

N° d'ordre 14/2010-M/G-C

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITÉ DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE HOUARI BOUMEDIENE
FACULTE DE GENIE CIVIL



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de MAGISTER

En GENIE CIVIL
Spécialité : Géotechnique
Par

ABDELLI Kamal

Sujet

**INFLUENCE DES LAITIERS SUR LA MICROSTRUCTURE
DES BETONS A L'ETAT FRAIS ET DURCI**

Soutenu publiquement le : 20/07/2010, devant le jury composé de :

M^{me} F.KHARCHI
M^r M.N.OUDJIT
M^r BRAHMA
M^{me} K. AIT MOKHTAR
M^r S.HADDADI

Professeur à l'USTHB
Maître de conférences A à l'USTHB
Professeur à l'U. Blida
Maître de conférences A à l'USTHB
Maître de conférences A à l'USTHB

Présidente
Directeur de Thèse
Examinateur
Examinatrice
Examinateur

RÉSUMÉ

L'étude vise l'amélioration des comportements physico-chimique et mécanique, aussi bien à court terme qu'à long terme, ainsi que la durabilité des ouvrages à base des ciments aux laitiers.

Outre la protection de l'environnement, de par la réduction des gaz à effet de serre (CO_2), le recyclage des laitiers vitreux dans les ciments permet d'augmenter la compacité des bétons suite à la fixation de la Portlandite sous forme de silicate de calcium hydraté (C-S-H). De plus, les faibles dégagements de chaleur induits par les ciments à base de laitier font d'eux des candidats pour leur utilisation lors des bétonnages en grande masse ou par temps chaud (cas du Sud Algérien).

Ce travail est une contribution à l'étude de la réactivité des laitiers dans le cadre de leur utilisation comme substitut du clinker pour l'élaboration des bétons usuels et à hautes performances.

Dans la présente étude, nous avons testé des bétons à hautes performances contenant des pourcentages allant de 10% à 30% de laitier vitreux. En vue d'augmenter les performances à court terme, nous avons incorporé 10% de fumée de silice (FS) et avons réduit le rapport E/L en présence d'adjuvant haut réducteur d'eau.

Les résultats obtenus montrent que la substitution d'une partie du ciment par le laitier a permis d'améliorer les comportements rhéologique et mécanique des bétons ce qui répond aux exigences économique et environnemental.

Mots clés :

Laitier des hauts fourneaux, ciment, béton, durabilité, environnement, béton à hautes performances.

ABSTRACT

The study aims improve the physical and mechanical behaviour, both in the late as well as the durability of structures made of slag cement.

Besides protecting the environment, by reducing greenhouse gas emissions (CO_2), effects the amorphous slag recycling in cement increases the compactness of concrete after fixing the portlandite to form silicate calcium hydrate (C-S-H).

In addition, low heat release induced by slag cements make them candidates for use in mass concreting in hot weather (as in Southern Algeria).

This work is a contribution to the pouzzolanic reactivity of slag in the context of their use as substitute of clinker for the development of normal and high performance concrete.

In this study, we tested high-performance concretes containing percentages ranging from 10 to 30% amorphous slag. In order to increase performance at the early age, we have incorporated 10% silica fume (SF) and have reduced the W/L ratio in the presence of high range water reducer adjuvant.

The results show that substitution of part cement by slag has improved rheological and mechanical behaviour of concrete which meets the economical and environmental requirement.

Keywords :

Blast furnace slag, cement, durability, environment, high performance concrete.

ملخص

تهدف هذه الدراسة إلى تحسين السلوكيات الفيزيوية - كيميائية ، الميكانيكية و كذلك متانة الهياكل المصنوعة من اسمنت خبث الأفران على المدى القصير و الطويل . إضافة إلى حماية البيئة , عن طريق الحد من انبعاث الغازات ذات الأحتباس الحراري , يساهم خبث الأفران في تدعيم الرص للخرسانة بعد تثبيت البورتلنديت على شكل سيليكات الكالسيوم المهدرجة .

زيادة على ذلك , الحرارة المنخفضة الناتجة عن اسمنت خبث الأفران تجعل منه المرشح للاستخدام في الخرسانات الكتلية في الطقس الحار(كما هو الحال في الجنوب الجزائري) . هذا العمل هو مساهمة في دراسة تفاعل خبث الأفران في سياق استخدامه كبديل في الكلنكر لتطوير الخرسانة العادية و عالية الأداء .

في هذه الدراسة نقوم باختبار الخرسانات العالية الأداء و التي تحتوي على نسب تتراوح ما بين 10 الى 30 بالمائة من الخبث الزجاجي . من اجل رفع مستوى الأداء على المدى القصير , أدرجت 10 بالمائة من دخان السيليس كما خفضت نسبة كمية الماء/الرابط بدمج محسنات ذات تخفيض عالي للماء . تبين النتائج المحصل عليها أن استبدال جزء من الأسمنت بالخبث تسمح بتحسين التصرفات الريولوجية و الميكانيكية للخرسانات ذات الفعالية العالية للرد على المتطلبات الاقتصادية و البيئية .

كلمات البحث :

خبث الفرن العالي والاسمنت والخرسانة ، وقوة التحمل ، والبيئة ، وارتفاع أداء محددة .

DÉDICACE

À Mes Chères Parents,

À Mon Épouse Karima et mes filles Amel et Amira

À Tous Mes Frères et Sœurs.

À Toute Ma famille.

REMERCIEMENTS

La présentation de ce mémoire est l'occasion pour moi de remercier tous ceux qui m'ont apporté aide, conseils et encouragements durant toute la durée de ce travail.

J'exprime ma profonde reconnaissance à mon directeur de thèse, Dr M.N. OUDJIT, pour ses précieux conseils, sa disponibilité, sa patience et sa gentillesse tout au long de ces années de travail. J'ai pu apprécier ses compétences scientifiques étendues (qui ne sont plus à démontrer), mais également ses grandes qualités humaines.

Il m'est agréable de remercier le Professeur F.KHARCHI, Professeur à l'USTHB, qui me fait l'honneur de présider notre jury.

Il m'est aussi agréable de remercier le Professeur A.BRAHMA, Professeur à l'Université de Blida, qui a accepté d'être examinateur et membre de ce jury, je lui suis très reconnaissant pour l'accueil compréhensif qu'il m'a réservé.

J'adresse un grand merci au Dr K. AIT MOKHTAR, Maître de Conférence à l'USTHB, qui m'a fait le grand honneur d'examiner mes travaux et de participer à ce jury.

Je remercie Aussi Dr S.HADDADI, Maître de Conférence à l'USTHB, d'avoir accepté avec un accueil chaleureux de participer à ce jury. Je le remercie aussi pour l'aide qu'il m'a apporté, ses précieux conseils et sa patience.

Je remercie le professeur D.BENOUAR, Directeur du Laboratoire Bâti dans l'Environnement, pour sa contribution morale et matérielle pour la concrétisation de ce travail.

J'exprime mes plus sincères remerciements à mes amis et collègues A. ZENATI et K. ARROUDJ qui m'ont toujours encouragés à aller de l'avant, à avoir confiance en moi.

Je tiens à remercier tous mes amis enseignants chercheurs, personnels techniques et administratifs, de la faculté de Génie Civil, particulièrement Messieurs K. AOUDJEN et K. FALEK, sans lesquels ce mémoire n'aurait jamais vu le jour.

Je tiens à remercier aussi mes collègues et amis : Mme M. LAAKRI, M.LANEZ, R.NACIR, Z.ABIB, M.CHIKHAOUI, M.BENELDJOUZI, M. KENDEL, Dr M. BEHIM.

Je tiens à remercier toute ma famille qui sans elle ce travail n'aura jamais vu le jour.

TABLE DES MATIÈRES

RESUMES

REMERCIEMENT

TABLE DES MATIERES

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

INTRODUCTION GÉNÉRALE 1

PREMIERE PARTIE : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE I : LE CIMENT

I-1 Présentation	3
I-2 Historique	3
I-3 Evolution de l'industrie cimentière en Algérie	4
I-4 Fabrication industrielle du ciment	5
1-4-1 Principe	5
1-4-2 Procédés de fabrication du ciment Portland	5
a - Procédé par voie sèche	6
b- Procédé par voie semi-sèche	7
c- Procédé par voie humide	7
1-4-3 Désignation des ciments à base de clinker	7
1-4-4 Principaux constituants du clinker	9
I-5 Hydratation du ciment Portland	11
I-5-1 Composition du ciment Portland	11
I-5-2 Hydratation des silicates	11
I-5-3 Hydratation des aluminates	13
I-5-4 Mécanismes d'hydratation d'un ciment Portland	14
I-5-4-1 Humidité relative et hydratation	16
I-5-4-2 Concept de maturité	16
I-6 Durcissement	17

CHAPITRE II : LE LAITIER DE HAUT-FOURNEAUX

II-1 Généralités	19
II-1-1 Définition	19
II-1-2 Historique	19
II-2 Laitier de haut fourneau granulé	22
II-2-1 Processus de granulation	22
II-2-2 Utilisation	23
II-3 Caractérisation des laitiers	25
II-3-1 Composition chimique	25
II-3-2 Activité hydraulique	25
a) Influence de la composition chimique	26

b) Influence de la structure du verre	26
c) Influence de la finesse du laitier	26
II-4 Hydratation	26
II-4-1 Activateurs chimiques	27
II-4-2 Accélérateurs	27
II-5 Minéralogie	27
II-5-1 Minéraux	27
II-5-2 Verre	28
II-5-3 Teneur en verre	28
II-6 Réactivité des laitiers	29
II-6-1 Réactivité du laitier suivant le mécanisme d'hydratation	31
II-7 Analyses thermiques différentielles (ATD)	31

CHAPITRE III : LE BÉTON À HAUTES PERFORMANCES

III-1 Introduction	33
III-2 Le béton à haute résistance	33
III-3 Béton à hautes performances (BHP)	34
III-3-1 Généralités sur les BHP	35
III-3-2 Superplastifiants	37
III-3-4 Rôle des fines et ultrafines	39
III-4 Composition des BHP	40
III-4-1 Choix des constituants	41
a- Ciment	41
b- Granulats	42
c- Adjuvants	42
III-5 Propriétés des BHP	44
III-5-1 Effets de la température sur le béton en cours de durcissement	44
III-5-2 Comportement en compression	45
III-5-3 Comportement en traction	46
III-5-4 Rigidité	46
III-5-5 Retrait	46
a- Retrait endogène	46
b- Retrait de dessiccation	47
III-5-6 Le fluage	48
III-5-7 Durabilité	49
III-5-8 Résistance au feu	49

DEUXIEME PARTIE : METHODES D'ESSAIS, CARACTERISATION DES MATERIAUX, RESULTATS ET DISCUSSION

CHAPITRE IV : PROGRAMME EXPÉRIMENTAL ET PROCÉDURE D'ESSAIS

IV-1 Introduction	51
IV-2 Analyse par diffractométrie aux rayons X	51
IV-3 Analyse par microscope électronique à balayage (MEB)	53

IV-4 Essais d'écoulement au cône Marsh	53
IV-5 Essais Calorimétrique	54
IV-6 Essai d'équivalent de sable	55
IV-7 Masses volumiques	55
IV-8 Teneur en eau	55
IV-9 Coefficient d'aplatissement du gravier	55
IV-10 Essai Los Angeles du gravier (NF P 18-573)	56
IV-11 Taux d'absorption des granulats	56
IV-12 Essai granulométrique	57
IV-13 Finesse de mouture	58
IV-14 Essai de consistance et de prise	58
IV-15 Essai d'affaissement	59
IV-16 Essais de compression (NF P 14-406)	59
IV-17 Essais de traction par fendage (NF P 18-408)	59
IV-18 Essai de retrait	59
IV-19 Essai de gonflement	60

CHAPITRE V : CARACTÉRISTIQUES DES MATÉRIAUX UTILISÉS ET FORMULATION DE BETON

V-1 Granulats	61
V-1-1 Sable	61
V-1-2 Gravier	62
V.2 Adjuvants chimiques	62
V.3 Eau de gâchage	63
V.4 Ciment	63
V.5 Constituants secondaires	64
V.5.1 Fumée de silice	64
V.5.2 Laitier des hauts fourneaux	65
V-6 Formulation du béton	67
V-6-1 Détermination du squelette granulaire par la Méthode Dreux Gorisse	68
V-7 Malaxage et préparation des éprouvettes	71

CHAPITRE VI : RESULTATS ET DISCUSSIONS

VI.1 Essais sur pâtes	72
V.1.1 Essais de consistance	72
V.1.2 Essai de prise	73
V.1.3 Hydratation des pâtes de chaux	73
V.1.4 Hydratation des pâtes de ciment portland	74
VI.2 Essai sur mortier	80
VI.2.2 Essais de retrait et de gonflement	80
a. Mesure du retrait et du gonflement	81
VI.3 Essais sur Béton	83
VI.3.1 Béton frais	83
a. Composition des bétons	83
b. Masses volumiques du béton à l'état frais	83

c. Essai d'affaissement au cône d'Abrams NF P 18 451	83
VI.3.2 Béton durci	84
VI.3.2.1 Masses volumiques du béton à l'état durci	84
VI.3.2.2 Essais mécaniques	84
a. Essai de compression NF P 18-406	84
b. Essais de traction par fendage NF P 18 408	86
CONCLUSION GÉNÉRALE	87
BIBLIOGRAPHIE	

LISTE DES FIGURES

- Figure I.1 : Constituants du cru avant clinkérisation
Figure I.2 : Fabrication du ciment par voie sèche
Figure I.3 : Micrographe en lumière réfléchi d'une section polie de clinker de ciment Portland
Figure I.4 : Évolution du dégagement de chaleur et de la conductivité électrique lors de l'hydratation d'une pâte de C3S
Figure I.5 : Courbe typique de calorimétrie isotherme d'un ciment
Figure II.1 : fabrication du laitier de haut fourneau
Figure II.2 : Granulation et trempe du laitier à sa sortie du haut fourneau d'EL HADJAR
Figure II.3 : Laitier cristallisé et laitier vitrifié
Figure II.4 : Le diagramme de Rankin
Figure III.1 : Vues de béton ordinaire et de BHP au microscope électronique
Figure III.2 : Relation entre la résistance à la compression et le rapport E/C
Figure III.3 : Relation entre la porosité et le rapport E/C pour différents degrés d'hydratation
Figure III.4 : Action des superplastifiants - Défloculation des grains de ciment.
Figure III.5 : Les superplastifiants empêchent la floculation
Figure III.6 : Granulométrie des matières fines
Figure III.8 : Effet dispersant du superplastifiant
Figure III.9 : Influence d'un superplastifiant sur l'ouvrabilité du béton
Figure III.10 : Adhérences et fissures dans les bétons ordinaires et BHP
Figure III.11 : Diagramme Contraintes – Déformations
Figure IV.1 : Principe de BRAGG
Figure IV-2 : Représentation schématique de l'analyse par DRX
Figure IV.3 : Bouteille de Langavant
Figure IV.4 : Tamiseuse Alpine Air
Figure IV.5 : Principe de fonctionnement du permiabilimètre de Blaine
Figure IV.6 : Mesure de l'affaissement
Figure IV-7 : Appareillage pour la mesure du retrait
Figure V-1 : Courbes granulométriques des sables
Figure V.2 : Courbes granulométriques des graviers 3/8 et 8/15
Figure V.3 : spectre DRX du ciment
Figure V-4 : Diffractogramme x de la fumée de silice anhydre
Figure V.5 : Spectre DRX du laitier
Figure V.6 : Courbe de mélange (méthode Dreux-Gorisse)
Figure V-7 : Résultat d'écoulement par l'essai de cône de Marsh
Figure VI.1 : Consistance normale des pâtes (témoin, 10, 20 et 30% laitier)
Figure VI.4 : DRX des pâtes (Laitier + Chaux)
Figure VI.5 : DRX de la pâte témoin à 7, 28 et 90 jours
Figure VI-6 : DRX de la pâte à 10% de laitier
Figure VI.7 : DRX de la pâte à 20% de laitier
Figure VI.8 : DRX de la pâte à 30% de laitier
Figure VI-9 : Compilation des résultats de DRX en fonction de la teneur en laitier pour un âge donné
Figure VI.10 : mesure du gonflement
Figure VI.11 : Retrait endogène des mortiers
Figure VI.12 : Retrait total des mortiers
Figure VI-13 : Evolution de l'affaissement dans le temps en fonction du % en laitier
Figure VI-14 : Evolution de la résistance à la compression dans le temps et en fonction du % en laitier
Figure VI-15 : Evolution de la résistance à la traction dans le temps et en fonction du % en laitier

LISTE DES TABLEAUX

- Tableau I.1 : Composition du cru
- Tableau I.2 : Désignation des ciments Portland avant et après 2001
- Tableau I.3 : Appellation des ciments selon la norme EN 197-1
- Tableau II.1 : Production du laitier par les hauts fourneaux d'EL HADJAR
- Tableau II.2 : Consommation du laitier granulé par la cimenterie de HADJR SOUD
- Tableau II.3 : Composition chimique moyenne du laitier en % [23]
- Tableau III.1 : Caractéristiques de résistances et de déformations
- Tableau V.1 : Caractéristiques des granulats
- Tableau V.2 : Caractéristique du superplastifiant utilisé
- Tableau V.3 : Composition chimique du ciment
- Tableau V.4 : Composition minéralogique moyenne d'un ciment CRS (ACC)
- Tableau V.5 : Composition chimique de la Fumée de Silice
- Tableau V.6 : Composition chimique du laitier
- Tableau V.7 : Résultats du tamisage par Alpine Air
- Tableau V.8 : Squelette granulaire
- Tableau V.9 : Formulation des bétons de l'étude
- Tableau VI.1 : composition des pâtes
- Tableau VI.2 : temps de début et de fin de prise en fonction des pourcentages en laitier
- Tableau VI.3 : Composition des liants pour les essais de gonflement
- Tableau VI.4 : Composition du béton de notre étude
- Tableau VI.5 : masses volumiques du béton à l'état frais
- Tableau VI.6 : Affaissement au cône d'Abrams
- Tableau VI.7 : Masses volumiques du béton à l'état durci
- Tableau VI.8 : Résultats des essais de compression
- Tableau VI.9 : Résultats des essais de traction

INTRODUCTION GENERALE

A l'instar des autres pays, l'Algérie porte un grand intérêt au problème de déchets et des sous produits industriels et leur valorisation dans le domaine des matériaux de construction.

Le laitier qui est un sous produit de l'industrie sidérurgique constitue un problème pour l'environnement. Des milliers de tonnes sont deversés à l'air libre dans de grandes aires de stockage.

Les contraintes écologiques, en premier lieu, et économique, en deuxième lieu, remettent actuellement en question l'emploi de ces sous produit. La recherche de matériaux locaux, à faible coût technologique, est un objectif visé.

Dans ce sens, cette étude nous a permis de montrer la valeur du laitier des hauts fourneaux dans le domaine des matériaux de construction. De par ses caractéristiques, offrant un large choix quand à son utilisation, nous nous sommes intéressés aux différentes qualités qu'offre ce sous produit comme substituant au ciment.

A cette fin, la démarche repose sur différentes analyses. Les nombreux essais réalisés visent à caractériser le laitier. Nous insisterons sur les caractéristiques minéralogiques, chimiques et physiques ainsi qu'aux performances mécaniques qui constituent le critère essentiel pour le choix d'un matériau de construction.

Notre travail se divise en deux parties, la première est une synthèse bibliographique sur le ciment présentée dans un premier chapitre, ses modes de fabrications et surtout d'hydratation, un deuxième chapitre est consacré au laitier et sa valorisation, ses caractéristiques et quelques données sur le laitier d'El Hadjar. Et enfin, un troisième chapitre est consacré aux bétons de hautes performances, béton choisi pour notre étude, son historique et ses caractéristiques.

La deuxième partie, quant à elle, est consacrée aux différentes méthodes d'essais et de caractérisation des matériaux utilisés, présentés dans le quatrième et cinquième chapitre. Le sixième chapitre présente les résultats trouvés sur les bétons frais et durci ainsi que ceux des différents essais de caractérisations des matériaux.

Enfin, une conclusion générale et quelques recommandations sur l'importance du laitier des hauts fourneaux sur le plan environnemental et économique.

CHAPITRE I : LE CIMENT

I-1 Présentation

Les liants hydrauliques permettent de réaliser avec des granulats et de l'eau les mortiers ($D < 4\text{mm}$) et les bétons ($D > 4\text{mm}$). Ce sont des produits pulvérulents formant avec l'eau une pâte qui se solidifie en agglomérant les autres éléments d'un mortier ou d'un béton.

Un produit hydraulique a la propriété de faire prise, de durcir à la température ambiante, par simple gâchage à l'eau, même en milieu humide privé d'air.

Le ciment est un liant hydraulique sous forme d'une poudre fine qui a la propriété de former une pâte durcissant aussi bien à l'air que sous l'eau. Il est fabriqué à partir de pierre calcaire et d'argile principalement.

I-2 Historique

Pendant la préhistoire et au début de l'Antiquité, on utilisait l'argile comme liant pour maçonner les pierres. Lors de la construction des pyramides, les Égyptiens utilisèrent un plâtre obtenu par cuisson d'un gypse. Plus tard, les Grecs, puis les Romains, se servirent de la chaux produite par la cuisson du calcaire, dans leurs constructions. À partir du I^{er} siècle av. J.-C., ils améliorèrent le liant en y ajoutant des pouzzolanes, particules très fines d'origine naturelle, comme les cendres volcaniques, ou artificielles, comme la poussière de briques broyées. Ils obtinrent ainsi le ciment romain. Ce liant fut utilisé sans grandes modifications jusqu'en 1756, date à laquelle l'Anglais Smeaton, lors de la construction du phare d'Eddystone, mélangea des chaux hydrauliques et des pouzzolanes. Il obtint ainsi le premier liant artificiel, avec lequel il prépara un mortier aussi dur que la pierre de Portland.

En 1817, l'ingénieur français Louis Vicat, suivi, au début des années 1820, par Treussart, ainsi que par Pavin de Lafarge, découvrit et définit les formules des ciments actuels, préparés alors dans des fours verticaux. Les fours rotatifs firent leur apparition vers 1880 et sont toujours utilisés. À l'heure actuelle, les cimentiers, qui sont généralement équipés de laboratoires de recherche, cherchent à mettre au point des ciments de plus en plus performants [1].

I-3 Évolution de l'industrie cimentière en Algérie

En Algérie, la production du ciment est jeune par rapport aux pays occidentaux, elle a commencé juste avec l'indépendance du pays en 1962. Le secteur comprenait, à la nationalisation, trois (03) cimenteries totalisant une capacité productive de l'ordre de 1.5 millions tonnes, répartie entre l'actuelle société de ciment de Meftah (Ex-Rivet Lafarge), de Rais Hamidou (Ex- Pointe Pescade Lafarge) et de Zahana (Ex- Saint Lucien CADO) [2].

A partir de 1970, dans le cadre des programmes de développement économiques et sociaux, lancés pour répondre aux exigences de l'heure, un important potentiel a été réalisé par étape et avoisine présentement 11,5 millions de tonnes de ciment.

Actuellement, le ciment est considéré comme l'un des secteurs stratégiques voire névralgique, pour le développement économique du pays.

L'évolution de l'industrie cimentière est passée par plusieurs étapes dont les plus importantes demeurent [2] :

- La Période entre 1962 et 1967 :

Nationalisation et création de la Société Nationale des Matériaux de Construction (SNMC). Avant sa fermeture en 1972 pour rénovation, la cimenterie de Meftah produisait 50.000 t/an, celle de Zahana : 200.000 t/an et Rais Hamidou : 400.000 t/an . Durant cette période, la gestion demeurait entre les mains du propriétaire (Lafarge) et ce jusqu'en 1967 date à laquelle fut décrétée la nationalisation et la création de la Société Nationale des Matériaux de Construction «SNMC», qui en plus du ciment récupéra également les produits rouges et en béton ainsi que la céramique et les agrégats.

- La Période entre 1967 et 1983 :

Restructuration de la Société de Matériaux de Construction (SNMC) :

La SNMC engagea un vaste programme d'investissement pour la rénovation des lignes héritées de Lafarge et la réalisation de douze (12) nouvelles lignes de production en voie sèche, procédé plus moderne que celui de la voie humide. La capacité globale est passée alors à 10.000.000 t/an.

- La Période entre 1983 à ce jour :

A vu le lancement de trois nouvelles lignes à Ain Touta (Batna) et Elma Labiod (Tébessa), portant la capacité productive à 11.5 Millions de tonnes /an.

La capacité nationale s'est trouvée renforcée, par le nouveau projet privé A.C.C M'sila (actuellement Lafarge) réalisée par F.L.S pour le compte du groupe Orascom, avec 04 millions de tonnes opérationnelles depuis 2004 couvrant partiellement les besoins du pays.

Depuis 2006 deux nouveaux projets sont en cours d'exécution : Sig (Orascom) avec deux millions de tonnes dont cinq cent mille tonnes de ciment blanc et celui de Djelfa (Asec-Egypte) avec un million et demi de ciment gris. La capacité totale du pays est passée à quinze (15) millions de tonnes en 2008.

1-4 Fabrication industrielle du ciment

1-4-1 Principe

Réactions, principalement à l'état solide, vers 1450°C (clinkérisation), entre CaO, SiO₂, Al₂O₃ et Fe₂O₃ dans un four rotatif qui tourne à la vitesse de 1 à 2 tours/min.

On obtient le clinker (voir plus loin sa composition) qui est refroidi brusquement à l'air et auquel on ajoute lors du broyage de 3 à 5 % de gypse (régulateur de prise) et divers constituants (donnant les différents types de ciments) : laitier, pouzzolanes, cendres volantes, etc. Ces produits ont la propriété de fixer la chaux Ca(OH)₂, formée lors de l'hydratation du ciment, en donnant des composés hydratés stables. Les pouzzolanes, roches volcaniques riches (50 à 65 %) en silice amorphe réactive étaient utilisées par les romains, en présence de chaux, pour fabriquer des bétons. Les cendres volantes sont récupérées dans les centrales thermiques à charbon, les laitiers (silicoaluminates de calcium) sont issus des hauts fourneaux élaborant de la fonte [3].

Le clinker, avant broyage, est peu réactif avec l'eau et peut ainsi être transporté sans risque.

1-4-2 Procédés de fabrication du ciment Portland

Les matières premières sont constituées de calcaire (75%) et d'argile (25%) :



Calcaire 75%

+



Argile 25%

+ Concassage = cru

Figure I.1 : Constituants du cru avant clinkérisation

La composition moyenne est donnée dans le tableau suivant :

Tableau I.1 : Composition du cru

CaCO ₃	60 à 70 %	Al ₂ O ₃	5 à 10 %
SiO ₂	18 à 24 %	Fe ₂ O ₃	1 à 5 %

On distingue 3 principaux procédés de fabrication :

a - Procédé par voie sèche

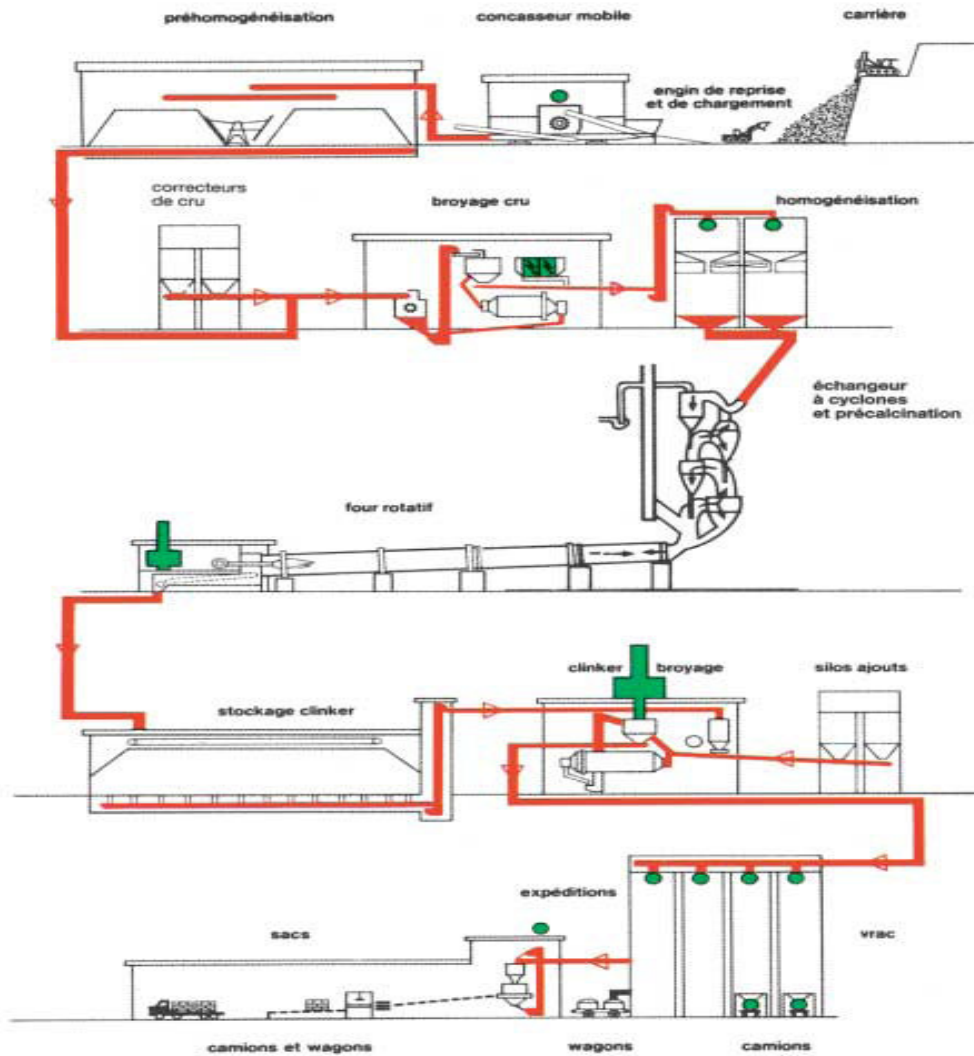


Figure I.2 : Fabrication du ciment par voie sèche

La matière première (en poudre) est préchauffée à 800°C par les gaz issus du four de cuisson puis, arrive partiellement décarbonatée, dans le four de cuisson (four rotatif court de 50 à 80 m). Ce procédé est le plus utilisé car il est le plus économe en énergie mais il nécessite la mise en œuvre de moyens importants de captation des poussières. Actuellement, celles-ci représentent moins de 0,02 % de la production. En 30 ans, les émissions ont été divisées par 100.

b- Procédé par voie semi-sèche

La poudre est agglomérée sous forme de boulettes de 10 à 20 mm de diamètre par ajout de 12 à 14 % d'eau, séchée et préchauffée comme précédemment.

c- Procédé par voie humide

La matière première est additionnée d'eau dès le broyage et manipulée sous forme de pâte fluide introduite par pompage dans des fours rotatifs longs de 100 à 200 m. Ce procédé présente l'inconvénient de consommer 30 à 40 % d'énergie de plus que le procédé par voie sèche.

