

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

BADJI MOKHTAR-ANNABA UNIVERSITY
UNIVERSITE BA DJI MOKHTAR-ANNABA



جامعة باجي مختار - عنابة

Faculté des sciences de l'ingénieur

Département de Génie Civil

MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de Magister

ELABORATION DES BETONS A HAUTES PERFORMANCES A BASE DES SOUS PRODUIT LOCAUX

FORMULATION ET CARACTERISATION PHYSICO-MECANIQUE

Option : Matériaux

Par : LAKHAL RIDHA

DIRECTEUR DU MEMOIRE : MC/A ACHOURA Djamel Université d'Annaba

DEVANT LE JURY

PRESIDENT: Dr BEHIM Mourad MC/A Université d'Annaba
EXAMINATEURS : Dr ARABI Nouredine MC/A Université d'Annaba
HACENE CHAUCHE MC/A Université d'Annaba
Abdelmadjid

ANNEE : 2011

Remerciements

Je remercie mon directeur de thèse, Dr ACHOURA Djamel, qui m'a accompagné de la meilleure des façons et avec patience exceptionnelle durant ce travail de thèse.

Je remercie également Dr BEHIM Mourad qui m'a fait l'honneur de présider mon jury de thèse. Ainsi que les autres membres du jury, Dr ARABI Noureddine et Dr HACENE CHAOUICHE Abdelmadjid qui ont accepté d'être examinateurs de la thèse.

Enfin, je remercie toutes les personnes du département de génie civil à l'université d'Annaba, qui font de ce département un lieu de travail hors du commun. Et en particulier mes chers amis Djegader Djamel, Hadidane Hocine et Berdjem layachi.

المخلص

الخرسانة ذات الخصائص العالية هي نوع جديد من الخرسانة التي تلبى متطلبات المباني والهياكل الحديثة. أنها تسمح للمصممين بناء هياكل أكثر علوا وديمومة. هذه الدراسة تهدف إلى العثور على التطبيق العملي و الفعال لخبث الأفران العالية المحبب في تطوير خرسانة ذات خصائص عالية.

الغرض من هذه الدراسة هو صياغة خرسانة ذات خصائص عالية و داك عن استبدال دخان السيليكا بالخبث المحبب الناعم. وتستند منهجية دراستنا حول تحسين المعالم التالية : التركيبية الحبيبية ، معدل الإضافات الناعمة، بالإضافة إلى صياغة خرسانة ذات خصائص عالية.

ويتحقق ذلك من خلال الاختبارات التي أجريت على تفريخ الخرسانة الطازجة والاختبارات على قوة الخرسانة المتصلبة. واستكملت هذه الاختبارات بالملاحظات تحت المجهر الإلكتروني الماسح.

النتائج المحصل عليها تدل على أن هذا الاستبدال يسبب تغيرات هامة من حيث قابلية التشكيل ومستوى المقاومة على المدى القصير، على العكس المدى الطويل ، تم الحصول على قوة ميكانيكية جيدة لكنها لا تزال أقل من تلك المصاغة بواسطة دخان السيليكا

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.4.1.	Relation entre la résistance à la compression et le rapport E/C.	10
Figure I.4.2	Relation entre la porosité et le rapport E/C pour différents degrés d'hydratation.	11
Figure. I.4.3.	Des charges opposées sur la surface des grains de ciment provoquent la floculation.	12
Figure. I.4.4.	Les superplastifiants empêchent la floculation.	13
Figure I.4.5.	Granulométrie des matières fines.	18

Chapitre II

Figure II.2.	Le diagramme de Keil (Evaluation des ajouts cimentaires dans le système ternaire : $\text{CaO} + \text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 = 100$)	26
Figure II.4.1.	Béton ordinaire : fissures d'adhérence et fissures dans le mortier	35
Figure II.4.2.	Béton hautes performances : les granulats sont généralement fissurés.	36
Figure II.4.2.	Diagramme de la résistance à la compression des Bétons hautes performances: bétons haute résistance selon l'EC2 Feu.	42
Figure II.8.1.	Modèle de la morphologie de l'auréole de transition d'un BO 1- couche continue de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, 2 - couche de CSH, 3 - couche de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, 4 - zone poreuse, 5 - pâte de ciment hors de l'auréole de transition, 6 – ettringite.	44
Figure II.8.2	Microstructure de la zone de contact entre la pâte et le granulat a) béton sans fumée de silice ; les cristaux de portlandite dans la zone de transition sont orientés perpendiculairement aux granulats, b) béton avec fumée de silice, absence de la zone de transition, homogénéité du gel CSH.	45

Chapitre III

Figure III.2.1	fillers de laitier granulés d'El-hadjar	50
Figure. III.2.2.	Fractions des graviers utilisés	50
Figure III.2.3.	courbes granulométriques des granulats utilisés	51
Figure III.3.	Organigramme représentant le Programme expérimental	53
Figure III.4.1.	Abaque de détermination du dosage en ciment	56
Figure III.4.2:	exemple d'une courbe de référence OAB.....	59
Figure III.4.3.	Organigramme de la méthode proposée pour formuler des BHP	63
Figure III.4.4.	Relation proposée entre le rapport E/L et la résistance à la compression.	64
Figure III.4.5.	Détermination du dosage en eau	65
Figure III.4.6.	Détermination du dosage en gros granulats	66
Figure III.4.7.	Feuille de composition d'un BHP	68

Chapitre IV

Figure IV.3.1.	Appareil de mesure du retrait (rétractomètre)	77
Figure IV.3.2.	Les échantillons pour le retrait (3 prismes de 7x7x28 cm)	78
Figure IV.3.3.	Expression des résultats de retrait du béton durci	79
Figure IV.4.1.	Résultat de la phase n° 1	83
Figure IV.4.2.	Confirmation des résultats de la phase 1.	85
Figure IV.4.3.	Résultat de la phase n° 2.....	87
Figure IV.4.4.	Correction d'affaissement au cône d'abrams	89
Figure IV.4.5.	Résultat de la phase n° 4.....	91
Figure IV.4.6.	Apparition des fissures dans les cubes.....	92
Figure IV.4.7	Apparition des fissures dans les cubes.....	93
Figure IV.4.8	Observations au microscope électronique balayage	94
	effectuées sur des échantillons des BHP 0.27 et BHP 0.30	
Figure IV.4.9.	Observations à l'œil sur des échantillons des BHP 0.27 et BHP 0.30	94
Figure IV.5.	Retrait des BHP 0.27 et Béton usuel M3.....	96

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau I.1.	Caractéristiques de résistance et de déformation 10
	suivant la norme EN 1992-1-1 :2004.

Chapitre II

Tableau II.5.1	Retrait de dessiccation(*) et retrait endogène (**) en 39
	fonction de f_{ck} et de l'humidité relative(HR) suivant
	la norme EN 1992-1-1 :2004.
Tableau II.5.2	Coefficient de fluage(*) en fonction de f_{ck} et de l'humidité 40
	relative(HR) et du délai de mise en charge suivant
	la NBN EN 1992-1-1.

Chapitre III

Tableau III.2.1.	Caractéristiques du ciment CPJ-CEM IIA 42,5 utilis 49
Tableau III.2.2.	Caractéristiques des fillers de laitier granulé d'El-Hadjar 59
Tableau III.2.3.	Caractéristiques des granulats utilisés 52
Tableau III.4.1.	Evaluation de l'ouvrabilité par référence d'affaissement..... 55
	au cône ou au test d'ouvrabilité C.E.S
Tableau III.4.2.	Valeur approximative du coefficient G 56
Tableau III.4.3.	Valeur du coefficient de compacité γ 57
Tableau III.4.4.	Valeur du terme correcteur k en fonction du dosage en ciment, 58
	de la puissance de la vibration et de l'angularité des granulats.

Chapitre IV

Tableau IV.4.1.	Compositions et dosages des mélanges de la 1ère phase pour 1 m ³ 81
Tableau IV.4.2.	Compositions et dosages des mélanges M5 et M6 pour 1 m ³ 83
Tableau IV.4.3.	Compositions et dosages de la 2ème phase pour 1 m ³ 86
Tableau IV.4.4.	Compositions et dosages de la 4ème phase pour 1 m ³ 89
Tableau IV.5.	Compositions et dosages des bétons pour le test de retrait, pour 1 m ³ 95

Table des matières

Remerciement

Résumé

Abstract

الملخص

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale1

Chapitre I :

Etude générale sur les Bétons Hautes Performances

I.1. Introduction	5
I.2. Perspective historique	6
I.3. Applications des BHP	7
I.4. Voies d'obtention des BHP	9
I.4.1. Utilisation d'une nouvelle génération de superplastifiants	9
I.4.1.1. Effet de l'eau excédentaire	9
I.4.1.2. L'action des superplastifiants.....	12
I.4.1.3. Interaction ou Compatibilité ciment-superplastifiant	14
I.4.1.3.a. Les polysulfonate.....	15
I.4.1.3.b. Les polycarboxylates.....	15
I.4.2. L'amélioration de l'étendu granulaire	16
I.4.2.1. Rôle et importance des granulats dans le béton	16
I.4.2.2. Rôle et importance des additions minérales	17
I.4.2.2.1. Effets des additions	19
I.4.2.2.1.a. Effet fillers ou effet de remplissage	19
I.4.2.2.1.b. Effet physique ou de surface	19
I.4.2.2.1.c. Effet chimique ou pouzzolanique	19
I.5. conclusion.	20

Chapitre II :

