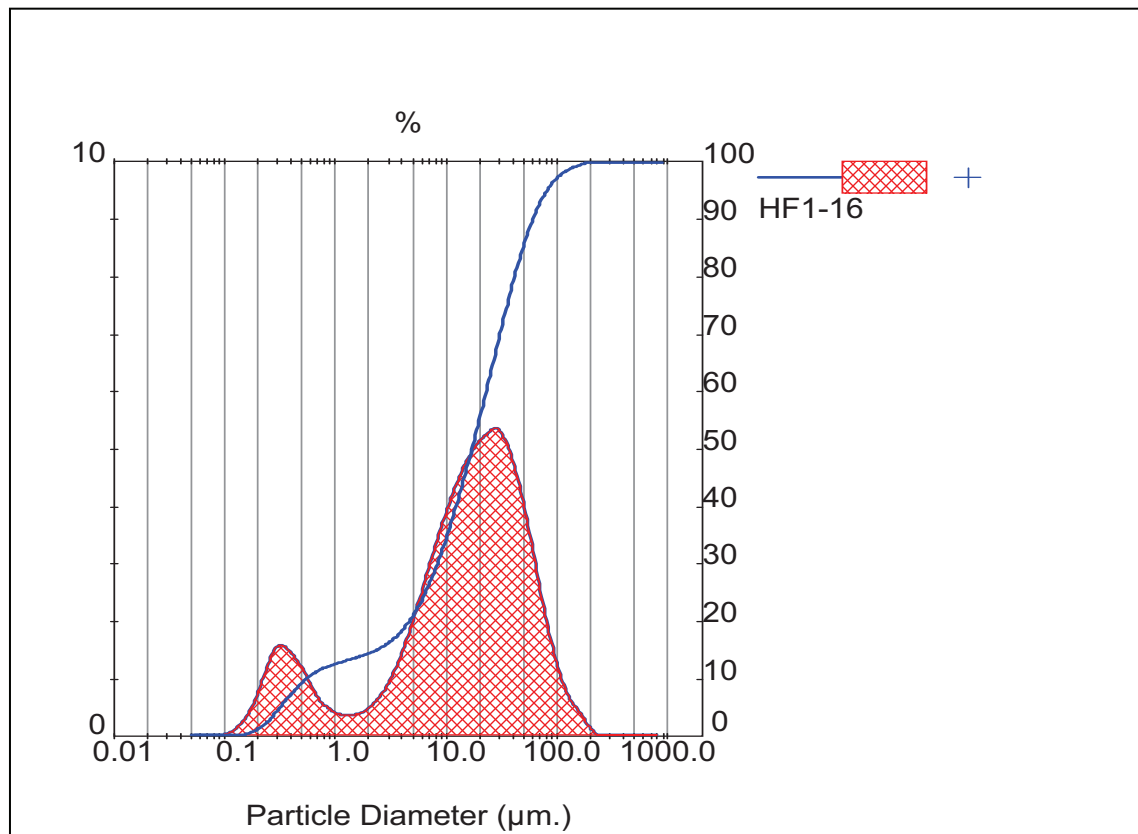


Figure 2.11 Courbe granulométrique du ciment HF1.

Analyse et courbe granulométrique de la deuxième finesse : HF2

Result: Analysis Table

ID: HF2	Run No: 18	Measured: 12/1/2004 09:18
File: MSILA	Rec. No: 8	Analysed: 23/3/2004 18:46
Path: C:\SIZERS\DATA\DATA\		Source: Analysed
Range: 300RF mm	Beam: 2.40 mm	Sampler: MS17
Presentation: 3OHD	Analysis: Polydisperse	Obs': 21.2 %
Modifications: None		Residual: 0.677 %
Conc. = 0.0143 %Vol	Density = 3.121 g/cm ³	S.S.A = 1.0837 m ² /g
Distribution: Volume	D[4, 3] = 22.43 μ m	D[3, 2] = 1.77 μ m
D(v, 0.1) = 0.44 μ m	D(v, 0.5) = 13.17 μ m	D(v, 0.9) = 51.31 μ m
Span = 3.863E+00	Uniformity = 1.317E+00	

Size (um)	Volume Under%	Size (um)	Volume Under%	Size (um)	Volume Under%	Size (um)	Volume Under%
0.05	0.00	0.67	13.38	9.00	38.66	120.67	97.99
0.06	0.00	0.78	14.08	10.48	43.00	140.58	98.52
0.07	0.01	0.91	14.68	12.21	47.63	163.77	98.98
0.08	0.02	1.06	15.20	14.22	52.46	190.80	99.39
0.09	0.04	1.24	15.70	16.57	57.41	222.28	99.72
0.11	0.10	1.44	16.21	19.31	62.41	258.95	99.92
0.13	0.22	1.68	16.76	22.49	67.40	301.68	100.00
0.15	0.46	1.95	17.37	26.20	72.35	351.46	100.00
0.17	0.88	2.28	18.11	30.53	77.07	409.45	100.00
0.20	1.60	2.65	19.00	35.56	81.47	477.01	100.00
0.23	2.70	3.09	20.12	41.43	85.41	555.71	100.00
0.27	4.23	3.60	21.52	48.27	88.81	647.41	100.00
0.31	6.06	4.19	23.27	56.23	91.60	754.23	100.00
0.36	7.94	4.88	25.44	65.51	93.77	878.67	100.00
0.42	9.66	5.69	28.05	76.32	95.38		
0.49	11.17	6.63	31.14	88.91	96.54		
0.58	12.42	7.72	34.68	103.58	97.37		

Tableau 2.15 Analyse granulométrique au laser du ciment HF2.

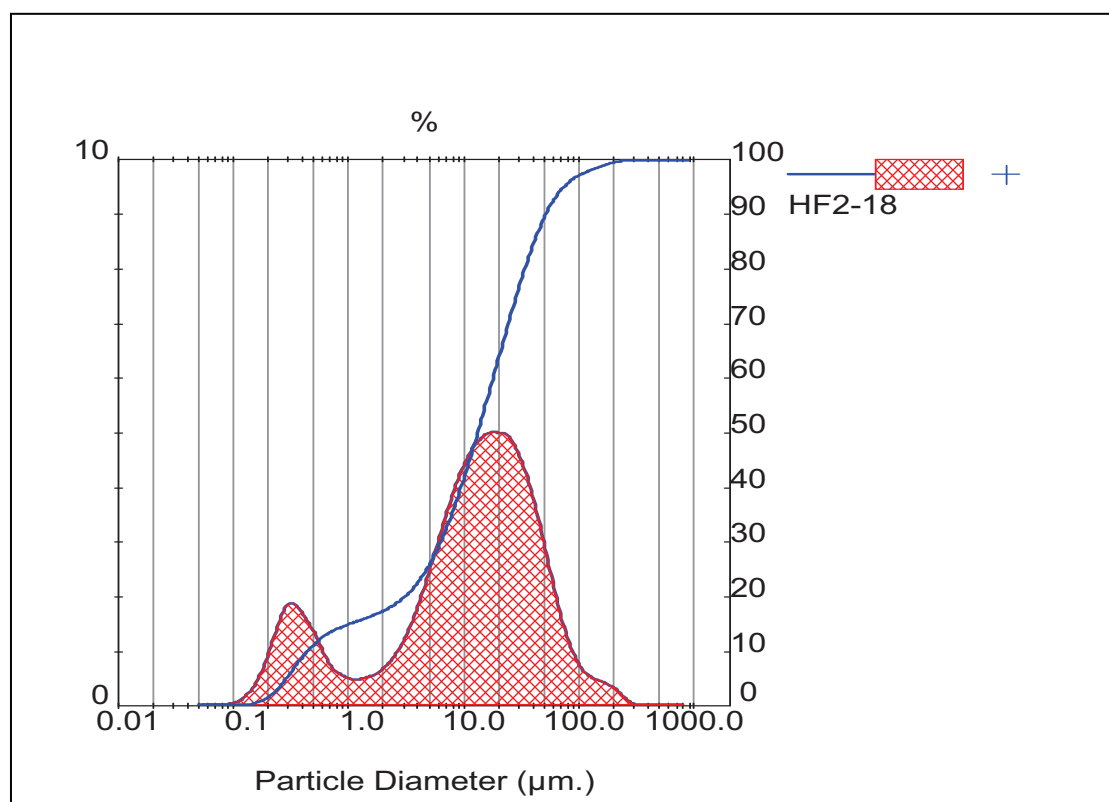


Figure 2.12 Courbe granulométrique du ciment HF2.

Analyse et courbe granulométrique de la troisième finesse : HF3

Result: Analysis Table

ID: HF3	Run No: 20	Measured: 12/1/2004 09:26
File: MSILA	Rec. No: 9	Analysed: 23/3/2004 18:47
Path: C:\SIZERS\DATA\DATA\		Source: Analysed
Range: 300RF mm	Beam: 2.40 mm	Sampler: MS17
Presentation: 3OHD	Analysis: Polydisperse	Obs': 19.1 %
Modifications: None		Residual: 0.844 %
Conc. = 0.0127 %Vol	Density = 3.091 g/cm ³	S.S.A. = 1.1239 m ² /g
Distribution: Volume	D[4, 3] = 22.10 μ m	D[3, 2] = 1.73 μ m
D(v, 0.1) = 0.42 μ m	D(v, 0.5) = 12.89 μ m	D(v, 0.9) = 49.53 μ m
Span = 3.811E+00	Uniformity = 1.321E+00	

Size (um)	Volume Under%	Size (um)	Volume Under%	Size (um)	Volume Under%	Size (um)	Volume Under%
0.05	0.00	0.67	13.92	9.00	38.70	120.67	97.65
0.06	0.00	0.78	14.61	10.48	43.31	140.58	98.32
0.07	0.01	0.91	15.18	12.21	48.22	163.77	98.92
0.08	0.02	1.06	15.65	14.22	53.30	190.80	99.41
0.09	0.04	1.24	16.07	16.57	58.46	222.28	99.75
0.11	0.10	1.44	16.50	19.31	63.60	258.95	99.93
0.13	0.23	1.68	16.96	22.49	68.64	301.68	100.00
0.15	0.47	1.95	17.47	26.20	73.56	351.46	100.00
0.17	0.92	2.28	18.10	30.53	78.20	409.45	100.00
0.20	1.67	2.65	18.88	35.56	82.47	477.01	100.00
0.23	2.83	3.09	19.88	41.43	86.28	555.71	100.00
0.27	4.43	3.60	21.17	48.27	89.51	647.41	100.00
0.31	6.35	4.19	22.84	56.23	92.12	754.23	100.00
0.36	8.32	4.88	24.96	65.51	94.10	878.67	100.00
0.42	10.11	5.69	27.60	76.32	95.50		
0.49	11.68	6.63	30.78	88.91	96.46		
0.58	12.96	7.72	34.49	103.58	97.13		

Tableau 2.16 Analyse granulométrique au laser du ciment HF3.

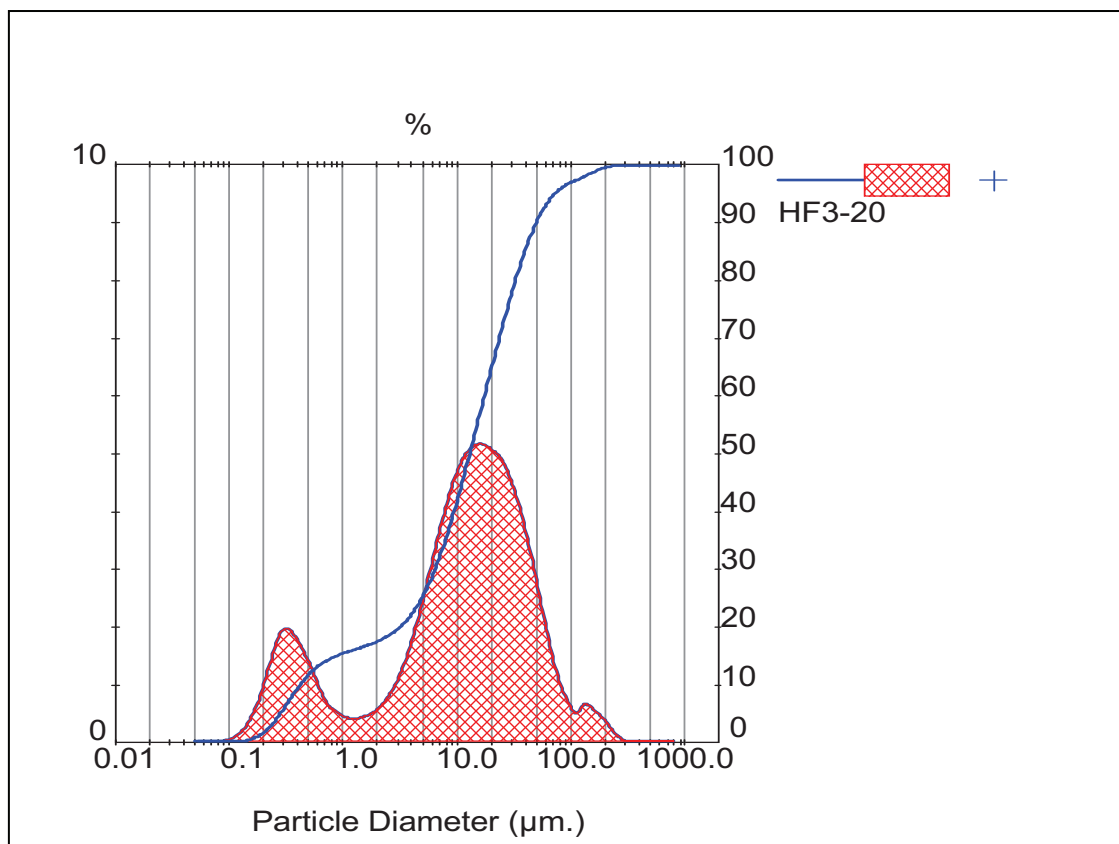


Figure 2.13 Analyse granulométrique au laser du ciment HF3.

Les courbes de granulométrie à laser (figures 2.14, 2.15 et 2.16) montrent que le fuseau granulaire est différent d'un ciment à un autre.

On remarque que :

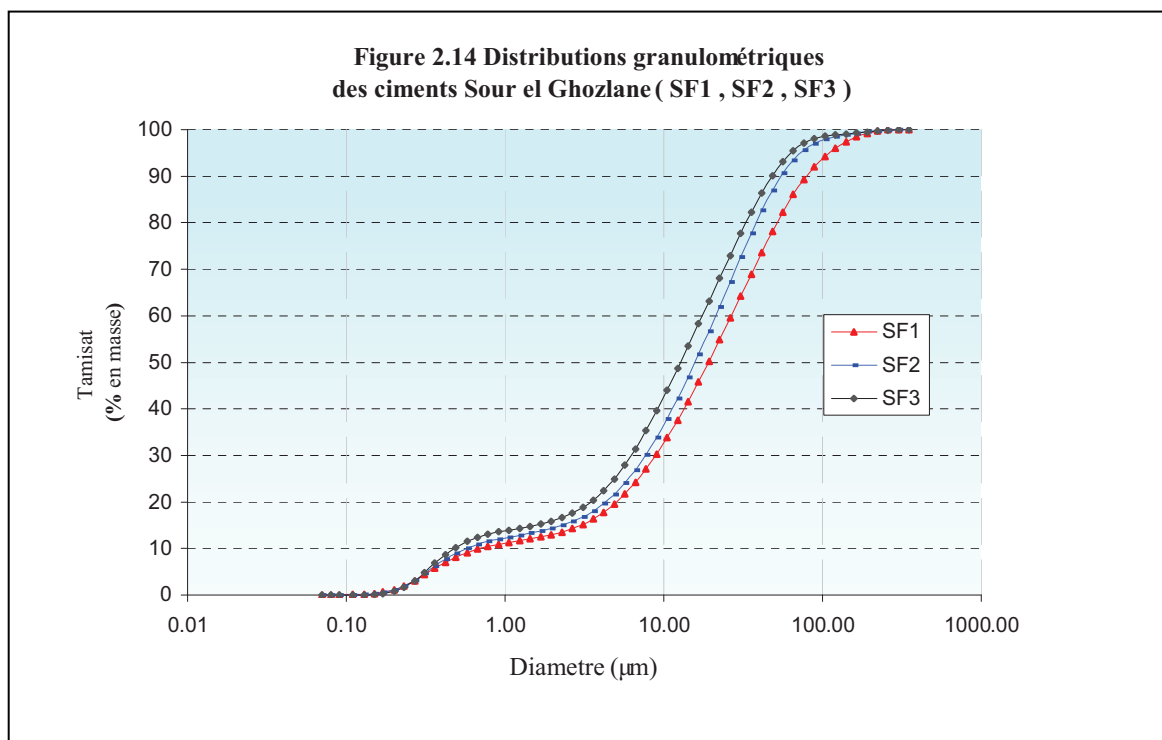
* L'augmentation de la surface Blaine pour chaque type de ciment est bien caractérisée par la rétrogradation des diamètres D_{10} , $D_{\text{médian}}$ et D_{90} .

Les premières finesses (SF1, AF1, HF1) possèdent un D_{10} , $D_{\text{médian}}$ et D_{90} assez différent. Par ailleurs, le D_{10} , $D_{\text{médian}}$ et D_{90} des deuxièmes finesses (SF2, AF2, HF2) ont tendance à se rapprocher.

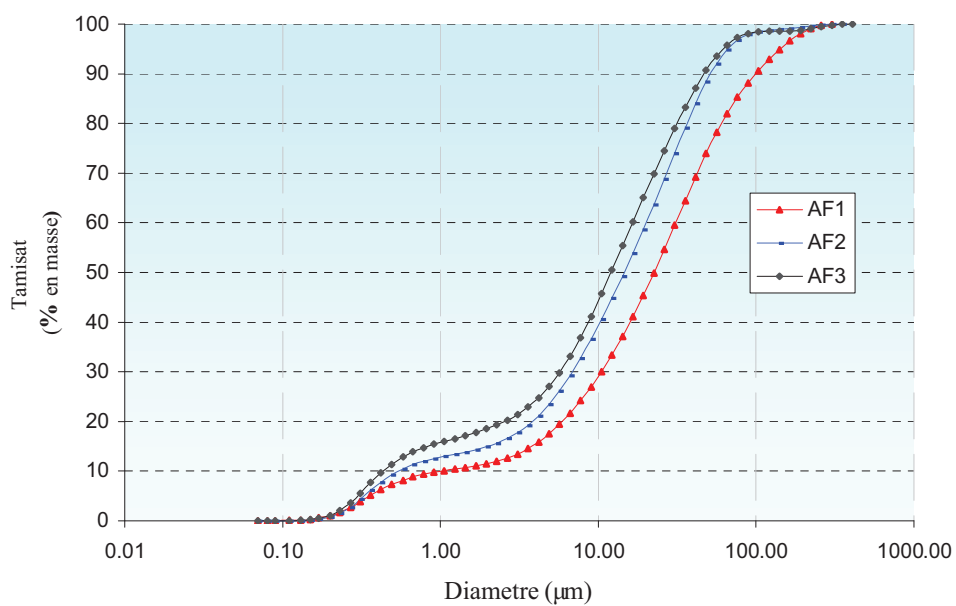
Les troisièmes finesses (SF3, AF3, HF3) possèdent un D_{10} , $D_{\text{médian}}$ et D_{90} globalement similaire.