1-4-3 Désignation des ciments à base de clinker

La norme NF EN 197-1 de 2001 s'applique à l'ensemble des ciments courants dans l'Espace Economique Européen. Elle est entrée en vigueur depuis le 1^{er} avril 2001.

Tableau I.2 : Désignation des ciments Portland avant et après 2001

Ancienne désignation de 1994 à 2001 Selon la norme NFP 15-301	Actuelle désignation depuis 2001 Selon la norme NF EN197-1
Ciment de haut fourneau CHF CLK	Ciment de haut fourneau CEM III/A, B CEM III/ C
Ciment pouzzolanique CPZ	Ciment pouzzolanique CEM IV/A ou B
Ciment au laitier et aux cendres CLC	Ciment composé CEM V/A ou B

Les principaux ciments selon l'actuelle norme en vigueur EN 197-1 sont sériés dans le tableau ci dessous :

Tableau I.3 : Appellation des ciments selon la norme EN 197-1

Principaux types	Notation des 27 produits (types de ciment courant)	Composition (pourcentage en masse) ^{a)}											Constituants secondaires	
		Constituants principaux												
		Clinker K	Laitier de haut fourneau S	Fumée de silice p ^{b)}	Pouzzolanes		Cendres volantes		Schiste calciné T	Calcaire				
Naturelle P	Naturelle calcinée Q				Silicieuse V	Calciqne W	L	LL						
CEM I	Ciment Portland	CEM I	95-100	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
CEM II	Ciment Portland au laitier	CEM II/A-S	80-94	6-20	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
		CEM II/B-S	65-79	21-35	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
	Ciment Portland à la fumée de silice	CEM II/A-D	90-94	—	6-10	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
	Ciment Portland à la pouzzolane	CEM II/A-P	80-94	—	—	6-20	—	—	—	—	—	—	—	0-5
		CEM II/B-P	65-79	—	—	21-35	—	—	—	—	—	—	—	0-5
		CEM II/A-Q	80-94	—	—	—	6-20	—	—	—	—	—	—	0-5
		CEM II/B-Q	65-79	—	—	—	21-35	—	—	—	—	—	—	0-5
	Ciment Portland aux cendres volantes	CEM II/A-V	80-94	—	—	—	—	6-20	—	—	—	—	—	0-5
		CEM II/B-V	65-79	—	—	—	—	21-35	—	—	—	—	—	0-5
		CEM II/A-W	80-94	—	—	—	—	—	6-20	—	—	—	—	0-5
		CEM II/B-W	65-79	—	—	—	—	—	21-35	—	—	—	—	0-5
	Ciment Portland au schiste calciné	CEM II/A-T	80-94	—	—	—	—	—	—	—	6-20	—	—	0-5
		CEM II/B-T	65-79	—	—	—	—	—	—	—	21-35	—	—	0-5
	Ciment Portland au calcaire	CEM II/A-L	80-94	—	—	—	—	—	—	—	—	6-20	—	0-5
		CEM II/B-L	65-79	—	—	—	—	—	—	—	—	21-35	—	0-5
		CEM II/A-LL	80-94	—	—	—	—	—	—	—	—	—	6-20	0-5
CEM II/B-LL		65-79	—	—	—	—	—	—	—	—	—	21-35	0-5	
Ciment Portland composé ^{c)}	CEM II/A-M	80-94	← 6-20 →									0-5		
	CEM II/B-M	65-79	← 21-35 →									0-5		
CEM III	Ciment de haut fourneau	CEM III/A	35-64	36-65	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
		CEM III/B	20-34	66-80	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
		CEM III/C	5-19	81-95	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
CEM IV	Ciment pouzzolanique ^{c)}	CEM IV/A	65-89	—	← 11-35 →				—	—	—	—	0-5	
		CEM IV/B	45-64	—	← 36-55 →				—	—	—	—	0-5	
CEM V	Ciment composé ^{c)}	CEM V/A	40-64	18-30	—	← 18-30 →		—	—	—	—	—	0-5	
		CEM V/B	20-38	31-50	—	← 31-50 →		—	—	—	—	—	0-5	

a) Les valeurs indiquées se réfèrent à la somme des constituants principaux et secondaires.

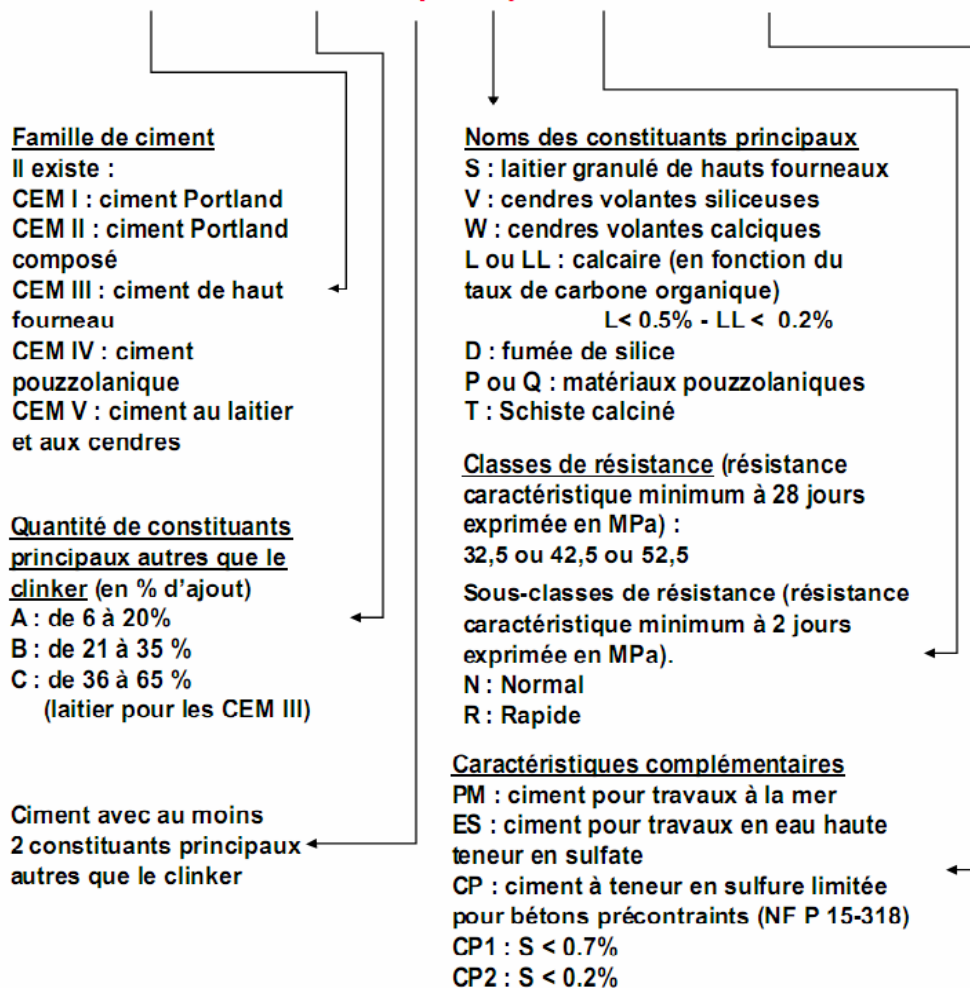
b) La proportion de fumées de silice est limitée à 10 %.

c) Dans le cas des ciments Portland composés CEM II/A-M et CEM II/B-M, des ciments pouzzolaniques CEM IV/A et CEM IV/B et des ciments composés CEM V/A et CEM V/B, les constituants principaux, autres que le clinker, doivent être déclarés dans la désignation du ciment (voir un exemple à l'article 8).

Les ciments sont désignés aussi par un nombre (32,5 ; 42,5 ou 52,5) indiquant leur classe de résistance (valeur minimale spécifiée de la résistance à la compression mesurée à 28 jours et donnée en N/mm² ou MPa).

Exemple de désignation selon ladite norme :

CEM II / B - M (S-V) 42,5N PM-ES-CP2*



En matière de contribution à la protection de l'environnement, l'industrie cimentière a réduit sa production de ciments (CEM I) et a favorisé la vente de CEM III ce qui a engendré une réduction des émissions de CO₂.

1-4-4 Principaux constituants du clinker

Les principaux minéraux du clinker sont des silicates et aluminates de calcium :

Composition indicatrice en % pondéral.

- Silicate tricalcique $3\text{CaO}.\text{SiO}_2$ (C_3S : **ALITE**) : 50 à 75 %
- Silicate bicalcique $2\text{CaO}.\text{SiO}_2$ ($\beta\text{C}_2\text{S}$: **BELITE**) : 7 à 30 %
- Aluminate tricalcique $3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$ (C_3A : **CELITE**) : 1 à 18 %
- Ferroaluminate calcique $4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$ (C_4AF : **CELITE**) : 4 à 20 %

Une photo de clinker de ciment Portland avec les différentes phases qui le composent est présentée à la Figure I.3 [4].

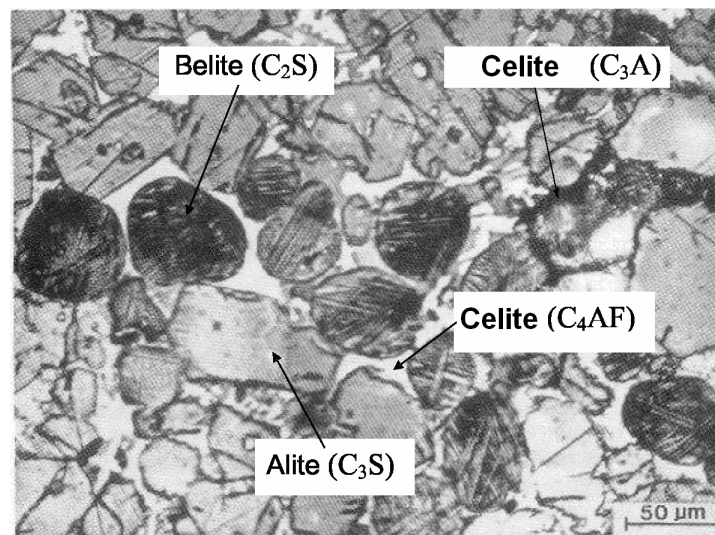


Figure I.3 : Micrographe en lumière réfléchie d'une section polie de clinker de ciment Portland (Taylor, 1997)

Les composés utilisés étant en nombre réduit, sous forme, en général d'oxyde, les cimentiers utilisent une notation spécifique, plus simple que celle des chimistes.

Notation utilisée en chimie des ciments pour les oxydes [4] :

- C = CaO : Chaux
- S = SiO₂ : Silice
- H = H₂O : Eau
- A = Al₂O₃ : Alumine
- F = Fe₂O₃ : Hématite
- $\hat{\text{S}}$ = SO₃ : sulfate
- $\hat{\text{C}}$ = CO₂ : gaz carbonique

I-5 Hydratation du ciment Portland

I-5-1 Composition du ciment Portland

Les ciments commerciaux sont issus du mélange du clinker broyé et du gypse.

On retrouve également dans le clinker des sulfates alcalins et de la chaux libre. À la sortie du four, le clinker est ensuite mélangé avec une quantité de gypse (teneur maximale de 5%) pour être broyé selon les normes en vigueur. Les différents types de ciment sur le marché se distinguent principalement par leurs proportions en silicates et en aluminates.

La composition minéralogique du ciment peut être déduite à partir de l'analyse chimique selon le potentiel de Bogue [4] :

$$C_3S = 4.0710 \text{ CaO} - 7.6024 \text{ SiO}_2 - 6.7187 \text{ Al}_2\text{O}_3 - 1.4297 \text{ Fe}_2\text{O}_3$$

$$C_2S = 2.8675 \text{ SiO}_2 - 0.7544 \text{ C}_3\text{S}$$

$$C_3A = 2.6504 \text{ Al}_2\text{O}_3 - 1.6920 \text{ Fe}_2\text{O}_3$$

$$C_4AF = 3.0432 \text{ Fe}_2\text{O}_3$$

Ces équations reposent sur certaines hypothèses simplificatrices : il n'y a pas d'impuretés dans le ciment et les produits chimiques dans le four sont stables.

La taille et la forme des grains de ciment influencent beaucoup son hydratation. Le broyage du clinker permet d'obtenir des particules fines mais de forme angulaire [5]. Plus un ciment est fin, plus sa surface spécifique est grande, ce qui permettra alors d'augmenter sa réaction avec l'eau.

Dans un ciment Portland ordinaire, on retrouve [6] :

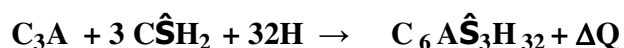
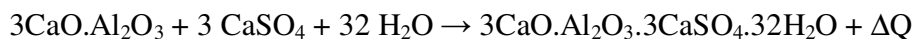
- De 7 à 9 % de grains très fins de diamètres inférieurs à 2 μm
- De 0 à 4% de grains grossiers de diamètres supérieurs à 90 μm

I-5-2 Hydratation des silicates

Au contact de l'eau, les silicates se dissolvent sous forme d'ions [7] :

Ca^{2+} , OH^- et $\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}$. Ceux-ci interagissent alors entre eux et forment des silicates de calcium hydratés (C-S-H) et de la portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). Ces réactions sont exothermiques et peuvent servir de catalyseur à la réaction d'hydratation. Dans le cas du C_2S , la cinétique d'hydratation est plus lente et la quantité de portlandite formée est plus faible.

À titre indicatif, les équations des réactions d'hydratation des silicates peuvent s'écrire, sans prendre en compte la stoechiométrie du système [8] :



Le type de C-S-H dépend de son origine (C₃S ou C₂S) et des conditions d'hydratation. De plus, le rapport E/C (donc la porosité) et le degré de maturation affecte la composition du gel de C-S-H. La progression de la réaction d'hydratation peut être suivie par des mesures de calorimétrie et de conductivité (Figure I.4). Comme on peut le voir, l'hydratation des silicates peut être séparée en cinq périodes distinctes.

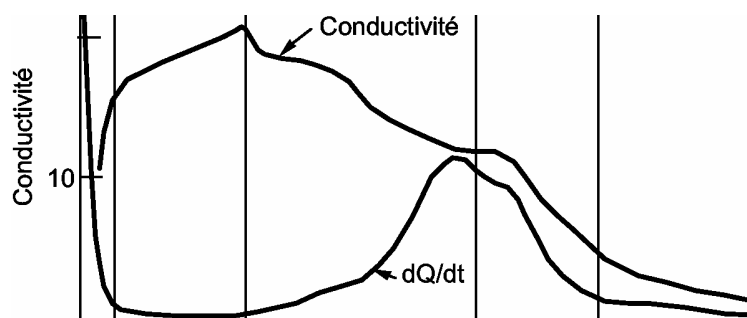


Figure I.4 : Évolution du dégagement de chaleur et de la conductivité électrique lors de l'hydratation d'une pâte de C₃S (adapté de Vernet et Cadoret (1991))

Les 5 périodes sont décrites comme suit [9] :

- Période 1 : réactions initiales

Lorsque les silicates entrent en contact avec l'eau, les ions SiO_4^{4-} qui sont en surface des grains passent en solution (sous la forme de complexes $\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}$ ou H_3SiO_4^-). La présence de ces ions fait alors augmenter la conductivité du milieu. Une couche protectrice de C-S-H se forme alors autour des grains ne permettant plus la réaction entre les silicates et l'eau.

- Période 2 : période d'induction

Durant cette période (appelée aussi période dormante) il y a peu d'activité chimique, ce qui se traduit par un faible dégagement de chaleur. La concentration en calcium croît alors que celle en silice décroît. La conductivité augmente toujours, mais plus faiblement que dans la 1^{ère} période. Ainsi, il apparaît que des C-S-H dits métastables (C-SH(m)) continuent de se former autour des grains de C₃S alors que la portlandite ne précipite pas. Cette période peut varier considérablement d'un type de mélange à l'autre.

- Période 3 : période d'accélération

Cette période est marquée par un fort dégagement de chaleur ce qui se traduit par une activité chimique intense. En général, c'est durant cette période que survient la prise. Deux types de réactions mènent à la formation des C-S-H dits stables (C-S-H(s)) et de la portlandite: soit par l'hydroxylation des C-S-H(m), soit par celle des C₃S. La formation de ces hydrates fait diminuer les concentrations ioniques de la solution interstitielle, ce qui se traduit alors par une baisse de la conductivité.

- Période 4 : période de décélération

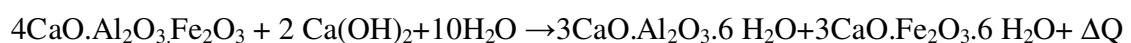
La couche d'hydrates formée ne permet plus qu'une réaction d'hydratation par diffusion. L'eau diffuse dans le matériau afin d'atteindre les composants anhydres du système, ralentissant alors considérablement la cinétique d'hydratation. Ceci correspond sur la courbe à une diminution de la chaleur dégagée. De même que pour la 3^{ème} période, plus les hydrates se forment, moins il y a d'ions dans la solution interstitielle, ce qui entraîne une diminution de la conductivité.

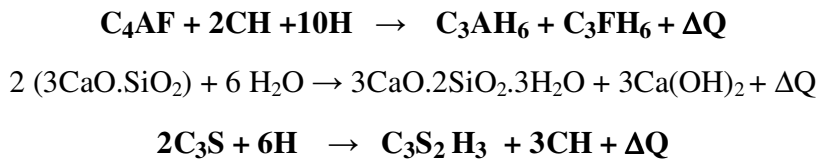
- Période 5 : période de consolidation

Le ralentissement, dû au caractère diffusionnel de la réaction d'hydratation, peut s'étaler sur des mois ou des années.

I-5-3 Hydratation des aluminates

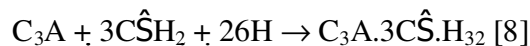
L'hydratation des aluminates étant très rapide, les cimentiers ajoutent du sulfate sous forme de gypse au clinker pour contrôler ces réactions. Ainsi, les réactions avec les aluminates se font en plusieurs étapes :





- Étape 1: Formation d'ettringite (phase AFt)

Les aluminates réagissent avec le sulfate du gypse pour former de l'ettringite :

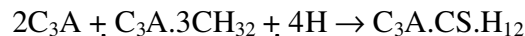


Avec : S □ SO₃ (anhydride sulfurique)

Cette période de fort dégagement de chaleur correspond à la période de pré-induction, ou période dormante. Une couche d'hydrates vient entourer les aluminates qui forment alors une couche protectrice autour du grain.

- Étape 2: Transformation de l'ettringite en monosulfate de calcium hydraté

Lorsque la source de gypse s'est épuisée, la concentration en sulfates de la solution baisse. L'ettringite devient alors instable et se dissout pour former du monosulfate de calcium hydraté (appelé AFm) [8]:



Cette période est aussi appelée période d'accélération : les réactions chimiques s'intensifient.

- Étape 3 : Hydratation des aluminates résiduels

Une fois que l'ettringite a fini sa transformation, les aluminates restants réagissent avec l'eau afin de donner trois types d'hydrates : C₂AH₈, C₄AH₁₃ et C₃AH₆.

I-5-4 Mécanismes d'hydratation d'un ciment Portland

L'hydratation du ciment Portland implique la réaction des quatre phases minérales qui le composent. Le ciment étant principalement composé de C₃S, l'hydratation de ce composé contrôle majoritairement la cinétique globale de l'hydratation. De nombreuses études ont été faites sur l'étude de l'hydratation individuelle de chacune de ces phases [10], mais très peu de travaux ont été focalisés sur les interactions entre ces réactions. Il faut donc garder à l'esprit que même si l'hydratation du ciment est souvent considérée comme étant contrôlée par l'hydratation du C₃S, il existe très probablement une synergie entre les différentes réactions.

La Figure I.5 présente la courbe caractéristique de calorimétrie isotherme d'un ciment qui peut être découpée en quatre périodes distinctes.

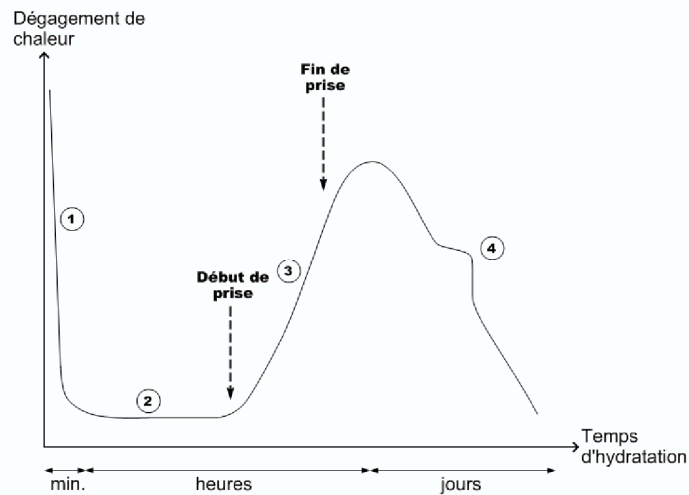


Figure I.5 : Courbe typique de calorimétrie isotherme d'un ciment

Ces périodes peuvent être décrites de la manière suivante [7]:

- Période 1 : réactions initiales

Cette période débute dès le contact entre l'eau et le ciment et dure quelques minutes. Le C₃S et le C₃A des grains de ciment réagissent immédiatement avec l'eau, formant de l'ettringite et des C-S-H (métastables). Cela correspond donc à une phase de dissolution : les ions entrent en solution.

- Période 2 : période dormante

Durant cette période, des ions Ca²⁺ et OH⁻ sont libérés. Ceci augmente alors le pH de la solution, ralentissant la dissolution des constituants. Le dégagement de chaleur est alors faible. Cette période correspond à la phase durant laquelle le béton est maniable.

- Période 3 : période d'accélération

Cette période débute lorsque la concentration en ions Ca²⁺ et OH⁻ de la solution devient critique, la conductivité électrique de la solution étant alors à son maximum. Cette sursaturation induit la précipitation de la portlandite. Il s'ensuit alors les mécanismes de dissolution, de nucléation et de précipitation des différentes phases, permettant la formation des hydrates (Ettringite, Portlandite, C-S-H). Cette grande activité chimique dégage beaucoup de chaleur, augmentant la température du matériau. Les hydrates formés commencent à

s'enchevêtrer permettant alors la création d'un solide rigide. La prise du béton se situe donc dans cette période. Elle correspond au moment où le béton passe de sa phase liquide à sa phase solide, c'est-à-dire qu'un chemin continu de particules liées mécaniquement traverse le solide.

- Période 4 : période de ralentissement

Les grains anhydres se trouvent recouverts d'une couche d'hydrates qui s'épaissit de plus en plus. Pour que l'hydratation se poursuive, il faut que l'eau diffuse à travers les pores de gel. Ainsi, cette période se traduit sur la courbe par une diminution de la chaleur dégagée. Si le réseau poreux est fermé, une partie du ciment n'est jamais atteinte et donc ne sera jamais hydratée. De plus la quantité d'eau au départ doit être suffisante pour hydrater tout le ciment. La valeur critique est : $(E/C) \approx 0.4$ [11]. C'est aussi durant cette période que l'ettringite de type AFt se dissout afin de se transformer en type AFm. Cette réaction correspond à la partie bosselée de la courbe de calorimétrie présentée à la Figure I.5.

I-5-4-1 Humidité relative et hydratation

Des études sur l'influence de l'humidité relative sur les réactions d'hydratation ont été menées par Patel, Killoh et coll. Leur étude a montré que lorsque l'humidité relative de l'environnement de cure diminuait, surtout de 97 à 70%, chaque phase s'hydratait plus lentement [12].

I-5-4-2 Concept de maturité

La résistance du béton augmente avec l'hydratation et elle-même augmente avec la température. La maturité d'un béton définit son état à un temps donné de son mûrissement [13]. Elle prend en compte l'effet couplé de la température et du temps d'hydratation du béton. Ainsi, pour une maturité donnée, deux bétons ont des caractéristiques identiques, quelque soit les conditions de mûrissement. Ce concept est très important dans le monde du génie civil car il permet de retracer l'évolution des réactions d'hydratation et donc la résistance du matériau. La maturité peut donc s'exprimer de la manière suivante :

$$M[t, H(T)] = \int_0^t K[T(\tau)] d\tau \tag{I.1}$$

Avec :

- H(T) : Histoire de température
- M[t,H(T)] : Maturité au temps t pour une histoire de température donnée

- $T(\tau)$: Température absolue au temps τ
- $K(T)$: Constante de cinétique à la température T

Plusieurs études ont montré que la loi expérimentale d'Arrhenius semblait être la plus appropriée pour déterminer la constante de cinétique dans le cas du matériau béton :

$$K(T) = Ae^{\left(\frac{-E_a}{RT}\right)} \quad (1.2)$$

Avec :

- A : Constante de proportionnalité
- R : Constante des gaz parfaits (8.314 J/mol.K)
- E_a : Energie d'activation apparente

L'énergie d'activation est dépendante de plusieurs facteurs, dont le ciment utilisé. De ce fait, cette énergie doit être mesuré systématiquement.

I-6 Durcissement

La qualité du ciment est constamment contrôlée en laboratoire. Des essais de résistance sont effectués sur des éprouvettes en mortier fabriquées avec le ciment. On immerge ces éprouvettes dans l'eau durant 28 jours, puis on mesure leur résistance à la compression et à la traction.

Les composés actifs du ciment sont des silicates tricalciques ($3CaO, SiO_2$), dicalciques ($2CaO, SiO_2$), et des aluminates tricalciques ($3CaO, Al_2O_3$). Instables, ces éléments changent de structure en présence d'eau. Le durcissement initial, la prise, est dû à l'hydratation du silicate tricalcique, qui produit un gel de silice hydratée et d'hydroxyde de calcium. Ces substances cristallisent en un enchevêtrement de paillettes qui emprisonnent les particules de sable et de gravier présentes dans le béton ou le mortier. Cette réaction est exothermique : elle libère de la chaleur. Les autres éléments du ciment s'hydratent de façon semblable, mais cristallisent beaucoup plus lentement et contribuent au durcissement lent et progressif de la pâte pendant des années [4].

La température ambiante joue un rôle important dans la prise du ciment. Par temps de gel, la chaleur dégagée lors du début de prise du ciment peut ne pas suffire pour empêcher l'eau incorporée dans le béton ou le mortier de geler. On parle alors de fausse prise. Le béton donne l'apparence d'une prise correcte, car la surface est dure. Mais l'hydratation des éléments du ciment n'a pas eu lieu, et le béton ne possède alors aucune résistance.

CHAPITRE II

LE LAITIER DE HAUT-FOURNEAUX

II-1 Généralités

II-1-1 Définition

Le laitier est un matériau non-métallique formé essentiellement de silicates et aluminosilicates de calcium. C'est un sous-produit de l'industrie sidérurgique provenant de l'élaboration de la fonte. Il est constitué par la partie non ferreuse de la « charge », c'est-à-dire la gangue du minerai et par des constituants secondaires tels que les résidus de minerais de fer, de combustion du coke et de carbonate de calcium (CaCO_3 ou dolomie) [14, 17].