Propriétés des Bétons Hautes Performances

II.1 Introduction	23
II.2. Composition des BHP :	23
II.2.1. Différents type de fillers	25
II.2.1.1. La fumée de silice.....	26
II.2.1.2. Les cendres volantes	28
II.2.1.3. Le laitier de hauts fourneaux.....	29
II.2.1.3.a. Description physico-chimique de laitiers granulés.....	29
II.2.1.3.b. Composition minéralogique potentielle du laitier	30
II.2.1.3.c. Classification des laitiers.....	31
II.2.1.3.d. L'hydraulicité du laitier granulé	31
II.2.1.3.e. Activation du laitier granulé	32
II.2.1.3.f. Emploi du laitier granulé dans le béton	34
II.3. Effets de la température sur le béton en cours de durcissement	34
II.4. Comportement mécanique des BHP	35
II.4.1. Comportement en compression	35
II.4.2. Comportement en traction	37
II.4.3. Rigidité	37
II.5. Déformation dimensionnelles et volumique (retrait et fluage)	37
II.5.1. Retrait	37
II.5.1.1. Retrait endogène	37
II.5.1.2. Retrait de dessiccation	38
II.5.2. Le fluage	39
II.6. Durabilité	40
II.7. Résistance au feu	41
II.8. microstructure des BHP	42
II.9. Conclusion	46

Chapitre III :

Matériaux utilisés et procédure expérimentale

III.1. Introduction	48
III.2. Matériaux utilisés	48
III.2.1. Eau	48
III.2.2. Ciment	48
III.2.3. Filler de laitier de haut fourneau	49
III.2.4. Granulats	50
III.2.5. Superplastifiant.....	52
III.3. Procédure expérimentale	53
III.3.1. Phase 01: Optimisation du squelette granulaire (OPT 01)	54
III.3.2. Phase 02: Optimisation par l'introduction des fillers de laitier de haut fourneau (OPT 02)	54
III.3.3. Phase 03: Optimisation de la maniabilité par l'addition de Superplastifiant-Ajustement de la formulation et caractérisation.....	54
III.4. Méthodes de formulation suivies	55
III.4.1 Formulation des bétons usuels	55
III.4.1.1. Principe de la méthode de formulation de Dreux corrigée	55
III.4.2. Méthodes de formulation des BHP [1].	59
III.4.2.1. Méthode suggérée par le comité ACI 363 sur les bétons haute résistance	60
III.4.2.2. Méthode des coulis du LCPC :	60
III.4.2.3. La méthode simplifiée de Mehta et Aitcin	61
III.4.2.4. La méthode de formulation de l'université de Sherbrooke	62
III.4.2.4.a. Le rapport eau/liant	63
III.4.2.4.b. Dosage en eau	64
III.4.2.4.c. Le dosage en super plastifiant	65
III.4.2.4.d. Dosage en gros granulats	66
III.4.2.4.e. Teneur en air	66
III.4.2.4.f. Méthode de calcul de la formulation (feuille de calcul)	66
III.5. Conclusion.....	72

Chapitre IV:

Caractérisation des Bétons hautes Performances

IV.1. Introduction	74
IV.2. Fabrication des bétons, mise en place et conservation	75
IV.3. Descriptions des essais effectués	77
IV.3.1. Essais physiques	77
IV.3.1.1. maniabilité	77
IV.3.1.2. Retrait de dessiccation (Retrait de béton durci au-delà de 24 heures)	77
IV.3.2. Essais mécaniques	79
IV.3.2.1. Détermination de la résistance mécanique en compression uniaxiale	79
IV.3.2.2. Détermination de la résistance mécanique à la traction par flexion.....	80
IV.4. Mlange des bétons par phase.....	81
IV.4.1. Phase 01: Optimisation du squelette granulaire (OPT 01)	81
IV.4.2. Phase n° 2: Optimisation par l'introduction des fillers de laitier de haut fourneau (OPT 02)	84
IV.4.3. Phase n° 3: Optimisation de la maniabilité par l'addition de superplastifiant (OPT 03),	85
IV.4.4. Phase n° 4: Ajustement de la formulation et caractérisation	88
IV.5. Retrait du béton durci (au-delà de 24 heures)	94
IV.6. Conclusion.....	96
Conclusion Générale	99
Références bibliographique	103

Introduction Générale

Introduction générale

Le succès du béton dans le monde d'aujourd'hui – et vraisemblablement de demain – s'explique essentiellement par un ensemble unique et inégal de qualités tout particulièrement recherchées par les professionnels de la construction.

Ces dernières années ont vu une révolution dans le domaine du béton, avec l'apparition de bétons hautes performances et ultra-hautes performances, plus ductiles, plus durables, plus résistants. Ces innovations n'auraient pu voir le jour sans un important travail de recherche, qui a permis de développer une connaissance à l'échelle microscopique des mécanismes de comportement du béton. Ces importantes avancées ont lui-même permis de diversifier les utilisations auxquelles il était jusque-là destiné. Deux voies de recherche sont l'origine du développement spectaculaire des BHP :

- L'apparition d'une nouvelle génération de superplastifiant hautement réducteur d'eau, double action dispersion et défloculation. Cela est obtenu grâce à l'utilisation de polymères modernes (polysulfonate et polycarboxylates), qui offrent la possibilité d'une réduction sensible du dosage en eau ce qui permet de formuler des bétons avec un rapport eau/ciment inférieur à 0,3.
- L'amélioration de l'étendu granulaire par l'ajout d'additifs minéraux sous forme de fillers qui a un double rôle : l'augmentation de la compacité par remplissage d'une partie de volume des vides et micro-vides, d'une part, et d'autre part, et grâce à leur réactivité chimique, participe à la formation d'hydrate secondaire et par conséquent améliore la résistance et la durabilité [1].

L'Algérie connaît depuis une décennie un développement intense et soutenu des secteurs du bâtiment et de la construction. Que ce soient pour les grands projets de l'État (1 million de logements sociaux, équipements socio-éducatifs, administratifs, ...) ou les grands projets immobiliers (résidentiels, tertiaires) et touristiques initiés par les promoteurs privés et publics. Les exigences et normes internationales en matière de la performance des matériaux de construction n'est pas encore suffisamment intégrées aux processus de conception et de construction, malgré les dégâts subis lors du séisme de Boumerdes en 2003. Les constructeurs utilisent toujours des bétons traditionnels avec des résistances d'environ 30 MPa, et qui ne

d passent les 40 MPa dans les meilleures conditions. Ceci conduit à de grandes pressions sur les ressources (aciers d'armature, ciment, ...) et des impacts importants sur la durabilité des constructions. Afin de répondre aux exigences d'une construction moderne et durable, l'Algérie doit obligatoirement utiliser les technologies innovantes dans le domaine de fabrication des matériaux et bâtiments de construction. Parmi les bâtiments innovants on trouve les BHP (bâtiments hautes performances), dont l'utilisation a une double finalité : améliorer la résistance mécanique et la durabilité d'une part et économiser la consommation des matériaux de construction en réduisant les sections des éléments constructifs et en limitant le taux de ferrailage. Malgré que ces nouveaux bâtiments sont largement utilisés à travers le monde depuis plus de deux décennies. Leurs utilisations en Algérie, restent limitées ou inexistantes.

Actuellement les BHP sont formulés à base de la fumée de silice ou d'un mélange de la fumée de silice avec un ajout pouzzolanique. Bien que certaines pouzzolanes naturelles soient toujours utilisées dans certains pays, il ne semble pas qu'elles aient été utilisées à grande échelle pour fabriquer des bâtiments hautes performances (BHP). La plupart de ces pouzzolanes proviennent des coproduits industriels. Parmi ces pouzzolanes les plus utilisées, on trouve la pouzzolane naturelle, la fumée de silice, les cendres volantes et Le laitier de haut fourneau broyé qui est un ajout minéral et qui possède plusieurs qualités pouzzolaniques (composition chimique voisine de celle du ciment Portland et une activité hydraulique latente active en présence de ciment Portland) [2].

La décision d'utiliser ou non un laitier de haut fourneau comme ajout dépend, évidemment de sa disponibilité à un prix économique et compétitif. À l'heure actuelle, l'utilisation des laitiers dans les BHP est relativement limitée, mais, chaque fois qu'ils ont été utilisés, les laitiers ont offert des performances aussi bonnes que se soit dans les bâtiments usuels ou pour la formulation des BHP. Jusqu'à présent, les laitiers ont été utilisés en parallèle avec la fumée de silice pour fabriquer des BHP de classe I, II et III (50 à 125 MPa). Ils n'ont jamais été sérieusement considérés pour de telle application puisqu'il n'y a aucune raison que de telles additions minérales ne puissent être utilisées dans le futur pour la fabrication des BHP de classes IV et V [3].

Selon la littérature bibliographique, les laitiers ont été jusqu'à présent utilisés à des dosages variant entre 10 et 20 %. Ce dosage peut varier selon les conditions climatiques et environnementales. Cependant, dans le futur, on prévoit des dosages en laitier plus élevés.

Des tests sur chantier et dans une centrale à béton Montréal (Canada), montrent qu'un BHP ayant une résistance en compression à 90 jours de l'ordre de 130 MPa est obtenu en utilisant un liant composé de 60 % de laitier, 30% de ciment portland et 10% de fumée de silice [4]. En Algérie la production annuelle du laitier qui est estimée à 500.000 tonnes en moyenne ne trouve que quelques applications. Seule une partie du laitier granulé est utilisée comme ajout au ciment Portland [5].

L'utilisation des laitiers de hauts fourneaux dans la fabrication des bétons hautes performances constituent une nouvelle avancée pour une construction durable et qui offrent des avantages d'ordre économique, technique et écologique.

Deux objectifs sont visés par ce travail. Le premier concerne la formulation d'un BHP base de matériaux locaux qui répond aux exigences de l'évolution de la construction moderne. Le deuxième objectif est la possibilité d'un remplacement total de la fumée de silice par les fillers de laitier granulé de haut fourneau d'EL HADJAR et leur influence sur les caractéristiques des bétons frais et durcis.

Ce mémoire comporte quatre chapitres. Le premier chapitre présente une étude bibliographique générale sur les BHP, on aborde : une introduction et une définition des BHP, une perspective historique, les applications des BHP, et les voies d'obtention des BHP dont on parle des superplastifiants et leurs compatibilités avec le ciment, ainsi que des ajouts cimentaires et leurs rôles dans les BHP. Dans le deuxième chapitre, on illustre les propriétés physiques et mécaniques des BHP, ainsi que les différents types d'ajouts cimentaires utilisés pour la fabrication des BHP. Le troisième chapitre est une description des matériaux utilisés dans cette étude et de la procédure expérimentale suivie. Dans le quatrième chapitre, on donne les différents mélange réalisés par phases jusqu'à l'obtention des BHP avec les résultats obtenus et les interprétations. Est terminée par une conclusion générale qui discute la possibilité de la fabrication des BHP base des fillers de laitier granulé d'EL-HADJAR et leurs propriétés.