	CPJ .SG		
Diamètre (μ m)	SF1	SF2	SF3
D ₁₀	0.70	0.57	0.48
D médian	19.14	15.72	12.72
D ₉₀	79.08	54.69	48.12
	CPJ .AK		
Diamètre (μ m)	AF1	AF2	AF3
D ₁₀	1.01	0.54	0.44
D médian	22.60	14.57	12.03
D ₉₀	99.49	51.47	46.81
	CPJ .HS		
Diamètre (μ m)	HF1	HF2	HF3
D ₁₀	0.54	0.48	0.42
D médian	16.98	14.84	12.89
D ₉₀	60.28	56.93	49.53

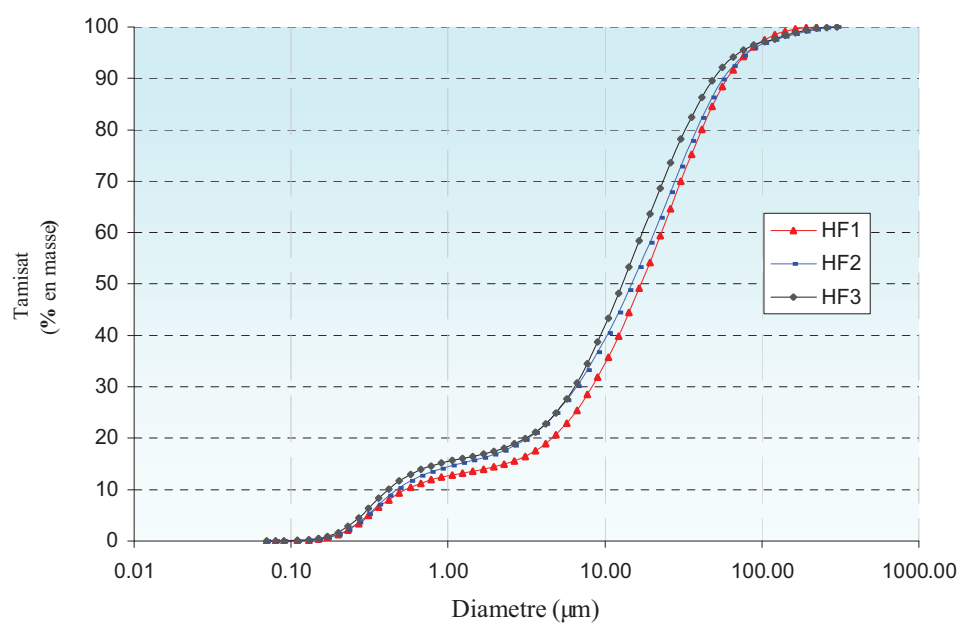
Tableau 2.17 Diamètres (D_{10} , $D_{\text{médian}}$ et D_{90}) des trois ciments étudiés.



**Figure 2.15 Distributions granulométriques
des ciments Ain el Kebira (AF1 , AF2 , AF3)**



**Figure 2.16 Distributions granulométriques
des ciments Hdjar Essoud (HF1, HF2 , HF3)**



2.1.2 LES GRANULATS

Les caractéristiques physiques et l'analyse granulométrique des granulats (fins et gros) ont été déterminées au laboratoire des travaux publics de l'EST (Sétif).

2.1.2.1 CARACTERISTIQUES PHYSIQUES

2.1.2.1.1 LE SABLE (granulats fins)

Le sable utilisé dans cette étude provient de oued Maïter (Boussaâda).

Le sable de Boussaâda, est un sable siliceux, ses grains roulés de formes arrondies et de surfaces lisses, est caractérisé par sa finesse.

Masse volumique absolue ou masse spécifique :

La valeur moyenne de la masse spécifique des échantillons testés est : $\gamma_s = 2,66 \text{ Kg/l}$.

Masse volumique apparente ou masse volumique :

La valeur moyenne de la masse volumique apparente du sable testé est: $\rho_s = 1,52 \text{ Kg/l}$.

Porosité :

Pour notre sable, $P_s = 42,86 \%$

Equivalent de sable :

Dans notre cas , $E.S = 72 \%$.

Donc on peut conclure qu'il s'agit d'un sable propre à faible pourcentage de fines argileuses convenant parfaitement pour les bétons de haute qualité (valeurs optimales $70 \leq E.S \leq 80$) .

2.1.2.1.2 LES PIERRES CONCASSEES (gros granulats)

Les pierres concassées utilisées pour la confection du béton proviennent de la station de concassage d'une carrière située à 25 Km de M'sila en allant vers Bordj Bou-Arréridj (carrière de COSIDER).

Les dimensions de graviers concassés utilisés dans notre travail expérimental sont le 3/8 et le 8/15.

Masse volumique absolue ou masse spécifique

$$\gamma_g (3/8) = 2,62 \text{ Kg/l}$$

$$\gamma_g (8/15) = 2,64 \text{ Kg/l}$$

Masse volumique apparente ou masse volumique

$$\rho_g(3/8) = 1,34 \text{ Kg/l}$$

$$\rho_g(8/15) = 1,37 \text{ Kg/l}$$

Porosité

$$P_g(3/8) = 48,85 \%$$

$$P_g(8/15) = 48,11 \%$$

Impuretés des pierres concassées

Fraction des pierres concassés	Impuretés en (%)	Spécification
3/8	0.87	< 2 %
8/15	0.99	< 2 %

Tableau 2.18 Impuretés des pierres concassées testées.

2.1.2.2 ANALYSE GRANULOMETRIQUE (tamisage à sec)

L'analyse granulométrique a pour objet de déterminer ou de définir la grosseur des grains qui constituent les granulats (le sable et la pierre concassée) et le pourcentage de chaque grosseur.

Eviter la confusion fréquente entre :

Granulométrie : science qui pour but la détermination des dimensions des grains.

Granularité : étude de la distribution dimensionnelle des grains d'un granulat.

Les classes granulaires d'un matériau pulvérulent sont déterminées par essai granulométrique.

Le jeu de tamis fractionne le matériau pulvérulent en plusieurs classes granulaires, il est choisi en fonction de la nature du matériau et de la précision exigée.

Tamis : dans lesquels l'organe de séparation est constitué d'une toile métallique ou d'une tôle perforée définissant des trous carrées.

Passoires : dans lesquels l'organe de séparation est constitué d'une toile métallique ou d'une tôle perforée définissant des trous circulaires.

Le module de finesse d'un granulat est égal au 1/100e de la somme des refus, exprimés en pourcentage sur les différents tamis de la série composée du module 23 au 38. C'est un facteur très important qui nous permet de juger la qualité du sable.

Les résultats de l'analyse granulométrique des granulats sont présentés dans le tableau 2.18. La constitution du mélange des granulats est donnée au tableau 2.19.

Tamis (mm)	Refus cumulés (%)	Tamisât en (%)	Refus cumulés (%)	Tamisât en (%)	Refus cumulés (%)	Tamisât en (%)
20,000	0	100				
16,000	1	99				
12,500	34	66				
10,000	73	27	0	100		
8,000	91	9	1	99		
6,300	99	1	20	80		
5,000	100	0	43	57	0	100
2,500			98	2	1	99
1,600			99	1	5	95
0,630					13	87
0,315					43	57
0,160					89	11
0,080					97	3
	Gravier 8/15		Gravier 3/8		Sable	

Tableau 2.19 Analyse granulométrique des granulats utilisés.

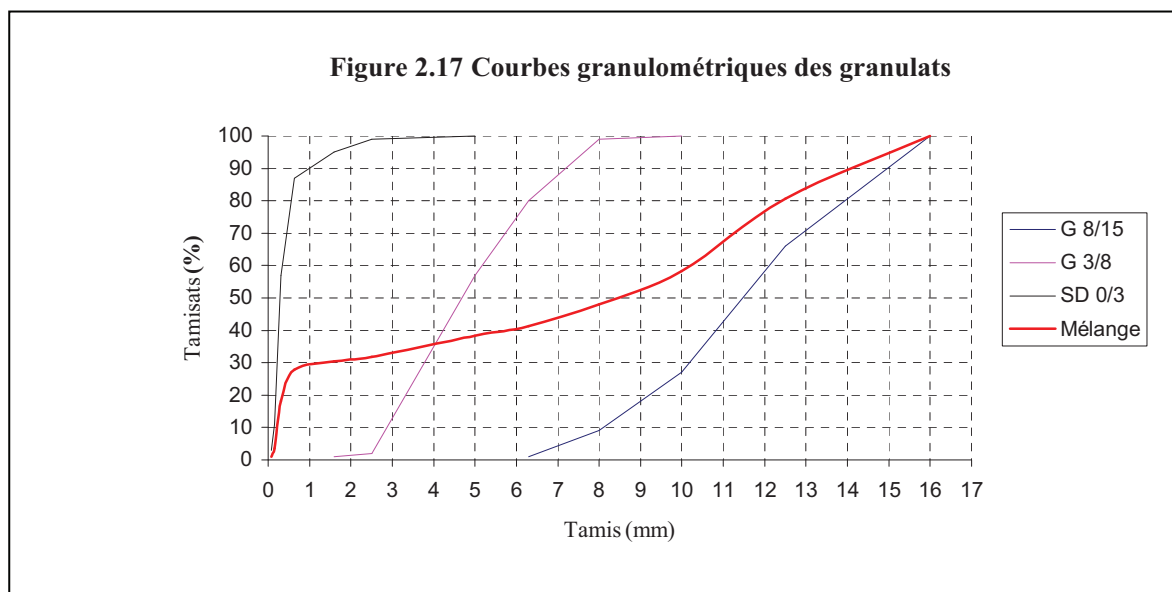
Le module de finesse du sable utilisé est $M_f = 1,51$ (il s'agit d'un sable fin).

Constitution du mélange des granulats

Fractions	Pondérale
G 8/15	= 57.00 %
G 3/8	= 11.00 %
SD 0/3	= 32.00 %

Tamis (mm)	16,000	12,500	10,000	8,000	6,300	5,000	2,500	1,600	0,630	0,315	0,160	0,080
Mélange	100,00	80,62	58,39	48,02	41,37	38,27	31,90	30,51	27,84	18,24	3,52	0,96

Tableau 2.20 Constitution du mélange des granulats.



2.1.3 L'EAU DE GÂCHAGE

L'eau de gâchage utilisée pour la confection du béton et du mortier doit être pure que possible, elle ne doit pas contenir une quantité excessive de vase, de matières organiques, acides, sels, matières sucrées, etc. ..

L'eau de gâchage utilisée dans notre étude est une eau potable «eau du robinet» fournie au laboratoire de Génie-civil à l'université de M'sila. L'analyse chimique a été effectuée au laboratoire de l'EPIDEMIA de M'sila.

Paramètres organoleptiques	Unité		Norme AF P 18 303
Couleur	Unit	Claire	
Odeur	Dilut.	Bonne	
Goût	Dilut	bon	

Paramètres physico-chimiques	Unité		
PH		7.94	≥ 4
Potentiel redox Eh	MV	-60.6	
Conductivité à 20°C	$\mu\text{s/cm}$	1926	
Turbidité	NTU	2.05	
Oxygène dissous	Mg/l	5.47	
Salinité	%	09	
CO ₂ libre	Mg/l	9.26	
CO ₂ Total	Mg/l	223.96	

PARAMETRE DE POLLUTION			
Ammonium NH ₄ ⁺	Mg/l	00	
Nitrate NO ₃ ⁻	Mg/l	8.6	≤ 500

D. MINIRALISATION			
Calcium Ca ⁺⁺	Mg/l	200	≤ 2000
Magnésium Mg ⁺⁺	Mg/l	37.2	≤ 2000
Chlorures Cl ⁻	Mg/l	265	≤ 2000
Sulfates SO ₄ ⁻²	Mg/l	760.48	≤ 2000
Bicarbonate HCO ₃ ⁻	Mg/l	244	
Carbonate CO ₃ ⁻²	Mg/l	00	
Dureté totale (TH)	F°	80.5	
Dureté permanente	F°	60.5	
Titre alcalin complet	F°	20	
Fer F ⁺²	F°	0.04	

Tableau 2.21 Analyse chimique et minéralogique de l'eau de gâchage utilisée.

Cette eau est acceptable pour la confection du béton et du mortier étudiés (tableau 2.21).

L'analyse chimique réalisée de l'eau de gâchage utilisée dans notre travail expérimental confirme la bonne qualité de cette eau (composition acceptable selon les exigences).

2.2 METHODES D'ESSAIS

2.2.1 ESSAI SUR LE CIMENT ANYDRE

2.2.1.1 LA MASSE VOLUMIQUE ABSOLUE

- **Objectif de l'essai**

Il s'agit de déterminer la masse volumique absolue (ou poids spécifique) des trois types de ciments utilisés.

La technique expérimentale utilisée est celle de l'appareil appelé «densimètre Le Chatelier».

- **Conduite de l'essai**

- Peser $m = 64$ g de ciment;
- Introduire du toluène (liquide non réactif avec le ciment) jusqu'à la graduation inférieure trait marqué 0 ; $V_0 = 250\text{cm}^3$;
- Placer le densimètre dans le bain thermostatique à température constante ($20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$);
- Corrigé éventuellement le niveau (0) après la stabilisation de la température pendant 20mn ;
- Introduire la quantité de ciment pesé dans le densimètre;
- Chasser les bulles d'air, en agitant doucement, en faisant tourner le densimètre
- Remettre à nouveau le densimètre dans le bain thermostatique ;
- Après la stabilisation du niveau, lire dans la graduation supérieure du densimètre, le volume du ciment introduit, soit V_1
- Calculer la masse volumique absolue du ciment en g/cm^3

$$\rho = m / V_1 - V_0$$

exemple de calcul

$$\begin{aligned} m &= 64,0 \text{ g} \\ V_0 &= 250 \text{ cm}^3 \\ V_1 &= 250 + 20,4 \text{ cm}^3 \end{aligned}$$

$$\rho = \frac{64,0 \text{ g}}{(250 + 20,4) - (250) \text{ cm}^3} = 3,1372 \text{ g/cm}^3$$

Incertitudes

$$\Delta\rho = \rho \left(\frac{\Delta m}{m} + \frac{\Delta V_1}{V_1 - V_0} + \frac{\Delta V_0}{V_1 - V_0} \right)$$

$$\Delta m = 0.001 \text{ g} \quad \Delta V_1 = \Delta V_0 = 0.1 \text{ ml}$$

$$\rho = 3,1372 \pm 0.30 \text{ g/cm}^3$$

2.1.1.2 MESURE DE LA FINESSE DU CIMENT

- **Objectif de l'essai**

Déterminer la surface totale des grains contenus dans une masse unité de poudre. Elle est exprimée en cm²/g, conformément à la norme EN-196-6

- **Principe de l'essai**

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 long. La surface massique est proportionnelle à $t^{1/2}$. La masse volumique du ciment étant connue.

- **Equipement nécessaire utilisé**

- Une salle maintenue à $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ et à une humidité relative de 65% ;
- Un appareil appelé « perméabilimètre de blaine » dont la description complète est donné par la norme EN 196-6 ;
- Une balance précise à 0.001g près ;
- Un chronomètre précis à 0.2 s près ;
- Des rondelles de papier filtre adaptées au diamètre de la cellule ;
- Un thermomètre précis à 0.1 °C.
-

- **Conduite de l'essai**

- Peser une masse m_c de ciment telle que la porosité une fois tassé dans la cellule soit égale à 0.5.
- Mettre la poudre de ciment dans la cellule puis compacter à l'aide du piston ;
- Mettre la cellule à sa place dans le rodage conique au sommet du manomètre ;
- Fermer le robinet et enlever le bouchon ;
- Déclencher le chronomètre lorsque le liquide atteint le repère N°2 sur le tube ;
- Arrêter le chronomètre lorsque le liquide atteint le repère N°3 sur le tube ;
- Relever le temps t à 0.2 s près.
- Calculer la surface spécifique du ciment

$$S_p = \frac{K \cdot e^{3/2} \cdot t^{1/2}}{\rho (1 - e) \cdot (0.1 \eta)^{1/2}} \quad (\text{cm}^2/\text{g})$$

Exemple de calcul

Constante de l'appareil $K = 2,1977$

Viscosité de l'air $(0.1 \eta)^{1/2} = 0.001347$ pour $T = 19^\circ\text{C}$

Porosité $e = 0.5$

Temps parcouru par l'air $t = (73 + 73 + 72 + 72) / 4 = 72.5 \text{ s}$ (moyenne de 4 essais)

Masse volumique du ciment $\rho = 3.1772 \text{ g/cm}^3$

Masse du ciment qu'il faut mettre dans la cellule

$$m_c = \rho \cdot e \cdot V_c = 3.1772 \times 0.5 \times 1.7721 = 2.8152 \text{ g}$$

$$Sp = \frac{2.1977 \times 0.5^{3/2} \times 72.5^{1/2}}{3.1772 (1 - 0.5) \cdot 0.001347} = 3091,79 \text{ (cm}^2/\text{g)}$$

2.2.2 ESSAIS SUR LA PATE DE CIMENT

2.2.2.1 ESSAI DE CONSISTANCE

La consistance de la pâte de ciment (pourcentage d'eau/pâte pure) caractérise sa fluidité.

Pour apprécier la consistance des trois types de ciments composés utilisés avec leurs finesses de mouture différentes, on a effectué l'essai avec l'appareil de Vicat conformément à la norme EN-196-3.

- **Objectif de l'essai**

Déterminer la quantité optimale d'eau de gâchage qui définit une telle consistance dite «consistance normalisée».

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

- **Principe de l'essai**

La consistance est évaluée en mesurant l'enfoncement, dans la pâte, d'une tige cylindrique sous l'effet d'une charge constante. L'enfoncement est d'autant plus important que la consistance est plus fluide.

- **Equipement nécessaire utilisé**

- Une salle maintenue de manière continue à $20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ et à une humidité relative supérieure ou égale à 50% ;
- Un malaxeur décrit dans la norme EN 196-1 ;
- Un appareil de Vicat muni
- d'une sonde d'un diamètre $\phi = 10 \text{ mm}$
- d'un moule tronconique de 40 mm de hauteur et de diamètres 70 et 80 mm ;

- d'une tige coulissante équipée sur laquelle vient se placer la sonde (la masse totale « tige + sonde » est de 300 g) .
- une plaque en verre qui sert comme base pour le moule ;
- une graduation (réglable en hauteur) permet de mesurer la distance qui sépare le dessous de la sonde de la plaque de base.
- Une balance précise à 1 g près.

- **Conduite de l'essai**

- Peser 500 g de ciment
125 g d'eau
- Verser l'eau dans le récipient du malaxeur puis ajouter le ciment en un temps compris entre 5 et 10 s .La fin du versement du ciment donne le temps 0;
- Ajouter 500 g de ciment à l'eau, en un temps compris entre 5 et 10 s. La fin du versement du ciment donne le temps 0 ;
- Mettre immédiatement le malaxeur en marche à vitesse lente pendant 90 s ;
- Arrêter le mouvement, démonter le batteur et récipient, racler les parois du récipient puis remonter le tout en une durée d'environ 15 s;
- Remettre le malaxeur en marche pour une durée de 90 s à vitesse lente ;
- Remplir le moule tronconique de la pâte fabriquée et araser la face supérieure ;
- Placer le moule et son support sur le socle de l'appareil ;
- Immobiliser la sonde au contact de la pâte ;
- Régler l'index des graduations au point 0
- Libérer la partie mobile sans vitesse initiale. La sonde s'enfoncera plus ou moins profondément dans la pâte alors dans la pâte.
- Noter l'indication de l'index sur la graduation après immobilisation de la partie mobile
- Si l'épaisseur mesurée est supérieure à 7 mm ; il n'y a pas assez d'eau
- Si l'épaisseur mesurée est inférieure à 5 mm ; il y a trop d'eau
- La pâte sera de consistance normalisée si l'épaisseur $d = 6 \text{ mm} \pm 1$,

2.2.2.2 ESSAIS DE PRISE

- **Objectif de l'essai**

Déterminer les temps de début et de fin de prise des pâtes pures des ciments étudiés conformément à la norme EN 196 3.

- **Principe de l'essai**

Le début de prise correspond au moment où l'on constate une augmentation relativement brusque de la viscosité de la pâte de consistance normalisée avec échauffement.

l'appareil utilisé est l'appareil de Vicat équipée d'une aiguille de Vicat. Quand la partie mobile est libérée l'aiguille s'arrête à une distance d du fond du moule telle que

$$d = 4 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$$

La fin de prise correspond au moment où la pâte est devenue un bloc rigide , le moment où l'aiguille ne s'enfonce plus dans la pâte que de 0,5 mm.