II-1-2 Historique

L'utilisation du laitier comme liant hydraulique débuta avant 1774, quand Lariot fabriqua du mortier en utilisant du laitier en combinaison de la chaux éteinte.

En 1862, Emile Langen proposa un processus de granulation pour faciliter la manutention et le transport du laitier à partir du haut fourneau. Le développement du laitier résulte en une première utilisation commerciale en 1865 avec une production record en 1892 et 1896 aux USA, à la suite de quoi l'administration allemande le reconnut en 1909 en admettant un ciment composé avec 30% de laitier.

En France, ce type de ciment fut utilisé en 1889 dans le métro souterrain de Paris, il fut reconnu en 1934 et figura pour la première fois dans les circulaires officielles de l'AFNOR.

En Grande Bretagne, la production de ciment au laitier commença au début du siècle dernier. Mais, au début de l'année 1960, le laitier devint disponible sous forme de poudre sèche et fut initialement utilisé dans les infrastructures des projets en charpente métallique.

Depuis la fin de l'année 1950, le ciment de laitier fut accepté par l'Afrique du Sud, l'Australie, l'ex URSS, le Japon, le Canada. Son taux d'utilisation a atteint différents niveaux dans ses différents pays.

En Algérie, l'utilisation du laitier dans le génie civil, en général, est très récente. Les hauts fourneaux n'existent que dans une seule usine, celle du complexe sidérurgique d'El Hadjar dans la wilaya de Annaba construit durant les années 70.

Ce complexe génère des déchets industriels de deux types:

- des déchets non utilisables et qui sont mis en décharge.
- des déchets valorisables, qu'on appelle sous – produits.

Les principaux déchets sidérurgiques sont les laitiers de hauts fourneaux granulé et cristallisé. Une tonne de fonte produite génère à El Hadjar en moyenne 380 kg de laitier [15]. Ce chiffre dépend en effet du minerai de fer et du procédé. La capacité de production de laitier granulé et cristallisé par les hauts fourneaux d'El Hadjar est de l'ordre de 600 000 tonnes par an [15] dont en moyenne 430 000 tonnes de laitier granulé et 170 000 tonnes de laitier cristallisé. [16].

La granulation du laitier à sa sortie du haut fourneau n'est pas une opération automatique mais elle est programmée en fonction de la demande en laitier granulé. Cette restriction est due au manque d'eau, l'Algérie ayant vécu une grande sécheresse durant les deux dernières décennies.

Le tableau suivant résume les statistiques de production du laitier granulé et cristallisé par les hauts fourneaux d'El Hadjar [15 - 17].

Tableau II.1 - Production du laitier par les hauts fourneaux d'EL HADJAR

Désignation	Production *10 ³									
	1987		1988		1989		1995		2002	
	t/an	%	t/an	%	t/an	%	t/an	%	t/an	%
<i>Laitier granulé</i>	167	58	484	70	347	63	129	34	467	83
<i>Laitier cristallisé</i>	124	42	196	29	206	37	250	66	99	17
Total	291	100	680	100	553	100	379	100	566	100

La production du laitier granulé par le complexe sidérurgique d'El HADJAR a connu trois périodes:

- La première période de production (les années 1970) : la production de laitier granulé et cristallisé était mise en décharge ce qui a conduit à la formation de deux terrils, aujourd'hui inexploités à cause de leur solidification.
- La deuxième période remonte aux années 1980 : des tentatives à l'échelle industrielle ont été menées pour l'emploi du laitier dans la construction des assises de chaussées et en cimenterie, mais en faible quantité ne permettant pas d'absorber totalement la production des hauts fourneaux.

- La troisième période (actuelle) : si l'emploi du laitier pour la construction des assises de chaussée s'est sensiblement réduit pour des raisons de récession économique, son emploi en cimenterie est toujours constant, de l'ordre de 20% en ajout au clinker, ce qui explique une plus grande production de laitier granulé que de laitier cristallisé, notamment en 2002 (Tableau II.1).

Les premières utilisations du laitier granulé de haut fourneau d'El Hadjar dans le domaine du génie civil concernent deux axes :

- Réalisation des assises de chaussées :

Les résultats satisfaisants donnés par des planches d'essais réalisées sur les tronçons des routes nationales (RN 44 et RN 16) dans les années 1970, en utilisant le laitier granulé du premier haut fourneau sous forme de grave – laitier et de sable – laitier ont permis de réaliser le tronçon de la voie express Est – Ouest (Annaba – Tlemcen), reliant les villes d'Annaba et de Berrahal, avec un mélange de laitier granulé moulu, de chaux et de ciment [18 - 19].

Le complexe sidérurgique s'est ensuite retrouvé avec une production de laitier granulé qu'il ne pouvait pas mettre en valeur, en particulier après l'entrée en production du second haut fourneau.

En effet, les cimenteries de l'Est, notamment Hamma Bouziane et surtout celle de Hadjr Soud ne pouvaient pas absorber toute la production potentielle de laitier granulé des hauts fourneaux d'EL HADJAR car elles n'en utilisaient que très peu (15%) dans leur ciment.

- Fabrication de ciment composé (CPJ)

L'intégration du laitier granulé de hauts fourneaux d'El Hadjar dans la fabrication des ciments a été faite pour la première fois en 1982 par la cimenterie de Hadjr Soud après des essais satisfaisant en laboratoire, validés plus tard par une autre étude [15], suivis d'essais à l'échelle industrielle. Cependant le dosage adopté qui était de 15% ne permettait pas d'absorber tout le laitier granulé de fraîche production et encore moins les stocks de laitier.

Aujourd'hui on estime la quantité de laitier, en majorité granulé, stocké à l'intérieur du complexe sidérurgique, à 2 millions de tonnes [15].

L'intégration du laitier granulé dans les ciments a posé un problème aux cimentiers car sa teneur en eau est trop élevée, en moyenne 14 %, ce qui nécessitait son séchage. La

cimenterie de Hadjr Soud s'est dotée d'un séchoir spécialement pour sécher le laitier granulé. Le dosage en laitier granulé dans le ciment de type CPJ fluctue entre 15 et 25 % en fonction de la qualité du clinker produit.

Le tableau II.2 donne les consommations de laitier granulé utilisés par la cimenterie de Hadjr Soud de 1994 à 2002 [20].

Tableau II.2 - Consommation du laitier granulé par la cimenterie de Hadjr Soud

Année	1994	1995	1996	1997	2002
Consommation du laitier granulé en %	19,74	18,28	17,08	13,55	20

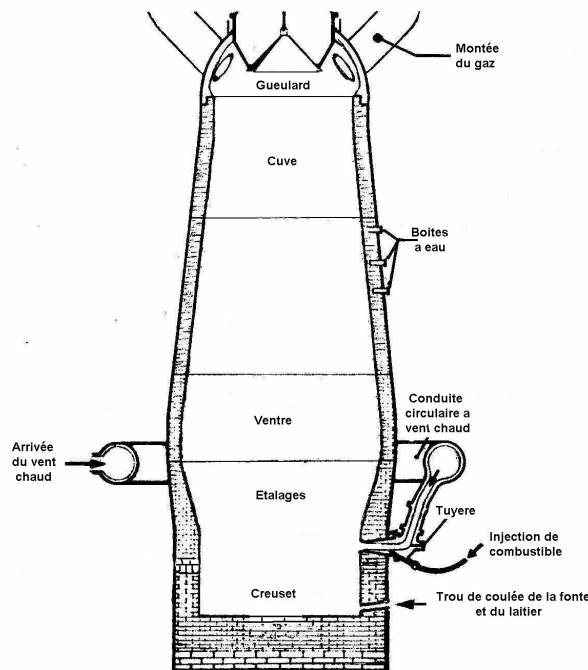


Figure II.1 : fabrication du laitier de haut fourneau

II-2 Laitier de haut fourneau granulé

II-2-1 Processus de granulation

Le principe de la granulation est d'extraire le plus possible de chaleur d'une quantité de laitier fondu, en un minimum de temps, afin d'obtenir l'état vitreux indispensable pour son

utilisation comme substitut du ciment Portland. Pour ce faire, il est d'abord nécessaire de réduire le laitier en gouttelettes ou en grains de 3 à 5 mm. La granulation se fait soit sous air (60 à 80 % en poids de verre) soit sous eau (>80 % en poids de verre).

Actuellement, ce processus est semi-sec ce qui signifie que le laitier est refroidi à la fois sous eau et sous air par un système de tambour rotatif (300 tours/min). De cette manière, la consommation d'eau (~1m³/T de laitier) et l'humidité résiduelle (~10%) sont abaissées [21].



Figure II.2 – Granulation et trempe du laitier à sa sortie du haut fourneau d’El Hadjar

II-2-2 Utilisation

Actuellement, les laitiers de hauts fourneaux trouvent une large application dans l'industrie des matériaux de construction.

Son utilisation dépend du traitement thermique qu'il a subi lors de son refroidissement depuis l'état liquide [22]. On retrouve le laitier de haut fourneau sous forme de :

- **Agrégat** : Matériau cristallin gris pierreux, utilisé pour la fabrication des routes et comme granulats légers pour la confection des bétons.
- **Laine de laitier** : Produit analogue à la laine de verre, obtenu par soufflage du laitier au cours de son refroidissement. Les fibres extrêmement fines de la laine, sont largement utilisées comme matériaux isolants pour la construction.
- **Brique de chaux au laitier** : Ce sont des variantes des briques de silico-calcaire, mais s'en distinguent par une masse volumique moindre et par de meilleures propriétés

d'isolation thermique parceque le sable lourd de quartz y est remplacé par les laitiers poreux et légers.

- **Laitier pour ciment** : L'emploi du laitier à la place du ciment pour la production du béton connu sous le nom de Siporex permet à la fois d'obtenir des produits plus légers et moins coûteux.

L'emploi du laitier à la place de l'argile ou du schiste (partiellement ou totalement) comme matière première pour la fabrication du clinker portland constitue un élargissement de la gamme de matières servant à fabriquer le clinker.

Toutefois, l'utilisation du laitier en qualité de matière crû exige la constance de sa composition chimique pour le dosage des composants et leur homogénéisation.

La composition chimique du laitier dépend non seulement du procédé technologique d'élaboration de la fonte, mais aussi du minerai, c'est pour cette raison que l'emploi du laitier pour la fabrication du clinker est rendu difficile.

Actuellement, ce problème est résolu grâce à la constance des laitiers produits et grâce aux parcs d'homogénéisation de laitier granulé installé, et qui sont semblables aux parcs de pré homogénéisation des mélanges de calcaires et d'argiles.

Les laitiers granulés servent essentiellement pour la production de divers types de ciments qui sont obtenus par le broyage simultané du clinker et du laitier, avec un ajout de gypse (3,5 à 5%). Le broyage, séparé des composants et leur mélange ultérieur, n'assure pas une aussi bonne homogénéisation que le premier cas.

En effet, le problème de broyabilité du clinker et du laitier ne se pose pas avec tant d'ardeur pour les ciments à faible teneur en laitier, mais pour les ciments à forte teneur en laitier, il est possible d'obtenir des ciments parfaitement homogénéisé, tout en opérant pas un broyage séparé grâce aux méthodes modernes de mélange des poudres par fluidisation.



Figure II.3 : Laitier cristallisé et laitier vitrifié

II-3 Caractérisation des laitiers

II-3-1 Composition chimique

Elle varie suivant la nature du minerai, la composition du calcaire, la consommation de coke et le type de fonte fabriquée.

Tableau II.3 - Composition chimique moyenne du laitier en % [23]

Oxydes	Teneur moyenne en %						
	Algérie	Australie	Allemagne	Afrique/sud	Canada	France	Japon
SiO ₂	40.1	35.8	31.5	34.2	35.6	33.5	31.2
CaO	40.2	41.1	36.6	39.4	38.8	42.2	37.4
Al ₂ O ₃	6.0	16.2	16.0	10.4	07.8	13.3	16.2
MgO	4.7	2.65	10.1	11.6	11.5	6.0	8.46
SO ₃ , S*	0.15*	1.52	2.36	2.09	4.36	0.94	3.03
FeO	2.0	-	-	-	0.11	12.4	0.05
MnO	2.64	1.63	0.47	1.26	0.60	2.64	0.65
Cr ₂ O ₃	-	-	-	-	0.01	-	0.01
TiO ₂	1.16	-	1.08	0.39	0.27	0.55	1.95
Na ₂ O	-	-	0.90	0.25	0.27	0.39	0.64
K ₂ O	0.70	1.43	0.77	0.50	0.43	0.70	0.47
Total	97.6	100.3	98.9	100.0	99.6	100.1	100.2

II-3-2 Activité hydraulique

Les laitiers possèdent des propriétés hydrauliques latentes ce qui signifie qu'il est nécessaire de les activer pour les rendre réactifs vis-à-vis de l'eau. Les termes les plus souvent utilisés pour qualifier ces propriétés des laitiers sont la réactivité, l'hydraulicité ou encore l'activité vis-à-vis de l'hydratation. Leur réactivité dépend de plusieurs facteurs fortement corrélés entre eux [23] :

a) Influence de la composition chimique

La différence de réactivité entre deux verres de composition chimique identique semble liée à la « structure » du verre.

b) Influence de la structure du verre

Elle dépend du degré de polymérisation, de l'énergie de liaison Me-O du cation dépolymérisateur et de la coordination du métal (Me) ainsi que de la composition chimique.

c) Influence de la finesse du laitier

La finesse du broyage du clinker influence la résistance au durcissement initial tandis que pour le laitier, la finesse du broyage influence le durcissement final.

Le verre possède un ordre local (premiers atomes voisins) mais ne possède pas de structures ordonnées à grande distance comme les minéraux. Les cations dépolymérisateurs rompent les liaisons, par exemple, de type siloxanes (-Si-O-Si-) dans les verres.

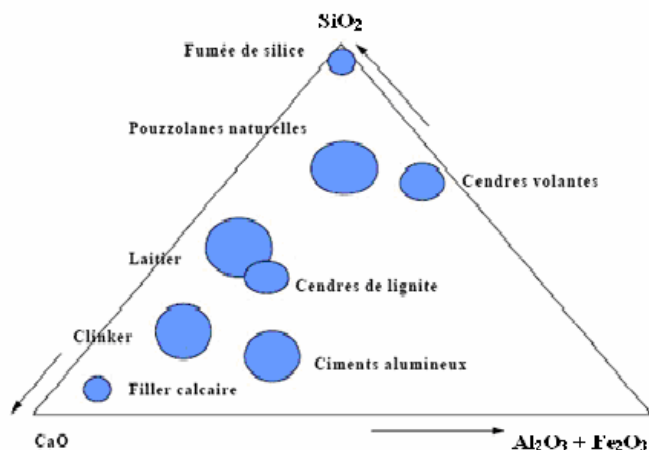


Figure II.4 : Le diagramme de Rankin

II-4 Hydratation

Les réactions d'hydratation du laitier sont des réactions de dissolution du verre par attaque hydroxylique (OH). C'est une différence fondamentale par rapport à l'hydratation du

clinker qui se déroule suivant une attaque hydrolytique (H_2O). Cependant, les éléments les plus basiques du laitier peuvent également être solubilisés par une simple attaque hydrolytique [24]. La nécessité d'avoir un milieu basique pour initier l'hydratation du laitier fait qu'ils réagissent moins rapidement avec l'eau. L'hydratation peut donc requérir une activation chimique (alcaline, sulfatique, sulfato-calcique ou sodique), mécanique (broyage plus poussé) et thermique (étuvage ou autoclavage).

Les ciments au laitier s'hydratent plus difficilement aux basses températures ($T < 20^\circ C$) et le développement des résistances mécaniques est retardé par rapport aux ciments Portland. Par contre, l'hydratation des laitiers (ciment au laitier) entraînent la formation des mêmes hydrates que ceux du clinker (ciment Portland).

II-4-1 Activateurs chimiques

Les activateurs ont un rôle de catalyseur de l'attaque du verre mais également un rôle de réactif dans les réactions de formation des hydrates. La portlandite ($Ca(OH)_2$) et le sulfate de calcium sont les activateurs les plus typiques de l'hydratation du laitier [14].

II-4-2 Accélérateurs

Ils influencent le taux d'hydratation des ciments. Pour ce faire, les accélérateurs doivent être solubles et s'ioniser dans l'eau de gâchage. Les accélérateurs les plus actifs sont les nitrates, nitrites, formates, thiosulfates, thiocyanates et halogénures, mais leur activité dépend de l'identité de leur cation accompagnateur. Les cations di-trivalents tels que Ca^{2+} , Mg^{2+} , Ba^{2+} , Fe^{3+} et Al^{3+} apparaissent plus effectifs que les ions monovalents comme Na^+ , K^+ et NH_4^+ [8]. Le $CaCl_2$ est particulièrement effectif aux basses températures.

II-5 Minéralogie

II-5-1 Minéraux

La plupart des laitiers présentent des proportions en phase cristalline relativement faibles, de l'ordre de 5 à 10%. La majeure partie de cette fraction cristalline est constituée de melilite (solution solide d'akermanite $Ca_2MgSi_2O_7$ et de gehlénite $Ca_2Al(AlSi)O_7$) et de merwinite ($Ca_3MgSi_2O_8$) [25].

II-5-2 Verre

Le verre de laitier est ce qu'on appelle un verre inversé à cause d'un grand nombre d'oxydes modificateurs et une structure très fragmentée, stabilisée par des liaisons ioniques entre les cations modificateurs et les complexes anioniques. La température et la vitesse de granulation déterminent principalement cette structure et la teneur en verre qui est considérée comme un facteur très important de la réactivité du laitier [41]. Ce verre ne possède pas d'ordre à « grande distance », comme dans les cristaux, mais il existe un ordre local figé par la trempe.

Les bandes diffuses présentes, dans les diagrammes de diffraction, sont la preuve qu'un certain degré d'ordre local existait déjà dans le laitier liquide et qu'il a été figé par la trempe. La position de ces bandes angulaires diffuses, sur les diagrammes de diffraction, ont été utilisées pour caractériser les matériaux vitreux [40].

Corps amorphes :

- LHF's vitreux : $20^\circ < 2\theta < 35^\circ$; LHF's partiellement cristallisés : $23^\circ < 2\theta < 38^\circ$.
- Pouzzolanes : $18^\circ < 2\theta < 28^\circ$.
- Pouzzolanes artificielles et cendres volantes calcaires : $30^\circ < 2\theta < 35^\circ$.
- Cendres volantes sulfato-calcareuses : $25^\circ < 2\theta < 44^\circ$.
- Argiles activées (pouzzolanes artificielles) : $15^\circ < 2\theta < 35^\circ$.

La basicité du laitier est définie à partir du rapport chaux / silice de la composition chimique du laitier.

Un rapport C/S >1 caractérise un laitier basique alors qu'un rapport C/S < 1 définit un laitier acide.

Même privé de cristaux, le laitier vitreux ne possède pas une structure homogène, mais consiste en microhétérogénéités (de 30 à 400 nm) de différentes phases.

II-5-3 Teneur en verre

La condition nécessaire pour transformer « complètement » un laitier à l'état vitreux est d'avoir, avant la trempe, une température du liquide supérieure de quelques degrés au point de fusion. Or, cette condition n'est pas toujours remplie dans la pratique.

Si le taux de refroidissement affecte la teneur en verre des laitiers, la composition chimique y joue également un rôle important. Par exemple, un rapport basicité / acidité ($C/(A+S)$) plus élevé donne des teneurs en verre plus faibles. Si cette relation ne semble pas toujours vérifiée, c'est parce qu'il est nécessaire de corrélérer ces proportions en oxydes avec d'autres paramètres ou facteurs. La présence d'agents nucléants hétérogènes (ex : ions Ti^{4+}), favorisant une cristallisation de volume par rapport à une cristallisation de surface, joue également sur les proportions de cette phase vitreuse [26].

Le laitier à l'état fondu renferme beaucoup d'énergie thermique (1700 kJ/kg = énergie interne du laitier) qui, par refroidissement rapide, n'est pas dissipée et, donc, le très bas niveau d'énergie de l'état cristallisé n'est pas atteint. Dès ce moment, le laitier possède une énergie interne plus élevée, qu'à l'état cristallin, ce qui le rend plus réactif chimiquement [27, 28]. L'hydraulicité du laitier dépend donc fortement de sa teneur en verre mais également de sa structure.

II-6 Réactivité des laitiers

L'activité des laitiers dépend fortement de la teneur en verre et de la structure de celui-ci. La plupart des auteurs [29 - 35] s'accordent sur le fait que la proportion en phases vitreuses des laitiers doit être largement supérieure à la proportion en phases cristallines. Par contre, ces auteurs n'aboutissent pas aux mêmes conclusions lorsqu'il s'agit de donner un rôle prépondérant :

- à la fraction plus ou moins grande de cristaux,
- au type de phases cristallisées,
- aux propriétés du verre résiduel.

La règle générale la plus suivie établit qu'une augmentation de la teneur en phases cristallines dans les laitiers réduit leur hydraulicité. D'un autre côté, le développement des résistances mécaniques des ciments au laitier dans lesquels les proportions en verre dépassent les 95% serait réduit [35].

Par conséquent, on ne pourrait pas établir de relation directe entre la teneur en verre d'un laitier et la résistance mécanique de ces ciments.

Néanmoins, quelques auteurs [42, 43] auraient observé que la durabilité des mortiers pouvait croître lorsque la teneur en cristaux passait de 0 à 5% et était légèrement réduite lorsque celle-ci augmentait de 5 à 35%.

Il n'est donc pas exclu qu'un optimum de la fraction cristalline dans le laitier existe. Toutefois, cet optimum serait fonction de la composition chimique du laitier. Les observations de Demoulian [10] indiquent, également, que la présence de 5% en poids de cristaux de merwinite a un effet bénéfique sur le développement de la résistance lequel serait attribuable à un enrichissement en Al_2O_3 de la fraction vitreuse rendant celle-ci plus réactive.

Les plus grandes divergences d'opinions se situent au niveau des formations minéralogiques, présentes dans les laitiers, comme l'akermanite, la gehlénite et la merwinite. La plupart considèrent ces minéraux comme inertes [29 - 31, 36 - 39]. Cependant, certains spécimens de ciment au laitier contenant 20% de merwinite ont montré de bonnes résistances grâce à l'augmentation de l'activité du laitier par la cristallisation d'une phase hydratée $Ca_2SiO_4 \cdot H_2O$ (C_2SH) qui augmente l'adhésion des autres produits hydratés à la surface des particules de laitiers anhydres. De plus, la présence de merwinite sous forme de cristallites dans un laitier permettrait d'augmenter la réactivité du laitier (composition chimique : C/S et CaO légèrement plus élevés). Il faut également tenir compte qu'une cristallisation importante de merwinite ou melilite laisse un verre résiduel plus acide et donc moins réactif. Une vitrification parfaite ne serait donc pas un critère de réactivité optimale. D'autres hypothèses font état de la présence de groupes structuraux similaires aux phases cristallines correspondantes dans le produit vitreux [44].

La connaissance de la composition chimique et de la teneur totale en verre des laitiers de haut fourneau semble, donc, ne pas être suffisante pour l'évaluation de sa réactivité. L'interaction entre le clinker, les constituants secondaires, les sulfates et le laitier constitue également un facteur important de la réactivité des laitiers.

Différentes approches ont été abordées afin de mieux comprendre la relation entre la réactivité et la composition chimique du laitier.

II-6-1 Réactivité du laitier suivant le mécanisme d'hydratation

L'hydratation du laitier vitreux a lieu suivant un mécanisme de dissolution – précipitation qui se déroule uniquement en présence d'une solution interstitielle basique [36]. Cette solution indique clairement que l'attaque de la phase vitreuse est hydroxylique.

Les composés hydratés, qui se forment suite à l'hydratation du laitier (essentiellement silicates de calcium hydratés et aluminates de calcium hydratés), et les activateurs de cette hydratation (hydroxyde de calcium, gypse) ont une nature invariable [45] et par conséquent un produit de solubilité défini et indépendant du laitier. Les énergies libres de dissolution – précipitation ne dépendent donc que de la solubilité de la phase anhydre, le laitier en l'occurrence [14, 36, 29, 30].

L'hydratation du laitier entraîne la formation des mêmes hydrates quelle que soit sa composition.

Les différences de réactivité entre divers laitiers peuvent donc être appréciées par une mesure de leur solubilité (verre), à condition de fixer le pH de la phase aqueuse. Dans la pratique, sa valeur est déterminée par l'équilibre de dissolution de l'hydroxyde de calcium et est proche de 12,6.

Pour un verre donné, la dissolution est quasi congruente en ce qui concerne la chaux, l'alumine et la silice, ce qui signifie que leur répartition pondérale dans le verre et dans la solution est voisine. Par contre, la magnésie a un taux de solubilisation systématiquement nul. La solubilité, chiffrée par la somme des concentrations en CaO, Al₂O₃ et SiO₂ en solution, varie de façon très importante avec la composition du verre.

II-7 Analyses thermiques différentielles (ATD)

Ces analyses consistent à soumettre une substance à un traitement thermique afin d'étudier les différents changements ou variations physiques et/ou chimiques telles que la susceptibilité magnétique, le poids, une transition cristalline, des propriétés mécaniques, des propriétés acoustiques, etc. [46]. Ces changements peuvent être suivis en fonction, d'une

augmentation de la température bien déterminée, de l'atmosphère (oxydante ou réductrice), de la conductivité thermique dans le creuset et de la finesse de l'échantillon [46].

Cette méthode permet donc de rassembler des informations importantes sur le comportement du laitier, sur ses structures vitreuses, ainsi que sur les transformations structurales, ou autres, apparaissant en fonction de l'augmentation de la température.

Au-delà de 750°C, le laitier entame sa cristallisation. Les analyses thermiques nous permettent donc de suivre la dévitrification du laitier. Les transformations structurales des verres et la formation des phases cristallines, se déroulant pendant cette dévitrification (cristallisation), contribuent à la détermination des paramètres cinétiques de germination, de croissance cristalline, de diffusion et d'homogénéisation des différents composants du laitier [47, 48].

CHAPITRE III

LE BÉTON À HAUTES PERFORMANCES

III-1 Introduction

L'exigences de réduction de la quantité d'eau, synonyme de résistance et de durabilité accrues, avec l'exigence d'un surcroît d'eau, synonyme d'ouvrabilité facilitée, sont les défis pour un béton de qualité supérieure. De nombreuses années de recherche ont été nécessaires pour arriver à satisfaire ces conditions. La découverte de superplastifiants très performants a constitué un véritable tournant. L'action de ces adjuvants est de rendre le béton nettement plus fluide, sans ajouter d'eau. Les superplastifiants ont créé, donc, la base du développement des bétons à hautes performances (BHP).

Les bétons à hautes performances présentent une durabilité améliorée et une résistance accrue. Ils peuvent supporter des charges supérieures ou permettre des constructions plus élancées. Ils peuvent également présenter des formes plus complexes et permettent de réaliser de plus grandes portées. Les nouveaux développements dans le domaine de la technologie du béton, la composition, la mise en oeuvre et les propriétés du béton à hautes performances seront abordés dans ce chapitre.

III-2 Le béton à haute résistance

La résistance à la compression est généralement considérée comme la principale propriété caractéristique du béton. Depuis la découverte du béton armé, les études ont été axées sur la recherche de méthodes permettant de renforcer cette résistance. Des progrès considérables ont été enregistrés dans ce domaine au cours de ces dernières décennies.

Aux Etats-Unis, durant les années 1950, une résistance à la compression de 35 MPa était considérée comme une résistance élevée. Dans les années 1970, la limite a été portée à 70 MPa, alors qu'en 1990, la notion de béton à haute résistance était réservée à un béton d'une résistance à la compression comprise entre 80 et 100 MPa [49].

La notion de « haute résistance » est dès lors très relative et, de toute évidence, évolutive. Il n'est dès lors pas étonnant que coexistent plusieurs définitions du « béton à haute résistance ». Selon la norme européenne EN 206-1, le béton est considéré comme un « béton à

haute résistance » à partir d'une classe de résistance de C55/67. Le premier nombre derrière la lettre C fait référence à la résistance à la compression caractéristique mesurée sur des cylindres, et le deuxième nombre, à la résistance à la compression caractéristique mesurée sur des cubes. La définition ne précise aucune classe de résistance maximale. Elle peut cependant être de facto déduite de la liste des classes de résistance possibles allant jusqu'à la classe C100/115 (tableau III.1).

Tableau III.1 : Caractéristiques de résistances et de déformations selon la norme EN 1992 1-1

Caractéristique	Classes de résistance										Bétons à haute résistance				
	12	16	20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	80	90	
Résistances caractéristiques en compression sur cylindre (MPa)	12	16	20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	80	90	
Résistances caractéristiques en compression sur cube (MPa)	15	20	25	30	37	45	50	55	60	67	75	85	95	105	
Résistance moyenne en compression (MPa)	20	24	28	33	38	43	48	53	58	63	68	78	88	98	
Résistance moyenne en traction directe (MPa)	1,6	1,9	2,2	2,6	2,9	3,2	3,5	3,8	4,1	4,2	4,4	4,6	4,8	5,0	
Module d'élasticité sécant (GPa)	27	29	30	31	33	34	35	36	37	38	39	41	42	44	
Déformation au pic de contraintes (%)	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,25	2,3	2,4	2,45	2,5	2,6	2,7	2,8	2,8	

III-3 Béton à hautes performances (BHP)

L'augmentation de la résistance à la compression du béton s'accompagne fréquemment de l'amélioration d'autres propriétés, comme la résistance à la traction, la rigidité, la résistance à l'usure, la durabilité, etc. Pour certaines applications, ces propriétés peuvent même être plus essentielles que le niveau de résistance atteint. Dans pareil cas, le choix des composants et de la composition ne doit pas être axé sur l'obtention d'une résistance maximale, mais davantage sur l'obtention d'une prestation optimale des propriétés souhaitées. La résistance supérieure obtenue est, pour ainsi dire, une incidence de second ordre [49].