Chapitre I :
Etude générale sur les Bétons à
Hautes Performances

Chapitre I :

Etude g n rale sur les B tons Hautes Performances

I.1. Introduction

La r sistance la compression est g n ralement consid r e comme la principale propri t caract ristique du b ton. Depuis la d couverte du b ton, les tudes ont t ax es sur la recherche de m thodes permettant d'am liorer cette r sistance. Des progr s consid rables ont t enregistr s dans ce domaine au cours de ces derni res d cennies. Aux Etats-Unis, durant les ann es 1950, une r sistance la compression de 35 MPa tait consid r e comme une r sistance lev e. Dans les ann es 1970, la limite a t port e 70 MPa, alors qu'en 1990, la notion de b ton haute r sistance tait r serv e un b ton d'une r sistance la compression comprise entre 60 et 100 MPa [6]. Cette volution n'est pas termin e ! Des r sistances la compression sup rieures 120 MPa ont t r alis es lors de constructions r centes [7]. La notion de 'haute r sistance' est tr s relative et, de toute vidence, volutionne.

L'augmentation de la r sistance la compression du b ton s'accompagne fr quemment de l'am lioration d'autres propri t s, comme la r sistance la traction, la rigidit , la r sistance l'usure, la durabilit , etc. Pour certaines applications, ces propri t s peuvent m me tre plus essentielles que le niveau de r sistance atteint. Dans un cas pareil, le choix des composants et de la composition ne doit pas tre ax sur l'obtention d'une r sistance maximale, mais davantage sur l'obtention d'une prestation optimale des propri t s souhait es. La r sistance sup rieure obtenue est une incidence de second ordre [8]. Dans ce cadre, le contenu de l'expression 'b ton haute r sistance' s'av re insuffisant. Les chercheurs lui pr f reront l'appellation 'b ton hautes performances', qui est clairement plus g n rale. Il est parfaitement possible d'obtenir un b ton pr sentant des hautes performances pour une propri t donn e, tout en ne poss dant pas une r sistance nettement sup rieure. [9].

Selon la norme européenne EN 206-1, le béton est considéré comme un 'béton 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 de 300 mm de hauteur et d'un diamètre de 150 mm, et le deuxième nombre représente la résistance à la compression caractéristique mesurée sur des cubes de 150 mm de côté. [9]. (tableau I.1.).

Tableau I.1. – Caractéristiques de résistance et de déformation suivant la norme EN 1992-1-1 :2004.

Caractéristiques	Classe de résistance \Rightarrow Béton haute résistance													
	12	16	20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	80	90
f_{ck} résistance caractéristique en compression sur cylindre (MPa)	12	16	20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	80	90
$f_{ck-cube}$ résistance caractéristique en compression sur cube (MPa)	15	20	25	30	37	45	50	55	60	67	75	85	95	105
f_{cm} résistance moyenne en compression (MPa)	20	24	28	33	38	43	48	53	58	63	68	78	88	98
f_{ctm} 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
E_{cm} module d'élasticité tangent (GPa)	27	29	30	31	33	34	35	36	37	38	39	41	42	44
ϵ_{c1} déformation au pic de contrainte (‰)	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

I.2. historique de l'évolution des bétons hydraulique

L'histoire du ciment commence en 3000 Av. J-C, où les Egyptiens ont utilisé des mortiers en gypse et des mortiers en chaux pour construire les pyramides. Puis, les Romains ont utilisé une sorte de béton pouzzolanique: Il s'agit d'un dépôt volcanique qui se solidifie si on le mélange avec de l'eau et de la chaux (Aujourd'hui la pouzzolane est classée comme un ajout). Mais, le mot béton, lui-même, a été introduit par l'ingénieur français Belidor (1697-1761) et vient de « betun, becton, beter » qui signifie « se solidifier ». En 1824, Joseph Aspadin a inventé le ciment portland, par la calcination, à 1500 °C, d'un mélange d'argile et de craie que l'on broie ensuite finement. [10].

Smeaton (1756), Vicat (1818), Aspadin (1825) furent parmi les inventeurs des bétons modernes. Monier et Lambot (1848), coignet (1852), Hennebique (1880) réalisèrent, avec ce matériau les premières constructions en béton armé (avec des résistances en compression de 15 à 25 MPa). Puis durant un siècle, le béton resta un mélange de : granulats, ciment, et d'eau.

Ces dernières décennies, de nombreux travaux scientifiques ont montré les effets néfastes, pour la résistance et la durabilité, des excès de l'eau de gâchage. Dans la perspective d'améliorer les propriétés constructives des bétons, il était donc nécessaire d'explorer les voies visant à réduire ce dosage en eau (découverte des plastifiants et fluidifiants vers les années 1970). En parallèle, d'autres recherches sont orientées pour l'obtention d'un mélange de très haute compacité, lors de la composition du béton (optimisation de l'étendu granulaire à l'échelle microscopique par l'ajout d'additions ultrafines) [11].

Ces deux voies de recherche sont abouties à des résultats très intéressants, et la découverte des nouveaux bétons qui ont des performances très élevées et surtout au niveau de la résistance et de la durabilité, se sont les Bétons Hautes Performances (BHP) et les Bétons Hautes Performances (BTHP).

I.3. Applications des BHP

Le BHP présente des avantages et des performances très intéressantes par rapport au béton traditionnel:

- Durabilité améliorée face aux agressions physico-chimiques (perméabilité réduite, meilleure protection de l'armature contre la corrosion, réduction de la pénétration des ions chlorure, diminution des risques de l'alcali-réaction, meilleure résistance au gel,...etc.). Cette durabilité améliorée présente de grands avantages en termes d'entretien à long terme.
- En règle générale, une fluidité très élevée à l'état frais. Cette caractéristique facilite la mise en œuvre du béton, même dans les zones à densité d'armature élevée.
- Résistance accrue au jeune âge. Cette propriété permet de réduire le temps de coffrage et d'accélérer la mise en précontrainte. Des délais d'exécution raccourcis sont donc envisageables.

- Une résistance finale accrue après durcissement, ce qui permet de réduire les sections du béton et par conséquent, la diminution du poids de la construction.
- Un module d'élasticité supérieur, susceptible d'améliorer la stabilité aérodyamique de ponts à lances.
- Un retrait total réduit, qui s'avère avantageux pour la maîtrise des déformations d'une construction, ainsi qu'en ce qui concerne les pertes de précontrainte.

Sur le plan architectural également, le BHP est assorti d'un certain nombre de nouvelles possibilités. C'est ainsi que le BHP permet la réalisation de constructions plus lances. Cet atout est d'ores et déjà matérialisé dans la réalisation d'ouvrages d'art (ponts), même si ce béton pourrait tout aussi bien être utilisé pour la construction de bâtiments. À l'heure actuelle, les avantages du BHP se concentrent principalement dans l'obtention d'un espace intérieur le plus utile possible. Nous pourrions cependant aussi songer à un nouvel aspect de l'enveloppe de la construction, avec un regain d'attention porté aux éléments architecturaux tels que les arcs, les voûtes,...

La façade d'un bâtiment pourrait en outre être redéfinie par l'utilisation potentielle de modules de dimensions supérieures. Alors que ces dimensions sont à l'heure actuelle généralement de 6 mètres, elles pourraient être portées à 7 ou 8 mètres, grâce au BHP. Cette augmentation pourrait faciliter la réalisation d'une autre conception de façade et donc d'un aménagement intérieur modifié, davantage en phase avec les normes internationales actuelles.

La liberté accrue obtenue pour l'aménagement intérieur d'un bâtiment conduit également à l'aménagement de la surface horizontale utile. Grâce à la modification des dimensions du module d'occupation du sol, les espaces libres pourront être plus grands, ce qui donnera à l'architecte plus de possibilités pour la conception et l'aménagement des espaces de vie et de bureaux.

Dans l'industrie de préfabrication, l'utilisation du BHP offre aussi de nouvelles perspectives. Citons notamment la possibilité de produire des cellules préfabriquées complètes, grâce à la réduction du poids d'éléments réalisés.

Un autre avantage du BHP par rapport au béton ordinaire est l'aspect visuel des surfaces de béton, tant coulées sur place que préfabriquées. L'apparition de petites bulles d'air à la

surface est souvent très limitée. La surface présente généralement une bonne texture, grâce à la haute teneur en fines.

En outre, le BHP n'est guère soumis à la ségrégation, de sorte que la formation de nids de gravier est généralement évitée. La présence de fumées de silice permet d'obtenir parfois des teintes plus sombres.

Historiquement, le BHP a été avant tout conçu pour des applications très particulières, comme les buildings. Il a été différentes reprises mis en œuvre aux États-Unis pour la réalisation de gratte-ciel, avec des bétons présentant des résistances de 120 à 130 MPa. Cependant, comme indiqué ci-dessus, le BHP peut également être une solution alternative pour les constructions réalisées habituellement en béton conventionnel. Le recours judicieux au BHP exige de toute évidence une collaboration très étroite entre le propriétaire, l'architecte, l'ingénieur, l'entrepreneur, la centrale béton et le laboratoire de recherche.

I.4. Voies d'obtention des BHP

I.4.1. Utilisation d'une nouvelle génération de superplastifiants

I.4.1.1. Effet de l'eau excédentaire

Durant des années, 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 l'ouvrabilité nécessaire. 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 répartit 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 la résistance du béton [12].

Un lien direct sera observé 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 nouveau. Dès 1894, le Français René Féret avait postulé cette conclusion de manière empirique [13]. 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 œuvre. Les vides et les pores qui en résultent réduisent la résistance, comme il est illustré par la figure I.4.1.