- **Equipement nécessaire utilisé**

- Une armoire maintenue d'une manière continue à une température de $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ et à une humidité relative supérieure ou égale à 90% ;
- Appareil de Vicat est équipé de :
 - *d'une aiguille de 1,13 mm + porte aiguille
 - *masse mobile de 1000g (partie mobile 300g + masse supplémentaire 700g)

- **Conduite de l'essai**

Le mode opératoire de l'essai est fixé par la norme EN 196-3 :

- confectionner une pâte normalisée comme indiqué au II.2.2.1. Le temps zéro est celui où le ciment a fini d'être ajouté à l'eau dans la cuve du malaxeur. La consistance recherchée de la pâte, une fois atteinte, la pâte est introduite dans le moule tronconique comme indiquée pour l'essai de consistance ;
- Remplir le moule tronconique, et araser la face supérieure ;
- Mettre le moule dans l'armoire en attendant, que la prise soit commencée ;
- Quand le moment supposé du début de prise approche, on fait sortir le moule de l'armoire et on le met sur le socle de l'appareil ;
- Immobiliser l'aiguille au contact de la pâte ;
- Libérer la partie mobile sans vitesse initiale
- Relever la distance d séparant l'extrémité de l'aiguille de la plaque de base ;
- si l'arrêt se produit à une distance $d = 4\text{mm} \pm 1\text{mm}$; La prise est commencée ;
- si non, on retourne le moule dans l'armoire qu'on le sortira qu'à intervalles de temps convenablement espacés jusqu'à ce que $d = 4\text{mm} \pm 1\text{mm}$
- On retourne le moule tronconique utilisé pour la détermination du début de prise de façon que les essais de fin de prise soient faits sur la face du moule en contact avec la plaque de base ;

2.2.3 ESSAIS SUR MORTIERS

2.2.3.1 MORTIER NORMAL

2.2.3.1.1 PROCEDE DE PREPARATION

La confection du mortier est réalisé conformément à la norme EN 196-1. Le sable utilisé est un sable normalisé.

Ciments étudiés	=	450 g
Sable normalisé	=	1350 g
Eau de gâchage	=	225 g

2.2.3.1.2 MESURE DU RETRAIT SUR EPROUVETTE DE MORTIER NORMAL

- **Objectif de l'essai**

Mesurer, en fonction du temps, la variation de la longueur d'éprouvette prismatique de mortier conservée, soit dans l'air, pour l'essai de retrait, soit dans l'eau pour l'essai de gonflement.

- **Principe de l'essai**

Les mesures ont lieu au démoulage de l'éprouvette 160 x 40 x 40 mm, puis à 3, 7 et 28 jours ; on détermine la variation de la longueur.

- **Equipement nécessaire utilisé**

Il est décrit dans la norme NF P 15-433.

- Une salle maintenue à une température de $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ et à une humidité relative à $50\% \pm 5\%$.
- Un bain d'eau dont la température est maintenue à de $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$.
- Un malaxeur normalisé .NF EN 196-1
- Des moules pour éprouvettes prismatiques 4 x 4 x 16 cm équipés de plots en laiton mis en place au centre de chaque face terminale et dans l'axe longitudinale, de façon à constituer une base de mesure pour un comparateur .
- Un dilatomètre à comparateur permettant d'effectuer des mesures de longueur avec une précision inférieure ou égale à 5 μm .
- Une tige de 160 mm de longueur en invar permet de régler le zéro du dilatomètre.

- **Conduite de l'essai**

- Chaque éprouvette ne doit pas être sortie de son ambiance que le moins de temps possible, maximum 30 mn.
- Lors du démoulage, mesurer L_0 de l'éprouvette. la tige étalon en invar de longueur
- $L = 160,000\text{ mm}$ permet la vérification préalable du comparateur (mise au zéro).
- Lire les variations de longueurs $dl(t)$ lue sur le comparateur à (3,7 et 28 jours)

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

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

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

- La variation relative de la longueur

$$\varepsilon(t) = \Delta l(t) / L$$

Si $\Delta l(t)$ est négatif l'on parle alors de retrait de l'éprouvette.

Si $\Delta l(t)$ est positif l'on parle alors de retrait de l'éprouvette

2.2.3.2 MORTIER A BASE DE SABLE DE DUNE (BOUSSADA)

On tient à signaler que les essais des résistances à la compression et à la traction par flexion ont été réalisés au laboratoire de Génie-civil de l'université de M'Sila.

Le but de ce travail expérimental est d'étudier l'influence de la surface spécifique et la granulométrie du ciment composé sur le comportement mécanique du mortier à base de sable local (sable de dune).

Le mortier étudié est à base d'un sable de dune de composition pondérale (C/S = 1/3). Il se compose de :

- * 3 parties de sable,
- * 1 partie de ciment,
- * E/C = 0,55

Le rapport E/C a été fixé à 0,55 à cause du module de finesse du sable qui est de 1,51 (sable fin).

- **Fluidité du mortier frais**

La fluidité ou consistance est la capacité du mortier de couler sous son propre poids.

La consistance est déterminée expérimentalement par la profondeur d'enfoncement en centimètre (cm) que peut provoquer un cône métallique pesant 300 grammes et ayant un angle de 30 degrés dans la pâte lâcher en chute libre sans vitesse initiale..

Tous les mortiers confectionnés sont à consistance égale.

2.2.3.2.1 RESISTANCES A LA COMPRESSION ET A LA TRACTION

- **Equipement nécessaire utilisé**

- L'ensemble est décrit de manière détaillée par la norme EN 196-1. Il est énuméré ci-dessous.
- Le laboratoire où a lieu la préparation des éprouvettes doit être maintenu à une température de $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ et à une humidité relative supérieure ou égale à 50%.
- Une armoire humide maintenue à une température de $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ et à une humidité relative supérieure à 90%.
- Un malaxeur normalisé.
- Des moules normalisés à trois compartiments horizontaux permettant la préparation de trois éprouvettes prismatiques de section transversale de 40 mm x 40 mm et de 160 mm de longueur.
- Un appareil à choc la hauteur de chute est de $15\text{ mm} \pm 0,3\text{ mm}$ à la fréquence d'une chute par seconde pendant 60 s.
- Une machine d'essais de résistance à la flexion permettant d'appliquer des charges jusqu'à 10 KN avec une vitesse de mise en charge de $50\text{ N/S} \pm 10\text{ N/S}$.
- Une machine d'essais à la compression permettant d'appliquer des charges jusqu'à 150 KN (ou plus) avec une vitesse de charge de $2400\text{ N/S} \pm 200\text{ N/S}$.

- **Préparation des éprouvettes**

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

- On prépare le mortier comme indiqué au
- On remplit un moule 40 x 40 x 160 mm de mortier préparer en deux couches en appliquant à chaque couche 60 chocs à l'aide d'appareil à chocs.
- La face supérieure arasée, les moules sont mis à l'abris.
- Après 24 h du coulage , les éprouvettes sont démoulées et entreposées dans l'eau à $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ en attendant le moment de l'essai de rupture (3, 7 et 28 jours).

- **Essai de traction par flexion**

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

Les éprouvettes sont exposées à l'air libre pendant 20 minutes pour qu'elles acquièrent l'état normal d'humidité.

Dans notre cas les valeurs sont lues directement sur la règle de l'appareil d'essai.

- *charge de rupture : P en N
- *la contrainte de traction : R_t en N/cm^2
- *Contrainte de flexion : R_f en N/cm^2

- **Essai de compression**

la machine utilisée est une presse hydraulique décrite par la norme NF EN 196-1.

Les demi prismes de l'éprouvettes obtenus après rupture en flexion seront rompus en compression .

La résistance à la compression:

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

F_c : est la charge de rupture de l'éprouvette en compression

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

2.2.4 ESSAIS SUR LE BETON A BASE DE MATERIAUX LOCAUX

Le but de ce travail expérimental est d'étudier l'influence de la surface spécifique et de la granulométrie du ciment à base d'ajout minéral (ciment composé) sur le comportement mécanique du béton à base de sable de oued maïter (Boussaada) et de pierres concassées provenant d'El-Euch (COSIDER).

Les propriétés du béton les plus importantes sont :

- *la fluidité du béton,
- *la réponse mécanique du béton.

2.2.4.1 COMPOSITION DU BETON

La méthode de formulation choisie pour la détermination de la composition du béton à tester est celle de Dreux-Gorisse.

- **Données de base**

- la dimension maximale des granulats est : $D = 16.00 \text{ mm}$.
- La résistance caractéristique souhaitée est $f_{c28} = 270 \text{ bars}$, on visera une résistance moyenne à 28 jours $f_c = \sigma'_{28} = 270 + 15 \% \cdot f_{c28} = 310.5 \text{ bars}$.
- Béton plastique l'affaissement au cône $A = 6 \text{ cm}$.

- **Dosage en ciment et en eau**

- Rapport $C/E = 1.70$
- Rapport $G/S = 2.13$
- Dosage en ciment : $C = 350.00 \text{ Kg/m}^3$
- Dosage en eau : $E = 206.46 \text{ litres}$.
- Correction est 5.43
 - * Dosage en eau corrigé $= 217.68 \text{ litres}$.
 - * Dosage en ciment corrigé $= 369.01 \text{ Kg/m}^3$.

- **Dosage des granulats**

$$\begin{aligned} G_{8/15} &= 57 \% ; \\ G_{3/8} &= 11 \% ; \\ S_{0/3} &= 32 \% . \end{aligned}$$

- **Formule de composition pondérale**

$$\begin{aligned} G_{8/15} &= 1062.34 \text{ Kg/m}^3 \\ G_{3/8} &= 203.46 \text{ Kg/m}^3 ; \\ S_{0/3} &= 600.92 \text{ Kg/m}^3 . \end{aligned}$$

Densité théorique du béton frais $= 2453.40 \text{ Kg/m}^3$.

2.2.4.2 ESSAI DE CONSISTANCE

- **Principe de l'essai**

Il s'agit de constater l'affaissement d'un cône de béton sous l'effet de son poids propre.

*Plus l'affaissement sera grand plus le béton sera réputé fluide.

*La fluidité désirée $A = 6 \text{ cm}$

On a opté pour déterminer l'ouvrabilité du mélange, l'essai d'affaissement au cône d'Abrams- lump-test (NF-P-18-451).

- **Equipement nécessaire utilisé**

Décrit dans la norme NF P 18-451, il se compose :
Un moule métallique tronconique sans fond.

*La hauteur 20 cm

*Les diamètres 20 cm et 10 cm

- une plaque de base avec dispositif de fixation;
- une tige de piquage de 16 mm de diamètre;
- un portique de mesure avec règle graduée.

- **Conduite de l'essai**

- Huiler légèrement le moule et humecter la plaque de base
- Fixer le cône sur la plaque
- Remplir le cône de béton en 4 couches de hauteurs sensiblement égales, chaque couche piquée (traversée) de 25 coups de tige.
- Araser la dernière couche avec la tige de piquage ;
- Ajuster la règle à la hauteur du béton H_1
- Détacher le système de fixation puis soulever le moule avec précaution.
- Laisser le mouvement d'affaissement se stabiliser (1 mn)
- Mesurer la nouvelle hauteur au point le plus haut du béton H_2
- Le béton n'étant plus maintenu s'affaisse plus ou moins suivant sa consistance.
- L'affaissement est : $A = H_1 - H_2$

2.2.4.3 ESSAI DE COMPRESSION

- **Objectif de l'essai**

Le but de l'essai est de connaître les résistances à la compression du béton à l'âge 7, 28 et 90 jours, confectionné avec les différents types de ciments étudiés.

- **Principe de l'essai**

Soumettre l'éprouvette étudiée à une charge croissante jusqu'à la rupture. En déduire la résistance à la compression (charge de rupture / section de l'éprouvette).

Les éprouvettes sont rompues en compression à 7, 28 et 90 jours.

- **Equipement nécessaire utilisé**

Une machine d'essai de résistance à la compression décrite dans la norme NF-EN196-1

- **Conduite de l'essai**

- Préparer les éprouvettes de béton étudié.
 - *Huiler les parois intérieures du moule cubique 100 x 100 x 100 mm.
 - *Remplir les moules de béton.
 - *Mettre les moules sur la table vibrante, puis faire subir des vibrations jusqu'à l'apparition d'une couche de laitance du ciment sur la surface libre. Araser la face supérieure à l'aide d'une règle biseautée.
 - *Immerger les éprouvettes dans l'eau, après démoulage, 24 heures après leur coulage
- Faire sortir les éprouvettes de l'eau 20 minutes avant les essais, pour qu'elles acquièrent l'état normal d'humidité.
- Centrer l'éprouvette sur le plateau (ne doit pas dépasser 1/100^e du diamètre)
- Appliquer la charge à raison de 2400 N/S.
- Arrêter la presse une fois l'éprouvette rompue
- Lire la charge de rupture.
- Calcul la résistance à la compression :

$$R_c = \frac{P}{S} = \frac{\text{charge de rupture.}}{\text{section de l'éprouvette (100 cm}^2\text{)}}$$

TROISIEME CHAPITRE

RESULTATS EXPERIMENTAUX ET INTERPRETATION

3.1 INFLUENCE DE LA FINESSE SUR LE POIDS SPECIFIQUE DES CEMENTS

D'après les résultats obtenus (tableau 3.1 et figure 3.1), on remarque :

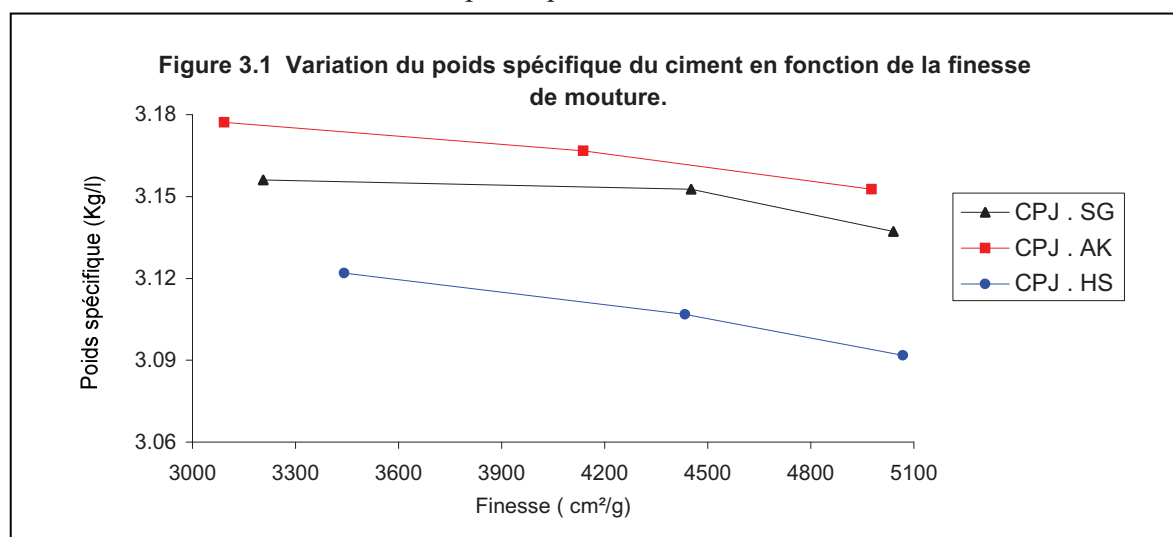
- Une différence significative du poids spécifique entre les différents ciments étudiés.
- Une diminution du poids spécifique au fur et mesure que la finesse de mouture augmente.

► Pour ce qui est de la différence entre les poids spécifiques des ciments étudiés, ceci peut être du à la nature de l'ajout minéral incorporé dans le ciment composé (différence des masses volumiques des ajout minéraux). Les ciments composés de type CPJ-CEM II/A (à base de tuff et pouzzolane-calcaire) présente des poids spécifiques nettement supérieures par rapport au ciment composé de type CPJ-CEM II/B (à base de laitier de haut fourneau), ceci est du principalement à la quantité de clinker présente dans chaque type de ciment composé et à la porosité de l'ajout minéral utilisé.

► Pour ce qui est de la diminution du poids spécifique en fonction de la variation de la finesse (broyage), ceci peut être expliquer par le fait, que sous le choc des boulets, les particules fines se chargent électriquement. Il y a ensuite développement de microcristaux à la surface des grains et formation de ponts entre les cristaux. Il se produit enfin une soudure à froid provenant de la modification de la structure de la matière lors du broyage, (valable pour les particules très petites). Lors de la rupture, la cohésion moléculaire du cristal est en partie détruite (certains atomes se trouvent séparés les uns des autres). Il se développe localement, à la surface des grains fraîchement rompus, de puissantes forces d'attraction (dans le cas du clinker, on trouve des atomes électropositifs et électronégatifs Ca^{2+} et O^{2-}).

Types de ciments Composés	CPJ Sour -El-Ghozlane			CPJ Ain-El-Kébira			CPJ Hadjar-Soud		
	SF1	SF2	SF3	AF1	AF2	AF3	HF1	HF2	HF3
Finesse (cm^2/g)	3206	4452	5038	3092	4138	4977	3442	4434	5068
Poids spécifique (g/cm^3)	3,1561	3,1527	3,1372	3,1772	3,1667	3,1527	3,1219	3,1068	3,0918

Tableau 3.1 Poids spécifiques et finesse des ciments étudiés



3.2 INFLUENCE DE LA FINESSE SUR LA PATE DES CIMENTS UTILISES

3.2.1 INFLUENCE DE LA FINESSE DU CIMENT SUR LA CONSISTANCE ET LA PRISE

D'après les résultats obtenus (tableau 3.2 et figures 3.2, 3.3 et 3.4), on remarque que l'augmentation de la finesse du ciment a un double effet :

- Augmentation de la quantité d'eau nécessaire pour avoir une consistance normale de la pâte du liant.

- Raccourcissement des délais (temps) de prise.

On remarque aussi que la granulométrie (distribution des grains) du ciment, a une influence prédominante sur la demande en eau du ciment, ceci se traduit par :

- une augmentation de la surface totale des grains qu'il faut mouiller au fur et à mesure que le ciment étudié est broyé plus finement.

- une grande proportion de vides (diminution du poids spécifique) que l'eau devra remplir avant de participer à la maniabilité de la pâte de ciment (porosité élevée).

Les principales comparaisons tirées entre :

- les différents types de ciments étudiés.
 - et les différentes finesses appliquées aux ciments utilisés.
- On remarque que la demande en eau des trois ciments étudiés n'est pas la même, la plus élevée est celle du CPJ-HS et la plus faible est celle du CPJ-AK, ceci est dû principalement à la différence de leurs granulométries. Plus la distribution granulométrique est "serrée" avec peu de particules de petites et de grosses dimensions, plus la demande en eau est élevée, ce qui est le cas pour la demande en eau des trois ciments étudiés :

CPJ. HS ($D_{10} = 0.54 \mu\text{m}$, $D_{90} = 60.28 \mu\text{m}$, $\text{span} = 3.518$).

CPJ. SG ($D_{10} = 0.70 \mu\text{m}$, $D_{90} = 79.08 \mu\text{m}$, $\text{span} = 4.096$).

CPJ. AK ($D_{10} = 1.01 \mu\text{m}$, $D_{90} = 99.49 \mu\text{m}$, $\text{span} = 4.357$).

► On constate que la demande en eau croît proportionnellement avec l'augmentation de la finesse de mouture du ciment, ceci est dû d'une part à l'augmentation de la surface totale des grains qu'il faut mouiller au fur et à mesure que le ciment étudié est broyé plus finement (D_{10} , D_{90} et le span : diminuent), et d'autre part à la diminution du poids spécifique (porosité élevée).