Dans ce cadre, le contenu de l'expression « béton à haute résistance » s'avère insuffisant. Elle lui est préférable dès lors l'appellation « béton à hautes performances », qui est clairement plus générale. Il est parfaitement possible d'obtenir un béton présentant des hautes performances pour une propriété donnée, tout en ne possédant pas une résistance nettement supérieure. C'est ainsi que le béton auto-compactant ou auto-plaçant a été initialement décrit au Japon comme un béton à hautes performances, en raison de son ouvrabilité exceptionnelle et de sa (très probable) amélioration au niveau de la durabilité. Le

béton auto-compactant ne doit cependant pas nécessairement être un « béton à haute résistance » [49].

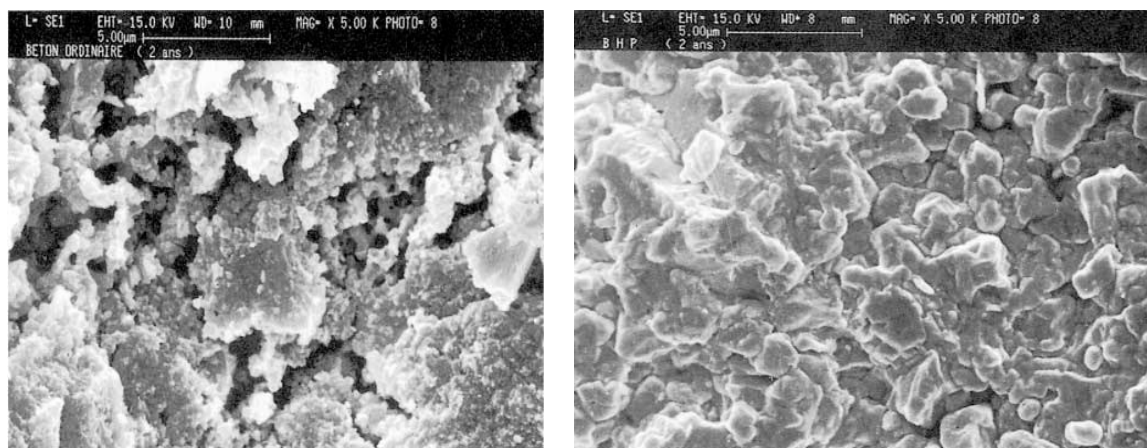


Figure III.1 : Vues de béton ordinaire et de BHP au microscope électronique (grossissement 5 000).

La question du béton à hautes performances est très vaste. Elle recouvre tous les aspects le différenciant du béton traditionnel, c'est à dire des changements relatifs tant aux composants, à la composition, à la mise en oeuvre qu'aux propriétés.

III-3-1 Généralités sur les BHP

Des années durant, la fabrication du béton n'a nécessité que des granulats, du ciment et de l'eau. Ce dernier composant remplit un double rôle : il permet l'hydratation du ciment et confère au béton frais sa nécessaire ouvrabilité. Cette ouvrabilité nécessite cependant une quantité d'eau supérieure à ce qui est strictement nécessaire pour l'hydratation. Une partie de cette eau – pour un rapport eau/ciment de 0,5, elle équivaut à environ la moitié de l'eau de gâchage – reste dans le béton au terme du processus de prise et de durcissement.

Elle se répand dans tout le béton et cause l'apparition d'un réseau de pores et de vides. L'augmentation de l'excédent en eau est proportionnelle au diamètre moyen des pores ainsi que de leur volume. Un nombre accru de pores de plus grandes dimensions affaiblit la structure du matériau et réduit dès lors la résistance du béton [50].

Nous observons donc un lien direct entre la résistance à la compression et l'eau de gâchage ajoutée au béton ou, formulé de manière plus scientifique, entre la résistance à la

compression et le rapport entre la quantité d'eau et de ciment, que l'on appelle le rapport eau/ciment (E/C). En fonction de l'augmentation ou de la diminution de ce rapport, la résistance du béton diminuera ou augmentera. Ce constat n'est pas neuf. Dès 1894, le Français René Feret avait postulé cette conclusion de manière empirique (Figure III.2). L'augmentation de la résistance est cependant limitée. À partir d'un rapport eau-ciment trop faible, le béton ne peut plus être mis en oeuvre. Les vides et les pores qui en résultent réduisent à nouveau la résistance, comme précisé dans la figure III.2. [50]

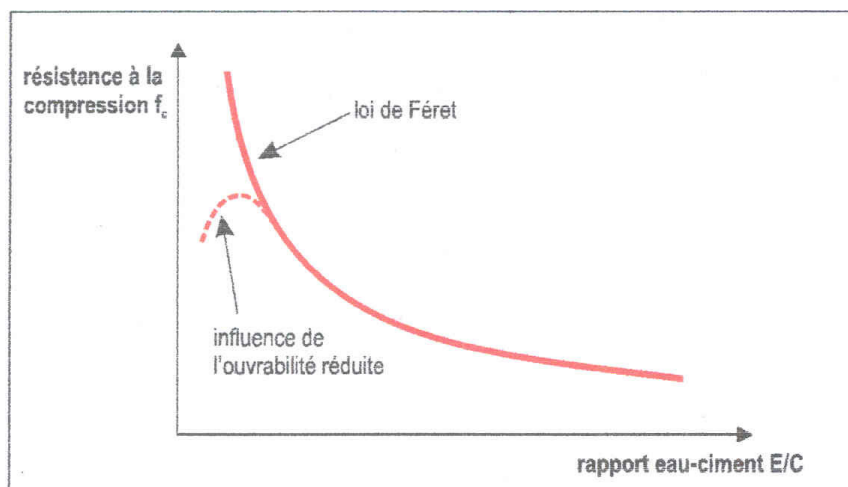


Figure III.2 : Relation entre la résistance à la compression et le rapport E/C

Progressivement, les chercheurs ont découvert qu'il existait également un lien entre le rapport eau/ciment et la durabilité. Le volume de pores est réparti sur un réseau de vides infiniment nombreux et de formes très variables. La plupart de ces vides ou pores présentent un diamètre de 10^{-9} à 10^{-8} μm , les pores de gel, et sont si petits que le transport de molécules (vapeur, gaz, etc.) en devient impossible. Nous observons cependant aussi des pores de plus grandes dimensions, les pores dit capillaires, dont le diamètre varie de 10^{-7} à 10^{-5} μm . Leur quote-part dépend du rapport eau/ciment et de la façon dont le ciment est hydraté, exprimée par le taux d'hydratation. Plus le taux d'hydratation augmente, plus le ciment est hydraté, plus la quantité d'eau liée croît et, par conséquent, plus la quantité d'eau libre diminue. La figure III.3 montre comment le volume de pores capillaires diminue en cas de baisse du rapport eau/ciment et de hausse du taux d'hydratation. L'humidité, la vapeur d'eau, les gaz et toutes sortes de substances nocives peuvent pénétrer assez facilement dans les pores capillaires, y migrer, voire détériorer le matériau de l'intérieur. La durabilité du béton augmente donc avec

la réduction du volume des pores (porosité réduite, compacité accrue) et du rétrécissement des pores (réduction de la perméabilité). Il s'ensuit que le rapport eau/ciment doit être le plus faible possible. [50]

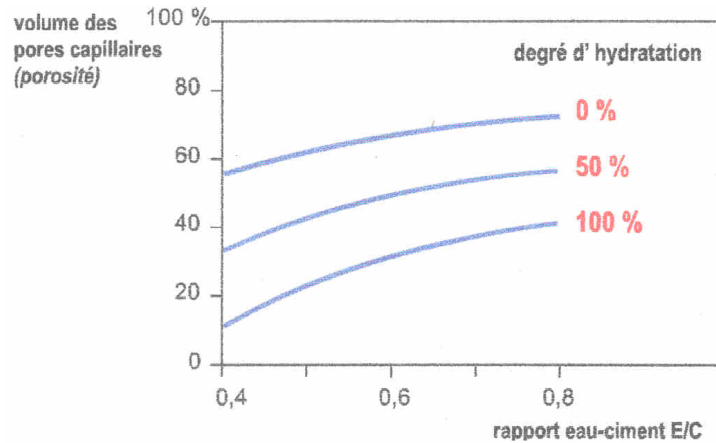


Figure III.3 : Relation entre la porosité et le rapport E/C pour différents degrés d'hydratation

III-3-2 Superplastifiants

La découverte des plastifiants et, plus particulièrement, de superplastifiants très puissants dans les années 1970, a constitué un véritable tournant. L'effet de ces adjuvants est de rendre le béton nettement plus liquide, sans ajouter d'eau. [51]

La surface de chaque grain de ciment contient des charges électriques libres. Les charges opposées s'attirent mutuellement. Au contact de l'eau, les grains s'agglomèrent alors en flocculats. L'eau de gâchage qui se trouve entre ces flocculats sera toutefois emprisonnée (Figure III.4) [51]. A partir de ce moment, elle ne contribuera plus à la fluidité de la pâte de ciment. L'ajout d'une quantité supplémentaire d'eau de gâchage sera nécessaire pour obtenir l'ouvrabilité souhaitée.

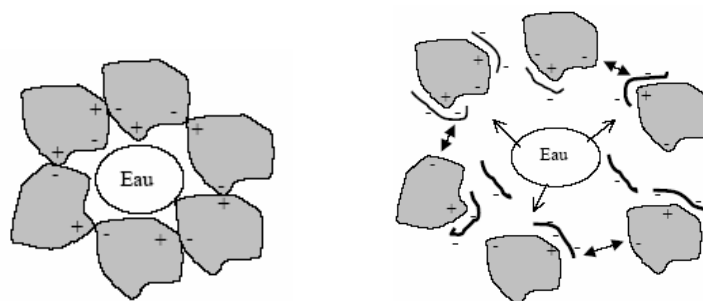


Figure III.4 : Action des superplastifiants - Déflocculation des grains de ciment.

Les superplastifiants empêchent la formation néfaste des congglomérats (Figure III.5). Les molécules du superplastifiant se fixent par adsorption sur l'interface entre le grain de ciment et l'eau de gâchage. Une fois adsorbé, le superplastifiant forme une charge négative autour de chaque grain de ciment. Ce faisant, les grains se repoussent les uns des autres. La dispersion qui en résulte réduit la viscosité de la pâte de ciment et augmente l'ouvrabilité. La structure moléculaire du superplastifiant, sous la forme de longues chaînes, renforce également cet effet.

Les molécules fixées les unes aux autres pour former des spirales avec des ramifications dans différentes directions s'enroulent entre les grains de ciment et empêchent de la sorte leur rapprochement réciproque. Grâce aux structures de polymères modernes « en forme de peigne », il est possible de réduire le rapport eau/ciment à moins de 0,3. La seule utilisation d'un superplastifiant permet également d'obtenir des résistances à la compression d'environ 80 MPa. [52]

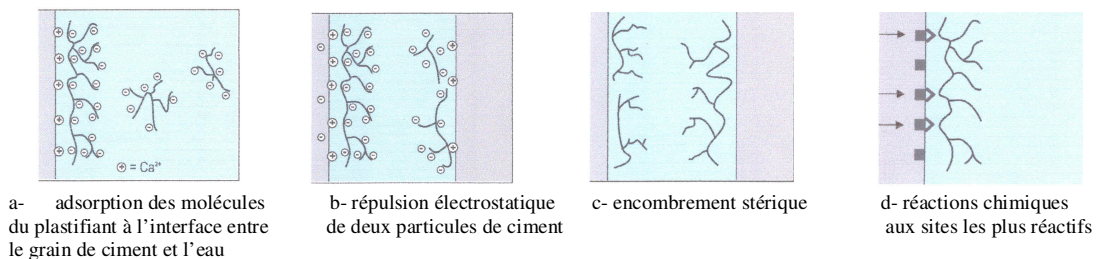


Figure III.5 : Les superplastifiants empêchent la floculation

La réduction du rapport eau/ciment par l'ajout d'un superplastifiant permet d'obtenir un béton plus compact. Des études ont cependant démontré que la composition de l'importante zone de transition entre les granulats et la pâte de ciment durcie demeure inchangée, c'est-à-dire qu'elle ne devient pas plus compacte.

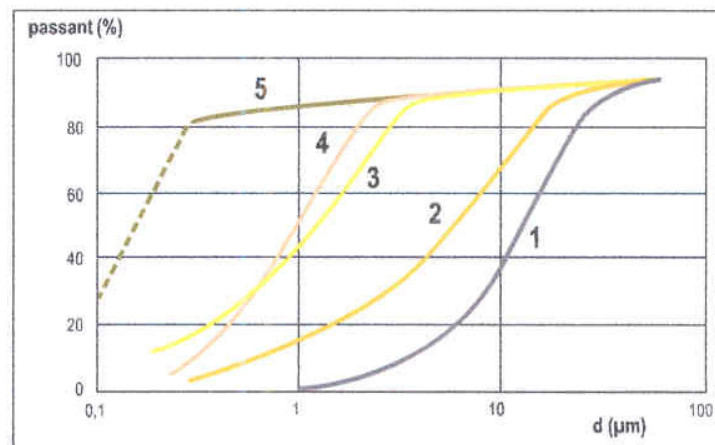
Cette zone est très poreuse et peu résistante. Sa largeur n'est que de 40µm, mais elle joue un rôle crucial lors de la reprise des contraintes par le béton. L'ajout de particules extrêmement fines (Figure III.6) permet de combler les minuscules vides dans cette zone de transition. La présence du superplastifiant est en outre essentielle pour éviter la formation de congglomérats [52].

III.3.4 Rôle des fines et ultrafines

Les fines ultra fines sont des particules de faibles à très faibles dimensions qui, ajoutées en quantités bien définies du poids de ciment, améliorent notablement les performances du béton grâce à leurs propriétés physiques et chimiques.

Parmi ces particules fines, citons notamment les cendres volantes, le filler calcaire, le quartz concassé, les laitiers de haut fourneau broyés et les fumées de silice. En raison de leurs petites dimensions et de leur immense surface spécifique, les fumées de silice sont les plus efficaces. La surface spécifique des fumées de silice oscille entre 15 000 et 25 000 m²/kg et est nettement supérieure à celle du ciment, comprise entre 350 et 500 m²/kg. Les fumées de silice disposent en outre de propriétés pouzzolaniques. Elles se lient à la chaux libérée lors de l'hydratation du ciment et contribue de la sorte au développement de la résistance [50].

Outre le compactage de la pâte de ciment durcie autour des granulats, ces particules ultrafines assurent également un remplissage généralement plus homogène du squelette granulaire dans la zone la plus fine. La compacité augmente, ce qui améliore la durabilité. Un autre effet positif de ces additions est leur influence favorable sur la stabilité du béton frais. Cette influence est particulièrement utile lors de la fabrication de bétons à très haute ouvrabilité. La résistance d'un béton obtenue grâce à un superplastifiant et à des fumées de silice peut excéder 100 MPa.



- 1. ciment ;
- 2. fines calcaires ;
- 3. ultrafines calcaires ;
- 4. ultrafines siliceuses ;
- 5. fumée de silice.

Figure III.6 : Granulométrie des matières fines

III-4 Composition des BHP

Le béton à haute résistance, ou plus généralement le béton à hautes performances, se compose de granulats, d'eau, de ciment, de superplastifiant, et éventuellement d'une addition, souvent, des fumées de silice. Un retardateur de prise y est parfois ajouté pour augmenter le temps de mise en oeuvre.

Le superplastifiant et le retardateur doivent être réciproquement compatibles, ainsi qu'avec le ciment utilisé. Etant donné que la résistance du béton dépend bien évidemment aussi de la résistance du ciment, un ciment de la classe 52,5N est la plupart du temps utilisé pour du béton à haute résistance, voire du 52,5R si une résistance initiale très élevée est souhaitée [52].

Les granulats connus pour les bétons ordinaires conviennent en principe également pour un béton à haute résistance. Si une résistance supérieure est souhaitée, la résistance mécanique du granulat est d'autant plus importante. C'est ainsi que des résistances supérieures à 100 MPa peuvent difficilement être obtenues avec du calcaire, mais peuvent l'être avec du porphyre ou du gravier [49, 52]. La forme joue également un rôle : les granulats concassés permettent d'obtenir un gain de résistance supérieur à 10 MPa. En outre, le diamètre maximal du grain ne peut pas être trop grand. En règle générale, le module d'élasticité des granulats est en effet supérieur à celui de la pâte de ciment durcie, de telle sorte que des concentrations de contraintes apparaissent au niveau des granulats. Le choix d'un grain de plus petite dimension permet d'abaisser les concentrations pour obtenir de plus petits pics. Dans le même temps, l'effet d'adhérence moyen entre les granulats et la pâte de ciment durcie diminue, car la surface spécifique et la quantité de mortier nécessaire à l'enveloppement de tous les grains augmentent. Il va de soi que le diamètre maximal des grains ne peut pas se réduire trop fortement, car, à défaut, la quantité d'eau nécessaire à l'hydratation des granulats augmentera trop fortement. La plupart du temps, le diamètre maximal des grains sera compris entre 10 et 20 mm, par exemple 16 mm. La composition doit être optimisée de telle sorte que la granulométrie, des gros grains aux très fins, soit la plus compacte possible. Ce n'est qu'en réduisant au minimum le volume de vides entre les grains que la combinaison idéale entre la résistance et l'ouvrabilité souhaitées, avec un minimum de pâte de ciment et d'eau, peut être réalisée [50].

La multiplicité des composants ne facilite guère la détermination de la composition optimale. Une composition typique contient 450 kg de ciment, un rapport eau-ciment de 0,30, un maximum de 10 % de fumées de silice en fonction de la masse de ciment et 10 litres de superplastifiant par mètre cube de béton. En règle générale, le diamètre maximal des grains ne dépassera pas 16 mm.

III-4-1 Choix des constituants

La qualité du béton est bien entendu fonction de celle de ses constituants : ciment, granulats, eau. L'idée de base des recherches entreprises est d'effectuer une sélection suffisante pour obtenir la résistance souhaitée, sans pour autant renchérir de façon prohibitive le coût des matériaux. Le transport des matériaux représente, en effet, une fraction importante de leur coût, qui devient insupportable dès que la distance de leur source au lieu d'utilisation dépasse quelques dizaines de kilomètres pour les granulats, et une centaine de kilomètres pour le ciment. Il est donc hors de question de se montrer trop exigeant en imposant des conditions trop restrictives ; en revanche, une attention particulière doit être apportée aux proportions du mélange, au choix de l'adjuvant et aux conditions de mise en oeuvre.

a- Ciment

Les normes françaises NF P 15-301 (Liants hydrauliques. Ciments courants. Composition, spécifications et critères de conformité) et NF P 15-010 (Liants hydrauliques. Guide d'utilisation des ciments) distinguent, pour les ciments, des catégories qui définissent leur composition et des classes de résistance. Parmi les différentes catégories disponibles, ce sont les ciments CEM I qui constituent le meilleur compromis entre haute résistance et disponibilité, car la plupart des cimenteries les fabriquent, et leurs caractères sont plus réguliers que ceux des ciments CEM II (avec ajouts). Quant au ciment alumineux, qui peut conduire à des résistances très élevées, sa mise en oeuvre est très délicate et il est peu répandu, si bien qu'en pratique, il est réservé à des travaux spéciaux, et notamment aux cas où l'on souhaite un durcissement très rapide, de l'ordre de quelques heures.

Les classes de résistances sont au nombre de trois : 32,5 ; 42,5 et 52,5. Pour un béton à haute résistance, seules les deux dernières sont à considérer, et la classe 52,5 est souvent préférée. En résumé, le choix doit se porter de préférence sur le ciment CEM I 52,5 avec, si possible, une faible teneur en aluminat tricalcique, ce qui le rend apte à l'emploi dans les ouvrages en contact d'eau de mer.

b- Granulats

Il est d'usage de dire que les granulats constituent le squelette du béton, ce qui traduit le fait que, presque toujours, ils sont plus durs que la pâte de ciment qui les enrobe. Mais la résistance propre du granulats est supérieure à celle du béton : le mécanisme de rupture du béton par compression est donc assez complexe ; il fait intervenir les qualités de forme et d'adhérence des granulats, aussi bien que leur résistance mécanique. Des granulats trop durs, et surtout de dimensions trop importantes, peuvent provoquer des concentrations de contraintes : selon de nombreux auteurs, les meilleurs bétons sont réalisés avec des granulats de dimensions inférieures à 15 mm ; le rapport adhérence/résistance augmente en effet lorsque la taille des granulats diminue. De même, pour les bétons à très haute résistance, les granulats concassés sont supérieurs aux roulés, dont la surface extérieure est plus faible à volume égal.

En résumé, pour les granulats autres que le sable, l'idéal serait un concassé assez dur, de taille moyenne, de bonne adhérence, avec une forme la plus cubique possible (absence de plaquettes et d'aiguilles). Le sable joue un rôle essentiel dans la résistance du ciment, son module de finesse doit être inférieur à 2,5 ; un ajout de 5 à 10 % de fines de 0,2 à 0,4 mm procure un effet bénéfique sur la plasticité du béton, sans nuire à la résistance. Enfin, pour un béton de qualité, le sable doit être propre avec un $ES > 75$.

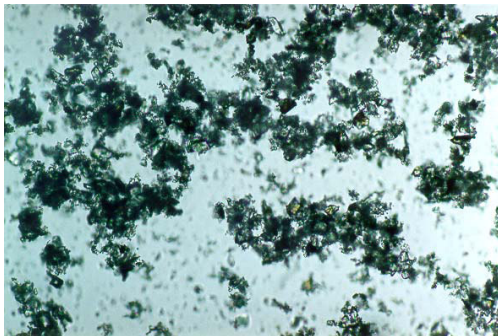
c- Adjuvants

L'emploi d'un fluidifiant est essentiel pour obtenir un béton de résistance élevée ; les fluidifiants sont, en général des acides organiques hydrocycliques (naphtalènes et polynaphtalènes), des ligno-sulfates et actuellement des polycarboxylates. Leur effet principal

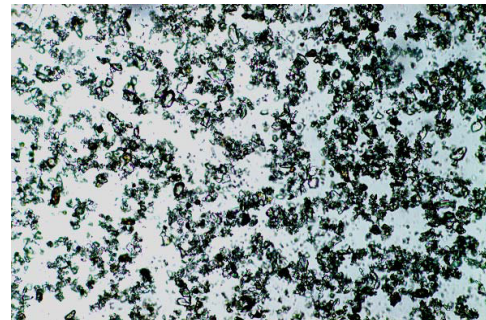
est d'abaisser la tension superficielle de l'eau et de défloculer le ciment, ce qui provoque une augmentation considérable de la fluidité du béton.

L'usage des fluidifiants est aujourd'hui plus répandu dans la plupart des grandes nations industrielles, les résultats obtenus avec ces produits sont souvent spectaculaires et ils méritent certainement un développement important.

La proportion d'adjuvant rapportée au poids du ciment est de l'ordre de 1 à 3 % ; elle doit être précisée par le fournisseur, car les fluidifiants du commerce sont plus ou moins dilués, et souvent mélangés à un retardateur de prise.



Suspension d'eau et de grain de ciment



Même suspension après ajout de 1% de superplastifiant

Figure III.8 : Effet dispersant du superplastifiant

Grâce à leur action de dispersion des grains du ciment (voir III.3.2), les fluidifiants permettent d'augmenter, de façon spectaculaire, l'ouvrabilité d'un béton, à teneur en eau égale. Ils permettent aussi, à ouvrabilité égale (mesurée au Cône d'Abrams ou, de préférence, au maniabilimètre) de diminuer le rapport E/C du poids d'eau au poids de ciment, et donc d'obtenir un béton de bien meilleure résistance. On sait, en effet, que la proportion d'eau nécessaire pour l'hydratation du ciment est de l'ordre de 25 % ($E/C = 0,25$) : or, pour un bon béton courant, le rapport E/C ne descend guère en dessous de 0,45, le complément d'eau ayant simplement pour rôle de délayer la pâte, afin de la rendre plus fluide.

Grâce à l'emploi d'un fluidifiant, il est possible d'arriver à des valeurs de E/C comprises entre 0,30 et 0,35 et d'augmenter ainsi la résistance du béton. En revanche, les fluidifiants ont parfois donné lieu à des échecs en raison de leur faible durée d'efficacité : l'action dispersante de l'adjuvant ne dure que 30 à 45 min après son mélange à l'eau de gâchage et passé ce délai, le béton frais revient à un état identique à celui d'un béton sans

adjuvant, ce qui peut rendre impossible sa mise en place dans les coffrages, étant donné sa faible teneur en eau. Cet inconvénient est sensible surtout dans le cas de béton prêt à l'emploi livré par camions, avec une incertitude sur le temps de transport. Le temps d'efficacité des fluidifiants peut être allongé par le recours à un retardateur ; on peut aussi différer l'introduction d'une partie du fluidifiant dans le mélange jusqu'à l'arrivée du camion sur le chantier, la proportion exacte entre les deux parts étant déterminée par l'expérience.

Actuellement, de nouvelles variétés d'adjuvants permettent un maintien d'ouvrabilité au delà de deux heures et voir plus.

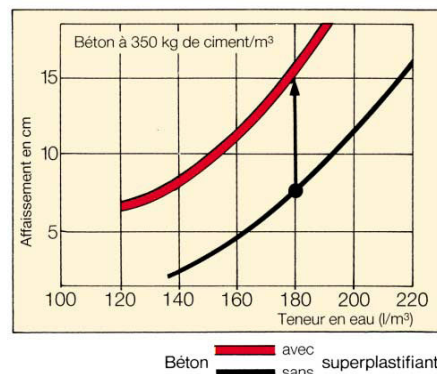


Figure III.9 : Influence d'un superplastifiant sur l'ouvrabilité du béton

III-5 Propriétés des BHP

III-5-1 Effets de la température sur le béton en cours de durcissement

En raison de la teneur élevée en ciment et de l'utilisation de ciment fin (classe 52,5), la production de chaleur, inhérente au processus de l'hydratation, s'intensifie dans le béton à hautes performances par rapport au béton ordinaire. Ce phénomène peut dès lors induire, même dans des éléments qui ne pourraient pas être spontanément qualifiés de « massifs », des contraintes thermiques relativement élevées [52].

Même si le béton à haute résistance absorbe mieux les contraintes de traction, le risque de fissuration est cependant nettement supérieur. Lors de la conception et de l'exécution, il convient donc d'accorder à ce phénomène une attention suffisante. Des mesures destinées à exclure au maximum le retrait empêché s'imposent dès lors. Les calculs des contraintes en fonction du développement calorifique escompté et des propriétés du béton en phase de durcissement sont souhaitables.

III-5-2 Comportement en compression

Lorsqu'un béton doté d'une résistance normale est comprimé, les fissures d'adhérence entre la matrice de mortier et le granulat se propageront autour des granulats. A un niveau proche de la résistance à la compression, ces fissures d'adhérence se propageront à toute la matrice de mortier, entraînant l'apparition de fissures dans le mortier. En définitive, le béton cèdera sous l'effet de tout un réseau de fissures ininterrompues dans le mortier, alors que les granulats ne subiront aucun dommage (Figure III.10) [52].

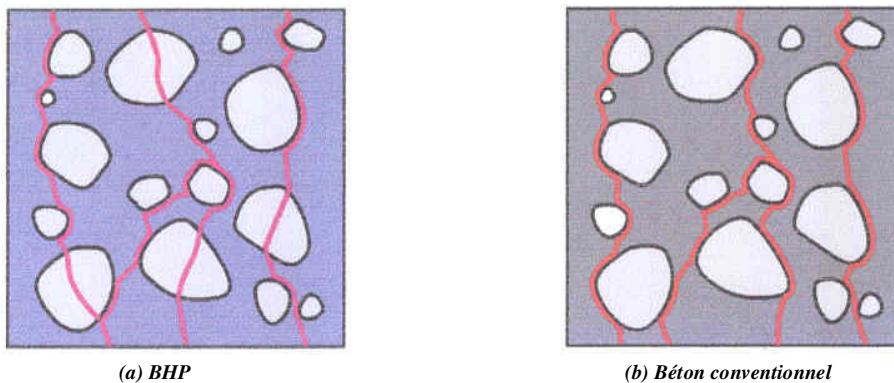


Figure III.10 : Adhérences et fissures dans les bétons ordinaires et BHP

Le béton à hautes performances se caractérise par une meilleure adhérence entre les granulats et la matrice de ciment. En outre, la résistance de la matrice sera pratiquement égale à la résistance des granulats. Dès lors, l'apparition et le développement de fissures d'adhérence ou de microfissures seront retardés. A l'approche de la rupture, les fissures se seront désormais généralement propagées au travers des granulats.