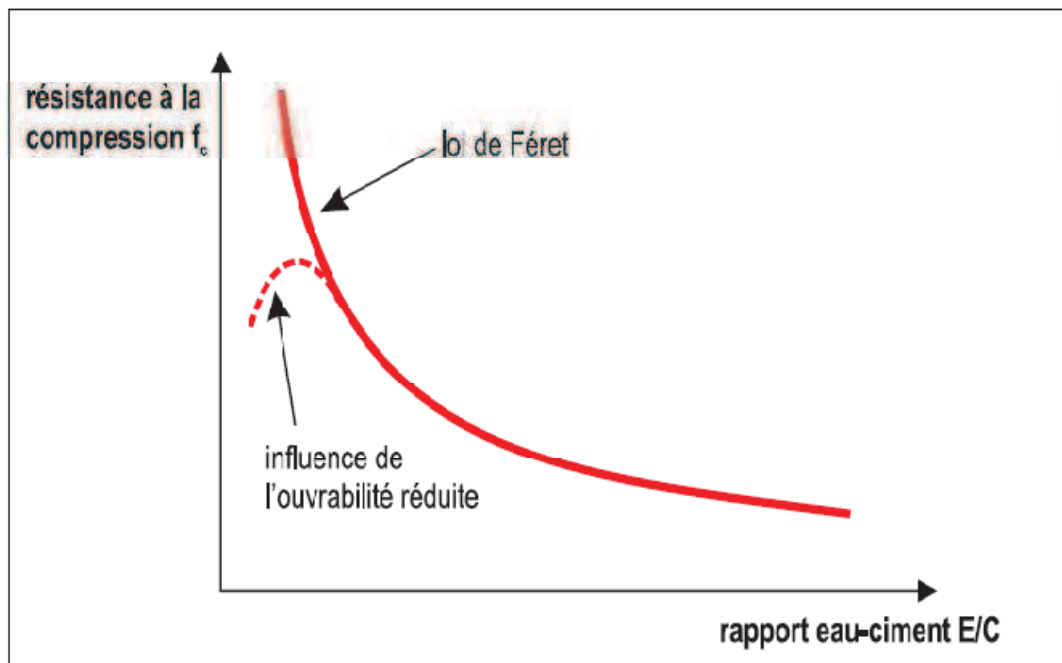


Figure I.4.1. Relation entre la résistance à la compression et le rapport E/C.

Progressivement, les chercheurs ont découvert qu'il existait également un lien entre le rapport eau-ciment et la durabilité. Le volume de pores est reparti 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} m (pores de gel) sont si petits que le transport de molécules (vapeur, gaz, etc.) en devient impossible. Cependant il y a aussi des pores de plus grandes dimensions dit capillaires dont le diamètre varie de 10^{-7} à 10^{-5} m. Leur quote-

part d pend du rapport eau-ciment et de la façon dont le ciment est hydrat , exprim e par le taux d'hydratation. Plus le taux d'hydratation augmente, plus le ciment est hydrat , plus la quantit d'eau li e cro t et, par cons quent, plus la quantit d'eau libre diminue. La figure I.4.2 montre comment le volume de pores capillaires diminue en cas de baisse du rapport eau-ciment et de hausse du taux d'hydratation [12]. L'humidit , la vapeur d'eau, les gaz et toutes sortes de substances nocives peuvent p n trer assez facilement dans les pores capillaires, y migrer, voire d t riorer le mat riau de l'int rieur. La durabilit du b ton augmente donc avec la r duction du volume des pores (porosit r duite, compacit accrue) et du r tr cissement des pores (r duction de la perm abilit). Il s'ensuit que le rapport eau-ciment doit tre le plus faible possible. Mais la question qui se pose dans ce cas l est l'ouvrabilit , et par la suite comment concilier deux exigences contradictoires : r duire la quantit d'eau pour obtenir une r sistance et une durabilit accrues, et ajouter de l'eau pour faciliter l'ouvrabilit ? De nombreuses ann es ont t consacr es la recherche d'une r ponse cette question.

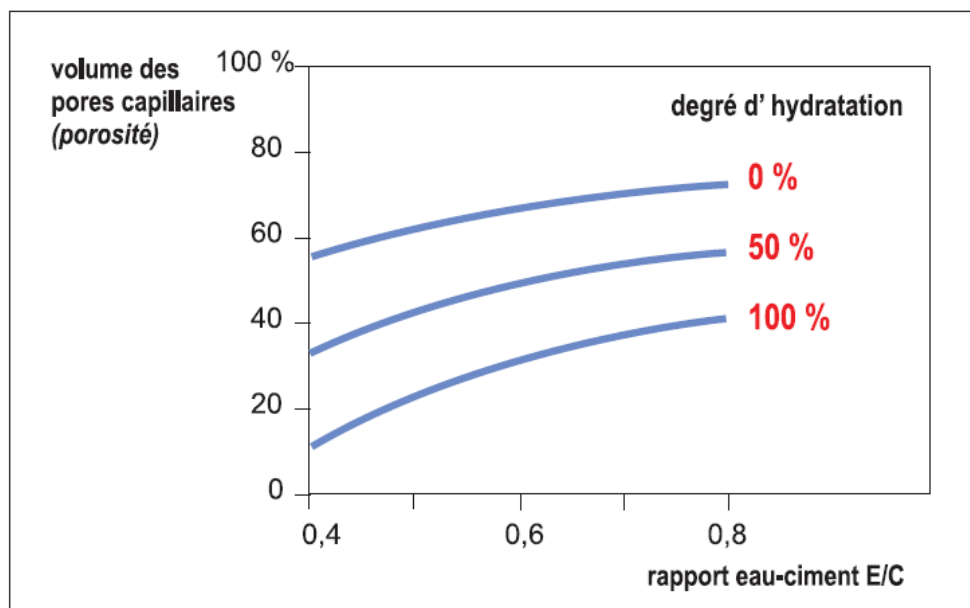


Figure I.4.2 Relation entre la la porosité et le rapport E/C pour différents degrés d'hydratation.

I.4.1.2. L'action des superplastifiants

La découverte des plastifiants et plus particulièrement des superplastifiants très puissants dans les années 1970 a constitué un véritable tournant. Ce sont des polyelectrolytes ou polymères hydrosolubles. Ils peuvent être classés historiquement dans les familles suivantes :

- 1^{ère} génération : poly-naphtalène-sulfonates (PNS)
- 2^{ème} génération : poly-méthacrylate-sulfonates (PMS)
- 3^{ème} génération : polycarboxylates (PC), et hybrides avec chaînes sulfonates
- 4^{ème} génération : poly-carboxylates-polyox (PCP) et poly-phosphonates-polyox

Aucun de ces produits n'est toxique, la dose où on les emploie typiquement, soit 0,5 % du poids de ciment [12].

L'effet de ces adjuvants est de rendre le béton nettement plus maniable, sans ajouter d'eau [14]. 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. I.4.3). À 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.

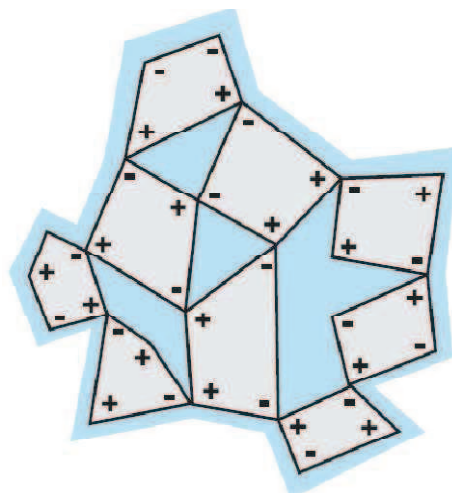


Figure. I.4.3. Des charges opposées sur la surface des grains de ciment provoquent la flocculation.

Les superplastifiants empêchent la formation rapide des conglomerats (Figure. I.4.4.). Leurs molécules 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 leurs rapprochements réciproques. 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 [15].

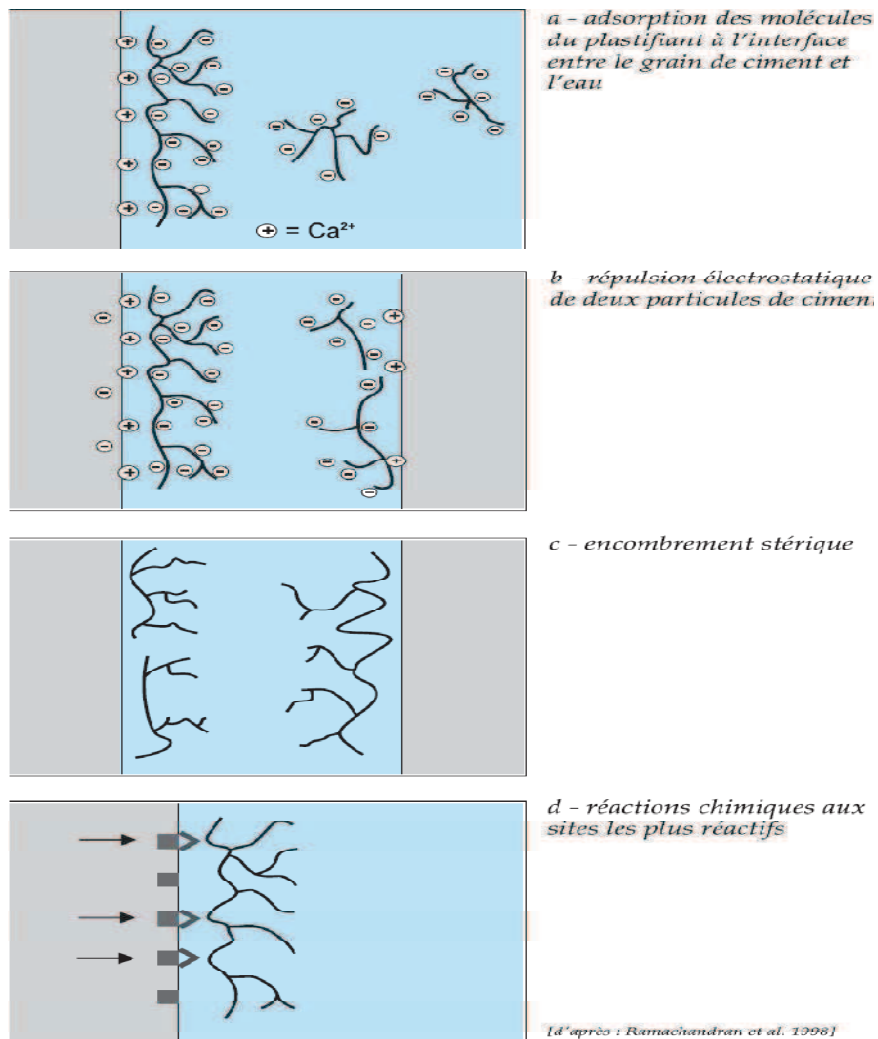


Figure. I.4.4. Les superplastifiants empêchent la floculation.