De même, on remarque que les temps de début et de fin de prise diminuent proportionnellement avec l'augmentation de la finesse de mouture des ciments, cela s'explique par le fait que la réaction pouzzolanique est accélérée à court terme. Ce qui veut

dire aussi que la cinétique d'hydratation du liant devient de plus en plus rapide en fonction de l'augmentation de la finesse. Par conséquent les cristaux de CSH (responsables du durcissement de la pâte) existent en grande quantité aux très jeunes âges.

On remarque aussi, que l'augmentation de la surface spécifique des ciments étudiés diminue les temps de prise (raccourcissement des délais de prise). En effet, les particules très fines adhèrent les unes aux autres et déclenchent le phénomène de prise de la pâte de ciment. Ainsi l'effet de la grande surface spécifique sur l'accélération de la réaction pouzzolanique réagit avec la portlandite pour former d'autres cristaux supplémentaires de CSH.

En effet, on sait que, plus la surface spécifique augmente plus le diamètre moyen des particules diminue et plus la cinétique d'hydratation est accélérée ce qu'on a constaté des résultats obtenus. Les temps de prise du CPJ-HS sont les plus courts et ceux du CPJ-AK sont les plus longs du fait que leurs diamètres moyens volumiques sont différents (25.67 μm : CPJ-HS, 32.09 μm : CPJ-SG et 38.85 μm : CPJ-AK) pour toutes les finesesses. Donc plus le diamètre moyen est faible plus les délais de prise (début et fin) sont très courts (cinétique d'hydratation rapide et complète).

Donc, on peut conclure que la finesse du ciment est une caractéristique importante : lors du gâchage, plus les particules sont fines, plus la surface de ciment en contact avec l'eau est grande et plus l'hydratation est rapide et complète (raccourcissement des délais de prise).

Ciments composés	CPJ Sour-Ghozlane			CPJ Ain-El-Kébira			CPJ Hadjar-Soud		
	SF1	SF2	SF3	AF1	AF2	AF3	HF1	HF2	HF3
Consistance normale (%)	25.3	25.8	26.4	24.9	25.4	26.1	26.2	26.8	27.3
Début de prise (mn)	202	118	103	218	159	156	175	107	90
Fin de prise en (mn)	252	181	159	288	231	217	222	161	134

Tableau 3.2. Consistances et délais de prise (début et fin) des ciments étudiés

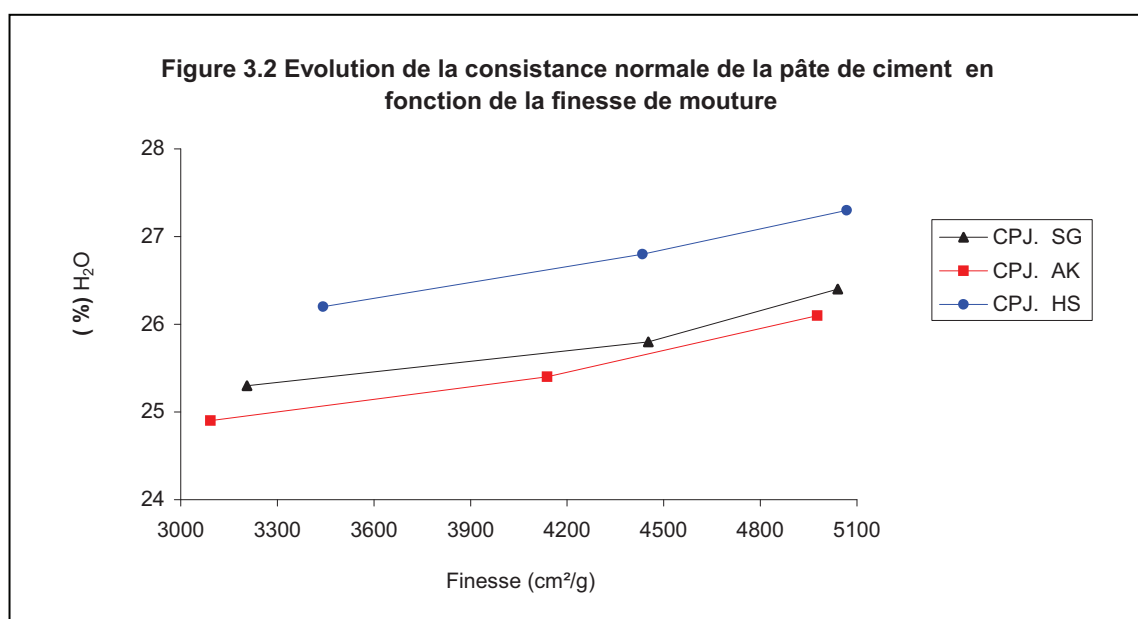


Figure 3.3 Evolution du temps de début de prise de la pate de ciment en fonction de la finesse de mouture

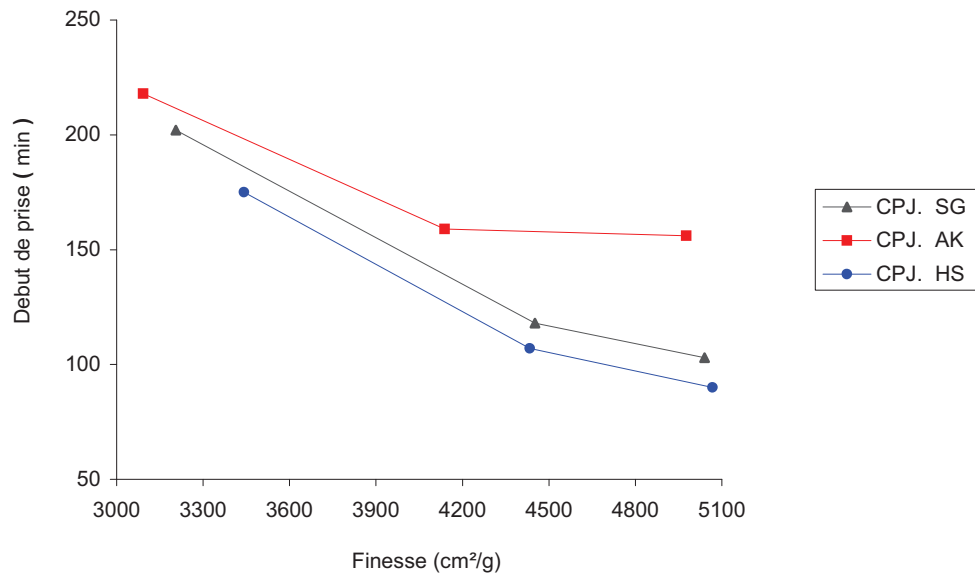
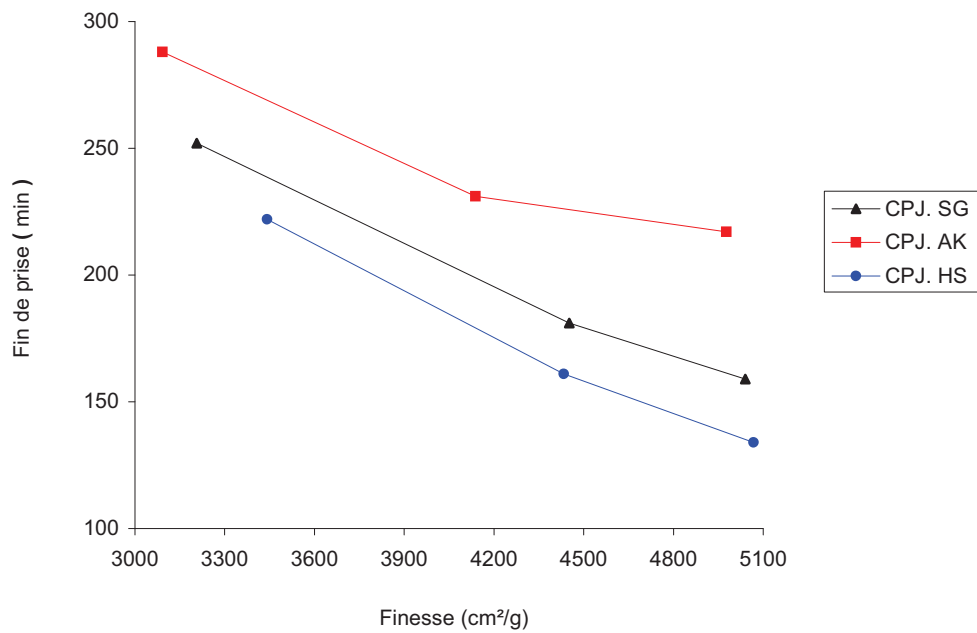


Figure 3.4 Evolution du temps de fin de prise de la pate de ciment en fonction de la finesse de mouture du ciment



3.3 INFLUENCE DE LA FINESSE SUR LE MORTIER NORMAL

3.3.1 INFLUENCE DE LA FINESSE DU CIMENT SUR LE RETRAIT ET LE GONFLEMENT

Les résultats de mesure du retrait, et du gonflement que provoquent les ciment étudiés sur des éprouvettes de mortier normal sont présentés dans les tableaux 3.3, 3.4, 3.5 et 3.6 et représentés par les figures 3.5, 3.6, 3.7, 3.8, 3.9, 3.10 et 3.11.

L'objectif de cette comparaison est d'étudier l'influence de la finesse sur les variations dimensionnelles des ciments composés étudiés.

D'après les résultats obtenus, on peut affirmer que tous les ciments étudiés provoquent de faibles retraits et gonflements sur les éprouvettes de mortier normal qu'on a testé.

Les mesures de retrait à 28 jours sont conformes à la norme NF P 15-433 qui spécifie les retraits pour les ciments «CPJ-CEM II» doivent être :

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

Les principales remarques tirées concernant les retraits observés pour les trois ciments composés étudiés sont :

- Augmentation du retrait en fonction de l'âge de durcissement (3, 7 et 28 jours).
- Augmentation du retrait en fonction de variation de la finesse de mouture du ciment.

► L'augmentation du retrait observé en fonction de l'âge de durcissement, est du à la création d'un fin réseau de pores capillaires à l'intérieur de la pâte de ciment hydraté. Lorsque ces capillaires sont saturés d'eau, la consommation d'eau pour l'hydratation du ciment provoque un assèchement, cela aboutit à la formation de ménisques où se produisent des forces d'attractions qui provoque le retrait. Cette augmentation des pores est du au fait, que la porosité de l'ajout minéral est plus élevée que celle du clinker.

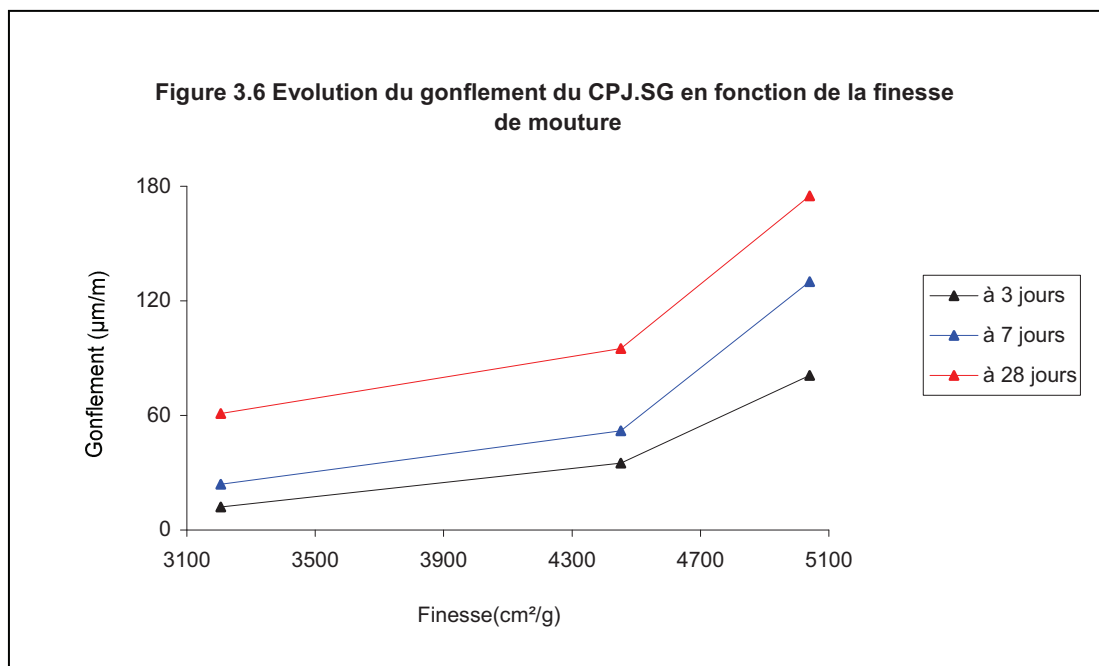
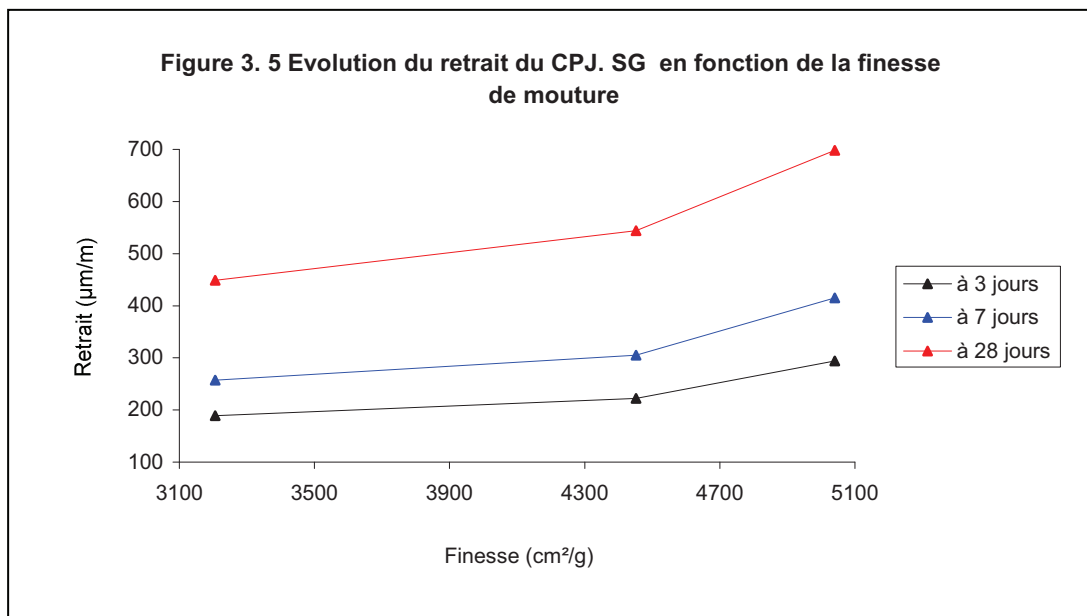
► L'augmentation du retrait en fonction de la finesse, est du essentiellement à la présence d'une porosité capillaire élevée. Ceci provoque la formation d'une grande quantité de ménisques, et la cinétique d'hydratation devient très rapide à l'intérieur de la pâte de ciment hydraté (augmentation des forces de traction qui se développent à l'intérieur des capillaires).

Le gonflement observé est dû à la constitution d'hydrates massifs comme la portlandite Ca(OH)_2 , dont la croissance fait pression sur l'ensemble de la structure et en provoque la dilatation. Ainsi, le gonflement est en relation avec la taille des cristaux de Portlandite et non avec sa quantité. Ce gonflement s'oppose en partie au retrait. Il est lié à la quantité de chaux libre non hydratée restant après le début de prise.

La présence de la portlandite de taille élevée et massive est en relation directe avec l'espace disponible. Ce dernier est directement en relation avec la granulométrie du ciment.

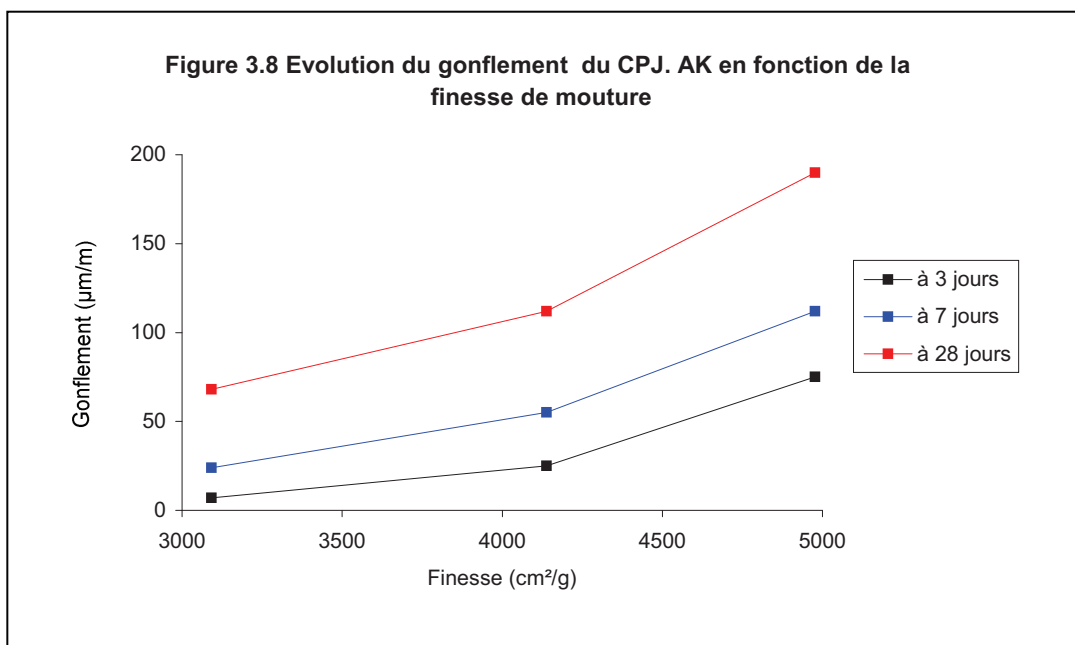
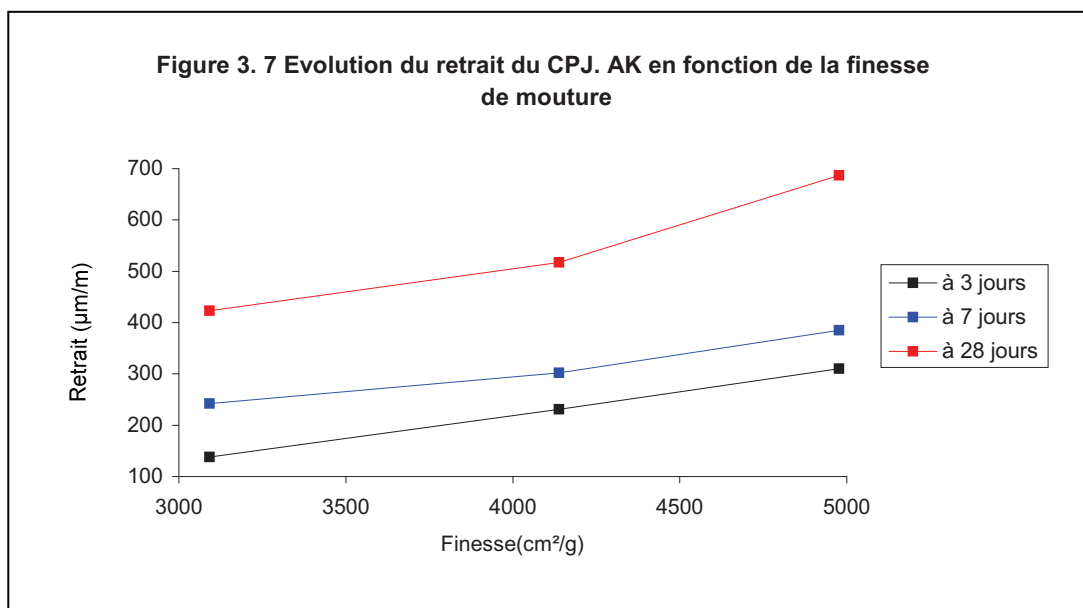
CPJ Sour-El-Ghozlane	Retrait ($\mu\text{m/m}$)			Gonflement ($\mu\text{m/m}$)		
	3 j	7 j	28 j	3 j	7 j	28 j
SF1	189	257	449	12	24	61
SF2	222	305	544	35	52	95
SF3	294	415	698	81	130	175

Tableau 3.3 Retrait et gonflement provoqués par le **CPJ-SG** sur le mortier normal en fonction de la finesse..