Sur le diagramme contrainte-déformation (Figure III.11), ce phénomène s'exprime par un comportement légèrement plus linéaire par rapport au béton de résistance conventionnelle. De même, le béton à hautes performances présente un retrait plus marqué après l'obtention de la résistance à la compression, c'est-à-dire après la rupture du béton, et la portance tendra très rapidement vers la valeur zéro. Le BHP présente en d'autres termes un comportement de rupture fragile plus marqué que le béton de résistance conventionnelle.

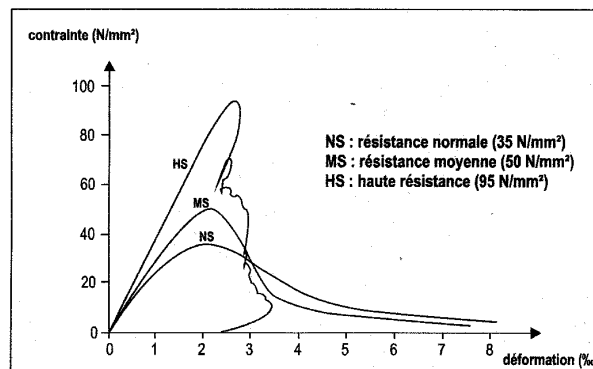


Figure III.11 : Diagramme Contraintes – Déformations

III-5-3 Comportement en traction

Généralement, la résistance à la traction du béton est liée à la résistance à la compression. En ce qui concerne le béton conventionnel, différentes formules sont appliquées. Dans la norme EN 1992-1-1:2004, une formule différente est proposée pour le béton à haute résistance par rapport au béton conventionnel (Tableau III.1). Un élément essentiel est cependant le caractère fragile du béton à hautes performances, signalé ci-dessus. Dès que la résistance est atteinte, la portance tendra très rapidement vers la valeur zéro.

III-5-4 Rigidité

Le module d'élasticité du béton est essentiellement déterminé par les propriétés des granulats et de la matrice de mortier. Au fur et à mesure que la matrice se consolide et se rigidifie, le béton présentera également une rigidité accrue. Le module d'élasticité du béton à hautes performances est dès lors toujours lié à la résistance à la compression (Tableau III.1).

III-5-5 Retrait

Tant le béton à haute résistance que le béton conventionnel sont soumis à un retrait plastique, à un retrait endogène (par auto-dessiccation) et à un retrait de dessiccation.

a- Retrait endogène

Le ciment réagit avec une quantité d'eau donnée. Ce processus s'accompagne d'une réduction du volume. Par rapport au volume initialement occupé par l'eau et par le ciment, le volume du produit de la réaction après hydratation complète sera réduit d'environ 10 %. Au

début de la réaction, le béton encore plastique absorbe sans difficulté la réduction volumique. Dès que le béton se rigidifie, la contraction est empêchée. Ce phénomène entraîne le développement de contraintes de traction dans les espaces remplis d'eau. Ces pores en devenir se dilatent, ce qui provoque une sous-pression aspirant l'air extérieur. Dans cet espace désormais partiellement rempli d'eau, apparaissent des forces capillaires qui contractent les pores. Ce retrait interne est donc le résultat de deux processus : un processus chimique et un processus physique. Dans un béton conventionnel, caractérisé par un excédent d'eau, le retrait endogène demeure limité à environ 10^{-8} . [52, 53]

En ce qui concerne le béton à haute résistance, où la quantité d'eau disponible est nettement moins importante, le ciment attire à lui cette faible quantité d'eau. Les pores s'asséchant progressivement sont soumis à des forces capillaires en augmentation constante, permettant de la sorte au retrait endogène d'atteindre des valeurs nettement supérieures.

Il est manifeste que le retrait endogène augmente avec l'accroissement de la résistance et s'effectue essentiellement à court terme. Etant donné que le retrait endogène résulte du processus d'hydratation, il sera toujours présent, même en cas de cure parfaite du béton. Seuls de nouveaux concepts relatifs à la cure intérieure pourraient s'avérer précieux. De toute évidence, le retrait endogène du béton à hautes performances requiert une attention particulière. Conjugué aux éventuelles contraintes thermiques résultant de la chaleur d'hydratation élevée, le retrait endogène pourrait en effet provoquer l'apparition d'importantes fissures dans un BHP frais.

b- Retrait de dessiccation

Le retrait de dessiccation se produit dans un environnement qui n'est pas saturé en eau. Dans ce cas, de l'eau peut s'évaporer des pores. Ce phénomène donne lieu à des forces capillaires qui contractent les pores et génère par voie de conséquence une réduction du volume. Le niveau du retrait de dessiccation dépend en grande partie de la quantité d'eau évaporable présente dans le béton. Dans des circonstances normales, une fraction importante ne s'évaporerait pas, car elle est liée chimiquement ou est fixée entre les produits d'hydratation.

L'eau présente dans les pores capillaires, de plus grandes dimensions, peut quant à elle s'évaporer. Le volume réduit des pores capillaires est une caractéristique typique du béton à haute résistance. Par rapport au béton ordinaire, il sera dès lors moins sujet au phénomène du retrait de dessiccation. Il en ressort que le retrait de dessiccation diminue en cas d'augmentation de la résistance.

Le retrait d'un béton de 90 MPa dans un environnement affichant une humidité relative de 50 % est de moitié inférieur au retrait observé pour un béton de 30 MPa. La diminution du retrait se poursuit avec l'accroissement de l'humidité relative. L'addition de fumées de silice n'a aucune incidence sur le retrait final, mais accélère le processus. Le retrait de dessiccation peut toujours se poursuivre, même à plus long terme. L'ampleur de ce retrait peut être sensiblement influencée par des mesures de cure énergiques [50, 53].

III-5-6 Le fluage

Le fluage du béton à hautes performances, c'est-à-dire la déformation croissante sous l'effet d'une contrainte constante, est fréquemment inférieur au fluage observé pour un béton de résistance conventionnelle. L'âge du béton au moment de la sollicitation est également extrêmement important pour le BHP. Lorsque la charge est exercée sur un béton jeune, la déformation par fluage sera plus importante que dans le cas d'un béton plus âgé. Il en va de même en ce qui concerne le béton conventionnel.

La norme EN 1992-1-1:2004 définit les formules nécessaires au calcul du fluage. Il en ressort par exemple que le coefficient de fluage d'un béton de classe de résistance C 25/30 est environ trois fois supérieur à un béton de classe de résistance C 90/115 pour une humidité relative de 50 %. Il convient cependant de conserver à l'esprit que les contraintes observées dans le BHP sont nettement supérieures à celles inhérentes au béton conventionnel. Les déformations immédiates peuvent dès lors devenir aussi importantes, en fonction, bien évidemment, de la résistance à la flexion, dans le cas d'une poutre par exemple. Ce phénomène est encore renforcé à long terme par le biais de l'utilisation d'un coefficient de retrait. En cas de constructions en BHP, la limitation des déformations et des flèches peut devenir le facteur déterminant du projet, plutôt que la portance proprement dite. Ce faisant, le matériau ne peut pas toujours être utilisé de manière optimale.

III-5-7 Durabilité

Etant donné la structure plus dense des pores du béton de hautes performances, ce matériau affiche un meilleur comportement face aux mécanismes d'agression. La plupart des processus de dégradation sont en effet causés par l'entrée de substances agressives, telles que des chlorures, du dioxyde de carbone, des acides, etc.

Si la pénétration de ces substances dans le béton est entravée, comme dans le cas du BHP, les processus de dégradation y afférant ne pourront bien évidemment se produire que bien plus tard. Quoiqu'il en soit, il convient toujours de veiller à la pureté des éléments constitutifs du béton, afin d'éviter toute agression par des mécanismes internes (présence de sulfates, d'alcalis, de granulats réactifs, ...).

Toutefois, la durée d'utilisation d'une construction est en grande partie également déterminée par les conditions d'exécution. Dans ce cadre, nous avons déjà fait allusion ci-dessus au risque de fissuration prématurée résultant des effets thermiques et du retrait (principalement endogène). La présence de telles fissures peut influencer sensiblement la durabilité de la construction [50].

III-5-8 Résistance au feu

Même si la durabilité du BHP est en règle générale nettement supérieure à celle du béton conventionnel, la résistance au feu est cependant un élément sur lequel il convient d'attirer l'attention. En raison de la structure très dense des pores, la pression de vapeur, qui apparaît à l'intérieur du béton à des températures excédant 100 °C, peut difficilement être réduite. La vapeur ne peut en effet pas être rapidement évacuée à l'extérieur, en raison de la structure très dense du matériau. Par rapport au béton conventionnel, la résistance du béton à haute résistance diminuera dès lors plus rapidement si la température est supérieure à 100 °C.

En raison des pressions de vapeur accumulées, il convient également d'examiner les risques potentiels d'éclatement du béton. En ce qui concerne le béton des classes de résistance C 55/67 à C 80/95, les règles inhérentes au béton conventionnel suffisent pour éviter les éclatements, pour autant que la teneur en fumées de silice soit inférieure à 6 % de la masse de

ciment. En cas de teneurs supérieures en fumées de silice et en cas de classe de résistance C 90/105, il sera nécessaire de prendre des mesures particulières, telles que le mélange d'au moins 2kg/m^3 de fibres de polypropylène. En cas de températures élevées, ces fibres fondront, ce qui laissera de petits canaux ouverts via lesquels les pressions de vapeur pourront être dissipées plus rapidement [52].

CHAPITRE IV

PROGRAMME EXPÉRIMENTAL ET PROCÉDURE D'ESSAIS

IV-1 Introduction

Une méthode de composition de béton pourra être considérée comme satisfaisante si elle permet de réaliser un béton répondant aux exigences suivantes :

- Le béton doit présenter, après durcissement, une certaine résistance,
- Le béton frais doit pouvoir facilement être mise en oeuvre (ouvrabilité),
- Le béton doit présenter un faible retrait et fluage,
- Le coût du béton doit rester le plus bas possible,

Ces principales exigences résident dans des paramètres qui sont intimement liés aux caractéristiques physiques et morphologiques des matériaux utilisés (nature et qualité des granulats, type de liant, etc.). C'est pourquoi, il est absolument nécessaire de sélectionner des matériaux adéquats afin de répondre à toutes ces conditions.

Plusieurs essais doivent être réalisés au préalable. Dans ce chapitre, nous exposons les différentes opérations à réaliser afin de déterminer les caractéristiques des différents matériaux utilisés dans notre étude.

IV-2 Analyse par diffractométrie aux rayons x

L'analyse par diffraction aux rayons X (DRX) permet de faire l'analyse qualitative des phases cristallines et de caractériser des solides non cristallins ou amorphes. L'analyse quantitative est aussi possible si on incorpore dans l'échantillon un étalon interne à un pourcentage défini. Il faut alors comparer l'intensité des pics des différentes phases de l'échantillon avec les intensités des pics de l'étalon par rapport au bruit du fond [54].

Les conditions de diffraction d'un rayonnement X par une famille de plans réticulaires sont définies par la loi de Bragg.

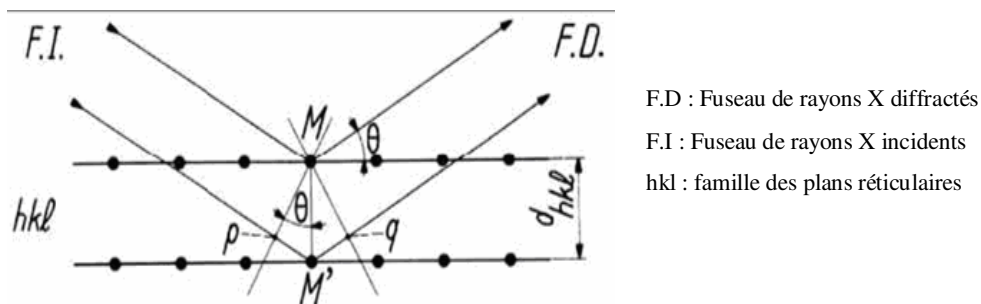


Figure 0IV.1 : Principe de BRAGG

Donc, chaque espèce cristalline va donner un diagramme de diffraction caractéristique, c'est-à-dire un ensemble de raies de diffraction dont la position et l'intensité correspondent à sa structure cristalline. Quand les rayons X frappent une poudre comportant plusieurs espèces minérales, chaque cristal diffracte pour son propre compte, le spectre résultant est la somme des diffractions correspondant à chaque espèce.

La connaissance des raies de diffraction correspondant aux différentes espèces pures permet d'identifier les composants du mélange soumis à l'analyse.

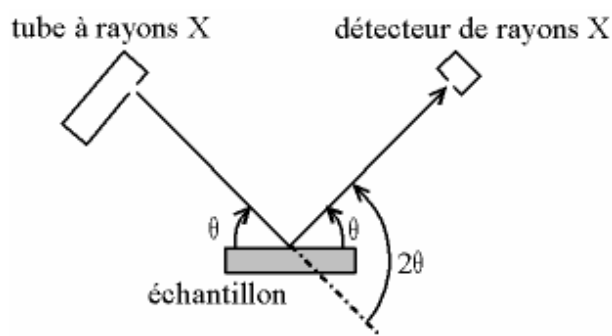


Figure IV-2 : Représentation schématique de l'analyse par DRX

Dans l'appareil utilisé, les rayons X sont produits à l'aide d'un tube sous vide, appelé le tube de Coolidge. Il est formé d'une cathode et d'une anode faites d'un métal lourd (cobalt ou cuivre).

Le matériau qu'on veut analyser est placé dans le porte-échantillon, un détecteur des rayons diffractés tourne sur le même cercle à une vitesse bien définie permettant d'obtenir un diagramme sur lequel l'intensité des pics est fonction d'un angle θ . L'identification des

différents cristaux à partir des diffractogrammes X est déduite à l'aide des raies caractéristiques des éléments contenus.

Avant d'effectuer une diffraction aux rayons X, les échantillons bruts ou traités sont préalablement broyés jusqu'à une finesse inférieure à 30 μm puis déposés et compactés sur la surface rugueuse d'une lame de verre pour être parfaitement désorientés sur le porte-échantillon d'aluminium [55].

IV-3 Analyse par microscope électronique à balayage (MEB)

Le microscope électronique à balayage (MEB) utilise les informations provenant des électrons secondaires et rétrodiffusés. Le principe de fonctionnement consiste à bombarder un échantillon par un faisceau d'électrons focalisé grâce à des lentilles électromagnétiques. Le diamètre du faisceau est d'environ 100 Å. Sous l'effet de ce bombardement, l'échantillon émet des électrons secondaires et des électrons rétrodiffusés et aussi un rayonnement X des atomes caractéristiques de la cible. Les électrons secondaires et rétrodiffusés sont utilisés pour l'examen morphologique, c'est-à-dire pour avoir une image de l'échantillon. Les rayons X sont détectés à l'aide d'un spectromètre, le résultat est un spectre dans lequel l'intensité des pics dépend de la concentration de l'élément caractéristique dans l'échantillon.

IV-4 Essais d'écoulement au cône Marsh

Cet essai consiste à verser une certaine quantité (1,2 l) de coulis dans un cône Marsh et de mesurer son temps d'écoulement. L'essai a été utilisé pour déterminer les points de saturation des coulis étudiés qui contiennent différents dosages en laitier et en superplastifiant. Le point de saturation d'un ciment correspond au dosage en superplastifiant au-dessus duquel toute augmentation du dosage n'augmente plus la fluidité du coulis. Le temps d'écoulement d'un coulis à travers le cône Marsh est fonction de sa viscosité ainsi que des forces de frottement sur les parois du cône. Il faut noter que le cisaillement n'est pas constant pendant l'écoulement parce que le volume du coulis dans le cône n'est pas constant. L'expérience montre qu'en général, le temps d'écoulement des coulis est linéaire jusqu'à 700 ml et il est recommandé de prendre ce temps d'écoulement comme le point de comparaison des coulis.

IV-5 Essais Calorimétrique

La calorimétrie est une méthode thermique de suivi de l'hydratation dans le temps. L'avancement de l'hydratation est évalué par une technique couramment utilisée, celle du calorimètre semi-adiabatique AFNOR (éditeur des normes françaises) également appelé calorimètre de Langavant. L'évolution de l'hydratation est accessible par la mesure de la chaleur dégagée par le matériau pendant qu'il s'hydrate (réactions exothermiques).

L'échantillon, disposé dans une éprouvette cylindrique, est mis dans une bouteille isolante (vase dit Dewar), dans lequel règne un vide poussé, fermé par un bouchon calorifugé. Au sein de ce vase, est disposé un thermocouple. L'appareillage ainsi que le mode opératoire sont décrits dans la norme NF P 15-436.



Figure IV.3 : Bouteille de Langavant

À un instant t donné, la chaleur d'hydratation du ciment $Q(t)$ est définie comme la somme de la chaleur accumulée dans le vase depuis l'instant initial et de la chaleur dissipée, vers le milieu extérieur. Cette chaleur est exprimée en joule par gramme de CEM I 42.5.

Elle est donnée par la formule :

$$q = \frac{M\theta_t}{C} + \frac{1}{C} \int_0^t \alpha \cdot \theta \cdot dx = A + D \quad (\text{IV.1})$$

A : représente la chaleur accumulée dans le calorimètre

D : représente la chaleur dissipée (ou fuites) vers le milieu extérieur

Avec :

C[g] : le poids de CEM I 42.5 contenu dans l'éprouvette

t[h] : la durée de l'hydratation

M[J°C⁻¹] : la capacité thermique totale du calorimètre et de l'éprouvette

α [Jh⁻¹°C⁻¹] : le coefficient de déperdition thermique du calorimètre

θ [°C] : l'échauffement de l'éprouvette

IV-6 Essai d'équivalent de sable

L'essai d'équivalent de sable (NF P 18-598), permettant de mesurer la propriété d'un sable, est effectué sur la fraction d'un granulat passant au tamis à mailles carrées de 5 mm. Il rend compte globalement de la quantité et de la qualité des éléments fins, en exprimant un rapport conventionnel volumétrique entre les éléments sableux qui sédimentent et les éléments fins qui flocculent.

La valeur de l'équivalent de sable (ES) est le rapport, multiplié par 100, de la hauteur de la partie sableuse sédimentée H_1 , à la hauteur totale du flocculat et de la partie sableuse sédimentée H_2 .

$$ES = (H_1/H_2) \times 100 \quad (IV.2)$$

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

IV-7 Masses volumiques

Il s'agit de mesurer le volume absolu, en vrac et apparent, du sable et de chaque fraction granulaire pour déterminer le squelette granulaire du béton.

Pour le béton, il s'agit de déterminer les masses volumiques apparente âgé de 3, 7, 14, 28 et 90 jours à partir d'une éprouvette pour le béton frais et durci.

IV-8 Teneur en eau

La mesure de la teneur en eau consiste à peser une certaine quantité d'échantillon, la séchée dans l'étuve à une température de 105° c jusqu'à un poids constant. Le teneur en eau est donné par la relation suivante :

$$W = 100 \times (\text{masse totale} - \text{masse séchée})/\text{masse totale} \quad (IV.3)$$

IV-9 Coefficient d'aplatissement du gravier

Le coefficient d'aplatissement des granulats (NF P 18-561) est le pourcentage de grains dont la grosseur excède 1,58 fois l'épaisseur. La grosseur est déterminée par l'analyse granulométrique.

Le refus de chaque tamis est ensuite tamisé sur une grille à fente parallèle d'ouverture 1,58 fois plus petite que celle de la maille correspondante. Les grains passant à travers la série de tamis utilisé sont bien les grains qu'il faut peser pour avoir le pourcentage pondéral.

IV-10 Essai Los Angeles du gravier (NF P 18-573)

L'essai consiste à mesurer la quantité d'éléments inférieurs à 1,6 mm produite en soumettant le matériau aux chocs de boulets normalisé dans la machine Los Angeles.

La granularité du matériau soumis à l'essai est choisi parmi les six classes granulaires 4 – 6,3 mm ; 6,3 – 10 mm ; 10 – 14 mm ; 10 – 25 mm ; 16 – 31,5 mm ; 25 – 50 mm, de la granularité du matériau, tel qu'il sera mise en œuvre. La classe 10 – 25 mm doit contenir 60% de 10 – 16 mm, la classe 16 – 31,5 mm doit contenir 60% de 16-25 mm et la classe 25-50mm doit contenir 60% de 25-40 mm. La masse de la charge des boulets varie suivant les classes granulaires.

Si M est la masse du matériau à étudier, m la masse des éléments inférieurs à 1,6 mm produits au cours de l'essai, la résistance à la fragmentation par choc s'exprime par la quantité : $100xm/M$.

Cette quantité sans dimension est appelée, par définition, coefficient Los Angeles (L_A).

Les granulats sont qualifiés comme suit :

$L_A < 15$	très bon
$15 < L_A < 20$	bon à moyen
$20 < L_A < 30$	moyen à faible
$L_A < 30$	médiocre.

IV-11 Taux d'absorption des granulats

Après séchage des échantillons à 105°C, on les pose dans un bac d'eau jusqu'à saturation, et en mesure ensuite le taux d'absorption des granulats par la relation suivante :

$$AG (\%) = 100 \times (M_2 - M_1)/M_1 \quad (IV.4)$$

Avec M_1 : poids de l'échantillon à sec

M_2 : poids de l'échantillon après saturation

IV-12 Essai granulométrique

L'essai consiste à classer les différents grains constituant l'échantillon en utilisant une série de tamis, emboîtés les uns sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. Le matériau étudié est placé en partie supérieure des tamis et le classement des grains s'obtient par vibration de la colonne de tamis.

On considère que le tamisage est terminé lorsque le refus ne varie pas de plus de 1 % entre deux séquences de vibration de la tamiseuse. On trace la courbe granulométrique sur un graphique comportant en ordonnée le pourcentage des tamisats sous les tamis dont les mailles D sont indiquées en abscisse selon une graduation logarithmique.

Les courbes granulométriques peuvent être déterminées par cet essai selon la norme (NF P 18-560).

Pour les sables, ils doivent présenter une granulométrie telle que les éléments fins ne soient ni en excès, ni en trop faible proportion. S'il y a trop de grains fins, il sera nécessaire d'augmenter le dosage en eau du béton tandis que si le sable est trop gros, la plasticité du mélange sera insuffisante et rendra la mise en place difficile. Le caractère plus ou moins fin d'un sable peut être quantifié par le calcul du module de finesse (MF). Celui-ci correspond à la somme de pourcentages des refus cumulés, ramenés à l'unité, pour les tamis de modules 23, 26, 29, 32, 35, 38. Ce paramètre est en particulier utilisé pour caractériser la finesse des sables à bétons (NF P 18-304).

Quant aux fines (laitier broyé et ciment) la méthode utilisée est celle par Alpine air. Tamisage approprié pour l'analyse de la taille des particules de tout type de matériaux sec. Le dégommage est assuré par un jet d'air ascendant fourni par une fente rotative, de manière à fluidiser les fines se trouvant sur le tamis (système Alpine). Ce dispositif se prête davantage au tamisage des poudres fines (< 100 microns).



Figure IV.4 : Tamiseuse Alpine Air

IV-13 Finesse de mouture

La mesure de la finesse Blaine (SSB) est normalisée (NF P 15-442).

Cet essai consiste à mesurer le temps de passage d'un certain volume d'air à travers un certain volume du liant placé et compacté dans une cellule. Cet échantillon a une porosité qu'il est possible de calculer. Le temps de passage de l'air à travers l'échantillon est comparé avec le temps de passage à travers un échantillon de ciment étalon qui a une surface spécifique connue. En connaissant la densité et la porosité de deux ciments on calcule la surface spécifique des poudres.

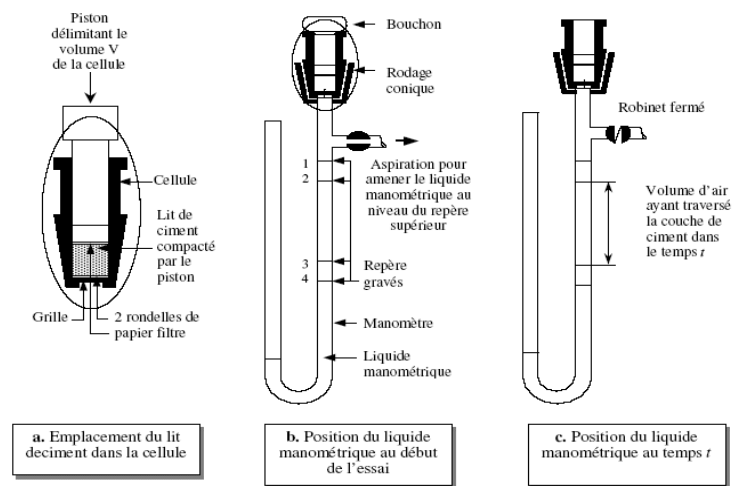


Figure IV-5 : Principe de fonctionnement du perméabilimètre de Blaine

Cette valeur correspond à la totalité de la surface des grains d'une poudre, donc à la surface de réaction.

IV-14 Essai de consistance et de prise

Les adjuvants chimiques ont une grande influence sur la vitesse d'hydratation du ciment. Leur utilisation impose la nécessité de déterminer les temps de début et de fin de prise qui peuvent être modifiés de façon très substantielle.

Le temps de prise initiale et finale a été déterminé par un essai de pénétration selon la norme EN 196-3.

IV-15 Essai d'affaissement

Cet essai est utilisé pour caractériser l'ouvrabilité du béton confectionné. Il consiste à mesurer l'affaissement d'un cône de béton sous l'effet de son propre poids on utilisant le cône d'Abrams.



Figure IV.6 : Mesure de l'affaissement

IV-16 Essais de compression (NF P 14-406)

Les essais de résistance à la compression ont été effectués sur des éprouvettes cubiques (15x15x15) cm³, à l'aide d'une presse de capacité de 4 000 KN, presse électronique ou l'éprouvette est placée et centrée entre deux plateaux ensuite chargée progressivement à une vitesse de 0,5 KN/s jusqu'à la rupture.

Cette résistance correspond à la contrainte moyenne d'écrasement de trois éprouvettes à chaque âge d'essai.

IV-17 Essais de traction par fendage (NF P 18-408)

Ces essais, appelés aussi essais brésiliens, consistent à écraser un cylindre de béton suivant deux génératrices opposées entre les plateaux d'une presse, cet effort de compression induit des contraintes de traction dans le plan passant par ces deux génératrices.

Ces essais ont été effectués sur des éprouvettes cylindriques 16x32 cm à l'aide de la même presse des essais de compression.

IV-18 Essai de retrait

Pour mesurer le retrait, des éprouvettes prismatiques 4x4x16 cm sont utilisées. On compare, à différents temps la variation de longueur d'une éprouvette par rapport à sa longueur

initiale à un temps t_0 pris comme origine. Le retrait sera mesuré par deux procédures, la première est le calcul du retrait endogène dû à la seule réaction d'hydratation en empêchant tout échange d'eau entre les éprouvettes et le milieu extérieur, pour cela, les éprouvettes sont préalablement enrobées d'une feuille d'aluminium autocollante. La deuxième procédure consiste à mesurer le retrait total libre dû à l'évaporation de l'eau contenue dans le béton, les éprouvettes sont conservées sans moyen de protection. Pour les deux procédures, les éprouvettes sont placées dans un milieu à température de $20 \pm 2^\circ\text{C}$ et une humidité relative de $65 \pm 5\%$ en absence de vent.

Le retrait de séchage est calculé ensuite en faisant la différence entre le retrait total et le retrait endogène.

Les surfaces de contacts sont poncées pour assurer un bon contact entre l'aiguille du comparateur et le béton. Les éprouvettes de béton sont placées d'une manière à éviter tout risque d'instabilité à une température ambiante.

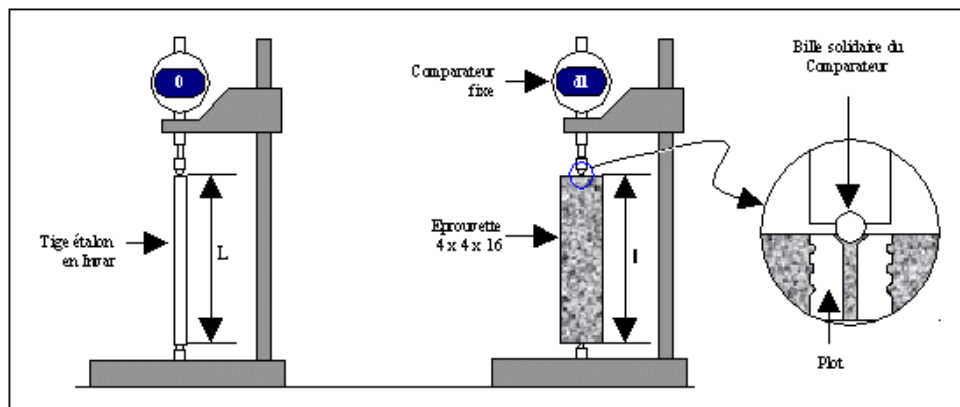


Figure IV-7 : Appareillage pour la mesure du retrait

IV-19 Essai de gonflement

Cet essai s'effectue sur des éprouvettes prismatiques de dimensions 4x4x16 cm, dont on compare à différents temps la variation de la longueur des éprouvettes par rapport à la longueur initiale à un temps t_0 pris pour origine. L'essai consiste à mesurer le gonflement dû à l'absorption de l'eau par le béton qui est trempé dans l'eau pendant toute la durée de l'essai. Ces éprouvettes sont placées dans une salle à température de $20 \pm 2^\circ\text{C}$ et une humidité relative de $65 \pm 5\%$.