I.4.1.3. Interaction ou Compatibilité ciment-superplastifiant

  l'heure actuelle la qualité des superplastifiants s'est nettement am lior e [13]. Certaines combinaisons ciment/superplastifiant permettaient de fabriquer des b tons ayant un grand affaissement initial et qui est conserver dans le temps (combinaison compatible), alors que dans d'autres cas l'affaissement initial lev obtenu avec un superplastifiant sera perdu tr s rapidement (combinaison incompatible). Donc une combinaison ciment/superplastifiant est dite non compatible quand un b ton superplastifi perd tr s rapidement son affaissement initial. Dans certains cas, des b tons peuvent perdre leur affaissement initial en moins de 15 min, tandis que dans d'autres cas des b tons peuvent conserver un affaissement sup rieur 200 mm pendant 1 h ou m me 1 h 30, sans ph nom ne de ressuage, de s gr gation et sans perte de r sistance 24 heures [12].

Au fur et mesure que le potentiel technologique et conomique des superplastifiants s'est affirm , un effort de recherche est soutenu pour essayer de mieux comprendre les m canismes d'interaction ciment/superplastifiant de façon d velopper des superplastifiants plus puissants, plus efficaces, plus conomiques, qui soient compatibles avec le plus grand nombre de ciment. Cet effort de recherche a finalement abouti au d veloppement d'une nouvelle science des adjuvants qui permet d j de mieux contr ler les propri t s des b tons superplastifi s [14].

Les interactions ciment / superplastifiant sont des processus tr s complexes. En effet, le ciment Portland est un mat riau inorganique polyphasique, compos des phases du clinker majoritaires (C_3S , C_2S , C_3A , C_4AF) et de phases minoritaires ($CaSO_4 \cdot xH_2O$, CaO , $(NaK)_2SO_4 \dots$). Il en est de m me pour les adjuvants organiques souvent constitu s de plusieurs composants du fait de la nature des produits ou r sultants de leurs proc d s de fabrication [15].

I.4.1.3.a. Les polysulfonate

Plusieurs recherches ont mis en évidence l'importance cruciale de la vitesse de dissolution des différents sulfates que l'on retrouve dans un ciment Portland lorsqu'il s'agit de maintenir l'affaissement des bétons superplastifiés. Chaque fois que la solution interstitielle du béton frais présente un déficit en ions SO_4^{-2} , des molécules de polysulfonate vont neutraliser des sites actifs du C_3A et c'est cette consommation de molécules de polysulfonate qui occasionne alors une perte d'affaissement.

La teneur en sulfates alcalins du clinker qui a servi à fabriquer le ciment devient donc un facteur clé dans cette compétition entre les ions SO_4^{-2} et les terminaisons SO_3^- des polysulfonates lorsqu'il s'agit de neutraliser les sites actifs du C_3A . En effet, les sulfates alcalins sont beaucoup plus rapidement solubles que les différentes formes de sulfate de calcium que l'on a rajouté au clinker dans les broyeurs et, en général, ils se situent très près du C_3A sur les grains de ciment.

L'importance de la teneur en sulfates alcalins explique aussi pourquoi ce sont les ciments très faible teneur en alcalins et les ciments blancs, qui contiennent très peu d'alcalins en général, qui sont les ciments les moins compatibles avec les superplastifiants base de polysulfonates.

Dès le moment où l'on connaît une des causes principales de la perte d'affaissement de certains bétons superplastifiés, il devient très facile de corriger ces cas d'incompatibilité : il suffit de rajouter une quantité adéquate de sulfate alcalin rapidement soluble dans le béton au moment de son gâchage [16].

I.4.1.3.b. Les polycarboxylates

Les superplastifiants actuels sont principalement des polycarboxylates (4^{ème} génération). Ils permettent de produire des bétons de faible rapport eau/liant. Ces matériaux présentent une grande efficacité à court terme mais, dans certains cas, la plasticité n'est pas maintenue dans le temps pour des raisons d'incompatibilité entre le superplastifiant et le liant, voire le granulat.

Les ptes superplastifi s incompatibles, par comparaison des ptes compatibles, pr sentent soit des grandeurs rh ologiques importantes, soit des propri ts d'coulement diff rentes. Ces changements d'ouvrabilit sont attribu s, en pr sence d'une source d'ions sulfate, une formation excessive d'ettringite (produit d'hydratation du C_3A) sous forme d'aiguille la surface des grains de ciment. Les phases anhydres impliqu es dans la r action de formation de cet hydrate interagissent avec les polycarboxylates. Les quilibres de dissolution des sulfates de calcium sont modifi s du fait de la complication des ions Ca_2^+ par les polym res. La vari t cristallographique du C_3A influence galemment la formation de l'ettringite. La structure orthorhombique tant plus r active que la structure cubique, sa pr sence dans un ciment peut tre l'origine d'une perte rapide d'ouvrabilit en pr sence de superplastifiant[17].

I.4.2. L'am lioration de l' tendu granulaire

I.4.2.1. R le et importance des granulats dans le b ton

De puis longtemps, la relation entre la composition du b ton et ces propri ts rh ologiques et m caniques a int ress les chercheurs. Le rapport E/C est une notion de base dans la technologie du b ton, mais il n'est pas suffisamment pr cis pour une maitrise compl te de la qualit du b ton frais et durci. Plusieurs tudes ont montr que les granulats qui constituent le squelette, et qui repr sentent dans les cas usuels plus de deux tiers du volume total du b ton ont des influences claires sur les performances du b ton selon leurs qualit s, leurs formes et leurs tailles (dimensions) et aussi le volume qu'ils occupent.

Il n'est pas n cessaire de choisir un granulat particuli rement r sistant pour produire un b ton usuel, par contre dans le cas des BHP ou la pate de ciment hydrat et la zone de transition sont suffisamment fortes, les granulats peuvent devenir le maillon faible du b ton. Tout le sable naturel utilis pour fabriquer un BHP doit contenir le moins possible de particules sup rieures 5 mm, lorsque ces particules sont plut t friables, car elles constituent alors le maillon faible du BHP. Le remplacement partiel d'un sable naturel par un sable concass peut pr senter quelques avantages surtout si le sable concass a t fabriqu en utilisant une roche tr s r sistante.

La forme des particules des gros granulats et aussi importante de point de vue rhéologique. Il faut essayer d'utiliser autant que possible des particules arrondies ou cubiques plutôt que des particules plates et allongées. Ce dernier type de particule n'est pas recommandé, car ces particules sont mécaniquement faibles et influencent négativement la maniabilité des bétons ce qui nécessite une augmentation du dosage en superplastifiant pour obtenir la maniabilité visée. Les granulats ont aussi une grande influence sur la compacité du béton qui est le facteur principal pour l'obtention des BHP.

I.4.2.2. Rôle et importance des additions minérales

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 40 μm , mais elle joue un rôle crucial lors de la reprise des contraintes par le béton [8].

L'ajout de particules extrêmement fines (Figure I.4.5.) permet de combler les minuscules vides dans cette zone de transition. La présence du superplastifiant est en outre essentielle pour éviter la formation de conglomerats. Parmi ces additions minérales, on trouve les cendres volantes, le filler calcaire, le quartz broyé, les laitiers de haut fourneau broyés et les fumées de silice. Les laitiers de haut fourneau broyés comme les fumées de silice disposent de propriétés pouzzolanique qui leur permettent de se combiner avec la chaux libre lors de l'hydratation du ciment [18]. Leur dimension, plus faibles que les grains de ciment, contribuent à une baisse de porosité à l'interface pâte-granat restituant ainsi une meilleure cohésion d'ensemble à maturité et par la suite au développement de la résistance

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

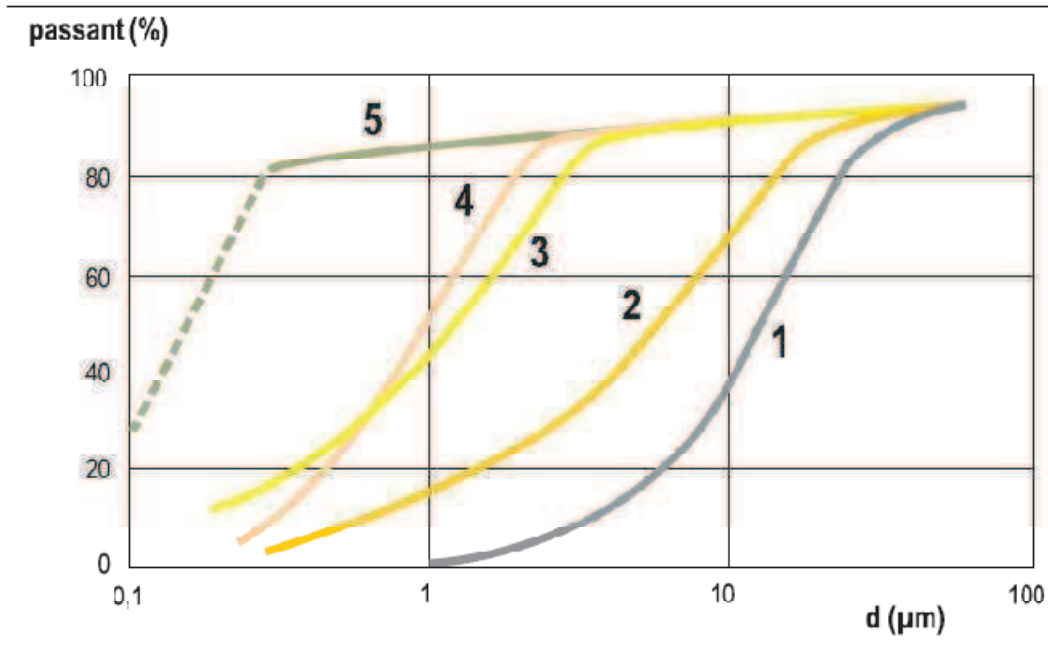


Figure I.4.5. Granulométrie des matières fines.