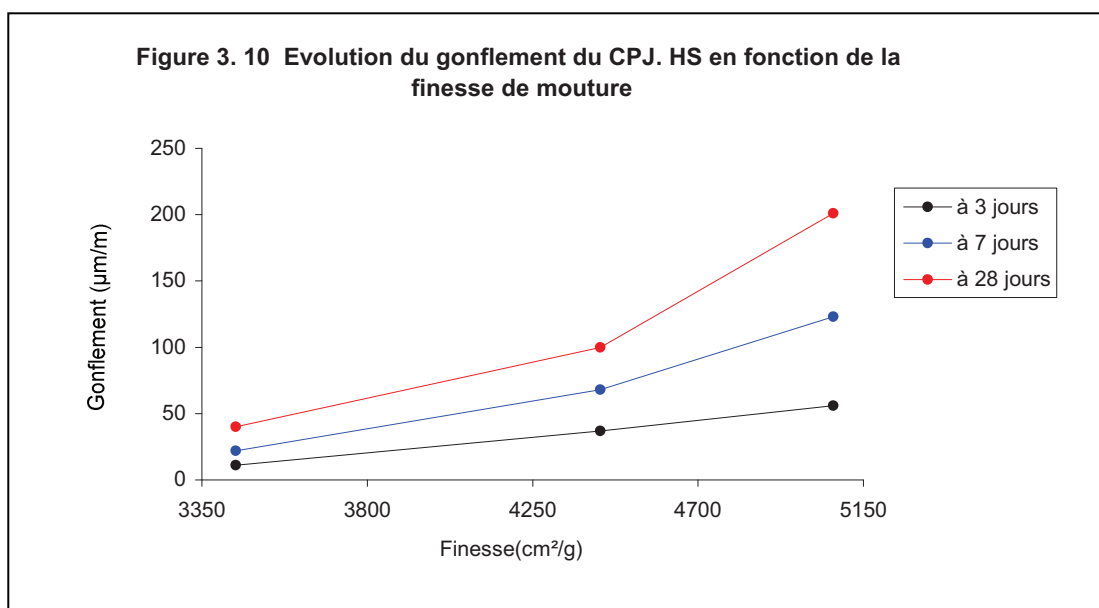
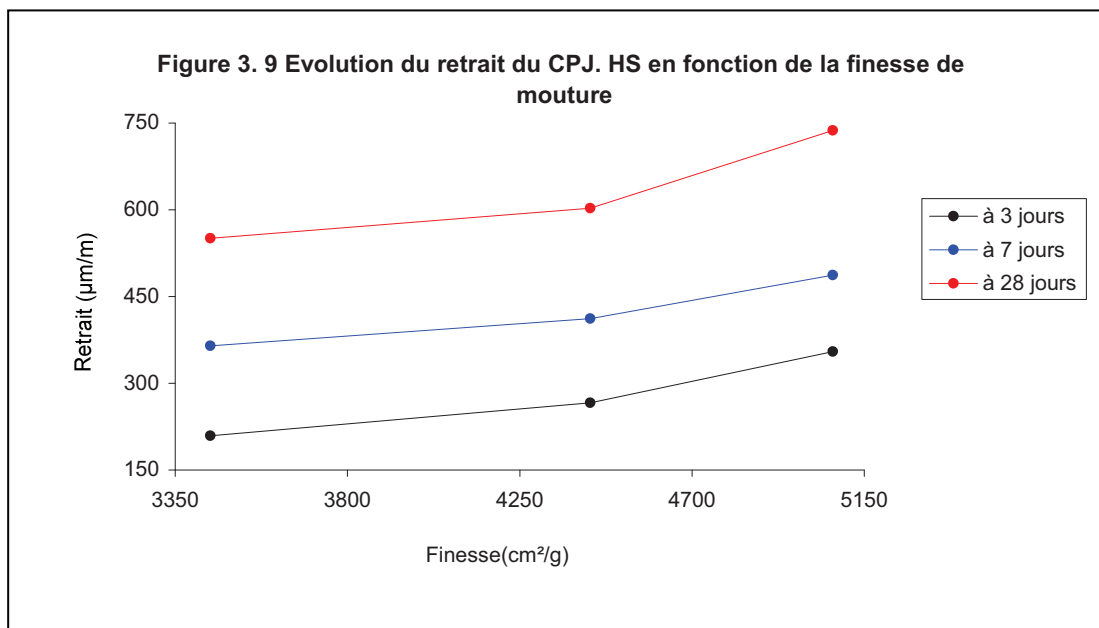
CPJ Ain-El-Kébira	Retrait ($\mu\text{m/m}$)			Gonflement ($\mu\text{m/m}$)		
	3 j	7 j	28 j	3 j	7 j	28 j
AF1	138	242	423	7	24	68
AF2	231	302	517	25	55	112
AF3	310	385	687	75	112	190

Tableau 3.4 Retrait et gonflement provoqués par le **CPJ-AK** sur le mortier normal en fonction de la finesse.



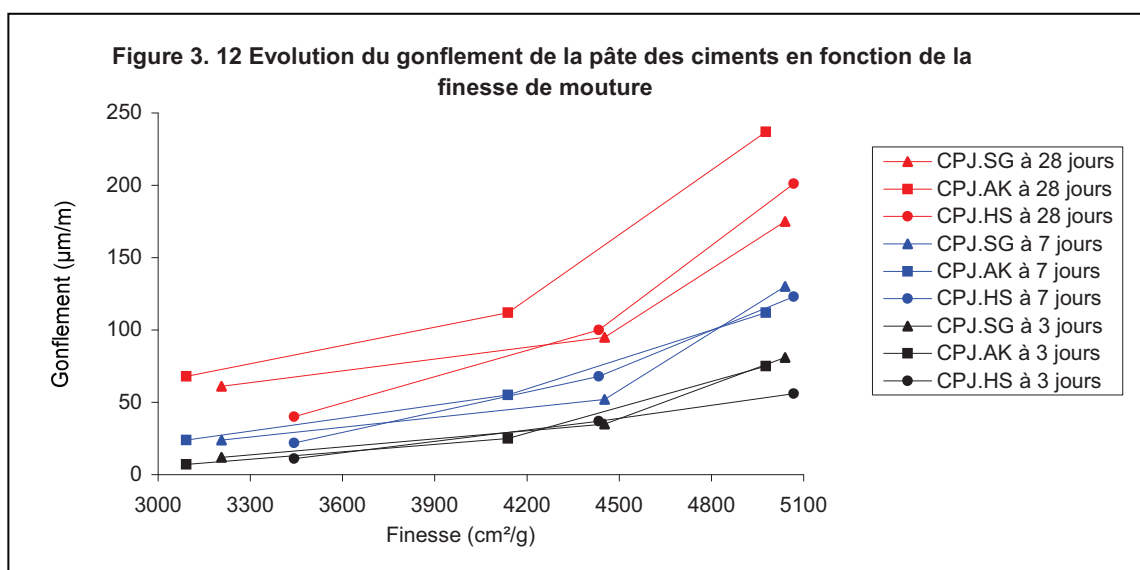
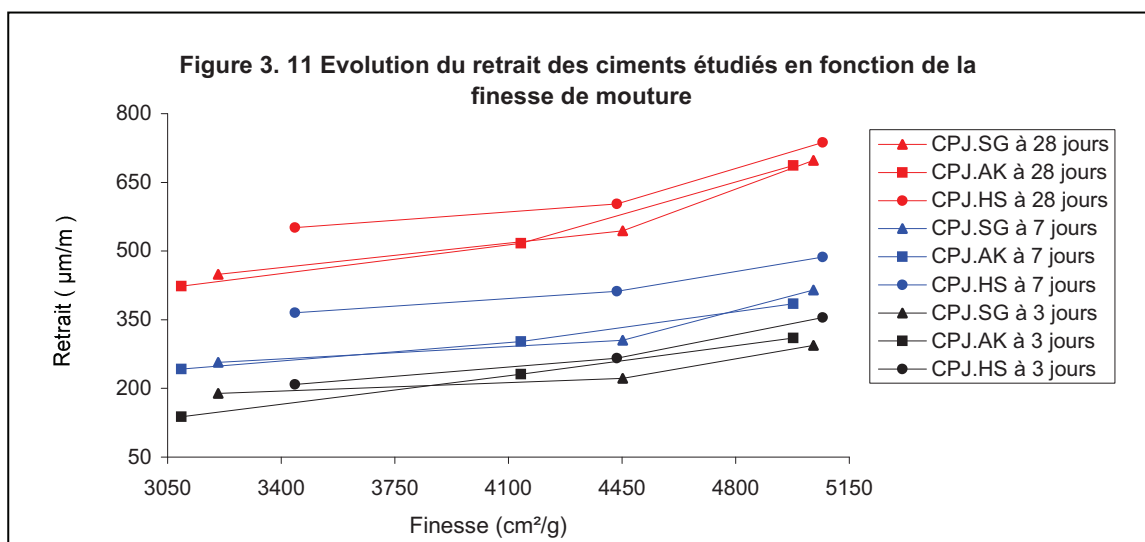
CPJ Hadjar-Soud	Retrait ($\mu\text{m/m}$)			Gonflement ($\mu\text{m/m}$)		
	3 j	7 j	28 j	3 j	7 j	28 j
HF1	209	365	551	11	22	40
HF2	266	412	603	37	68	100
HF3	255	487	737	56	123	201

Tableau 3.5 Retrait et gonflement provoqués par le CPJ-HS sur le mortier normal en fonction de la finesse.



CPJ Sour-El-Ghozlane	Retrait ($\mu\text{m/m}$)			Gonflement ($\mu\text{m/m}$)		
	3 j	7 j	28 j	3 j	7 j	28 j
SF1	189	257	449	12	24	61
SF2	222	305	544	35	52	95
SF3	294	415	698	81	130	175
CPJ Ain-El-Kébira	Retrait ($\mu\text{m/m}$)			Gonflement ($\mu\text{m/m}$)		
	3 j	7 j	28 j	3 j	7 j	28 j
AF1	138	242	423	7	24	68
AF2	231	302	517	25	55	112
AF3	310	385	687	75	112	190
CPJ Hadjar-Soud	Retrait ($\mu\text{m/m}$)			Gonflement ($\mu\text{m/m}$)		
	3 j	7 j	28 j	3 j	7 j	28 j
HF1	209	365	551	11	22	40
HF2	266	412	603	37	68	100
HF3	255	487	737	56	123	201

Tableau 3.6 Retrait et gonflement provoqués par les trois ciments étudiés sur le mortier normal en fonction de la finesse.



3.4 COMPORTEMENT MECANIQUE DU MORTIER A BASE DE SABLE DE DUNE

Les résultats des essais mécaniques (compression, traction et flexion) réalisés sur des éprouvettes de mortier à base de sable de dune avec différentes finesses de mouture des ciments composés utilisés aux différents âges de durcissement (7, 28 et 90 jours), sont présentés dans les tableaux 3.7 à 3.18 et représentés respectivement par les figures 3.13 à 3.24.

* CPJ-SG : ($SF_1 = 3206 \text{ cm}^2/\text{g}$, $SF_2 = 4452 \text{ cm}^2/\text{g}$, $SF_3 = 5038 \text{ cm}^2/\text{g}$)

* CPJ-AK : ($AF_1 = 3092 \text{ cm}^2/\text{g}$, $AF_2 = 4138 \text{ cm}^2/\text{g}$, $AF_3 = 4977 \text{ cm}^2/\text{g}$)

* CPJ-HS : ($HF_1 = 3442 \text{ cm}^2/\text{g}$, $HF_2 = 4434 \text{ cm}^2/\text{g}$, $HF_3 = 5068 \text{ cm}^2/\text{g}$)

On remarque que l'accroissement des résistances en fonction de l'âge de durcissement est pratiquement identique pour tous les échantillons testés.

D'après les résultats obtenus de la résistance à la compression, traction et à la flexion des mortiers confectionnés à base de sable de dune (Boussâada), on constate que :

► L'augmentation de la surface spécifique du ciment entraîne un accroissement des résistances mécaniques. Cela s'explique par l'accroissement de la cinétique rapide d'hydratation des minéraux C_3S et C_2S . Ces derniers sont donc les deux minéraux principaux qui assurent le développement des résistances à court et à moyen terme.

► L'augmentation de la surface spécifique du ciment améliore nettement les résistances mécaniques du mortier. Ceci confirme le rôle de la finesse de mouture (activation mécanique ou broyage poussé) dans l'hydratation rapide et complète du ciment composé (réaction pouzzolanique) par la formation de la portlandite $C_a(OH)_2$ libérée pendant l'hydratation du ciment. Cette réaction pouzzolanique donne naissance à un deuxième silicate de calcium hydraté supplémentaire (C-S-H) : principal responsable du durcissement de la pâte.

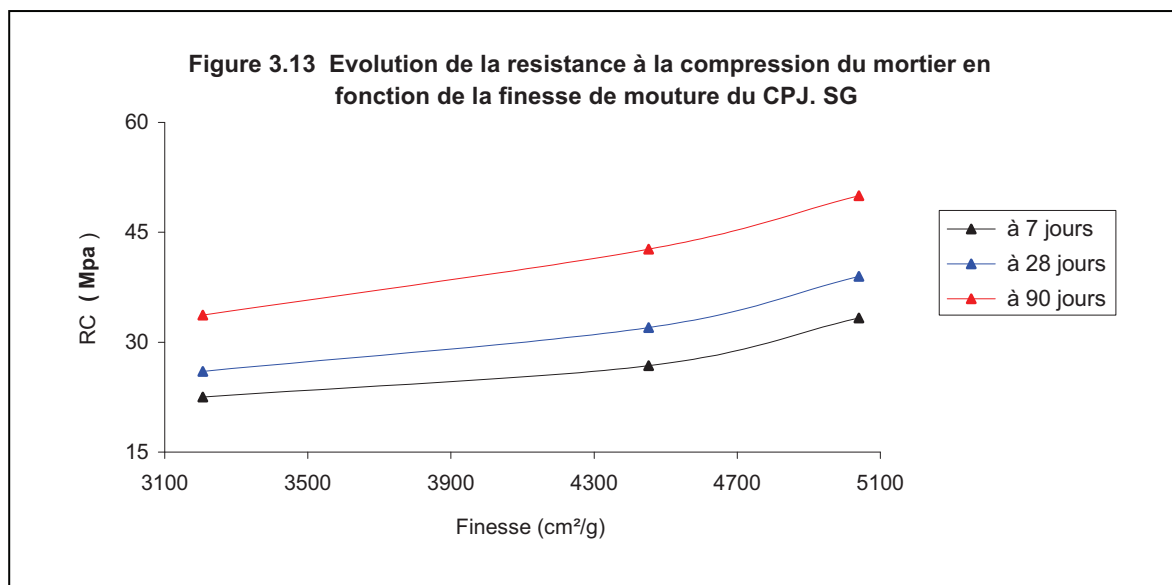
Donc la faiblesse des résistances aux jeunes âges (à court terme) peut être compensée par l'activation mécanique (augmentation de la finesse de mouture).

3.4.1 INFLUENCE DE LA FINESSE DU CIMENT SUR LA RESISTANCE A LA COMPRESSION DU MORTIER

Les résultats obtenus sont présentés dans les tableaux 3.7 à 3.10 et représentés respectivement par les figures 3.13 à 3.16.

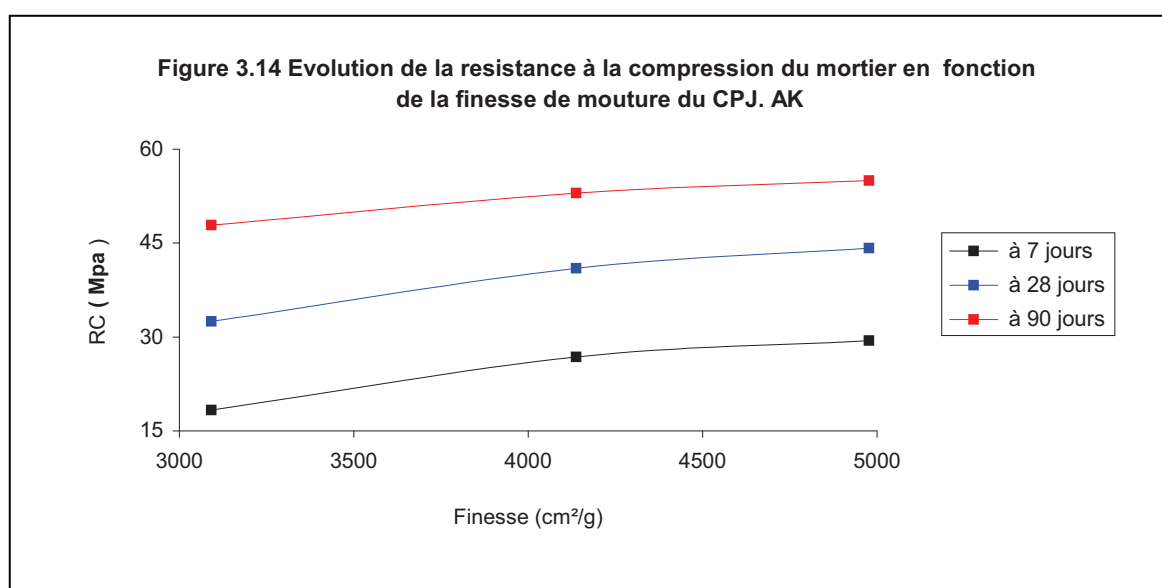
CPJ Sour el Ghozlane	S.S.B (cm²/g)	RCM₇ (Mpa)	RCM₂₈ (Mpa)	RCM₉₀ (Mpa)
SF1	3205	22.5	26	33.7
SF2	4452	26.8	32	42.7
SF3	5038	33.3	39	50

Tableau 3.7 Résistance à la compression du mortier en fonction de la finesse du **CPJ-SG**



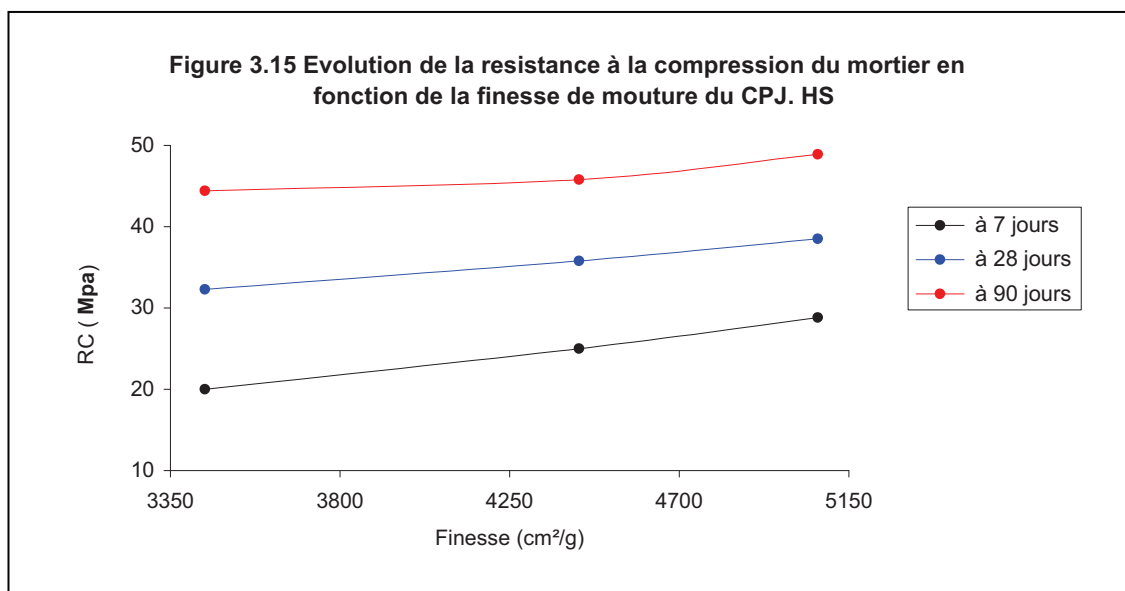
CPJ Ain el Kebira	S.S.B (cm²/g)	RCM₇ (Mpa)	RCM₂₈ (Mpa)	RCM₉₀ (Mpa)
AF1	3092	18.3	32.5	29.4
AF2	4138	26.8	41	44.2
AF3	4977	33.3	53	55