CHAPITRE V CARACTÉRISTIQUES DES MATÉRIAUX UTILISÉS ET FORMULATION DE BETON

V-1 Granulats

V-1-1 Sable

Le sable utilisé dans notre étude est un sable naturel roulé qui provient de la carrière de Taharacht de la Daira d'Akbou.

Les caractéristiques principales requises pour un sable à béton sont la propreté, définie par l'essai d'équivalent de sable et la granulométrie déterminée par l'analyse granulométrique, ainsi que le module de finesse.

Les propriétés des sablés utilisés dans notre étude sont les suivantes :

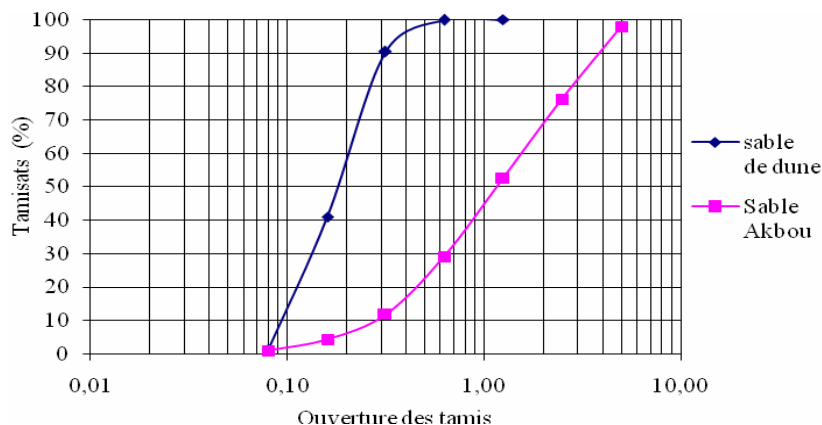


Figure V-1 : Courbes granulométriques des sables

Le module de finesse de notre sable est assez élevé par rapport à l'optimum recherché dans le cas d'un béton à hautes performances, qui devait être pris entre 2,6 et 2,8. C'est pour cette raison qu'en a corrigé cette caractéristique en ajoutant une quantité de sable de dune, qui, de par sa finesse très faible (0,9) nous permet d'avoir la présence d'une certaine quantité de fines qui corrigera le module de finesse du mélange des deux sable. Ainsi, après calcul de la quantité de sable de dune à ajouter pour corriger le module de finesse, cette dernière passe alors de 3,2 à 2,82.

V-1-2 Gravier

Après avoir essayé plusieurs graviers de diverses natures et origines, entre autre ceux de la carrière de Dellys, de la carrière Jaubert et de la carrière de Bouzegza, ces derniers ont été retenus pour leurs meilleures qualités. Leurs caractéristiques sont présentées ci après :

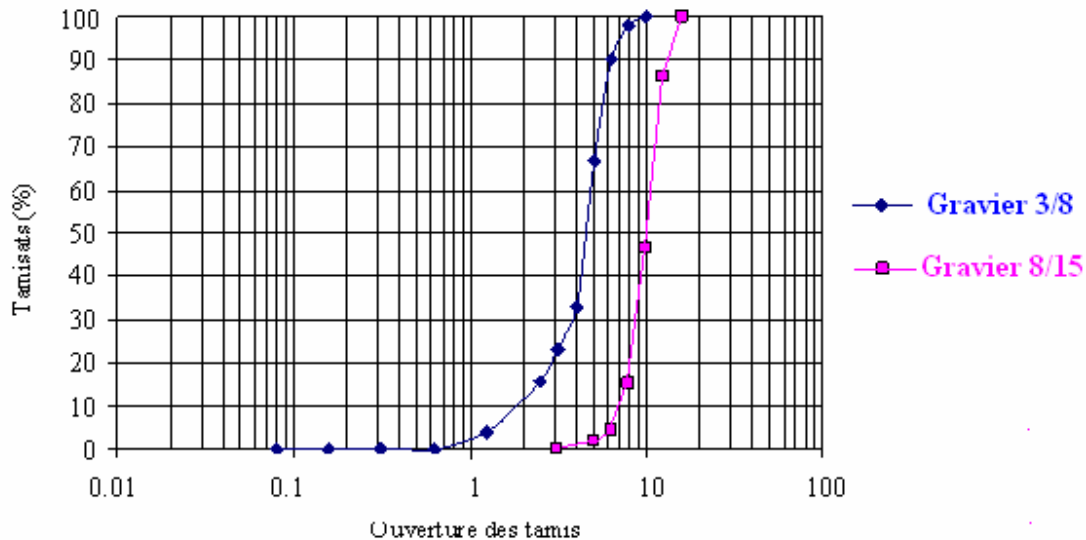


Figure V.2 : Courbes granulométriques des graviers 3/8 et 8/15

Tableau V.1 : Caractéristiques des granulats

Granulats	Masse volumique vrac g/cm^3	Masse volumique absolue g/cm^3	Module de finesse			Los Angeles	Absorption	Coefficient d'aplatissement
				ES* %	Propriété			
Sable d'Oued	1,64	2,50	3,28	78	-	-	-	-
Sable de dune	1,50	2,58	0,90	74	-	-	-	-
Gravier 3/8	1,44	2,56	-	-	0,27	20	0,30	6,13
Gravier 8/15	1,46	2,56	-	-	0,36	22	0,70	10,80

* ES : équivalent de sable à vue.

V.2 Adjuvants chimiques

Les superplastifiants sont les adjuvants chimiques qui permettent d'abaisser la quantité d'eau nécessaire pour avoir une certaine fluidité du béton ou d'améliorer la fluidité pour une quantité d'eau donnée. D'un autre côté, en diminuant le rapport E/C, on améliore de beaucoup les propriétés du béton durci et sa durabilité.

L'adjuvant utilisé dans notre étude est un superplastifiant haut réducteur d'eau, commercialisé sous le nom « MEDAFLOW HR 40 », fourni par l'entreprise Granitex. Il est à base de polycarboxylates.

Les caractéristiques physiques sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau V.2 : Caractéristique du superplastifiant utilisé

	Polycarboxylate
Densité	1,08
Extrait sec	40,00
pH	5,70
Couleur	Brun foncé
Forme	Liquide

V.3 Eau de gâchage

Nous avons utilisé dans nos travaux l'eau potable de robinet.

V.4 Ciment

Le choix du type de ciment est fonction de la valeur de sa classe vraie et des critères de mise en œuvre (vitesse de prise et de durcissement, chaleur d'hydratation, etc.). La classe vraie du ciment est la résistance moyenne en compression obtenue à 28 jours sur des éprouvettes de mortier normalisé.

Le ciment utilisé est un ciment Portland de Type CRS provenant de la cimenterie Lafarge (ex ACC) de la willaya de M'sila. Il appartient à la classe CEM1 42,5 dont les caractéristiques physico-chimiques sont présentées ci après :

Tableau V.3 : Composition chimique du ciment

Identification	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	CaO1	K ₂ O	Ins	Cl-	P.F
% Pondéral	21,83	3,76	4,83	63,47	2,20	1,89	0,17	0,75	0,48	0,4	0,03	0,91

Tableau V.4 : Composition minéralogique moyenne d'un ciment CRS (ACC)

Eléments	C4AF	C3A	C3S	C2S
% Pondéral	5,0 - 13,0	1,8 - 3,0	55 - 59	17 - 21

Le spectre DRX du ciment est présenté sur la figure suivante :

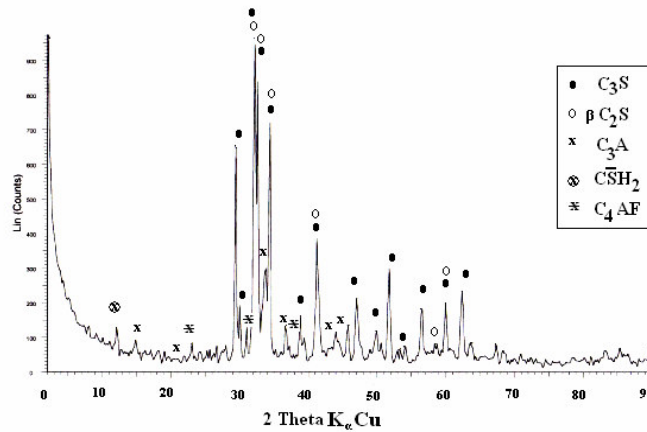


Figure V.3 : spectre DRX du ciment

Caractéristiques du ciment :

- La masse spécifique : 3,1 g/cm³
- Surface spécifique Blaine : 3 250 cm²/g
- Début de prise (min) : 170 - 200
- Fin de prise (min) : 270 – 290
- Résistances à la compression (MPa) :
 - 2 j : 16 – 22
 - 28 j : > 42,5

V.5 Constituants secondaires

V.5.1 Fumée de silice

La Fumée de silice est d'origine Canadienne dont les caractéristiques sont les suivantes :

Tableau V.5 : Composition chimique de la Fumée de Silice

Eléments	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O
% pondéral dans la fumée de silice	96	0,9	0,6	1,53	0,2	0,45	0,9	0,17

Ses masses volumiques apparente et réelle sont respectivement de 0,5 g/cm³ et 2,2 g/cm³.

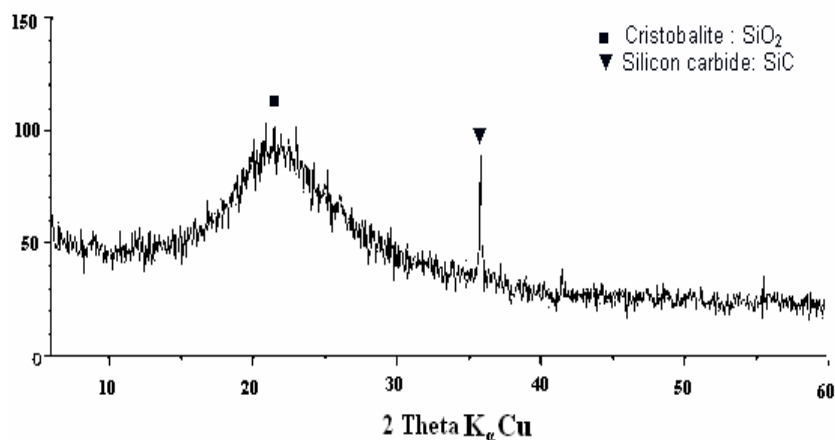
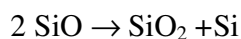
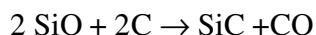


Figure V-4 : Diffractogramme x de la fumée de silice anhydre

La Fumée de Silice présente une structure amorphe caractérisée par un important halo centré à 4.04 \AA correspondant à la raie principale de la *Cristobalite*, forme la plus proche thermodynamiquement du verre de silice. Néanmoins elle contient une faible quantité de carbure de silicium (SiC) cristallisé résultant de la réaction chimique entre le mono-oxyde de silicium (SiO) et le carbone (C) de la charge, dans la zone la plus chaude, au dessus des électrodes du four [8]. Le SiO, étant thermodynamiquement instable dans cette zone ($T=1000^\circ\text{C}$) a tendance à se transformer en silicium (Si) et dioxyde de silicium (SiO_2) selon la réaction :



Par contre, en présence de carbone, la réaction (1) s'effectue autrement :



Le carborundum SiC est présent inévitablement dans toutes les fumées de silice issues des dépoussiérages des fours élaborant des alliages de silicium (Si) ou de ferro-silicium (FeSi) [53].

- Surface spécifique (BET) : $200\,000 \text{ cm}^2/\text{g}$
- Masse volumique apparente : $0,5 \text{ g}/\text{cm}^3$
- Masse volumique réelle : $2,2 \text{ g}/\text{cm}^3$

V.5.2 Laitier des hauts fourneaux

Dans notre étude, on a utilisé le laitier des hauts fourneaux d'El Hadjar. Ces caractéristiques sont données sur le tableau suivant :

Tableau V.6 : Composition chimique du laitier

composition chimique du laitier (%)	Essai 1	Essai 2	Moyenne
SiO ₂	33,280	33,240	33,260
CaO	44,380	44,770	44,575
MgO	4,440	4,880	4,660
Fe ₂ O ₃	1,014	1,100	1,057
Al ₂ O ₃	10,020	9,970	9,995
PAF	0,450	0,420	0,435
RI	0,360	0,300	0,330
SO ₃	0,195	0,210	0,203

Le spectre DRX du laitier est présenté sur suivante :

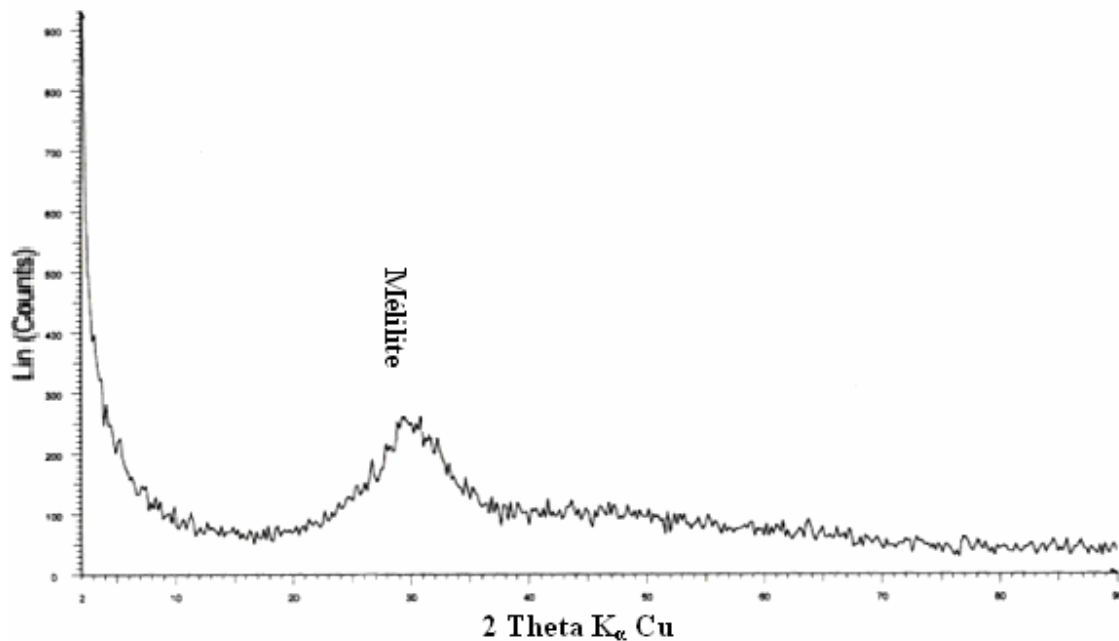


Figure V.5 : Spectre DRX du laitier

Le Laitier présente une structure amorphe, de par le halo centré à 30° 2théta correspondant à la Mélilite de formule : C₃MS₂-C₂AS. La diffraction aux rayons X montre aussi que notre laitier est amorphe, ceci est dû à son mode de refroidissement.

La préparation du laitier broyé nous a demandé un travail préliminaire, qui consiste à définir le temps de broyage pour avoir la meilleure surface spécifique possible.

Ainsi, avant la procédure de broyage, le laitier a été séché à l'air libre pendant 48 heures, ensuite broyé dans un broyeur de capacité de 20l à des quantités de 3 kg pendant 50 mn. Ce temps de broyage et cette quantité ont été déduits après plusieurs essais effectués au préalable, en variant le temps de broyage de 20 à 50 mn, la quantité de laitier à broyer est de 2 kg à 8 kg.

La granulométrie du laitier broyé s'est faite par tamisage Alpine Air dont les résultats sont les suivant :

Tableau V.7 : Résultats du tamisage par Alpine Air

Tamis (mm)	refus % Laitier	Tamisat laitier
0,04	34	66
0,05	25	75
0,063	16	84
0,08	9	91
0,1	5	95
0,125	2	98
0,16	1	99
0,2	0	100

D'après les résultats granulométriques du laitier broyé, nous constatons que plus de 75% des passants ont un diamètre inférieur à 50 μm et 66 % inférieur à 40 μm , c'est ce qui explique la finesse élevée de notre laitier.

Autres caractéristiques du laitier :

- Surface spécifique Blaine : 5 300 cm^2/g
- Indice de basicité : $\text{CaO}/\text{SiO}_2 = 1,34 > 1$ donc basique.
- Masse volumique apparente : 1,2 g/cm^3
- Masse volumique réelle : 2,88 g/cm^3

De par sa surface spécifique élevée et sa friabilité, le coefficient α , représentant la surface spécifique caractéristique du laitier, définie par $S = (S \times F)/100$, est très élevé traduisant une forte réactivité vu que α est supérieur à 60. [56]

V-6 Formulation du béton

Un béton de qualité doit présenter une bonne ouvrabilité et doit garantir l'obtention d'un ouvrage résistant et durable. Il est nécessaire de réaliser une étude de formulation.

Cette dernière est déterminée en fonction des critères de maniabilité et de résistance définis au préalable, la nature et les quantités de matériaux nécessaires à la confection d'un mètre cube de béton (eau E, ciment C, sable S, gravillon g et gravier G en kg/m^3).

Ces critères sont généralement fixés par un cahier des charges, on distingue généralement :

Les spécifications qui dépendent de la structure (BA ou BP) ; les prescriptions vis à vis des caractéristiques du béton frais ; les spécifications relatives au béton durci

Le choix et le dosage des différents matériaux ont une influence directe sur les principales propriétés du béton ainsi que sur son coût de fabrication.

Pour notre étude, le choix de la formulation s'est fait en combinant entre la méthode Dreux Gorisse, pour la détermination du squelette granulaire, et le choix des autres constituants soit par analyse expérimentale soit par les différentes recommandations de la littérature.

V-6-1 Détermination du squelette granulaire par la Méthode Dreux Gorisse

Plusieurs étapes de calcul successives sont nécessaires à l'obtention de la formulation théorique de béton :

- Détermination du rapport C/E
- Détermination de C et E
- Détermination du mélange optimal à minimum de vides
- Détermination de la compacité du béton
- Détermination des masses de granulats

L'ordre de grandeur de la quantité de ciment a été déterminé à partir d'abaque spécifique pour $D=16\text{mm}$ et pour les liants contenant 10% de fumée de silice. De par les caractéristiques de notre ciment (CRS) et l'adjuvant utilisé (très haut réducteur d'eau) dans notre étude, nous avons utilisé 450 kg de ciment par m^3 de béton. Dosage déterminé expérimentalement.

Il s'agit de déterminer les pourcentages de sable, de gravillons et de cailloux qui vont permettre la réalisation d'un squelette granulaire à minimum de vides. Les quantités des matériaux de chaque classe granulaire doivent être judicieuses pour que les plus petits éléments viennent combler les vides laissés par les plus gros. La courbe granulométrique théorique d'un matériau à minimum de vides peut être schématisée par une droite brisée. La démarche proposée par Dreux pour déterminer le mélange optimum à minimum de vides est la suivante : Tracé de la droite brisée de référence ; Détermination des pourcentages en volumes absolus de matériaux. La droite de référence de Dreux représente la courbe idéale d'un matériau à minimum de vides. C'est une droite brisée dont le point de brisure est défini par son abscisse X et son ordonnée Y :

En abscisse :

Si $D_{\max} < 20 \text{ mm}$ $X_A = D_{\max} / 2$

Si $D_{\max} > 20 \text{ mm}$ $X_A = \text{Milieu du segment compris entre Module (38) et Module } (D_{\max})$

En ordonnée :

La droite de Dreux a pour origine le point 0 (origine du graphe) et pour extrémité le point D_{\max} caractérisant le plus gros granulat.

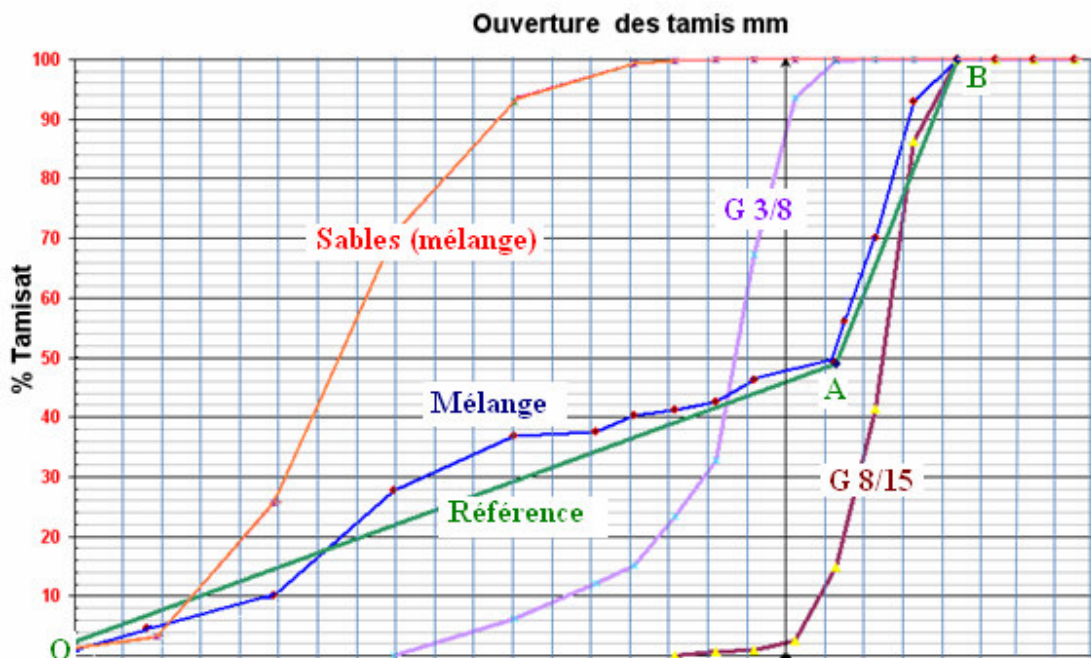


Figure V.6 : Courbe de mélange (méthode Dreux-Gorisse)

La composition du squelette granulaire pour un mètre cube de béton est comme suit :

Tableau V.8 : Squelette granulaire

Matériau	Proportions volumiques (%)	Composition pondérale (kg)
Sable 0/5	39	669
Gravier 3/8	12	204
Gravier 8/15	49	834

Après avoir fixé la quantité de ciment, les autres composants ont été déterminés expérimentalement.

Pour le superplastifiant, la détermination de l'optimum s'est fait par l'essai d'écoulement au cône de Marsh comme indiqué dans la figure suivante :

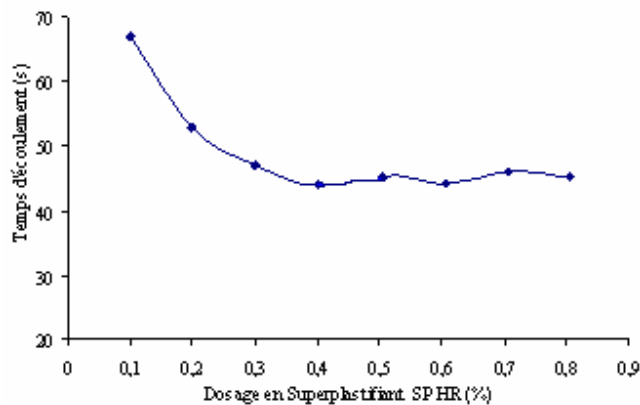


Figure V-7 : Résultat d'écoulement par l'essai de cône de Marsh

Nous avons déterminé le point de saturation au-delà duquel le superplastifiant n'influe plus sur la fluidité du coulis (0,4% en extrait sec équivalent à 1% en solution liquide). Mais dans le béton, d'autres matériaux interviennent et influent sur la fluidité du mélange, on a opté alors expérimentalement à un dosage de 1,5%.

Pour la quantité d'eau à utiliser, un premier choix pour un rapport Eau/Liant de 0,35 a été adopté. Après plusieurs essais sur béton, le rapport E/L a été ramené à 0,33.

Enfin, la formulation de béton pour notre étude est comme suit :

Tableau V-9 : Formulation des bétons de l'étude

Désignation	Béton Témoin avec 0% Laitier	Béton avec 10% Laitier	Béton avec 20% Laitier	Béton avec 30% Laitier
Liant	450	450,0	450	450
Ciment CRS	405	364,5	324,0	283,5
Fumée de Silice	45	40,5	36,0	31,5
Laitier	0	45,0	90,0	135,0
Eau	148,5	148,5	148,5	148,5
Rapport E/C	0,33	0,33	0,33	0,33
Gravier 3/8	207,5	166	166	166
Gravier 8/15	847	871	871	871
Sable	669	641	641	641
Sable 1 (Akbou)	535,2	513	513	513
Sable 2 (S. dune)	133,8	128	128	128
Superplastifiant (1,5%)	6,75	6,75	6,75	6,75

Cette formulation de béton obtenue est théorique, il convient de la tester et de la corriger par des essais de laboratoire avant d'être utilisée.

V-7 Malaxage et préparation des éprouvettes

La confection du béton consiste à verser dans l'ordre, dans un malaxeur à axe verticale, les fractions de graviers, de sables, de ciments avec ses ajouts en l'occurrence le laitier et la fumée de silice préalablement homogénéisé, malaxé à sec pendant une minute pour homogénéiser le tout avant d'ajouter l'eau de gâchage avec le superplastifiant haut réducteur d'eau.

Le superplastifiant est versé en deux fois, la première partie après avoir versé la première moitié de l'eau de gâchage et la deuxième après la deuxième moitié.

Juste après l'arrêt du malaxage, on mesure l'ouvrabilité de notre béton à l'aide du cône d'Abrams au temps $t_0 = 0s, 30\text{ mn}$ et 1 heure, ainsi que sa masse volumique.

On déverse ensuite le béton frais, en deux couches, chaque couche est tassée par piquage conformément à la norme NF P18-422, dans les moules métalliques dont les parois ont été préalablement lubrifiées par une huile de décoffrage.

Les moules sont conservés dans un local à une température et humidité constantes pendant 24 heures afin d'assurer un murissement du béton. Ensuite les éprouvettes sont démoulées, peser pour déterminer la masse volumique du béton durci, puis sont immergées dans un bac d'eau à une température d'environ 20°C jusqu'à l'échéance des essais d'écrasements.

CHAPITRE VI RESULTATS ET DISCUSSIONS

V.1 Essais sur pâtes

V.1.1 Essais de consistance

Dés que le ciment anhydre a été mélangé avec de l'eau, l'hydratation commence et les propriétés de la pâte ainsi obtenue sont évolutives dans le temps. Tant que cette hydratation n'est pas trop avancée la pâte reste plus ou moins malléable voire plastique, mais au bout d'un certain temps, le matériau devient de plus en plus difficile à travailler et sa température augmente: il fait prise et s'apparente à un solide.

Cet essai nous permet, dans notre cas, d'observer l'effet du laitier sur cette pâte. Une variation du pourcentage du laitier par rapport à la quantité du liant composé du ciment et de la fumée de silice est effectuée. La composition du mélange est donnée par le tableau qui suit :

Tableau VI.1 : composition des pâtes

Composant	Liant	Ciment	Fumée de silice	Laitier	eau
Témoin	500	450	50	0	142
10% laitier	500	405	45	50	142
20% laitier	500	360	40	100	142
30% laitier	500	315	35	150	142

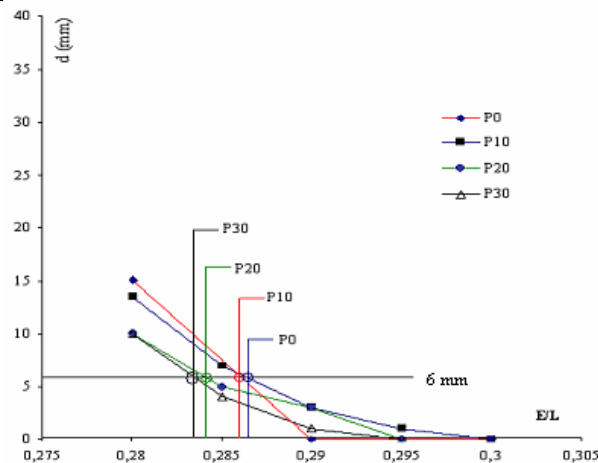


Figure VI.1 : Consistance normale des pâtes avec et sans laitier (P0, P10, P20, P30)

La consistance normale correspond à l'immobilisation de la sonde de vicat ($\Phi = 10$ mm) à 6mm du fond. Pour l'ensemble des pâtes, cette consistance est atteinte pour $E/C = 0,285 \pm 0,02$ (Figure VI.1).