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 très haute ouvrabilité.

I.4.2.2.1 Effets des additions

On peut résumer l'effet des additions minérales sous forme de fillers sur les propriétés des BHP comme suit [19]:

I.4.2.2.1.a. Effet fillers ou effet de remplissage :

Modification au niveau du squelette granulaire du mélange par une compensation du déficit en particules fines. Le squelette se trouve alors optimisé par remplissage d'une partie de volume des vides.

I.4.2.2.1.b. Effet physique ou de surface :

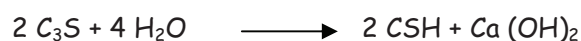
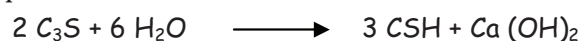
Les hydrates du ciment nouvellement formés pourraient précipiter en partie sur les surfaces minérales offertes par l'addition. En conséquence la couche d'hydrates qui se forme autour d'un grain de ciment anhydre présente une épaisseur réduite ; l'hydratation du cœur anhydre, régie par des phénomènes de diffusion, est alors facilitée. L'addition minérale entraîne donc une meilleure hydratation du ciment à un instant donné.

Ce processus entraîne une apparente accélération d'hydratation. La germination hétérogène reposant sur les phénomènes de surface, il est donc logique que la résistance augmente avec l'augmentation de la finesse des additions.

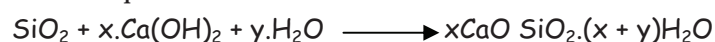
I.4.2.2.1.c. Effet chimique ou pouzzolanique :

La réaction pouzzolanique est une réaction chimique entre la silice et la portlandite. La silice, qui est généralement apportée par une addition minérale de type cendre volante, fumée de silice ou laitier de haut fourneau, réagit avec la portlandite formée lors de l'hydratation du ciment pour donner naissance au CSH secondaire. Les étapes de formation des CSH secondaires sont données ci-dessous [19]:

- formation de la portlandite :



- Réaction pouzzolanique :



I.5. Conclusion :

Depuis longtemps, la relation entre la composition du béton et ces propriétés rhéologiques et mécaniques a intéressé les chercheurs. Ces dernières années, les travaux de recherche ont orienté vers les effets néfastes des excès de l'eau de gâchage, pour la résistance et la durabilité des bétons ainsi que la recherche d'un mélange de très haute compacité, lors de la composition du béton. Ces deux voies de recherche sont abouties à des résultats très intéressants, et la découverte des nouveaux bétons qui ont des performances très élevées et surtout au niveau de la résistance et de la durabilité, se sont les Bétons Hautes Performances (BHP) et très Hautes Performances (BTHP).

Donc, pour obtenir un béton hautes performances ; Deux voies de nature physico-chimique sont distinctes :

- ✘ La défloculation des grains de ciment : grâce à l'utilisation de superplastifiants ce qui conduit à une réduction sensible de la quantité d'eau de gâchage. La sélection du couple liant - superplastifiant est une démarche très importante pour une bonne formulation et l'élaboration des bétons hautes performances.
- ✘ L'amélioration de l'étendu granulaire : par l'utilisation d'additifs ultra fin tel que la fumée de silice, fillers de laitier, cendre volante etc. chimiquement réactifs destinés à remplir les microvides de l'empilement des grains en améliorant ainsi la compacité.

Le BHP a été avant tout conçu pour des applications très particulières, comme les buildings. Il a été différentes reprises mis en œuvre pour la réalisation de gratte-ciel, avec des bétons présentant des résistances de 120 à 130 MPa. Cependant, le BHP peut également être une solution alternative pour les constructions réalisées habituellement en béton conventionnel car il présente des avantages et des performances très intéressantes par rapport au béton traditionnel tel que :

- Durabilité améliorée face aux agressions physico-chimiques,
- Une fluidité très élevée l'état frais,
- Résistance accrue au jeune âge,
- Une résistance finale accrue après durcissement,
- Un module d'élasticité supérieur,
- Un retrait total réduit,

- Permet la réalisation de constructions plus lancées,
- L'aspect visuel des surfaces de béton, tant coulées sur place que préfabriquées.

Le recours judicieux au BHP exige de toute évidence une collaboration très étroite entre le propriétaire, l'architecte, l'ingénieur, l'entrepreneur, la centrale béton et le laboratoire de recherche.

Chapitre II :
Propriétés des Bétons à Hautes
Performances

Chapitre II :

Propriétés des Bétons Hautes Performances

II.1. Introduction

Le béton est un matériau très hétérogène. Cette hétérogénéité est le résultat de la large étendue granulométrique des granulats mais aussi de la diversité des produits d'hydratation, très sensibles aux conditions d'hydratation et de conservation (température, humidité relative). De manière générale le matériau béton, est un composite dans lequel on distingue deux phases : la matrice (pâte de ciment durcie) et les granulats (gravillons et sable). Ainsi que la structure de l'interface pâte/granat (appelée zone de transition). Cette zone d'interface est le point fort des BHP qui se caractérise par une meilleure adhérence entre les granulats et la matrice de ciment. En outre, la résistance de la matrice est pratiquement égale à la résistance des granulats et des fois plus.

Même si la résistance mécanique du BHP est nettement supérieure à celle du béton ordinaire, il y a d'autres paramètres sur lesquels il convient d'attirer l'attention et qui présentent plus d'avantages pour ce matériau tel que la durabilité, la résistance au feu.

II.2. Composition des BHP

Le béton haute résistance, ou plus généralement le béton 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 œuvre. Le superplastifiant et le retardateur doivent être réciproquement compatibles, ainsi qu'avec le ciment utilisé. Étant 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 haute résistance, voire du 52,5R si une résistance initiale très élevée est souhaitée.

Les granulats connus pour les bétons ordinaires conviennent en principe également pour un béton 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. 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. Le diamètre maximal des grains ne peut pas se réduire trop fortement, car, à défaut, la quantité d'eau nécessaire au mouillage 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. 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 m³ de béton. En règle générale, le diamètre maximal des grains ne dépassera pas 16 mm [8].

II.2.1. Différents type de fillers

On peut fabriquer des BHP en utilisant seulement du ciment portland. Cependant, l'addition d'un ou plusieurs ajouts cimentaires lorsqu'ils sont disponibles des prix compétitifs peut être avantageuse, non seulement du point de vue économique, mais aussi du point de vue rhéologique et surtout du point de vue résistance [20]. La plus part des ajouts cimentaires contiennent une forme de silice vitreuse réactive qui, en présence d'eau, peut se combiner avec la chaux pour former un silicate de calcium hydraté du même type que celui qui est formé durant l'hydratation du ciment portland [21]. Cette réaction est généralement lente et peut se développer après plusieurs semaines. Cependant, plus l'ajout est fin et vitreux plus sa réaction avec la chaux est rapide. Si on utilise 20 - 30 % d'ajout, théoriquement, on pourrait faire réagir toute la chaux produite par l'hydratation du ciment portland pour la transformer en CSH. Cependant, les conditions dans lesquelles on utilise le b ton sont très différentes de cette situation idéale et la réaction pouzzolanique n'est jamais complète [1].

Ces matériaux sont des coproduits industriels, leur composition chimique est en général plus large que celle du ciment portland, ce qui explique la grandeur des surfaces que ces zones couvrent dans le diagramme ternaire : $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$ [22].