Tableau 3.8 Résistance à la compression du mortier en fonction de la finesse du **CPJ-AK**



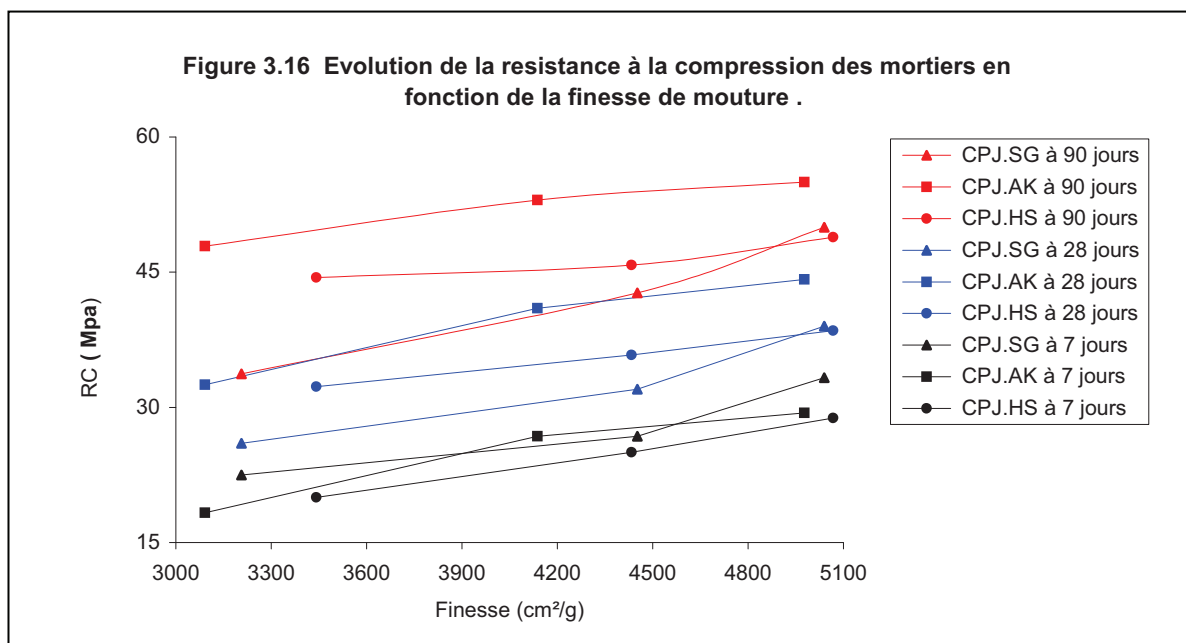
CPJ Hdjar Essoud	S.S.B (cm²/g)	RCM₇ (Mpa)	RCM₂₈ (Mpa)	RCM₉₀ (Mpa)
HF1	3442	20	32.3	45.8
HF2	4434	25	35.8	48.8
HF3	5068	28.8	38.5	48.9

Tableau 3.9 Résistance à la compression du mortier en fonction de la finesse du CPJ-HS



CPJ Sour el Ghazlane	S.S.B (cm²/g)	RCM₇ (Mpa)	RCM₂₈ (Mpa)	RCM₉₀ (Mpa)
SF1	3205	22.5	26	33.7
SF2	4452	26.8	32	42.7
SF3	5038	33.3	39	50
CPJ Ain el Kebira	S.S.B (cm²/g)	RCM₇ (Mpa)	RCM₂₈ (Mpa)	RCM₉₀ (Mpa)
AF1	3092	18.3	32.5	29.4
AF2	4138	26.8	41	44.2
AF3	4977	33.3	53	55
CPJ Hdjar Essoud	S.S.B (cm²/g)	RCM₇ (Mpa)	RCM₂₈ (Mpa)	RCM₉₀ (Mpa)
HF1	3442	20	32.3	45.8
HF2	4434	25	35.8	48.8
HF3	5068	28.8	38.5	48.9

Tableau 3.10 Résistance à la compression des mortiers en fonction de la finesse.

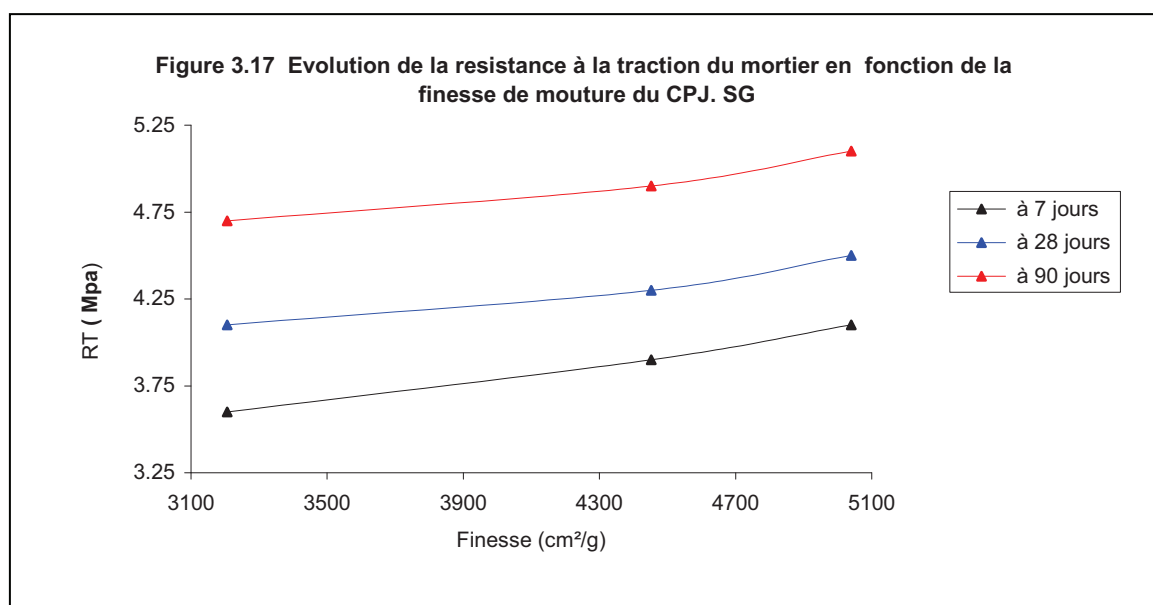


3.4.2 INFLUENCE DE LA FINESSE DU CIMENT SUR LA RESISTANCE A LA TRACTION DU MORTIER

Les résultats obtenus sont présentés dans les tableaux 3.11 à 3.14 et représentés respectivement par les figures 3.17 à 3.20.

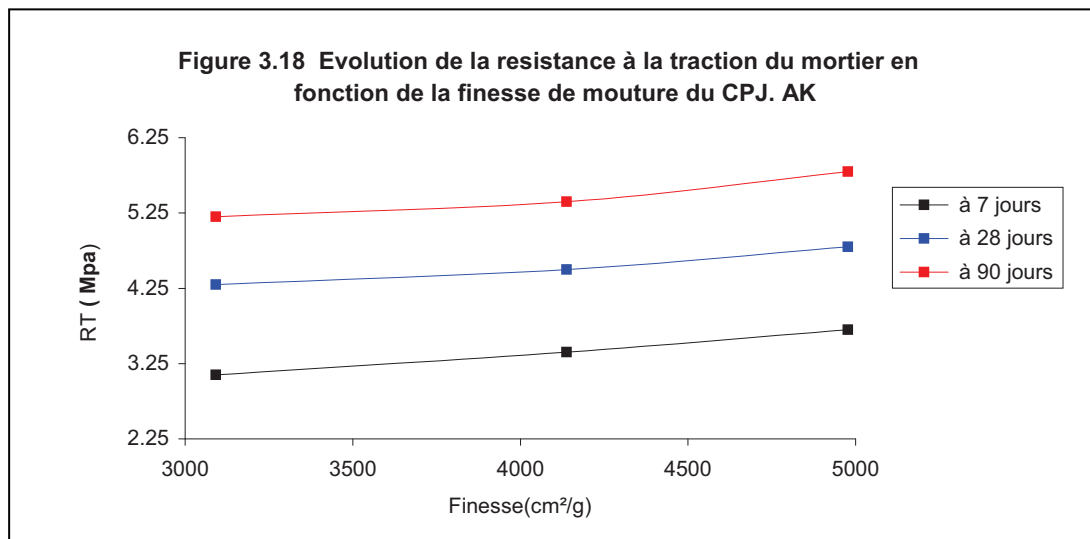
CPJ Sour el Ghazlane	S.S.B (cm ² /g)	RTM ₇ (Mpa)	RTM ₂₈ (Mpa)	RTM ₉₀ (Mpa)
SF1	3205	3.6	4.1	4.7
SF2	4452	3.9	4.3	4.9
SF3	5038	4.1	4.5	5.1

Tableau 3.11 Résistance à la traction du mortier en fonction de la finesse du CPJ-SG



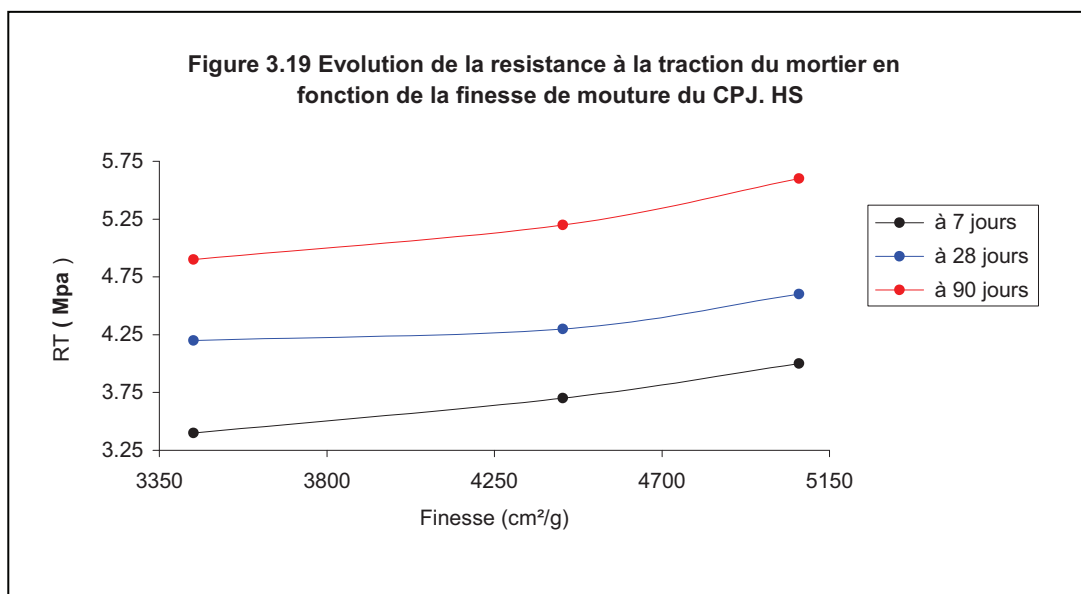
CPJ Ain el Kebira	S.S.B (cm²/g)	RTM₇ (Mpa)	RTM₂₈ (Mpa)	RTM₉₀ (Mpa)
AF1	3092	3.1	4.3	5.2
AF2	4138	3.4	4.5	5.4
AF3	4977	3.7	4.8	5.8

Tableau 3.12 Résistance à la traction du mortier en fonction de la finesse du CPJ-AK



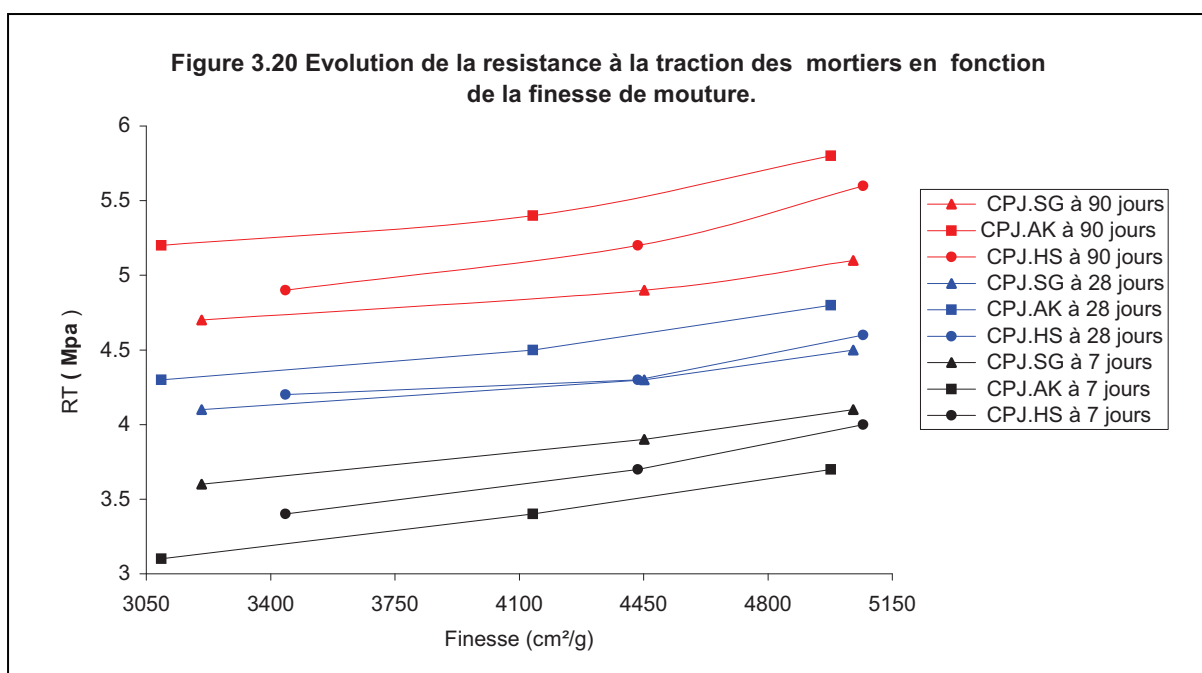
CPJ Hdjar Essoud	S.S.B (cm²/g)	RTM₇ (Mpa)	RTM₂₈ (Mpa)	RTM₉₀ (Mpa)
HF1	3442	3.4	4.2	4.9
HF2	4434	3.7	4.3	5.2
HF3	5068	4	4.6	5.6

Tableau 3.13 Résistance à la traction du mortier en fonction de la finesse du CPJ-HS



CPJ Sour el Ghoulane	S.S.B (cm²/g)	RTM₇ (Mpa)	RTM₂₈ (Mpa)	RTM₉₀ (Mpa)
SF1	3205	3.6	4.1	4.7
SF2	4452	3.9	4.3	4.9
SF3	5038	4.1	4.5	5.1
CPJ Ain el Kebira	S.S.B (cm²/g)	RTM₇ (Mpa)	RTM₂₈ (Mpa)	RTM₉₀ (Mpa)
AF1	3092	3.1	4.3	5.2
AF2	4138	3.4	4.5	5.4
AF3	4977	3.7	4.8	5.8
CPJ Hdjar Essoud	S.S.B (cm²/g)	RTM₇ (Mpa)	RTM₂₈ (Mpa)	RTM₉₀ (Mpa)
HF1	3442	3.4	4.2	4.9
HF2	4434	3.7	4.3	5.2
HF3	5068	4	4.6	5.6

Tableau 3.14 Résistance à la traction des mortiers en fonction de la finesse du CPJ-HS

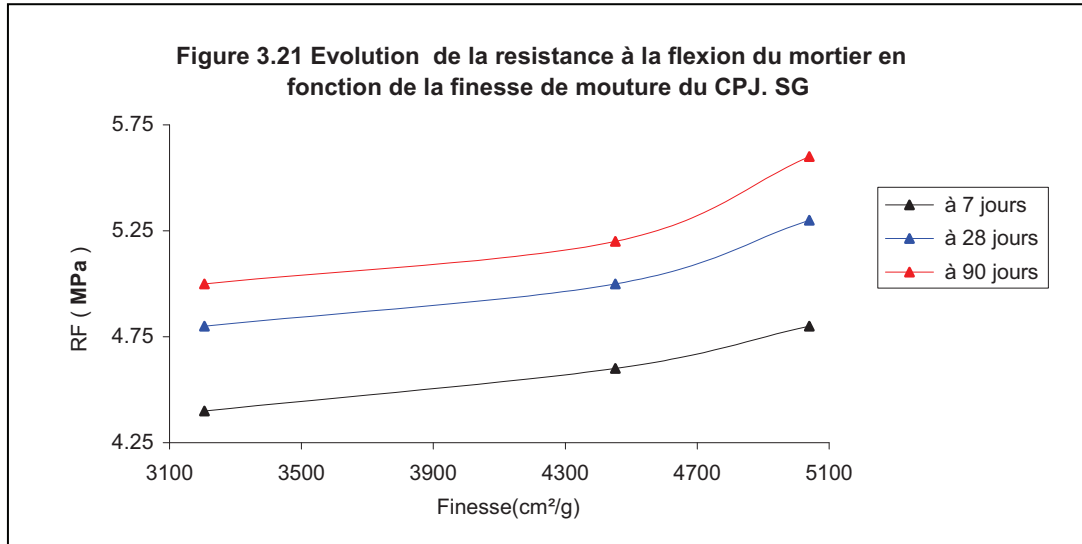


3.4.3 INFLUENCE DE LA FINESSE DU CIMENT SUR LA RESISTANCE A LA FLEXION DU MORTIER

Les résultats obtenus des essais mécaniques réalisés sont présentés dans les tableaux 3.15 à 3.18 et représentés respectivement par les figures 3.21 à 3.24.