V.1.2 Essai de prise

Le début de prise dépend de plusieurs paramètres ; c'est pourquoi il varie notamment suivant la composition chimique et la finesse de mouture du ciment et du laitier.

Des essais de prise sur pâte pure ont été effectués à l'aide de l'aiguille de Vicat suivant la norme EN 196-3. L'objectif de cet essai consiste à suivre l'évolution du taux de cisaillement de la pâte et de déterminer le temps du début et de fin de prise.

Dans notre cas, le but est de voir l'influence des différents dosages en laitier, ainsi que l'effet de l'activant sur la consistance et la prise.

Les temps de début et de fin de prise de compositions étudiées sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau VI.2 : temps de début et de fin de prise en fonction des pourcentages en laitier

Pâtes	Témoin	10% laitier	20% laitier	30% laitier
Début de prise (min)	132	133	136	140
Fin de prise (min)	292	305	312	320
Écart (min)	160	172	176	180

Les résultats obtenus font état des effets de la teneur en laitier. On remarque une légère augmentation du délai de prise.

V.1.3 Hydratation des pâtes de chaux

Afin de quantifier la réactivité du laitier, des essais sur pâte (chaux + laitier) ont été réalisés.

Trois mélanges en pâtes de chaux ont été analysés après 35 jours d'hydratation, il s'agit d'une combinaison entre le laitier des hauts fourneaux et de la chaux de 30%, 50% et 70% simultanément. Les spectres DRX montrent clairement que le laitier utilisé possède un pouvoir pouzzolanique. Chaque fois que le taux de laitier augmente, l'intensité des raies correspondant à la portlandite diminue, et celles correspondant au C-S-H augmentent.

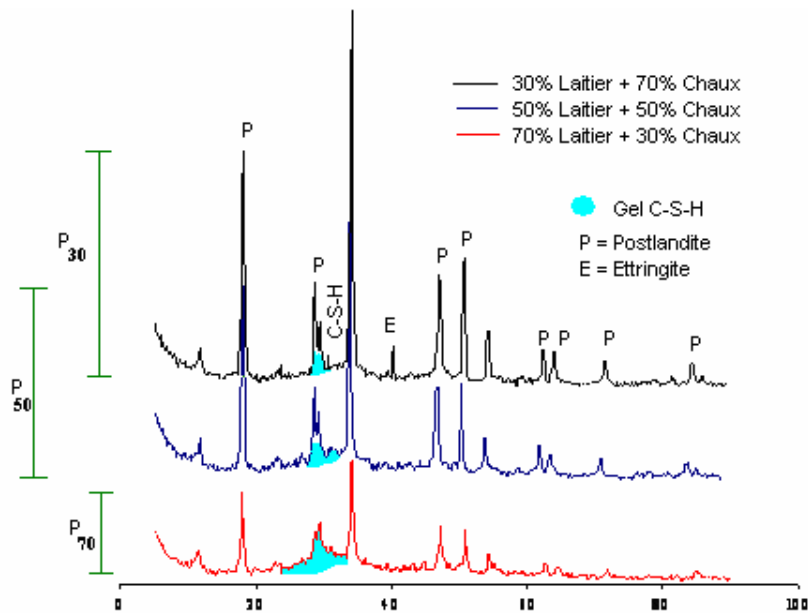


Figure VI.4 : DRX des pâtes (Laitier + Chaux)

Un classement peut être établi en fonction de la hauteur du pic de chaux (P_i) centré à $2,62\text{\AA}$ et de surface (S_i) du gel de C-S-H comme suit (Figure VI.4) :

$$P_{30} > P_{50} > P_{70}$$

$$S_{30} < S_{50} < S_{70}$$

Confirmant la fixation de la chaux proportionnellement au taux de laitier présent dans les mélanges en pâte de chaux.

V.1.4 Hydratation des pâtes de ciment portland

L'analyse par diffractométrie aux rayons X (DRX) a été effectuée sur des mélanges en pâte. Ces mélanges sont confectionnés selon les formulations choisies et conservés dans des tubes en PVC fermés hermétiquement dans une salle régulée en température à $20^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$.

L'étude des diffractogrammes X relatifs à l'évolution de l'hydratation des pâtes avec et sans ajout de laitier (Figures VI.5 à VI.8) montre que :

- Une diminution de l'intensité des raies du C_3S et du $\beta\text{C}_2\text{S}$ comparativement à celles du ciment anhydre et une apparition des raies de la Portlandite et des C-S-H traduisant l'hydratation des silicates de calcium.

- A 28 et 90 jours d'hydratation, une réduction de l'intensité des raies de la Portlandite dans les pâtes testées due au pouvoir pouzzolanique des ajouts (FS et Laitier) qui se traduit par la formation de C-S-H.
- La quantité des hydrosilicates (C-S-H) formés est plus importante dans les pâtes à base de laitier comparativement à celles du témoin. Cette différence est due à la fixation supplémentaire de Portlandite par le laitier.

En conclusion, cette analyse par DRX nous a permis de mettre en évidence la réactivité pouzzolanique du laitier. Elle nous a permis par ailleurs d'établir un classement selon la hauteur du pic de la Portlandite centré à 2.62Å et de la surface des gels de C-S-H (figure VI.9).

De la même manière que pour les pâtes à base de chaux, nous avons pu établir les deux classements suivants :

Classement 1 : A un âge donné et pour une teneur en laitier de 10, 20 et 30% :

$$P_{10} > P_{20} > P_{30}$$

$$S_{10} < S_{20} < S_{30}$$

Classement 2 : A une teneur en laitier fixée et pour des âges différents 7, 28 et 90j :

$$P_7 > P_{28} > P_{90}$$

$$S_7 < S_{28} < S_{90}$$

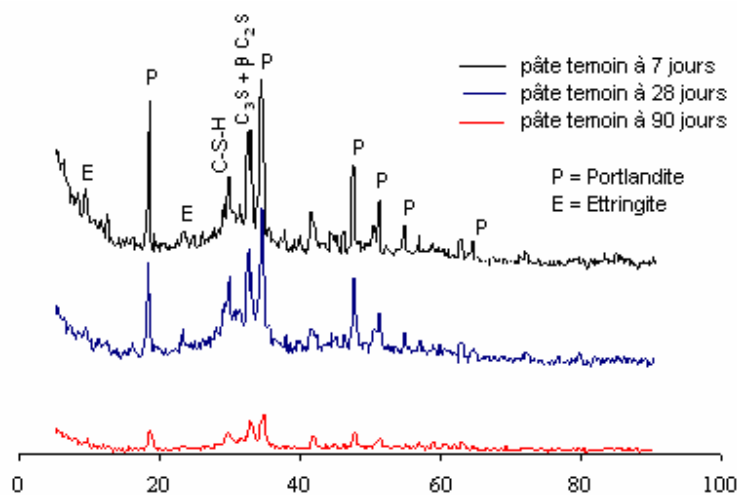


Figure VI.5 : DRX de la pâte témoin à 7, 28 et 90 jours

Ces classements confirment bien le rôle pouzzolanique des laitiers se traduisant par la formation de C-S-H supplémentaires à ceux formés à partir des 10% de fumée de silice et

conduiront ultérieurement à rendre la matrice du béton plus compacte. Cette compacité contribuera à l'amélioration de la durabilité des bétons à base de laitier.

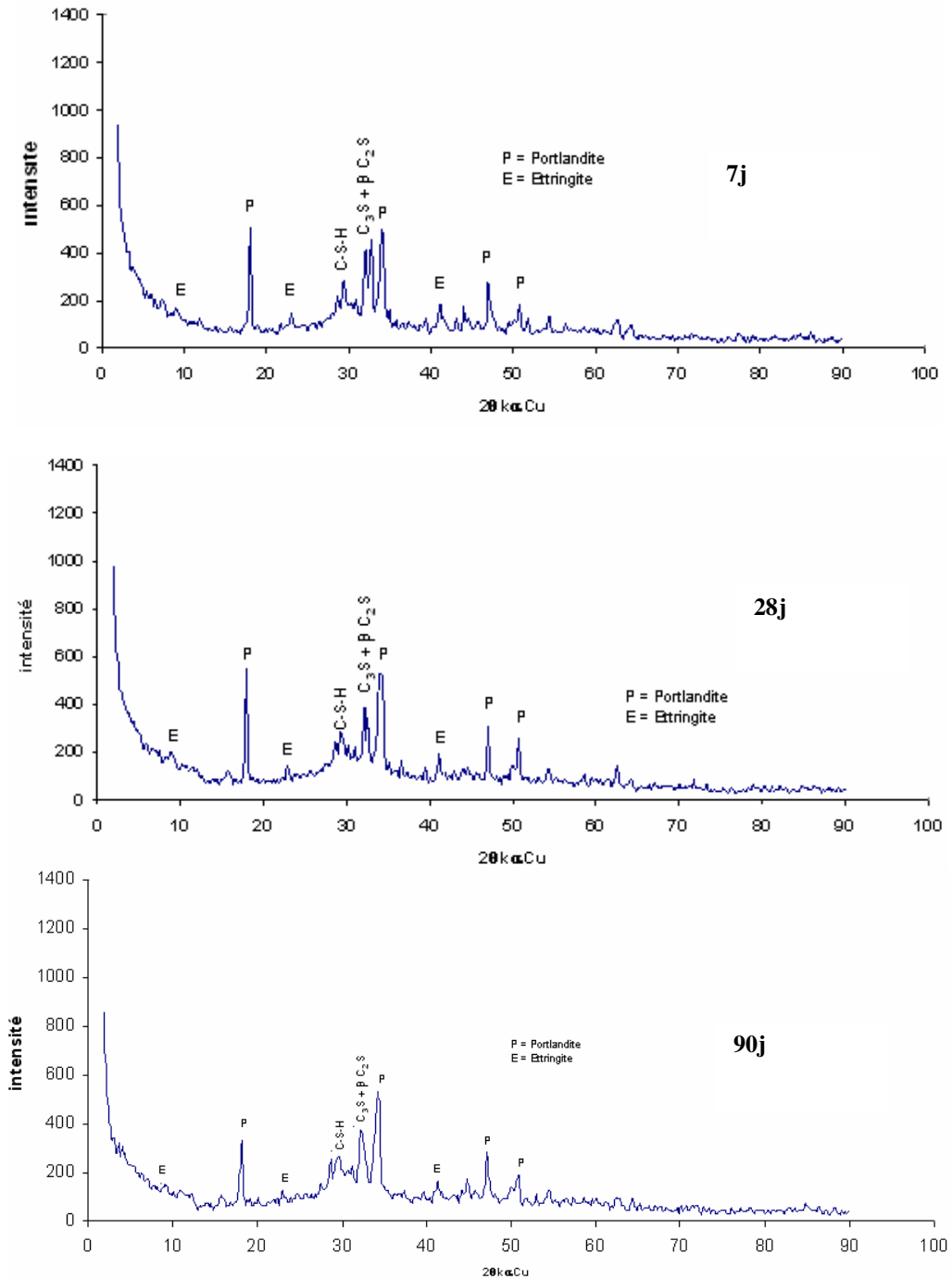


Figure VI-6 : DRX de la pâte à 10% de laitier

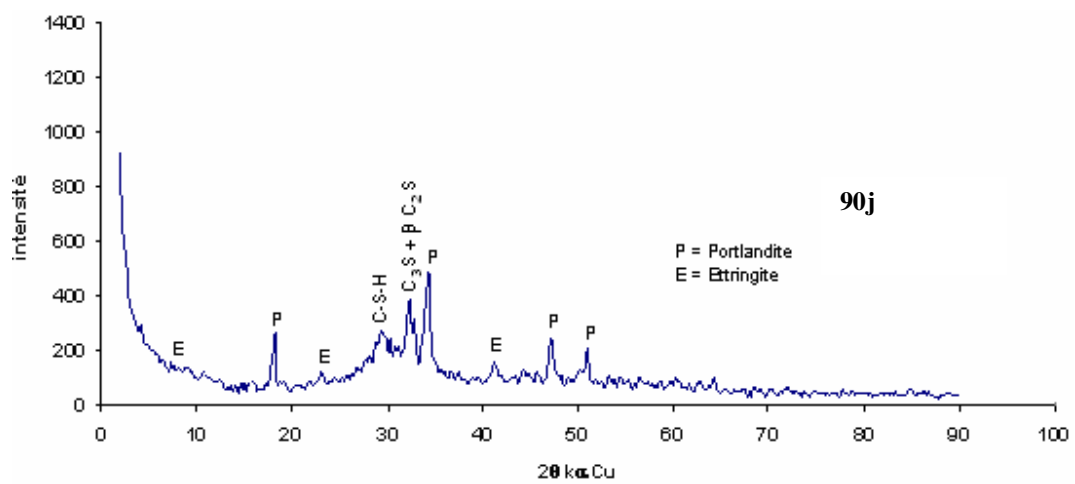
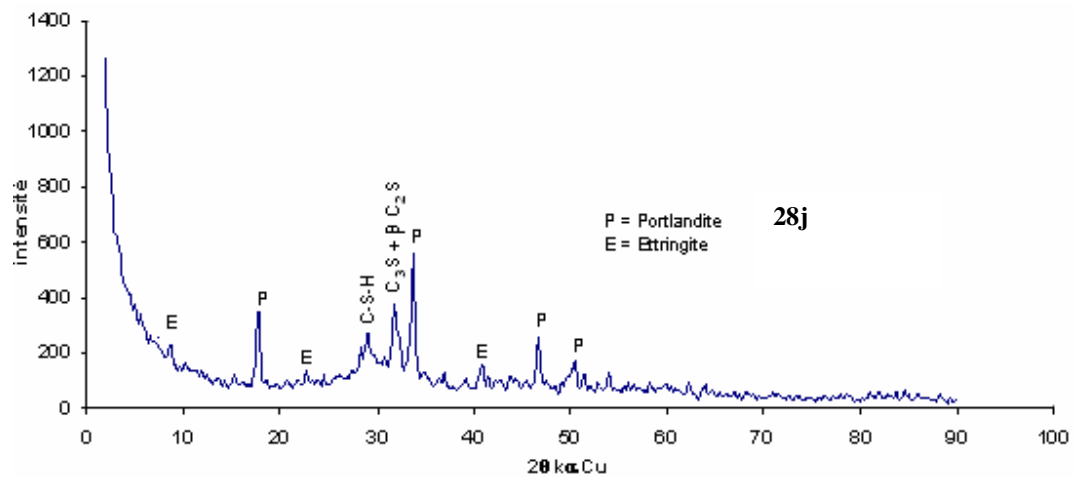
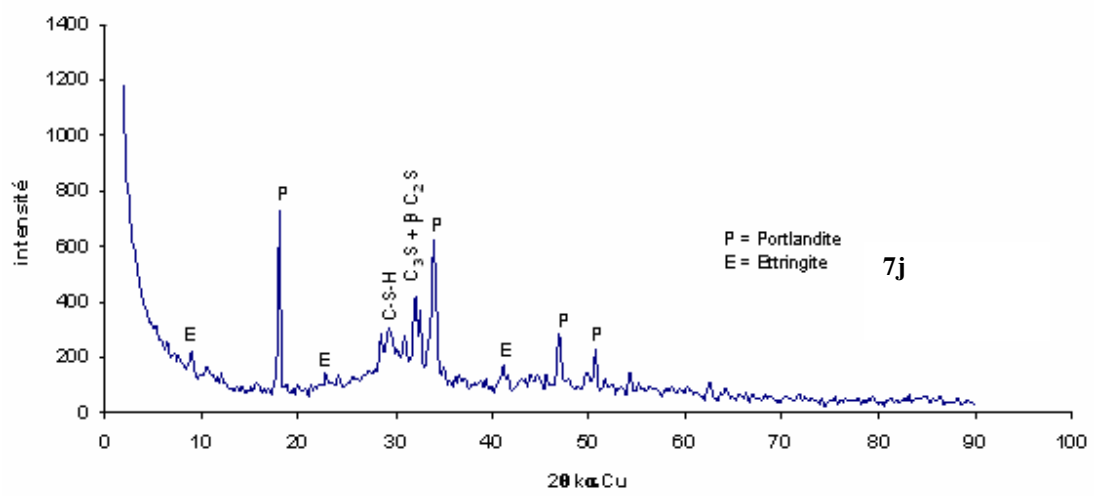


Figure VI.7: DRX de la pâte à 20% de laitier

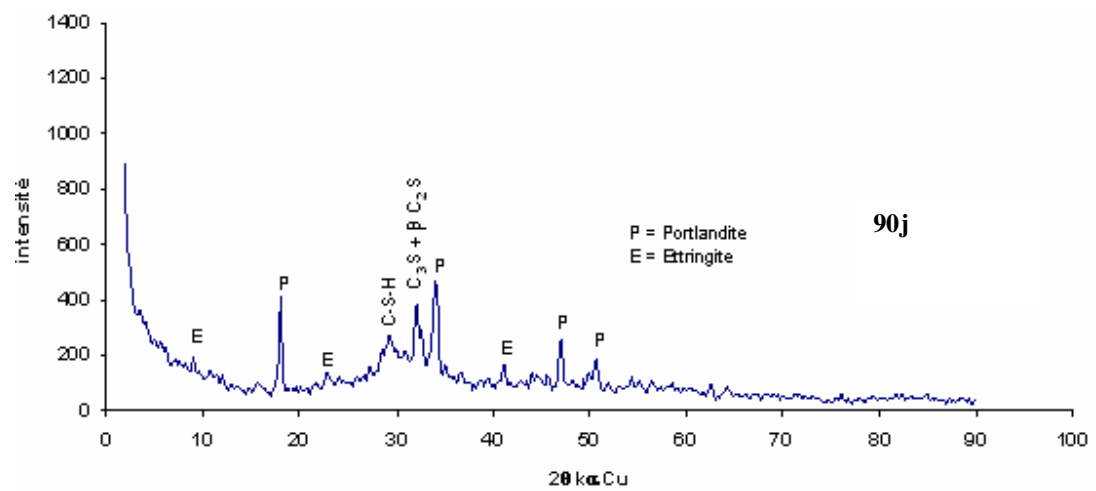
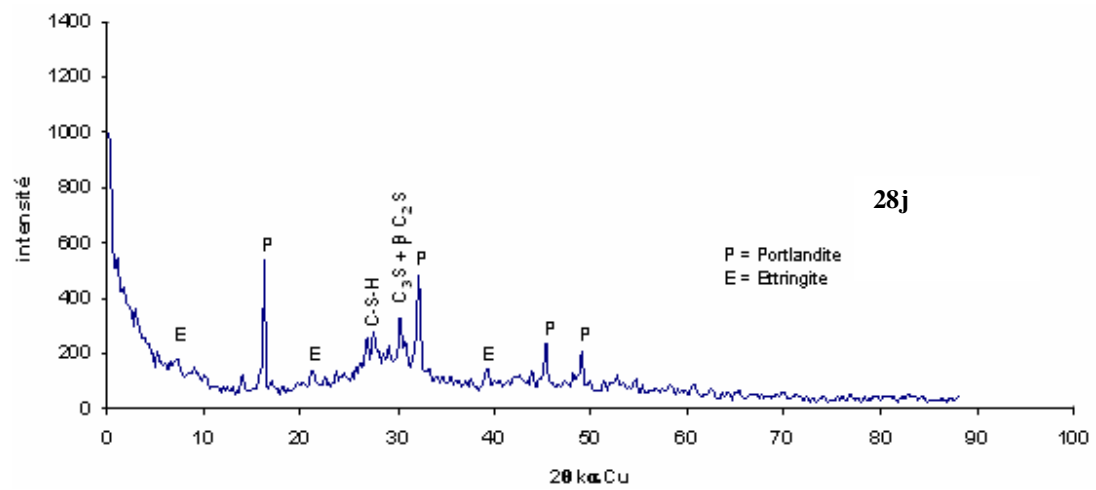
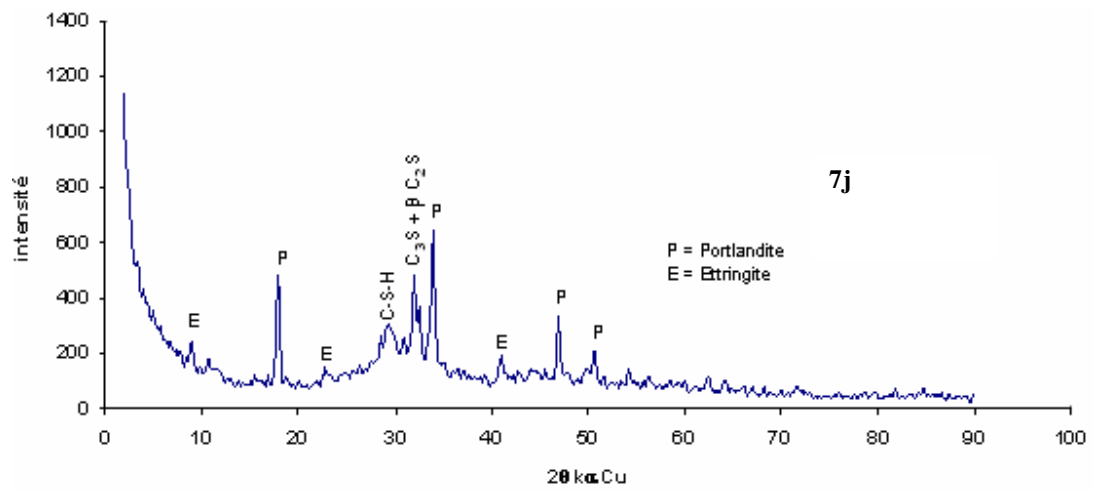


Figure VI.8 : DRX de la pâte à 30% de laitier

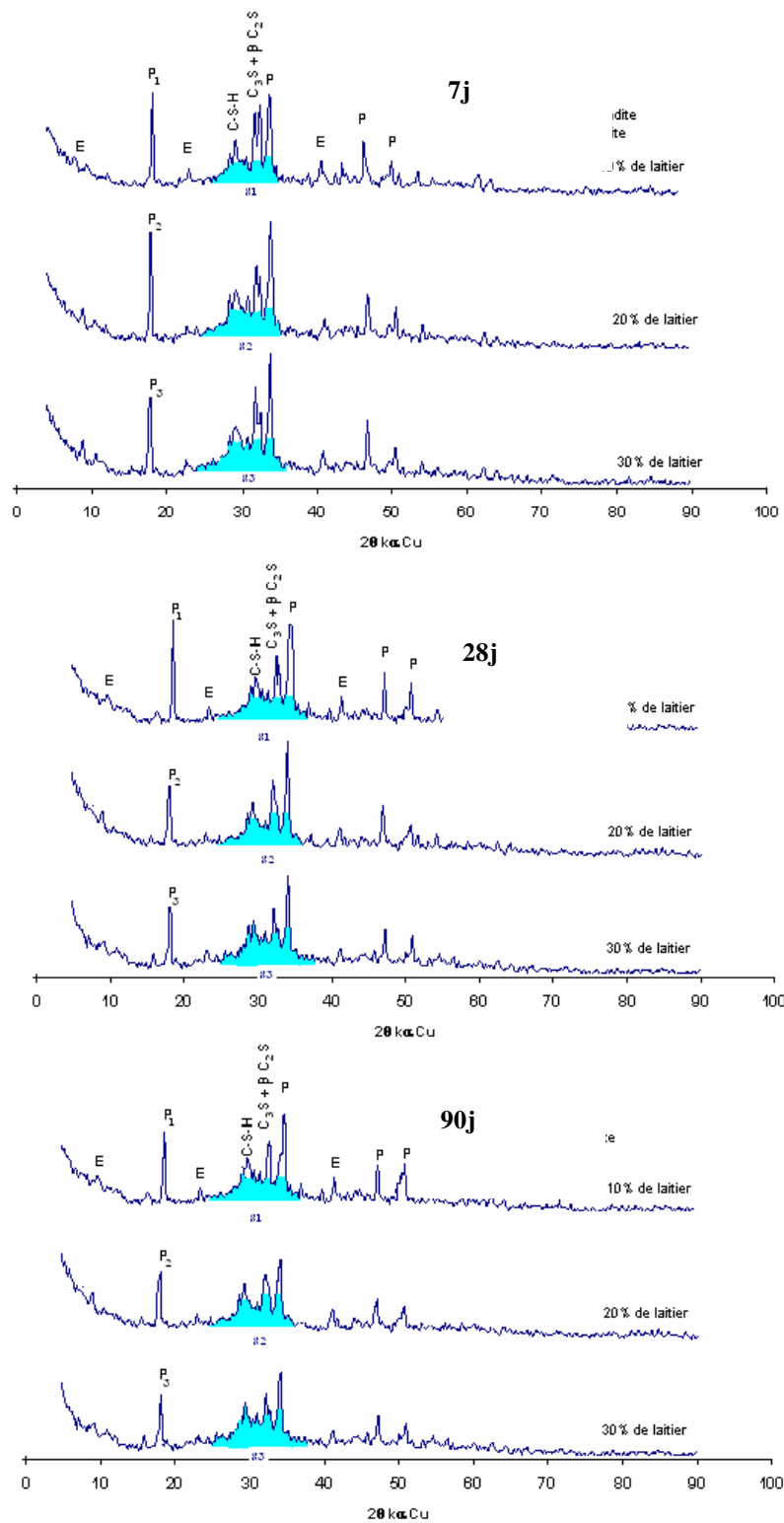


Figure VI-9 : Compilation des résultats de DRX en fonction de la teneur en laitier pour un âge donné

VI.2 Essai sur mortier

VI.2.2 Essais de retrait et de gonflement

Le séchage naturel du béton a des conséquences importantes sur le comportement mécanique des structures et sur leur durabilité.

Il est source de déformations différés (Retrait) et, en plus de la modification des caractéristiques mécaniques et locales qui résultent des variations de teneurs en eau.

Les retraits de la pâte de ciment manifeste des variations dimensionnelles en l'absence de chargement. Ces variations sont surtout en relation avec sa dessiccation et avec sa structuration progressive (hydratation du ciment). Les dimensions des pièces augmentent et diminuent, on distingue alors les gonflements et les retraits.

L'objectif des essais est d'évaluer le retrait et le gonflement que provoque le ciment et ses ajouts sur des éprouvettes de mortier normal. On compare, à différents temps, la variation de longueur d'une éprouvette de 4 x 4 x 16 cm³ par rapport à sa longueur à temps t₀ pris par l'origine. Les mesures sont effectuées à l'aide d'un dilatomètre suivant les indications données par la norme NF P 15 433.

La composition de la phase liante des mortiers à base de sable normalisé destinés aux essais de retrait et de gonflement sont contenues dans le tableau suivant :

Tableau VI.3 : Composition des liants pour les essais de gonflement

	Composition du liant
Témoin	10% FS + 90% ciment
10% laitier	9% FS + 10% laitier + 81% ciment
20% laitier	8% FS + 20% Laitier + 72% ciment
30% laitier	7% FS + 30% Laitier + 63% ciment

a. Mesure du retrait et du gonflement

Les éprouvettes ont été conservées à 20°C dans l'eau ou à l'air, selon qu'il s'agisse des mesures du gonflement ou du retrait. Une fois les liants durcis, les mortiers subissent des variations de volume importantes quand leur contenu en eau ou l'humidité du milieu environnant varie.

D'après les résultats trouvés, on remarque que le retrait endogène du témoin est plus faible que celui des mortiers à base de laitier (Figure VI.10).

La présence du laitier se traduit par une hydratation plus lente et un dégagement de chaleur moindre que le témoin. Ce qui explique des résultats inférieurs à ceux du témoin pour le retrait total (Figure VI.11).

La figure VI.12 montre clairement un gonflement des éprouvettes, avec 10, 20 et 30% de laitier, inférieur à ceux du témoin. Ceci est dû à la consommation du laitier de la portlandite, produite lors de l'hydratation, ce qui a conduit à réduire le gonflement.