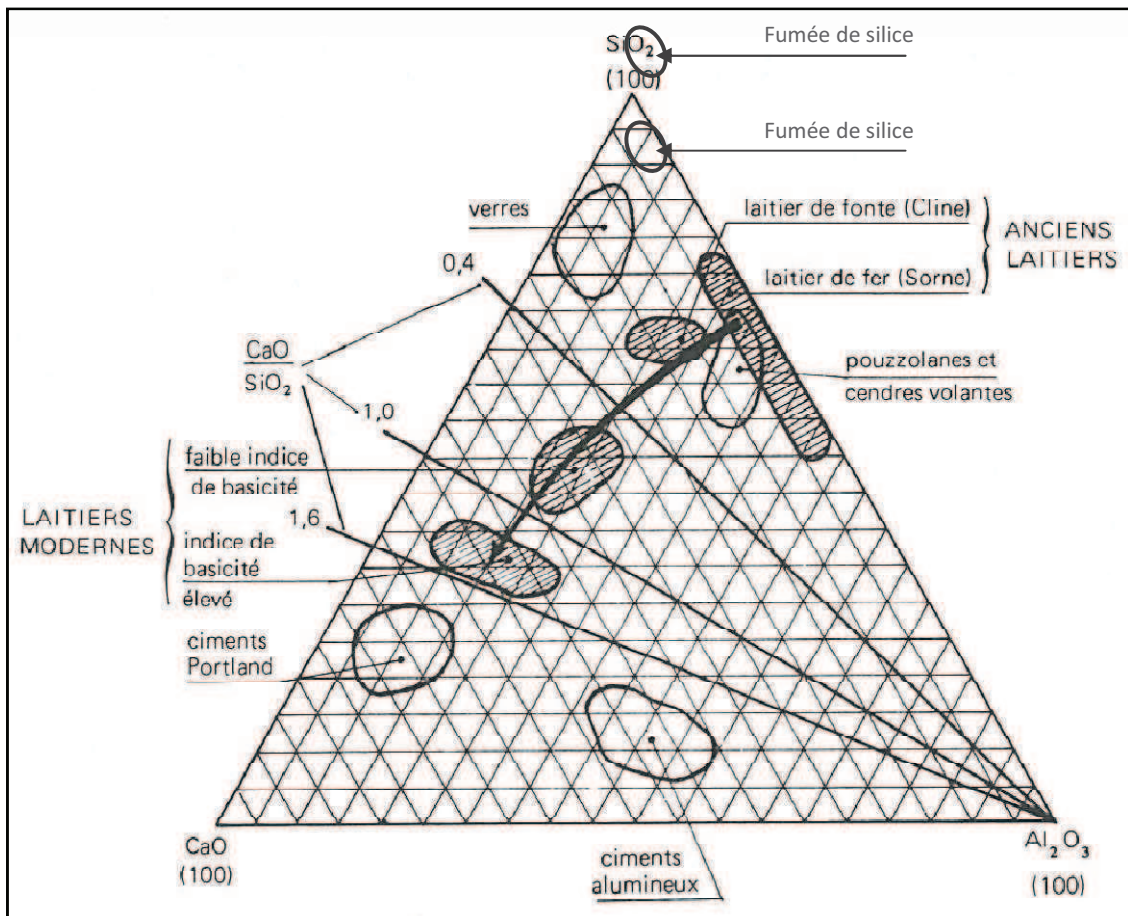


Figure II.2. Le diagramme de Keil (Evaluation des ajouts cimentaires dans le système ternaire : $CaO + SiO_2 + Al_2O_3 = 100$)

II.2.1.1. La fumée de silice :

La fumée de silice est un coproduit de la fabrication du silicium et de ses alliages. Les températures de travail très élevées (1500 – 3000 °C) au cours de l'élaboration du Silicium, provoquent d'importants dégagements de fumée qui sont captés en surface afin de protéger l'environnement [8]. Suivant la composition des alliages, les produits secondaires ajoutés aux ingrédients principaux et les méthodes de fabrication les propriétés des fumées de silice sont assez diverses.

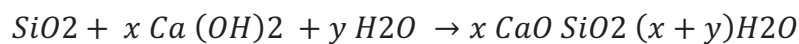
D'un point de vue chimique la fumée de silice est essentiellement composée de silice (plus de 90 %). De point de vue structural, elle est essentiellement composée de silice vitreuse. Et du point de vue morphologique, les particules de fumée de silice se présentent sous forme de sphères ayant des diamètres compris entre 0,1 µm et 1 ou 2 µm. La dimension moyenne de ces sphères est 100 fois plus faible que celle d'une particule de ciment moyen [23].

La densité de la fumée de silice est d'environ 2,2, une valeur usuelle pour la silice vitreuse. La surface spécifique de la fumée de silice ne peut pas être mesurée de la même façon que celle du ciment portland à cause de son extrême finesse : elle doit être déterminée par adsorption d'azote dans la documentation on trouve les valeurs entre 15000 et 25000 m²/kg, par contre 1500 m²/kg pour un ciment portland.

Ces caractéristiques très particulières (très forte teneur en silice, état amorphe, extrême finesse) ont fait de la fumée de silice une pouzzolane très active

Les effets bénéfiques de la fumée de silice sur la microstructure et les propriétés mécaniques du béton sont dus essentiellement à la rapidité à laquelle la réaction pouzzolanique se développe, mais aussi à un effet physique particulier aux particules de fumée de silice qui est l'effet filler. En outre, la fumée de silice a un effet non négligeable sur la germination des grains de portlandite Ca(OH)₂

Les fumées de silice réagissent pouzzolaniquement avec la chaux libre par l'hydratation du ciment pour former des silicates de calcium hydratés (C-S-H), selon la réaction pouzzolanique suivante [1]:



Cet effet réduit la taille des pores, d'où une diminution de la porosité qui améliore les propriétés mécaniques du ciment.

Les fumées de silice grâce à leur morphologie offrent en outre l'avantage du béton frais. Elles n'interfèrent pas sur l'arrangement géométrique des grains de ciment dans la

suspension, les grains de silice peuvent venir se placer dans les espaces entre les grains de ciment sans modifier la disposition géométrique.

Mais en pratique, pour que ces deux effets (effet fillers et effet pouzzolanique) puissent se développer, il est nécessaire d'ajouter un fluidifiant au mélange.

L'ajout de fumée de silice entraîne une amélioration des résistances mécaniques en compression. Le dosage optimal en fumée de silice pour l'obtention de hautes résistances se situerait aux alentours de 10% de fumée de silice par rapport au poids de ciment [24].

Les particules de fumée de silice peuvent avoir un effet fluidifiant sur les bétons ayant un très faible rapport E/C [25]. Cet effet n'est pas bien expliqué par les chercheurs : certains voient que l'action des petites sphères de fumée de silice est comme celle des billes d'un roulement, d'autres pensent que les particules de fumée de silice déplacent une certaine quantité d'eau que l'on retrouverait au sein des grains de ciment flocculé. La combinaison de ces deux modes d'action de la fumée de silice entraîne la formation d'une microstructure très dense et d'une très bonne adhérence entre les granulats et la pâte de ciment hydratée [1].

II.2.1.2. Cendres volante :

Les cendres volantes sont des particules très fines récupérées dans les dépoussiéreurs de cheminée des centrales thermiques fonctionnant au charbon pulvérisé. Ils peuvent avoir différentes compositions chimiques et différentes compositions de phase, ils peuvent être classés en quelques grandes familles, parmi ces grandes familles on trouve : les cendres silico-alumineuses, les cendres silico-calciques et les cendres sulfocalciques qui ont une très forte teneur en calcium et en soufre. Ce n'est pas toujours facile d'inclure une cendre volante dans une de ces classes, et pouvoir prédire son comportement pouzzolanique [26].

Les particules de cendres volantes peuvent avoir des formes très différentes les unes aux autres. Elles peuvent avoir une forme sphérique, avec une distribution granulométrique semblable à celle du ciment portland, elles peuvent contenir des sphères creuses, comme elles peuvent contenir seulement des particules angulaires leurs dimensions pouvant descendre

jusqu' 0,15 μm , dans certains cas [1]. L' tendue granulaire des cendres volantes varie de 0,5 μm 4 μm selon la nature du produit, la masse volumique moyenne est d' environ 1,35 m^2/g .

Pour d velopper une r action pouzzolanique, la cendre volante doit contenir une quantit non n gligeable de mat riaux vitreux, de cet effet, il faut porter beaucoup d' attention et en se basant pas sur une g n ralisation de leurs efficacit quand elles sont utilis es comme ajouts dans les BHP.

II.2.1.3. Les laitiers de haut fourneau

Selon la fili re consid r e, le laitier de Haut Fourneau est un co-produit d coulant de la transformation, dans le Haut-Fourneau, soit des oxydes de fer en "Fonte", soit des oxydes de mangan se en alliage "Ferro-mangan se"[23]. Ce laitier est une roche liquide (1500°C environ) compos e des parties non m talliques du minerai combin es la chaux [25]. Dans les hauts fourneaux modernes, chaque tonne de fonte g n re de l'ordre de 280 340 kg de laitier [26].

Le traitement employ pour l'obtention des laitiers granul et le refroidissement rapide ; Le proc d consiste refroidir brutalement le laitier en fusion avec de l'eau. Le produit obtenu se pr sente sous la forme d'un sable 0/4 mm. Lors de cette trempe, le laitier acquiert une structure. L' volution normale du refroidissement ayant t stopp e, le laitier conserve une nergie latente qui constitue son potentiel de prise hydraulique. Il existe deux types de granulation, en rigole et en pot. C'est le proc d utilis pour la granulation du laitier d'EL-HADJAR.

II.2.1.3.a. Description physico-chimique de laitiers granul s

Les laitiers granul s de hauts fourneaux sont des sables de couleur jaune/beige et pr sentant g n ralement une granulom trie 0/8 mm. Ils peuvent tre broy s pour augmenter leur teneur en fines (l ments inf rieurs 0.080 mm) donc leurs r activit s. En r sulte un sable 0/3 0/4 mm, appel laitier pr broy . La teneur en fines requise est de 10 12 % en moyenne.

Les principaux composants chimiques de ces laitiers sont la chaux (CaO, 40% environ), la silice (SiO₂, 35% environ), l'alumine (Al₂O₃, 11% environ) et la magnésie (MgO, 8% environ).

La caractéristique la plus marquante de ces sables est leur réactivité ou "hydraulicité", c'est-à-dire leur capacité à faire prise en présence d'eau et d'un agent basique (activant). Cette prise hydraulique, très peu exothermique, se fait de façon lente et permet d'atteindre de hautes performances sur une longue durée [25].

Le laitier granulé, présente une structure vitreuse et désordonnée. Cette forme vitreuse est instable car le laitier (du fait de la trempe) a gardé une énergie de cristallisation non dissipée qui va lui permettre d'être hydraulique. Sous l'effet d'une activation basique, le laitier vitrifié va donc évoluer vers son plus bas niveau d'énergie en formant des produits d'hydratation solides. C'est la formation de ces hydrates qui constitue la prise et le durcissement du laitier et qui lui confère la caractéristique de liant hydraulique [1].

II.2.1.3.b. Composition minéralogique potentielle du laitier

La composition minéralogique potentielle du laitier a été calculée à partir des principaux oxydes (CaO, MgO, SiO₂, Al₂O₃) par analyse chimique. Les phases cristallines susceptibles d'apparaître au cours de la dévitrification sont la melilite qui est une solution solide de la gehlénite (C₂AS) et de l'akermanite (C₂MS₂), la pseudowollastonite (CS), la rankinite (C₃S₂), la merwinite (C₃MS₂), le silicate bicalcique (C₂S), le diopside (CMS₂), la montecellite (CMS) et la forsterite (MS₂). Les résultats des calculs chimiques conduisent à conclure que les laitiers de haut fourneau utilisés en cimenteries sont potentiellement constitués de (C₃S₂, C₂AS et C₂MS₂) pour 95% et de (CS ou C₃MS₂ ou C₂S) pour 5% [27].