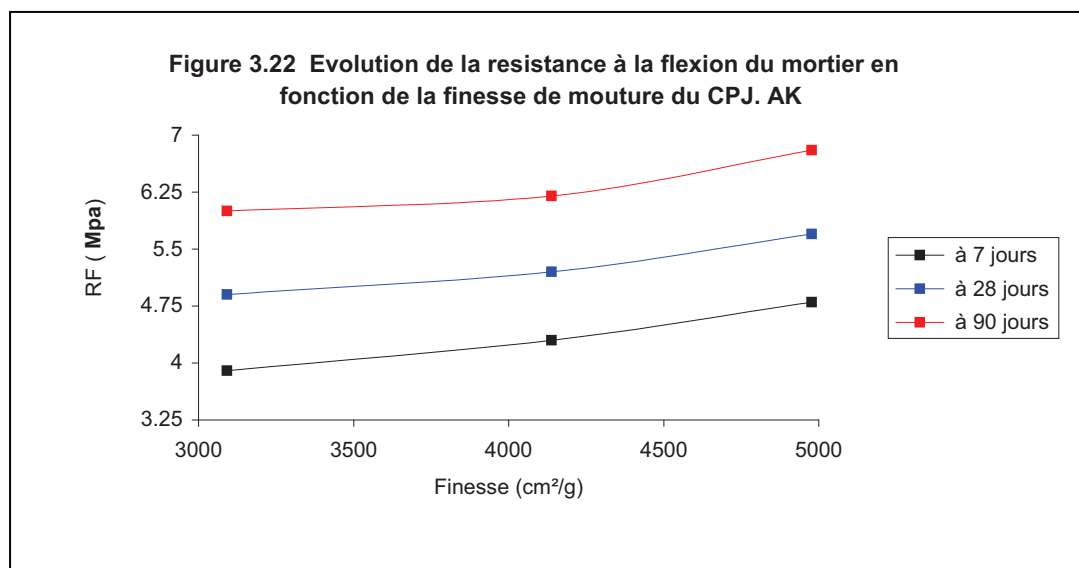
CPJ Sour el Ghozlane	S.S.B (cm²/g)	RFM₇ (Mpa)	RFM₂₈ (Mpa)	RFM₉₀ (Mpa)
SF1	3205	4.4	4.8	5
SF2	4452	4.6	5	5.2
SF3	5038	4.8	5.3	5.6

Tableau 3.15 Résistance à la flexion du mortier en fonction de la finesse du **CPJ. SG**



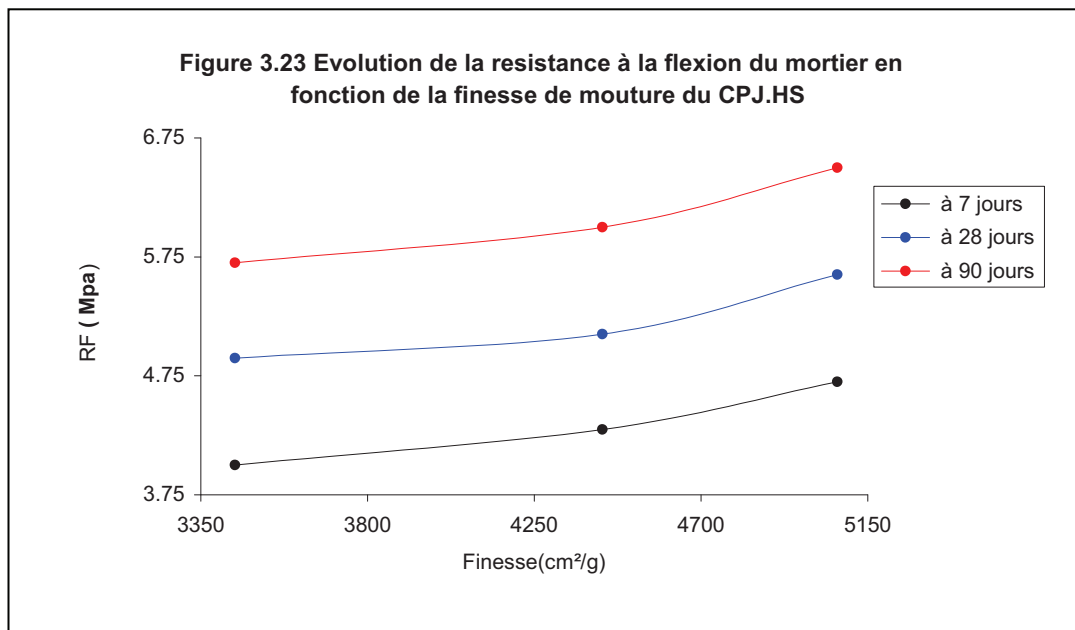
CPJ Ain el Kebira	S.S.B (cm²/g)	RFM₇ (Mpa)	RFM₂₈ (Mpa)	RFM₉₀ (Mpa)
AF1	3092	3.9	4.9	6
AF2	4138	4.3	5.2	6.2
AF3	4977	4.8	5.7	6.8

Tableau 3.16 Résistance à la flexion du mortier en fonction de la finesse du **CPJ. AK**



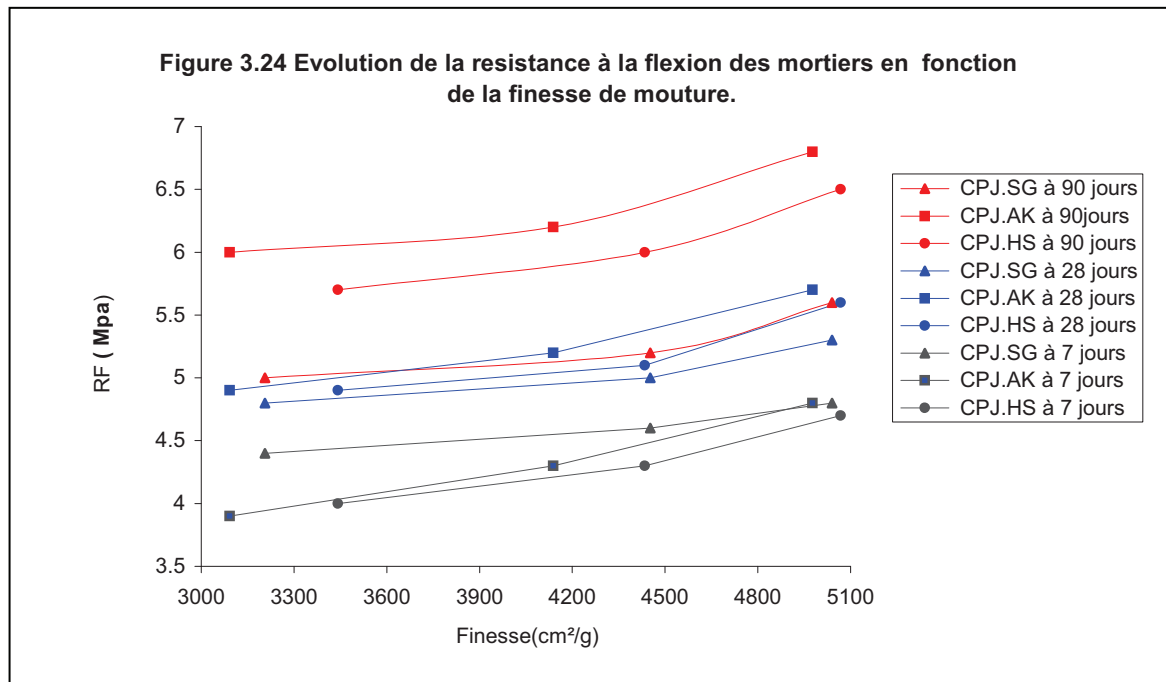
CPJ Hdjar Essoud	S.S.B (cm²/g)	RFM₇ (Mpa)	RFM₂₈ (Mpa)	RFM₉₀ (Mpa)
HF1	3442	4	4.9	5.7
HF2	4434	4.3	5.1	6
HF3	5068	4.7	5.6	6.5

Tableau 3.17 Résistance à la flexion du mortier en fonction de la finesse du **CPJ. HS**



CPJ Sour el Ghozlane	S.S.B (cm²/g)	RFM₇ (Mpa)	RFM₂₈ (Mpa)	RFM₉₀ (Mpa)
SF1	3205	4.4	4.8	5
SF2	4452	4.6	5	5.2
SF3	5038	4.8	5.3	5.6
CPJ Ain el Kebira	S.S.B (cm²/g)	RFM₇ (Mpa)	RFM₂₈ (Mpa)	RFM₉₀ (Mpa)
AF1	3092	3.9	4.9	6
AF2	4138	4.3	5.2	6.2
AF3	4977	4.8	5.7	6.8
CPJ Hdjar Essoud	S.S.B (cm²/g)	RFM₇ (Mpa)	RFM₂₈ (Mpa)	RFM₉₀ (Mpa)
HF1	3442	4	4.9	5.7
HF2	4434	4.3	5.1	6
HF3	5068	4.7	5.6	6.5

Tableau 3.18 Résistance à la flexion des mortiers en fonction de la finesse.



3.5 INFLUENCE DE LA FINESSE DU CIMENT SUR LA RESISTANCE A LA COMPRESSION DU BETON A BASE DE MATERIAUX LOCAUX

Les résultats des essais mécaniques de compression réalisés sur des éprouvettes cubiques (10x10x10 cm³) de béton à base de matériaux locaux (sable de dune et pierres concassées d'El-Euch) en fonction de la finesse de mouture du ciment composé aux différents âges de durcissement (2, 7, 28 et 90 jours) sont présentés dans les tableaux 3.19 à 3.22 et représentés respectivement par les figures 3.25 à 3.28.

*** Sour-El-Ghozlane : (SF₁= 3206 cm²/g, SF₂ = 4452 cm²/g, SF₃ = 5038 cm²/g)**

*** Ain-El-Kébira : (AF₁= 3092 cm²/g, AF₂ = 4138 cm²/g, AF₃ = 4977 cm²/g)**

*** Hadjar-Soud : (HF₁= 3442 cm²/g, HF₂ = 4434 cm²/g, HF₃ = 5068 cm²/g)**

Les constatations faites sur la résistance à la compression du mortier sont pratiquement identiques à celles du béton et donc l'interprétation des résultats est la même.

De même lorsque la finesse de mouture croît, la résistance mécanique à la compression augmente.

Le taux d'accroissement de la résistance mécanique à la compression en fonction de la finesse de mouture augmente lorsque la surface spécifique du ciment croît et ceci selon la réactivité d'hydratation de l'ajout minéral utilisé.

La comparaison des résultats de résistance mécanique obtenu pour les bétons testés à base de différents ciments composés (ajouts minéraux différents) est la suivante :

*** Comparaison des résultats à 2 jours de durcissement :**

► La résistance mécanique du béton à base de CPJ-SG à 2 jours d'âge de durcissement croît de 11.41% à 45,65%, respectivement pour les finesses choisies de 3206 cm²/g à 4452 cm²/g et de 4452 cm²/g à 5038 cm²/g.

► La résistance mécanique du béton à base de CPJ-AK à 2 jours d'âge de durcissement croît de 23.38% à 62.90 %, respectivement pour les finesses de 3092 cm²/g à 4138 cm²/g et de 4138 cm²/g à 4977 cm²/g.

► La résistance mécanique du béton à base de CPJ-HS à 2 jours d'âge de durcissement croît de 15.56 % à 37.72 %, respectivement pour les finesses de 3442 cm²/g à 4434 cm²/g et de 4434 cm²/g à 5068 cm²/g.

*** Comparaison des résultats à 7 jours de durcissement :**

► La résistance mécanique du béton à base de CPJ-SG à 7 jours d'âge de durcissement croît de 5.18 % à 24.39 %, respectivement pour les finesses de 3206 cm²/g à 4452 cm²/g et de 4452 cm²/g à 5038 cm²/g.

► La résistance mécanique du béton à base de CPJ-AK à 7 jours d'âge de durcissement croît de 25.45% à 44.36 %, respectivement pour les finesses de 3092 cm²/g à 4138 cm²/g et de 4138 cm²/g à 4977 cm²/g.

► La résistance mécanique du béton à base de CPJ-HS à 7 jours d'âge de durcissement croît de 4.61 % à 10.76 %, respectivement pour les finesses de 3442 cm²/g à 4434 cm²/g et de 4434 cm²/g à 5068 cm²/g.

*** Comparaison des résultats à 28 jours de durcissement :**

► La résistance mécanique du béton à base de CPJ-SG à 28 jours d'âge de durcissement croît de 4.06 % à 20.81 %, respectivement pour les finesses de 3206 cm²/g à 4452 cm²/g et de 4452 cm²/g à 5038 cm²/g.

► La résistance mécanique du béton à base de CPJ-AK à 28 jours d'âge de durcissement croît de 8.79% à 15.31%, respectivement pour les finesses de 3092 cm²/g à 4138 cm²/g et de 4138 cm²/g à 4977 cm²/g.

► La résistance mécanique du béton à base de CPJ-HS à 28 jours d'âge de durcissement croît de 8.88 % à 13.33 %, respectivement pour les finesses de 3442 cm²/g à 4434 cm²/g et de 4434 cm²/g à 5068 cm²/g.

*** Comparaison des résultats à 90 jours de durcissement :**

► La résistance mécanique du béton à base de CPJ-SG à 90 jours d'âge de durcissement croît de 6.25 % à 15,58 %, respectivement pour les finesses de 3206 cm²/g à 4452 cm²/g et de 4452 cm²/g à 5038 cm²/g.

► La résistance mécanique du béton à base de CPJ-AK à 90 jours d'âge de durcissement croît de 9.61 % à 20.76 %, respectivement pour les finesses de 3092 cm²/g à 4138 cm²/g et de 4138 cm²/g à 4977 cm²/g.

► La résistance mécanique du béton à base de CPJ-HS à 90 jours d'âge de durcissement croît de 10.74 % à 14.81 %, respectivement pour les finesses de 3442 cm²/g à 4434 cm²/g et de 4434 cm²/g à 5068 cm²/g.

La conclusion qu'on peut déduire est que :

- L'activation mécanique (broyage poussé) des ciments aux ajouts minéraux accélère fortement la cinétique d'hydratation à 2 jours de durcissement (réactivité très rapide de la réaction d'hydratation).

- L'augmentation de la finesse des ciments aux ajouts minéraux accélère moyennement la cinétique d'hydratation à 28 jours de durcissement (réactivité moyenne de la réaction d'hydratation).

- L'augmentation de la finesse des ciments aux ajouts minéraux accélère faiblement la cinétique d'hydratation à 90 jours de durcissement (réactivité faible de la réaction d'hydratation).

- Le taux d'accroissement de la résistance mécanique à la compression du béton croît en fonction de la finesse des ciments composés utilisés.

- Les résultats présentés dans le tableau 2.23 et la figure 2.29 précisent clairement l'influence des paramètres étudiés (finesse et nature du ciment composé) sur la réponse mécanique du béton :

- * réactivité de l'ajout minéral (CPJ-AK : résistance mécanique meilleure par rapport aux CPJ-SG et CPJ-HS),

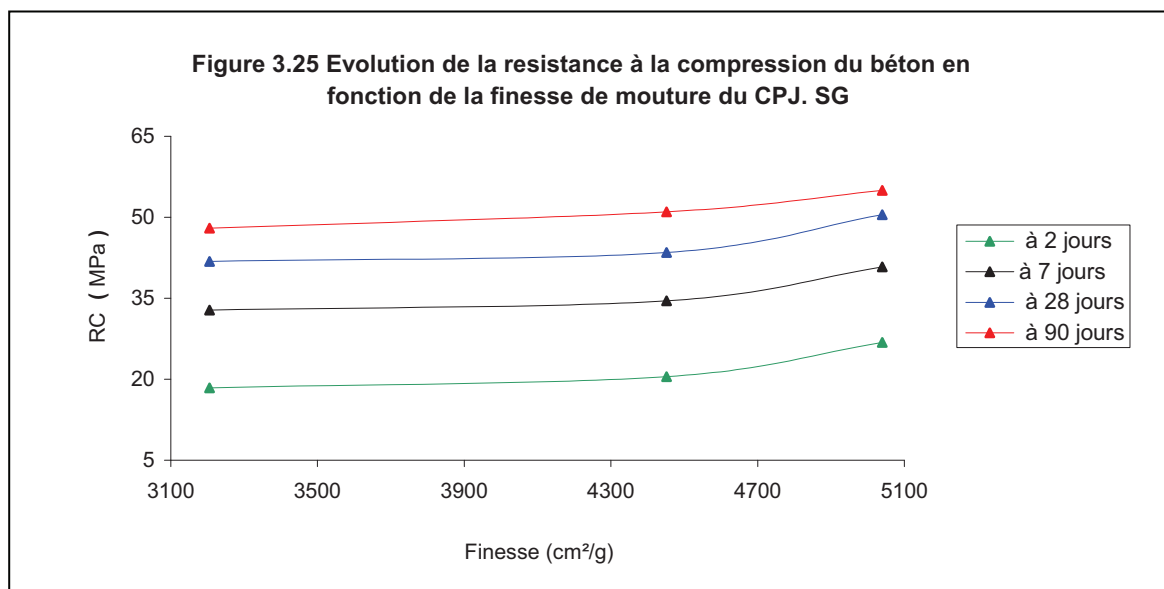
- * variation dimensionnelle (retrait faible : CPJ-AK par rapport aux CPJ-SG et CPJ-HS),

- * Le ciment composé de Hadjar-Soud «CPJ-HS» présente un faible accroissement de la résistance mécanique à 7 et à 28 jours par rapport aux autres ciments composés (CPJ-AK et CPJ-SG), ceci précise clairement l'hydratation latente du laitier de haut fourneau de Annaba (quantité importante de laitier présente dans le ciment : 30%).

- * L'accroissement des réponses mécaniques en fonction de la variation de la finesse (activation mécanique) croît d'une façon différente d'un ciment à un autre, ceci dépend du type et pourcentage d'ajout minéral (réactivité de l'ajout) incorporé dans le ciment composé.

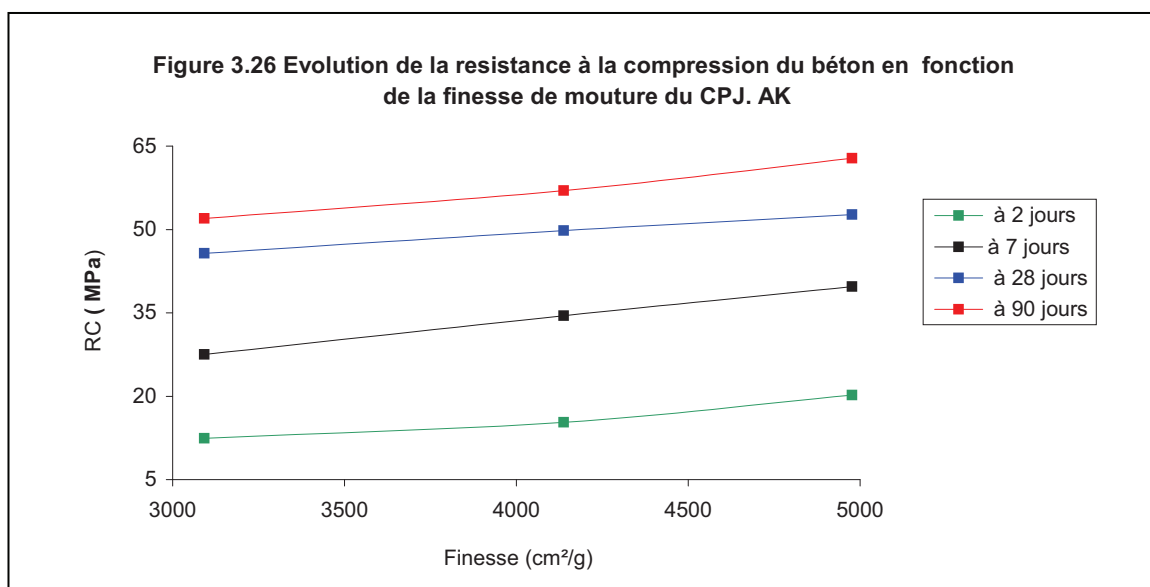
CPJ Sour el Ghzlane	S.S.B (cm²/g)	RCB₂ (Mpa)	RCB₇ (Mpa)	RCB₂₈ (Mpa)	RCB₉₀ (Mpa)
SF1	3205	18.4	32.8	41.8	48
SF2	4452	20.5	34.5	43.5	51
SF3	5038	26.8	40.8	50.5	55

Tableau 3.19 Résistance à la compression du béton en fonction de la finesse du **CPJ. SG**