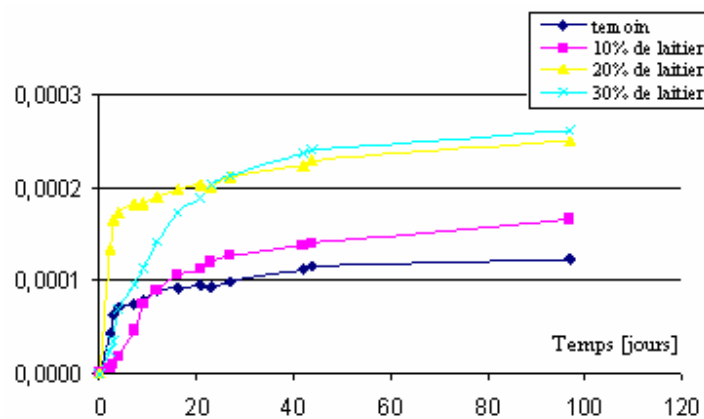


Figure VI.10 : Evolution du retrait endogène des mortiers en fonction du temps et du % en laitier

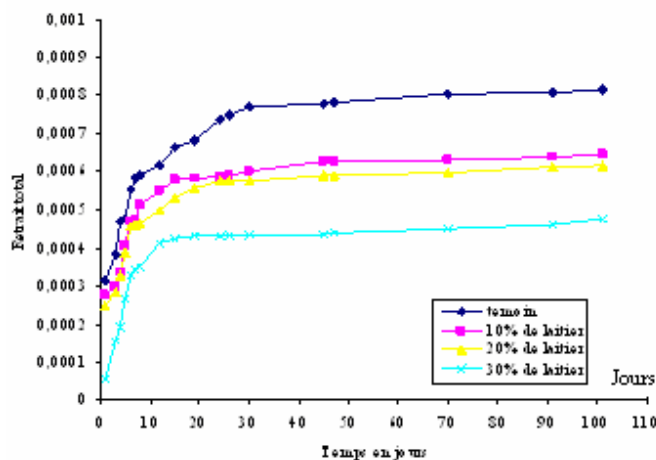


Figure VI.11 : Evolution du retrait total des mortiers en fonction du temps et du % en laitier

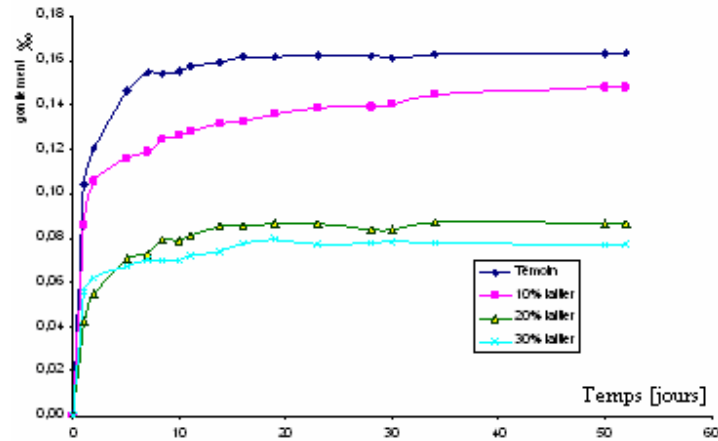


Figure VI.12 : Evolution du gonflement en fonction du temps et du % en laitier

VI.3 Essais sur Béton

VI.3.1 Béton frais

a. Composition des bétons

Outre la partie liante, les bétons ont été confectionnés avec un squelette granulaire identique.

Tableau VI.4 : Composition du béton de notre étude

	Ciment	Laitier	FS	Sable d'oued	Sable de dune	Gravier 3/8	Gravier 8/15	Eau E/C=0,31	SP 1,5%
Témoïn	405	0	45	513	128	166	871	148,5	6,75
10% L	364,5	45	40,5	513	128	166	871	148,5	6,75
20% L	324	90	36	513	128	166	871	148,5	6,75
30% L	315	135	31,5	513	128	166	871	148,5	6,75

b. Masses volumiques du béton à l'état frais

Les masses volumiques des bétons, témoin et avec 10, 20 et 30% de laitier, ont des masses volumiques à l'état frais et durci sensiblement égales, de l'ordre de moins de 2%. Cette légère sensibilité est due au remplissage des vides par le laitier de part sa grande finesse.

Le tableau suivant donne les différentes masses volumiques des bétons à l'état frais.

Tableau VI.5 : masses volumiques du béton à l'état frais

Béton	Témoin	10% laitier	20% laitier	30% laitier
Masse volumique	2,57	2,58	2,6	2,6

c. Essai d'affaissement au cône d'Abrams NF P 18 451

Les essais d'ouvrabilités du béton ont donnés les résultats suivants :

Tableau VI.6 : Affaissement au cône d'Abrams

Béton	Témoin	10% laitier	20% laitier	30% laitier
Affaissement à t=0s (cm)	19,5	23,5	24	24,5
Affaissement à t=30min (cm)	14,5	21,5	22	22

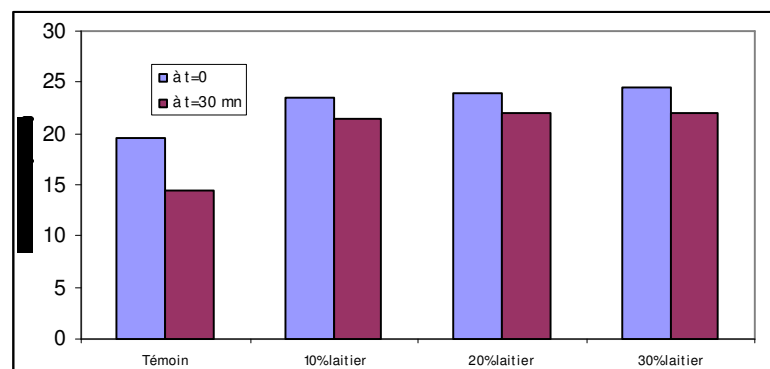


Figure VI-13 : Évolution de l'affaissement dans le temps en fonction du % en laitier

On remarque à travers ces résultats que les bétons témoins et avec laitier sont fluides. Cette ouvrabilité s'explique, d'une part, par rapport au béton témoin, par la présence d'un superplastifiant qui lui confère une meilleure hydratation des grains de ciment, mais qui a tendance à diminuer avec le temps à cause de la perte d'effet du superplastifiant. D'autre part, par rapport aux bétons contenant du laitier, en plus de l'effet du superplastifiant, le laitier joue un rôle non négligeable dans l'ouvrabilité à t_0 et au maintien de celle-ci dans le temps.

VI.3.2 Béton durci

VI.3.2.1 Masses volumiques du béton à l'état durci

Les masses volumiques des bétons à l'état durci sont données par le tableau suivant :

Tableau VI.7 : Masses volumiques du béton à l'état durci

Béton	Témoin	10% laitier	20% laitier	30% laitier
Masse volumique	2,59	2,6	2,62	2,62

VI.3.2.2 Essais mécaniques

a. Essai de compression NF P 18-406

Les résultats des essais de compression, réalisés sur des éprouvettes cubiques 15x15x15 cm³, dans les conditions optimale, sont donnés par le tableau suivant :

Tableau VI.8 : Résultats des essais de compression

Béton	3j (MPa)	7j (MPa)	28j (MPa)	90j (MPa)
Témoin	51,98	63,65	79,62	89,60
10% Laitier	41,35	55,68	79,23	83,13
20 % Laitier	37,80	49,37	75,61	75,92
30% Laitier	34,97	48,61	72,61	75,25

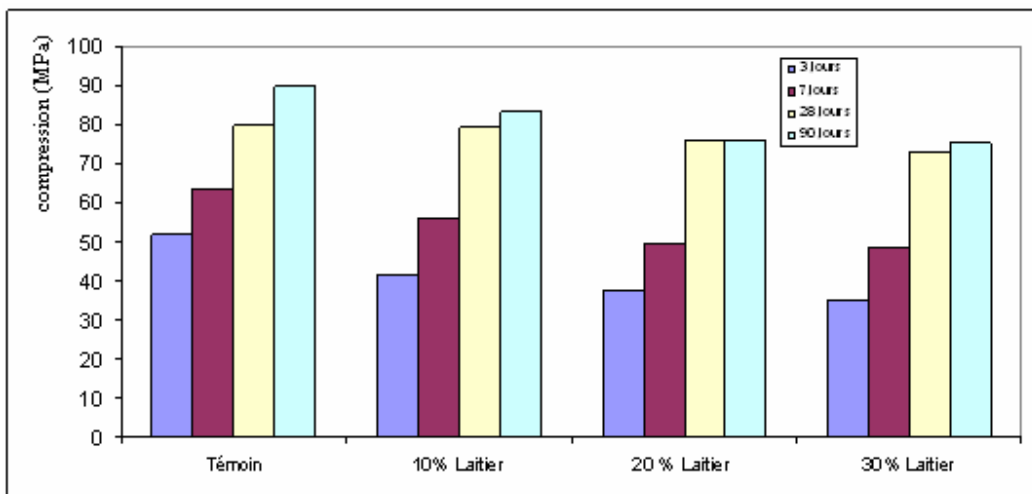


Figure VI-14 : Evolution de la résistance à la compression dans le temps et en fonction du % en laitier

A court terme, c'est-à-dire entre 3 et 7 jours d'âge, les résultats trouvés (Figures VI.14 et tableau VI.18) sont assez marqués entre le témoin et les bétons à 10, 20 et 30% de laitier. Le laitier s'hydrate plus lentement que le ciment et la fumée de silice, ce qui se répercute sur les résistances à court terme. La fumée de silice est responsable, en partie, des valeurs de la compression à 3 jours qui est de l'ordre de 52 MPa ce qui correspond déjà aux performances d'un BHP.

Au-delà de 7 jours d'âge, les résultats ont tendances à se rapprochés entre le témoin et les bétons avec ajout de laitier. Le laitier a pris son temps à s'hydrater avec la formation supplémentaire des C-S-H, ce qui explique ce regain en résistance et le rapprochement avec le témoin.

A 28 jours, pour tous les bétons étudiés, les résistances à la compression entrent largement dans la fourchette des 50 – 100 MPa préconisée et par la littérature et par la norme EN 1992 1-1 pour être considérés comme des BHP. Même le béton à une forte teneur en laitier (30%) obéit largement à ce critère.

Ces résultats montrent que le béton que nous avons étudié, à base de matériaux locaux, sauf fumée de silice, est très intéressant pour notre pays.

b. Essais de traction par fendage NF P 18 408

Les résultats des essais de traction par fendage, réalisés sur des éprouvettes cylindriques 16/32, dans les conditions optimale, sont donnés par le tableau suivant :

Tableau VI.9 : Résultats des essais de traction

Béton	3j (Mpa)	7j (Mpa)	28j (Mpa)	90j (Mpa)
Témoin	4,20	5,32	7,09	7,46
10% Laitier	3,51	4,77	5,51	5,52
20 % Laitier	2,82	3,73	4,29	5,03
30% Laitier	2,78	3,35	4,16	4,68

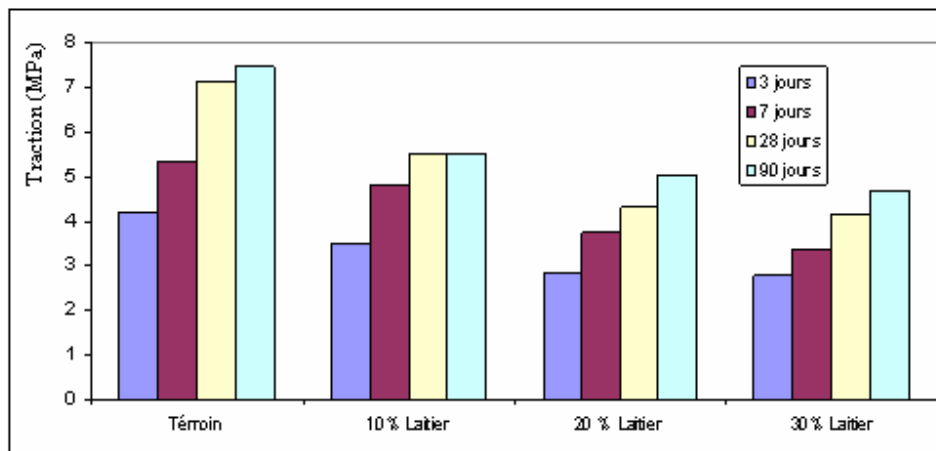


Figure VI-15 : Evolution de la résistance à la traction dans le temps et en fonction du % en laitier

On remarque à travers ces résultats que la tendance est la même que la compression.

A court terme, la différence entre le témoin et les autres bétons varie entre 16,4% à 33,81% pour le béton à 30% de laitier à 3 jours d'âge. Cette tendance est maintenue même à long terme où la différence en résistance passe de 26% à 37,26% à 90 jours d'âge.

Ces résultats montrent que le béton a tendance à perdre en résistance chaque fois que le taux de laitier est élevé, et se rapproche du témoin chaque fois que le taux de laitier diminue. Ces résultats restent conformes à la norme EN 1992 1-1 qui préconise une résistance minimale à 28 jours, pour les essais sur éprouvette prismatique, à 4,2 MPa pour les BHP. Cette tendance est respectée pour tous les bétons étudiés ce qui confirme leurs hautes performances.

CONCLUSION GÉNÉRALE & RECOMMANDATIONS

Le but de notre travail est une contribution à la valorisation d'un résidu industriel très abondant en Algérie en l'occurrence le laitier des hauts fourneaux.

Afin de cerner son comportement comme ajout cimentaire dans des bétons nous avons mené une étude détaillée sur les caractéristiques physico-chimique minéralogique et mécanique sur chacun des constituants entrant dans la formulation du béton.

Lesdits constituants ont été testés tant à l'état anhydre et hydraté aussi bien sous forme de pâte, de mortier et béton.

Il est exigé du laitier d'être vitreux pour convenir à son utilisation en cimenterie. Cette vitrification le rend apte à pouvoir s'hydrater où lui donner un pouvoir pouzzolanique.

Afin de mettre en évidence cette pouzzolanité du laitier qui est synonyme de fixation de la Portlandite (Ca(OH)_2) issue de l'hydratation des silicates de calcium du ciment Portland, nous avons simplifié le problème en étudiant l'hydratation du laitier en présence de pâte de chaux.

L'étude par DRX en pâte de chaux à base de 30, 50 et 70% de laitier a montré que:

- Le laitier permettait de fixer la chaux sous forme de C-S-H de par la réduction des pics principaux de la chaux.
- Les C-S-H obtenus sont semi cristallisés quel que soit le dosage en laitier vu qu'ils sont obtenus à température ambiante ($20^\circ\text{C}\pm 1^\circ\text{C}$)
- Après 35 jours d'hydratation, la chaux n'a pas été totalement fixée même avec un dosage de 70% de laitier qui correspond en réalité à la mise en jeu de 23% de silice présente dans le mélange (0.7x 33).

Ces résultats nous ont confortés lors de nos testes menés sur des pâtes à base de ciment portland où nous nous sommes intéressé à la fixation de la Portlandite.

Lesquels résultats montrent, à partir des diffractogrammes x l'évolution de l'hydratation des pâtes avec et sans ajout de laitier :

- Une diminution de l'intensité des raies du C_3S et du $\beta\text{C}_2\text{S}$ comparativement à celles du ciment anhydre et une apparition des raies de la Portlandite et des C-S-H traduisant l'hydratation des silicates de calcium.

- A 28 et 90 jours d'hydratation, une réduction de l'intensité des raies de la Portlandite dans les pâtes testées due au pouvoir pouzzolanique des ajouts (FS et Laitier) qui se traduit par la formation de C-S-H.
- La quantité des hydrosilicates (C-S-H) formés est plus importante dans les pâtes à base de laitier comparativement à celles du témoin. Cette différence est due à la fixation supplémentaire de Portlandite par le laitier.

Notre étude met en évidence la réduction du retrait total et du gonflement dans les mortiers à base de laitier. Cette réduction est d'autant plus prononcée que le dosage en laitier est plus élevé. Par contre le retrait endogène augmente en présence de laitier (suit un chemin inverse) témoignant de la densification de la matrice cimentaire c'est-à-dire de la présence de pores plus fins que ceux présents dans le mortier sans laitier.

La présence de laitier dans les bétons améliore les performances mécaniques tant en compression qu'en traction à long terme. Bien que les valeurs enregistrées soient inférieures à celles des bétons témoins (sans laitier), la formation des C-S-H supplémentaires de par l'activité pouzzolanique du laitier a permis de compenser la réduction de la partie active du ciment que sont les silicates. Les bétons obtenus peuvent être classés à haute performance puisque leurs résistances en compression à 28 jours sont toutes supérieures à 75 MPa et donc supérieures à celles préconisées par les normes (>60MPa).

Notre étude peut être complétée par la méthode Brunauer Emmet et Teller (BET) à partir d'adsorption et désorption de gaz inerte afin d'évaluer la porosité des bétons en terme de porosité totale et en terme de distribution de la taille des pores dans le béton.

Quant on sait que :

- une tonne de ciment dégage en moyenne une tonne en gaz carbonique,
- le CO₂ est un gaz à effet de serre (GES) vulnérable à la couche d'ozone
- le stockage du laitier, occupe de vaste étendue des terres censées être agricoles (El-Hadjar ANNABA), est vulnérable à la nappe phréatique
- le laitier est trente fois moins cher que le ciment (prix du laitier ≈300DA/t)

Notre travail, de par les performances atteintes dans les bétons, montre sans ambiguïté que la substitution du ciment à raison de 30% de laitier, offre un double avantage économique et écologique.

Notre étude peut être complétée par la méthode Brunauer Emmet et Teller (BET) à partir d'adsorption et désorption de gaz inerte afin d'évaluer la porosité des bétons en terme de porosité totale et surtout en terme de distribution de la taille des pores dans le béton.

Nous préconisons aussi d'intervenir à la source (haut fourneau) pour rendre le laitier plus réactif en lui assurant un refroidissement mixte (Eau+ Air) connu sous le nom de laitier bouleté. Ce type de refroidissement s'il venait à être réalisé au niveau du complexe sidérurgique d'El-Hadjar, le taux de substitution au ciment sera encore plus élevé (>35%) et permettra aux cimentiers la commercialisation des ciments de type CEM III /A,B ou C, utilisant respectivement :

- 35 à 65% de laitier pour le type A connu sous l'ancienne appellation (CHF)
- 66 à 80% de laitier pour le type B connu sous l'ancienne appellation (CHF)
- 81 à 95% de laitier pour le type C connu sous l'ancienne appellation (CLK)

Cette valorisation du laitier de haut fourneau d'El Hadjar de par leur incorporation dans les ciments à des pourcentages aussi élevés permettra à l'Algérie un gain économique plus important tout en assurant un équilibre de l'écosystème.

Bibliographie

- [1]. Dr.GHOMARI Fouad, Science des matériaux de construction, Université Aboubaker Belkaid, Faculté des Sciences département génie civil, (2006).
- [2] Mr BENDIB Abdelhamid, Historique du ciment et situation de la production en Algérie, Groupe ERCE / GIC, 2005.
- [3] Le ciment et ses application, Fiche Technique, Collection Technique CimBéton, Edition Juillet 2001.
- [4] Alexa BRESSON, Influence de la minéralogie sur le comportement des mortiers du ciment au jeune âge, Mémoire de Maîtrise en Génie Civil, Faculté des Sciences et de Génie, Université de Laval, Québec, Mai 2006.
- [5] Van Breugel, K., Simulation of hydration and formation of structure in hardening cement-based materials, Delft, PhD. Thesis, 1991.
- [6] Taylor, H. F. W., Cement chemistry, Second edition, Thomas Telford edition published, 1997.
- [7] Garcia Boivin, S., Retrait au jeune âge du béton : Développement d'une méthode expérimentale et contribution à l'analyse physique du retrait endogène, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Thèse de Doctorat, 1999.
- [8] Neville, A. M., Propriétés des bétons, Edition Eyrolles, 2000.
- [9] Barcelo, L., Influence de la caractéristique des ciments sur la structuration et le comportement dimensionnel des matériaux cimentaires au jeune âge, Ecole Normale Supérieure de Cachan, Thèse de Doctorat, 2001.
- [10] Gartner, E. M., Gaidis, J. M. et Grace, W. R., Hydration Mechanisms, I et II. Materials Science of Concrete I et II. Westerville, American Concrete Society: p. 95-125 et 9-39, 1989.
- [11] Van Breugel, K., Hydratation of Cement-Based Systems : Aspects of hydration of cement-based systems and possibilities to quantify the evolution of hydration processes., Improved Production of Advanced Concrete Structures (IPACS), 2001.
- [12] Patel, R. G., Killoh, D. C., Parott, L. J. et Gutteridge, W. A., Influence of curing at different relative humidities upon compound reactions and porosity in Portland cement paste, Materials and structures, 21, pp.192-197, 1988.
- [13] Kada-Benameur, H., Wirquin, E. et Duthoit, B., "Determination of apparent activation energy of concrete by isothermal calorimetry." Cement and Concrete Research, 30, pp.301-305, 2000.
- [14] Stéphan ASSIÉ, Durabilité des bétons autoplaçants, Thèse de Doctorat, Laboratoire Matériaux et Durabilité des bétons, INSA de Toulouse, Octobre 2004.
- [15] MALEK A., Caractéristiques physico - chimiques du laitier de haut fourneau, Séminaire sur la valorisation des laitiers et des coproduits sidérurgiques, p17 – 25, Annaba 29/30 Nov. 1998.
- [16] Document technique de la direction de la recherche appliquée (DRA) du complexe sidérurgique d'EL HADJAR, 1989.
- [17] Document technique, statistiques de production de COPROSID, Janvier 2003.
- [18] ADJABI A., Utilisation du laitier en technique routière, Séminaire sur la valorisation des laitiers et des coproduits sidérurgiques, p 72 – 79, Annaba 29/30 Nov. 1998.
- [19] BOUDJELLALI A., Utilisation du laitier en technique routière, Séminaire sur la valorisation des laitiers et des coproduits sidérurgiques, p 44 – 48, Annaba 29/30 Nov. 1998.
- [20] MECHOIUAK, Utilisation des laitiers granulés à la cimenterie de HADJR SOUD, Séminaire sur la valorisation des laitiers et des coproduits sidérurgiques, p 80 – 90, Annaba 29 et 30 Nov. 1998.
- [21] R. DRON. Mécanisme de la prise du laitier granulé sous activation alcaline. Rapport de recherche n°38, Laboratoire des Ponts et Chaussées, 128 pages, 1974.
- [22] H.F.W. TAYLOR, Cement Chemistry, 2nd ed., Thomas Telford, London, 1997.
- [23] BEHIM M., Réactivité, rôle et durabilité des laitiers dans les matériaux à matrice cimentaire, Thèse de Doctorat, Université de Annaba, 2005.
- [24] S. MURGIER. Etude par résonance magnétique nucléaire de différents noyaux d'un liant à base de laitier de haut fourneau : application industrielle. Thèse de doctorat, Université Paris 6, 2004.
- [25] P. FIERENS AND P. POSWICK. Nouveaux aspects de l'hydratation de laitiers industriels, Seventh International Congress on the Chemistry of Cement, Paris, Vol. III, pp. 112-116, 1980.

- [26] R-G. DUAN, K-M. LIANG AND S-R GU. The effect of Ti^{4+} on the site of Al^{3+} in the structure of $CaO - Al_2O_3 - SiO_2 - TiO_2$ system glass. *Materials Science and Engineering A*, Vol. 249, pp. 217-222, 1998.
- [27] M. REGOURD, B. MORTUREUX, E. GAUTIER, H. HORNAIN AND J. VOLANT. Caractérisation et activation thermique des ciments au laitier. *Seventh International Congress on the Chemistry of Cement*, Paris, Vol. III, pp. 105-111, 1980.
- [28] S. GOTO, T. YOSHII AND M. DIAMON. Effects of the thermal history on the hydraulic properties of slags. *Cement and Concrete Research*, Vol. 15, No. 6, pp. 964-968, 1985.
- [29] R. DRON. Structure et réactivité du laitier granulé. *Seventh International Congress on the Chemistry of Cement*, Paris, Vol. III, pp. 81-85, 1980.
- [30] R. DRON AND F. BRIVOT. Approche du problème de la réactivité du laitier granulé. *Seventh International Congress on the Chemistry of Cement*, Paris, Vol. III, pp. 134-139, 1980.
- [31] M. BEHIM, M. CYR, M. F. HABITA AND P. CLASTRES. Réactivité du laitier granulé. *Ciments, Bétons, Plâtres et Chaux*, Vol. 860, pp. 40-44, 2003.
- [32] A. R. N. EBERENDU AND K. E. DAUGHERTY. The quantitative determination of glass in slag by infrared spectroscopy. *Cement and Concrete Research*, Vol. 14, No. 6, pp. 873-883, 1984.
- [33] L. DONGXU, X. ZHONGZI, L. ZHIMIN AND C. LIN. The activation and hydration of glassy cementitious materials. *Cement and Concrete Research*, Vol. 32, No. 7, pp. 1145-1152, 2002.
- [34] R-Z YUAN, S-X OUYANG AND Q-Y GAO. Structure and hydraulic activity of slags in the system $CaO - MgO - Al_2O_3 - SiO_2$. *Silicates Industriels*, Vol. 1, pp. 3-6, 1981.
- [35] J. I. ESCALENTE, L. Y. GOMEZ, K. K. JOHAL, G. MENDOZA, H. MANCHA AND J. MENDEZ. Reactivity of blast-furnace slag in Portland cement blends hydrated under different conditions. *Cement and Concrete Research*, Vol. 31, No. 10, pp. 1403-1409, 2001.
- [36] R. DRON. Facteurs chimiques et structuraux de la réactivité des laitiers. *Silicates Industriels*, Vol. 6, pp. 143-147, 1982.
- [37] J. G. M. DE JONG. Le mécanisme de réaction de l'hydratation des ciments métallurgiques. *Silicates Industriels*, Vol. 1, pp. 5-11, 1977.
- [38] M. REGOURD, H. HORNAIN AND B. MORTUREUX. Résistance à l'eau de mer des ciments au laitier. *Silicates Industriels*, Vol. 41, pp. 19-27, 1977.
- [39] P. Z. WANG, R. TRETTIN, V. RUDERT AND R. UMLAUF. Einfluss der primären phasenausscheidungen auf die hydraulische reaktivität von durch granulation abgeschreckte hochofenschlacken. *Zement - Kalk - Gips International*, Vol. 54, No. 11, pp. 646-653, 2001.
- [40] SMOLCZYK H. G., Duisburg, Rheinhausen, « L'influence de la chimie du laitier sur les résistances des ciments de haut fourneau », *Zement, Kalk Gips n°6*, 1978
- [41] CAIJIN SHI and ROBERT L. DAY, Early hydration alkali - actived slag, *ACI, Journal Materials*, n°3, Vol 26, 1996.
- [42] K. G. BABU AND V. S. R. KUMAR. Efficiency of GGBS in concrete. *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, No. 7, pp. 1031-1036, 2000.
- [43] J. S. LUMLEY, R. S. GOLLOP, G. K. MOIR AND H. F. W. TAYLOR. Degrees of reaction of the slag in some blends with Portland cements. *Cement and Concrete Research*, Vol. 26, No. 1, pp. 139-151, 1996.
- [44] L. S. D. GLASSER, F. P. GLASSER AND H. F. W. TAYLOR. Topotactic reactions in inorganic oxy-compounds. *Quarterly Reviews, Chemical Society*, Vol. 16, No. 4, pp. 343-360, 1962.
- [45] P. FIERENS AND P. POSWICK. Nouveaux aspects de l'hydratation de laitiers industriels. *Seventh International Congress on the Chemistry of Cement*, Paris, Vol. III, pp. 112-116, 1980.
- [46] S. L. BOERSMA. A theory of differential thermal analysis and new methods of measurement and interpretation. *Journal of The American Ceramic Society*, Vol. 38, pp. 281-284, 1955.
- [47] P. F. MCMILLAN, W. T. PETUSKEY, B. COTÉ, D. MASSIOT, C. LANDRON AND J-P. COUTURES. A structural investigation of $CaO - Al_2O_3$ glasses via ^{27}Al MAS-NMR. *Journal of Non-Crystalline Solids*, Vol. 195, pp. 261-271, 1996.
- [48] S. W. LEE, K. B. SHIM, K. H. AUH AND P. KNOTT. Activation energy of crystal growth in $PbTiO_3$ glass using differential thermal analysis. *Journal Of Non-Crystalline Solids*, Vol. 248, pp. 127-136, 1999.
- [49] SHAH S.P. ; AHMAD S.H., High performance concretes and applications, Edward Arnold, ISBN 0-340-58922-1, 1994

- [50] Dr G. De Schutter, Bulletin de la Fédération de l'Industrie Belge (FEBELCEM), Juillet 2007.
- [51] RAMACHANDRAN V.S. ; MALHOTRA V.M. ; JOLICOEUR C. ; SPIRATOS N., Superplasticizers : properties and applications in concrete, Ottawa : CANMET, 1998.
- [52] BAROGHEL-BOUNY V., Les spécificités des bétons à hautes performances, Paris : LCPC, 2004
Seventh International Symposium on the Utilization of High-Strength/High-Performance Concrete, ACI Symposium Publication 228, Volumes 1 & 2, 2005
- [53] FEVRE C. (Ed.), Projet National BHP 2000 - Les bétons à hautes performances, Guides pratiques (3 tomes) ; Paris : IREX, 2002, 2003
- [54] M.N. Oudjît, Réactivité des fumées de silice condensées en présence de chaux ou de ciment Portland, Thèse de Doctorat, INSA Toulouse, 1986.
- [55] A. Zenati, Contribution à l'étude des bétons de poudres réactives à base de fibre, Mémoire de Magister, USTHB 2007.
- [56] A. Naceri, I. Messaoudene, Effet de l'activation mécanique du laitier de haut fourneau sur le comportement mécanique du mortier, Lebanese Science Journal, Vol. 7, No. 2, 2006.
- [57] M.N. OUDJIT, Influence des ajouts sur la prise et le durcissement des mortiers et bétons, D.E.A, INSA Toulouse, France, 1982.
- [56] M.L/ KATEB, Formulation des bétons autoplaçants à base de laitier, Magister, FGC/USTHB, 2006.