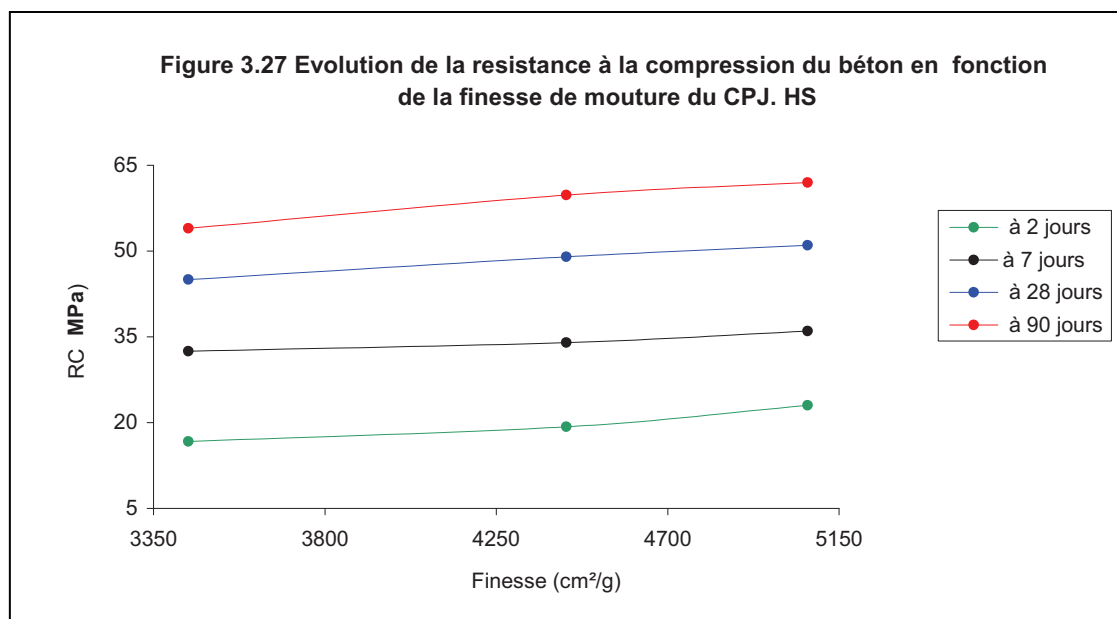
CPJ Ain el Kebira	S.S.B (cm²/g)	RCB₂ (Mpa)	RCB₇ (Mpa)	RCB₂₈ (Mpa)	RCB₉₀ (Mpa)
AF1	3092	12.4	27.5	45.7	52
AF2	4138	15.3	34.5	49.8	57
AF3	4977	20.2	39.7	52.7	62.8

Tableau 3.20 Résistance à la compression du béton en fonction de la finesse du **CPJ. AK**



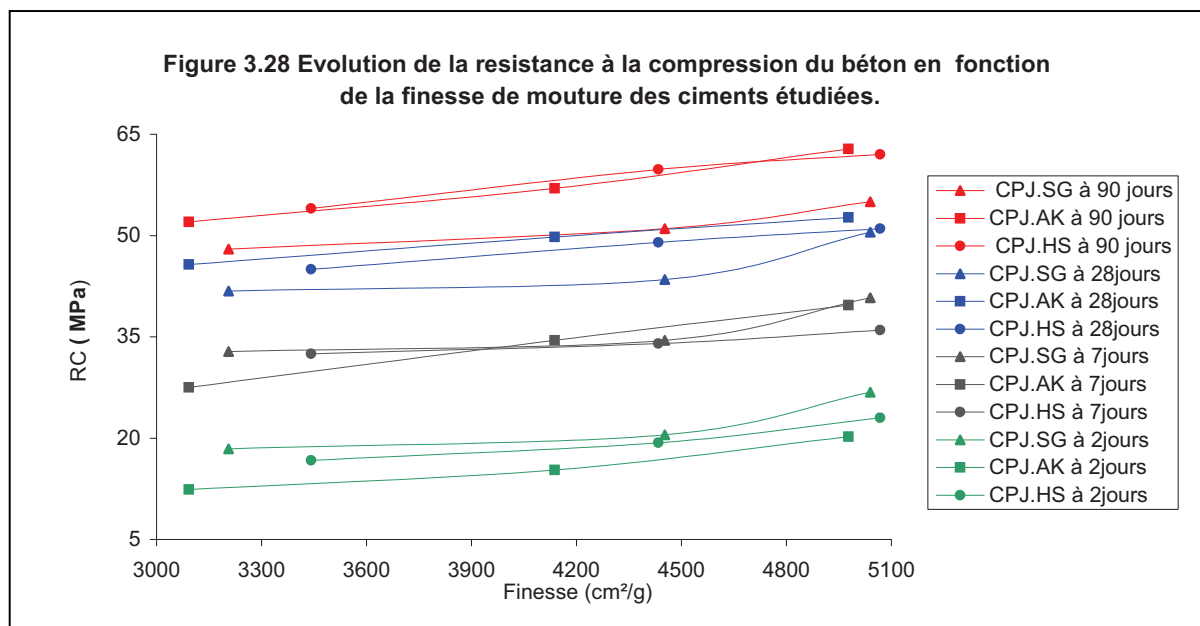
CPJ Hdjar Essoud	S.S.B (cm²/g)	RCB₂ (Mpa)	RCB₇ (Mpa)	RCB₂₈ (Mpa)	RCB₉₀ (Mpa)
HF1	3442	16.7	32.5	45	54
HF2	4434	19.3	34	49	59.8
HF3	5068	23	36	51	62

Tableau 3.21 Résistance à la compression du béton en fonction de la finesse du CPJ. HS



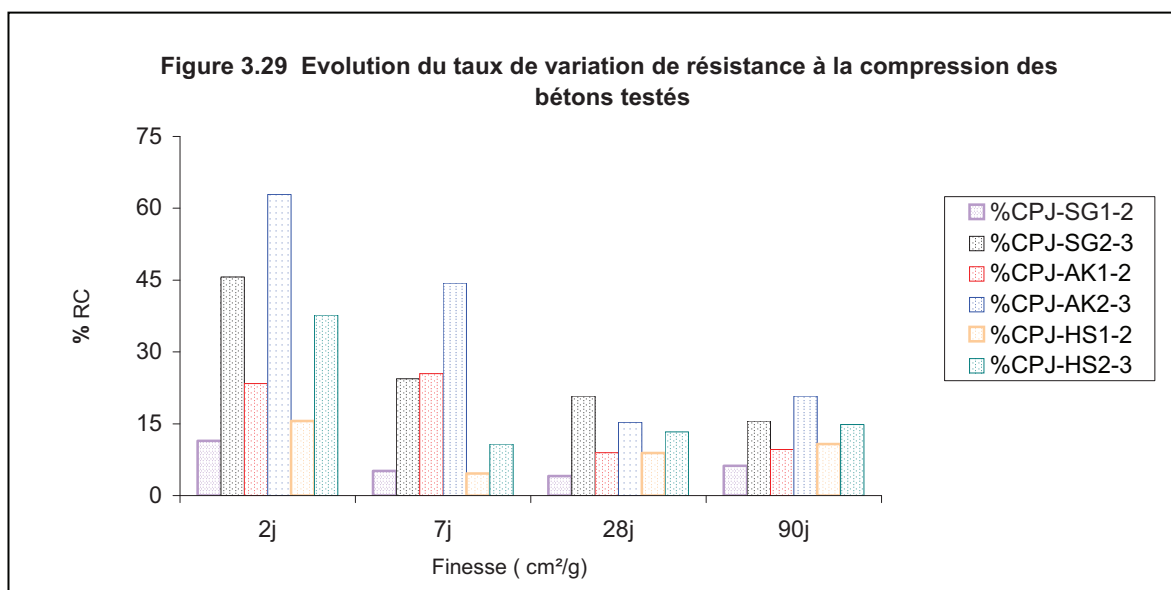
CPJ Sour el Ghoulane	S.S.B (cm²/g)	RCB₂ (Mpa)	RCB₇ (Mpa)	RCB₂₈ (Mpa)	RCB₉₀ (Mpa)
SF1	3205	18.4	32.8	41.8	48
SF2	4452	20.5	34.5	43.5	51
SF3	5038	26.8	40.8	50.5	55
CPJ Ain el Kebira	S.S.B (cm²/g)	RCB₂ (Mpa)	RCB₇ (Mpa)	RCB₂₈ (Mpa)	RCB₉₀ (Mpa)
AF1	3092	12.4	27.5	45.7	52
AF2	4138	15.3	34.5	49.8	57
AF3	4977	20.2	39.7	52.7	62.8
CPJ Hdjar Essoud	S.S.B (cm²/g)	RCB₂ (Mpa)	RCB₇ (Mpa)	RCB₂₈ (Mpa)	RCB₉₀ (Mpa)
HF1	3442	16.7	32.5	45	54
HF2	4434	19.3	34	49	59.8
HF3	5068	23	36	51	62

Tableau 3.22 Résistance à la compression des bétons en fonction de la finesse.



	Rapports de Variations des résistances	% de la variation de la résistance à la compression en (Mpa)			
		%RC ₂	%RC ₇	%RC ₂₈	%RC ₉₀
%CPJ-SG1-2	SF2 – SF1 / SF1	11.41	5.18	4.06	6.25
%CPJ-SG2-3	SF3 – SF2 / SF2	45.65	24.39	20.81	15.58
%CPJ-AK1-2	AF2 – AF1 / AF1	23.38	25.45	8.97	9.61
%CPJ-AK2-3	AF3 – AF2 / AF2	62.90	44.36	15.31	20.76
%CPJ-HS1-2	HF2 - HF1 / HF1	15.56	4.61	8.88	10.74
%CPJ-HS2-3	HF3 – HF2 / HF2	37.72	10.76	13.33	14.81

Tableau 3.23 Evolution du taux de variation de la résistance à la compression des bétons testés.



CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

1. CONCLUSION GENERALE

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

Le ciment portland composé (C.P.J-C.E.M II) avec ajout minéral se distingue par un durcissement ralenti à sa période initiale en comparaison avec un ciment Portland ordinaire sans ajout, c'est-à-dire sans constituant secondaire (C.P.A-C.E.M I). Cette propriété latente du ciment avec ajout minéral (C.P.J-C.E.M II), 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 (C.P.J-C.E.M II) ont des temps de prise un peu plus longs que les ciments Portlands purs (C.P.A-C.E.M I), surtout dans le cas de bétonnage par temps froid. On sait que les temps de prise peuvent être raccourcis :

- * grâce à une finesse (surface spécifique) plus grande,

- * grâce à l'emploi d'adjuvants accélérateurs (la soude, la potasse, les chlorures de sodium, . . .).

L'objectif de cette étude expérimentale consiste à étudier l'influence de la finesse (surface spécifique) et de la granulométrie (distribution des tailles de particules) des ciments aux ajouts minéraux 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 trois types de ciments (C.P.J-C.E.M II) de différentes cimenteries (ciments avec différents ajouts minéraux : laitier, tuf et pouzzolane-calcaire).

Les propriétés physiques des ciments (C.P.J-C.E.M II) 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 à leurs bases, telles que, le retrait, le gonflement et les réponses mécaniques (R_f , R_t et R_c pour le mortier et R_c pour le béton) ont été étudiées.

D'après les résultats expérimentaux obtenus, il ressort que l'augmentation de la surface spécifique et la composition (type et nature d'ajout minéral) des ciments aux ajouts minéraux sont les principaux responsables à l'amélioration de la réactivité latente des additions minérales et de l'accroissement des résistances mécaniques des mortiers et bétons.

Les divers résultats présentés dans ce mémoire précisent clairement l'influence majeure de l'activation mécanique (broyage poussé) des ciments aux ajouts minéraux (CPJ-CEM II/A et CPJ-CEM II/B) sur la cinétique d'hydratation des ciments (consistance et délais de prise), 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 de la finesse (surface spécifique) des ciments composés influe sensiblement sur le besoin en eau nécessaire pour avoir une consistance normale.

- * Les temps de début et de fin de prise diminuent proportionnellement avec l'augmentation de la finesse des ciments composés.

- * l'activation mécanique (broyage poussé) des ciments aux ajouts minéraux présente deux avantages essentiels : une bonne résistance mécanique du mortier et du béton ainsi qu'une cinétique d'hydratation accélérée 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 de la finesse des ciments aux ajouts cimentaires (tuff, pouzzolane-calcaire et laitier) sur les propriétés physiques et mécaniques des matériaux (ciments, mortiers et bétons) diffère d'un ciment à un autre (type et nature de l'ajout minéral).

- * Enfin, les ciments aux ajouts minéraux doivent être finement broyés ($S_p > 3500 \text{ cm}^2/\text{g}$) afin d'accélérer la cinétique d'hydratation des ciments à court terme (amélioration de la réactivité des ajouts minéraux cimentaires) et assurer une bonne résistance mécanique du matériau :

- L'activation mécanique (broyage poussé) des ciments aux ajouts minéraux accélère fortement la cinétique d'hydratation à 2 jours de durcissement (réactivité très rapide de la réaction d'hydratation).

- L'augmentation de la finesse des ciments aux ajouts minéraux accélère moyennement la cinétique d'hydratation à 28 jours de durcissement (réactivité moyenne de la réaction d'hydratation).

- L'augmentation de la finesse des ciments aux ajouts minéraux accélère faiblement la cinétique d'hydratation à 90 jours de durcissement (réactivité faible de la réaction d'hydratation).

2. PERSPECTIVES (FUTURS TRAVAUX)

L'objectif principal de cette recherche était :

d'une part, l'étude de l'influence du broyage poussé (activation mécanique) sur les propriétés physico-chimiques (Fluorescence aux rayons X «F.R.X» et perméabilimètre de Blaine «P.B») et les paramètres granulométriques des ciments étudiés à l'aide d'un granulomètre à laser «G.L» (classe et distribution granulométrique).

d'autre part, l'étude de l'influence de la finesse des ciments composés (tuff, pouzzolane-calcaire et laitier) sur :

- le poids spécifique du ciment à l'état anhydre, la consistance normale et les délais de prise (début et fin) de la pâte du ciment composé à base d'ajout minéral,

- le retrait et le gonflement du mortier normal à base d'un sable normalisé,
- le comportement mécanique des mortiers et des bétons.

En perspective, nous proposons les axes de recherches suivants :

1- Influence chimique et physique des ajouts minéraux (laitier, pouzzolane et calcaire) sur le comportement mécanique du mortier et du béton à base de matériaux locaux.

2- Effet des adjuvants sur la cinétique d'hydratation des ciments aux ajouts minéraux.

3- Influence du rapport E/C et du mode de conservation sur la réponse mécanique du mortier et du béton à base de ciments aux ajouts minéraux.

4 - Etude de l'influence des paramètres granulométriques des ajouts minéraux sur les propriétés physiques et mécaniques des mortiers et bétons.

5 - Etude de l'influence des tensioactifs (agents de mouture) sur le broyage des ciments composés à base d'ajouts minéraux dans le but :

- * d'améliorer le rendement des broyeurs,
- * de réduire le temps de broyages,
- * limiter la consommation d'énergie.

6 -Mesure de la chaleur d'hydratation par calorimétrie en fonction de la finesse de mouture des ciments aux ajouts minéraux (détermination de la quantité de chaleur dégagée pendant l'hydratation des ciments composés).

7- Analyse microstructurale par diffraction aux rayons X (DRX) et observation des faciès au microscope électronique à balayage (MEB) des pâtes de ciments composés à différents temps de durcissement (contrôle de la formation de l'étringite, de la portlandite et des CSH).

8- Etude de l'influence des méthodes d'activation (chimique et thermique) des ajouts minéraux cimentaires (laitier, pouzzolane, calcaire, etc . . .).

9- Influence de l'activation des ajouts minéraux (actifs et inertes) par la chaux (chaux fine < 80 μm) ou au gypsonat (gypse + soude) sur la réponse mécanique du mortier et du béton.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1]- **R. KARA ALI**, "Influence des additions minérales sur le besoin en eau et les résistances mécaniques des mélanges cimentaires", Thèse de Doctorat, Université de Cergy-Pontoise, 2002.
- [2]- **A. BESSA, JP. BIGAS & JL. GALLIAS**, "Influence des additions minérales naturelles et industrielles sur les principaux paramètres de formulation de mortiers", XXI^{èmes} Rencontres Universitaires de Génie Civil, 2003.
- [3]- **M. VENUAT**, "La pratique des ciments, mortiers et bétons", 2^{ème} Editions du Moniteur des Travaux Publics et de Bâtiment, Paris, 1989.
- [4]- **AFNOR**, "Liants hydrauliques, définition, classification et spécification des ciments", Normalisation Française : AFNOR P 15-301, Paris, pp. 1-11, 1994.
- [5]- **CENTRE D'INFORMATION SUR LE CIMENT ET SES APPLICATIONS**, "Fiches techniques : Le ciment et ses applications", Collection Technique CIMBETON, Paris, 1997.
- [6]- **M. PAPADAKIS & M. VENUAT**, "Réactions d'hydratation", Fabrication et utilisation des liants hydrauliques, 2^{ème} Edition, Paris, pp. 187-205, 1966.
- [7]- **F. ROUESSAC & A. ROUESSAC**, "Analyse chimique : Méthodes et techniques instrumentales modernes", 3^{ème} Edition, MASSON Ed, Paris, 1997.
- [8]- **NORME SIA 215**, "Liants minéraux", Société Suisse des Ingénieurs et Architectes, Zurich, 1978.
- [9]- **HFW. TAYLOR**, "Cement chemistry", T.TELFORD, London, 1997.
- [10]- **PC. HEWLETT**, "Chemistry of cement and concrete", Editions Arnold, 1998.
- [11]- **AFNOR**, "Recueil des normes françaises, béton et constituants du béton", Ciments et Chaux, Tome 2, AFNOR, Paris, 1990.
- [12]- **K. HERMANN**, "Les ajouts", Bulletin du ciment, N° 4, Paris, 1995.
- [13]- **BEI. ABDELRAZIG, SD. MAIN & DV. NOWELL**, "Hydration studies of modified OPC pastes by differential scanning calorimetry", Journal of Thermal Analysis, Vol. 38, pp. 495-504, 1992.
- [14]- **VS. RAMACHANDRAN**, "Utilisation des déchets et sous-produits comme granulats du béton", Institut de Recherche en Construction I.R.C, Canada, 1995.

- [15]- **F. ROUESSAC & A. ROUESSAC**, "Analyse chimique : Méthodes et techniques instrumentales modernes", 4^{ème} Edition, DUNOD, Paris, 1998.
- [16]- **RAPPORT D4ACTIVITES**, Centre de recherche, Sherbrooke-Laval, 1998.
- [17]- **CETIM**, Unité de recherches, Boumerdes, 2003.
- [18]- **A. BESSA**, "Evaluation de la contribution des additions minérales naturelles à l'activité liante du ciment dans les mortiers", XXI^{èmes} Rencontres Universitaires de Génie Civil, 2003.
- [19]- **W. KURDOWSKI & A. SZUMMER**, "L'influence des composants mineurs sur les propriétés hydrauliques du clinker Portland", Silicates Industriels, Tome 33, N° 6, pp. 183-191, 1978.
- [20]- **R. DELGOVE & JM. HOCHART**, "Granulométrie laser", 8Th Symposium : Caractérisation de la granulométrie, Reims, pp. 63-68, 2001.
- [21]- **R. BALACHANDAR, SR. MULPURU & MH. UNGURIAN**, "Particle size measurements : Applications of laser techniques", 7Th International Symposium, Libon, Portugal, pp. 741-748, 1994.
- [22]- **AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS**, "Standard test method of hydraulic-cement, mortar and concrete", Philadelphia, C-158, 1993.
- [23]- **T. ALLEN**, "Particle size measurement", 5Th Edition, Chapman and Hall, New York, 1990.
- [24]- **J. BENSTED**, "Hydratation of Portland cement", Advances in Cement Technology, New York Press, pp. 307-347, 1981.
- [25]- **AK. SCHINDLER & KJ. FOLLIARD**, "Influence of supplementary cementing materials on the heat of hydration of concrete", Advanced in Cement and Concrete IX Conference, Colorado, pp. 10-14, 2003.
- [26]- **V. BAROGHEL-BOUNY**, "Caractérisation des pâtes de ciment, Méthodes, Analyses et Interprétation", Thèse de Doctorat, ENPC, Paris, 1994.
- [27]- **P. TIKALSKY & RL. FREEMAN**, "The effect of pouzzolan and slag on the resistance of concrete", Master's thesis, University of Texas, 1998.
- [28]- **PC. AITCIN, A. NEVILLE & P. ACKER**, "Les différents types de retrait", Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, N° 215, pp. 41-45, 1998.