II.2.1.3.c. Classification des laitiers

Le diagramme de Keil (diagramme triangulaire représentant le système ternaire chaux-silice-alumine) permet de situer le laitier de haut fourneau par rapport à d'autres liants utilisés en béton. Ce diagramme montre que les laitiers ont une composition relativement proche de celle du ciment Portland, même si celui-ci ne nécessite qu'un apport d'eau pour déclencher son hydraulicité [25].

Les laitiers sont représentés par le produit C.A (dans lequel C symbolise la teneur en CaO et A la teneur en Al_2O_3) la composition chimique du laitier se situe dans une zone précise du diagramme ternaire CaO-SiO₂-Al₂O₃ (Le diagramme de Keil) (figure II.1). En moyenne, un laitier contient 35 % de SiO₂, 40 % de CaO, 8 % de MgO et 12 % de Al₂O₃. Selon la valeur de leur rapport CaO/SiO₂ les laitiers peuvent être divisés en laitiers acides (CaO/SiO₂ < 1) et en laitiers basiques (CaO/SiO₂ > 1) [26]. Trois types de laitier sont ainsi définis:

Type H : $425 \leq C.A < 550$

Type T : $C.A > 550$

Type A : $C.A < 425$

II.2.1.3.d. L'hydraulicité du laitier granulé (r activit hydraulique)

L'hydraulicité du laitier est essentiellement appréciée à partir de critères chimiques (indice de basicité) et de critères minéralogiques.

L'hydraulicité du laitier (sa r activit hydraulique) est d'abord liée à son taux de vitrification, c'est-à-dire à l'importance de la partie vitreuse par rapport à la partie cristalline. Ce taux est d'autant plus élevé que la trempe aura été plus efficace.

L'hydraulicité du laitier dépend également de sa composition chimique qui joue d'abord un rôle sur la structure du laitier (le degré de polymérisation de la silice dépend de l'état de liaison des composants majeurs – ions calcium, magnésium, aluminium- qui peuvent intervenir comme formateurs ou modificateurs du réseau vitreux, ainsi que des éléments mineurs tels que manganèse, titane, soufre) donc sur sa grande stabilité et sa grande r activit .

Mais l'influence de la composition chimique sur les propriétés hydrauliques du laitier apparaît plus clairement que celle de la structure.

Si l'on peut considérer dans une approche grossière qu'une basicité élevée est prioritairement favorable, les modules de basicité les plus couramment utilisés :

$$P_1 = \frac{C}{S} \quad , \quad P_2 = \frac{C+M}{S} \quad , \quad P_3 = \frac{C+M}{S+A}$$

Ne sont pas très valables pour représenter l'hydraulicité des laitiers.

De nombreux chercheurs ont proposé des indices chimiques d'hydraulicité pour les laitiers granulaires de hauts fourneaux. Le domaine d'application de ces indices est limité, en effet les variations des différents constituants

II.2.1.3.e. Activation du laitier granulé

L'activation classique du laitier consiste à activer le laitier par un agent basique et cela par l'ajout de chaux sous forme de poudre, ou à partir du ciment Portland (activation calcique) ou par l'ajout du gypse (activation sulfato-calcique (gypsonat)). Ce type d'activation est connu depuis fort longtemps. À partir des années 70, l'activation alcaline du laitier a bénéficié de plusieurs études et publications, et a connu plusieurs applications [28].

L'activation alcaline se réfère principalement à l'activation par :

- Les alcalis caustiques (NaOH, KOH, ...).
- Les sels non siliceux (R_2CO_3 , R_2SO_3 , ...).
- Les sels siliceux (R_2O , m) SiO_2 . (O R représente Na, K et Li) [29].

Les facteurs qui influent la réactivité des laitiers sont les suivants :

- (1) Le degré de vitrification (teneur en verre) obtenu au cours de la trempe qui dépend de la température du matériau en fusion à la sortie du haut fourneau, de sa composition chimique et de la viscosité du laitier. Le degré de vitrification du laitier est assez difficile à quantifier, et les méthodes pour quantifier la teneur en verre donnent des résultats qui ne concordent pas toujours,

- (2) La composition chimique est un paramètre très important, qui influence le degré de vitrification du laitier au moment de la trempe, mais aussi sa solubilité et ainsi la réactivité du verre au cours de son hydratation. La réactivité du laitier augmente avec sa basicité, le contenu en acide soluble SiO_2 et Al_2O_3 et le contenu en CaO ,
- (3) La composition minéralogique : différentes études ont été faites sur l'effet de la composition minéralogique de la phase cristallisée du laitier trempé sur sa réactivité, des résultats controversés ont été obtenus et cette relation n'a pas été établie de façon claire.
- (4) La finesse de broyage et la distribution granulométrique : la réactivité d'un laitier est proportionnelle à sa surface exposée à l'eau. Les particules de laitier plus petites que $10\ \mu\text{m}$ contribuent aux résistances au jeune âge (jusqu'à 28 jours), celles dont le diamètre est compris entre 10 et $45\ \mu\text{m}$ contribuent aux résistances ultérieures et les particules plus grosses que $45\ \mu\text{m}$ présenteraient une faible réactivité.
- (5) L'activation du laitier par différents activateurs : le laitier seul n'a pas de propriétés hydrauliques; mélange avec l'eau il ne durcit pas et un gel acide imperméable se forme sur sa surface qui bloque la dissolution du laitier. Pour développer ses propriétés liantes, le laitier a besoin d'un activateur ou d'un catalyseur qui réagit avec cette couche pour former une couche plus perméable qui va permettre l'hydratation du laitier.

Les activateurs ne sont pas de simples catalyseurs permettant le déroulement des réactions, mais également des réactifs entrant dans les réactions de la formation des hydrates [30]. Ils ont comme rôle de :

- Accroître la solubilité des composants du laitier.
- Favoriser la formation de quelques hydrates.
- Favoriser la formation du réseau de la structure des hydrates [31].

Les bénéfices qui pourraient être tirés en utilisant les laitiers sont multiples :

- Ecologiques et environnementaux (utilisation d'un sous-produit et la diminution de l'émission de CO_2).
- Économiques (le coût du laitier est le coût de son transport ; l'économie du coût du combustible pour la production de la même quantité de ciment).
- Techniques (amélioration des propriétés mécaniques des bétons, durabilité largement améliorée) [32].

II.2.1.3.f. Emploi du laitier granulé dans le béton :

La norme XP P 18-305 « Béton prêt à l'emploi » autorise l'utilisation du laitier granulé broyé de hauts fourneaux (au sens de la norme P 18-506) comme addition cimentaire pour la confection des bétons [33].

Le laitier granulé broyé permet de modifier certaines propriétés du béton, principalement le comportement aux milieux agressifs et aux alcalis-réactions, la diminution de la chaleur d'hydratation et de la porosité, mais il diminue la maniabilité du béton [34]. Ces modifications dépendront du taux d'addition et de la finesse de mouture du laitier. Il doit répondre aux spécifications détaillées dans la norme NF P 18-506[24].

II.3. Effets de la température sur le béton en cours de durcissement

En raison de la teneur élevée en ciment, la production de chaleur, inhérente au processus de l'hydratation, s'intensifie dans le béton hautes performances par rapport au béton ordinaire. Ce phénomène ne peut induire, même dans des éléments qui ne pourraient pas être spontanément qualifiés de 'massifs', des contraintes thermiques relativement élevées. Même si le béton haute performance 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 ce phénomène une attention suffisante. Des mesures destinées à exclure au maximum le retrait empêché s'imposent. Les calculs des contraintes en fonction du développement calorifique escompté et des propriétés du béton en phase de durcissement sont souhaitables [35].

II.4. Comportement mécanique des BHP

II.4.1. Comportement en compression

Lorsqu'un béton ordinaire 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 toute la matrice de mortier, entraînant l'apparition de fissures dans le mortier. En définitive, le béton contiendra sous l'effet de tout un réseau de fissures ininterrompues dans le mortier, alors que les granulats ne subiront aucun dommage (figure II.4.1).

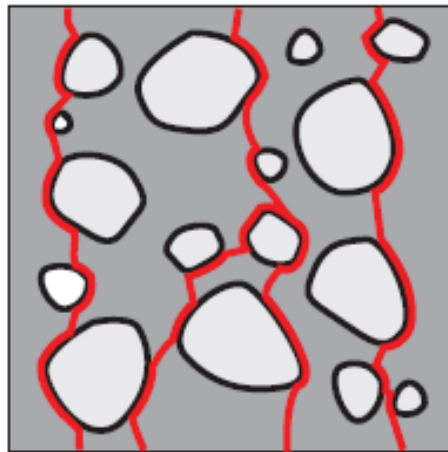


Figure II.4.1. Béton ordinaire : fissures d'adhérence et fissures dans le mortier.

Le béton 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 et des fois plus. 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 (figure II.4.2).

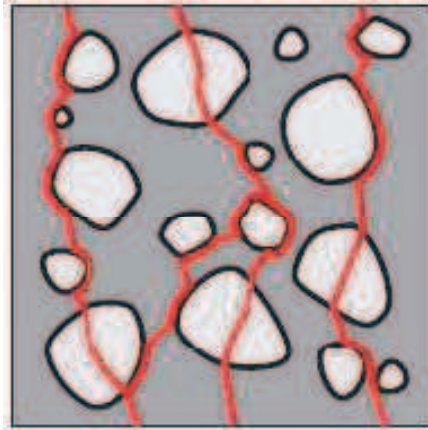


Figure II.4.2 – Béton hautes performances :
les granulats sont galement fissurés.

Sur le diagramme contrainte-déformation (figure II.4.3), ce phénomène ne s'exprime par un comportement légèrement plus linéaire par rapport au béton ordinaire. De même, le béton 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.

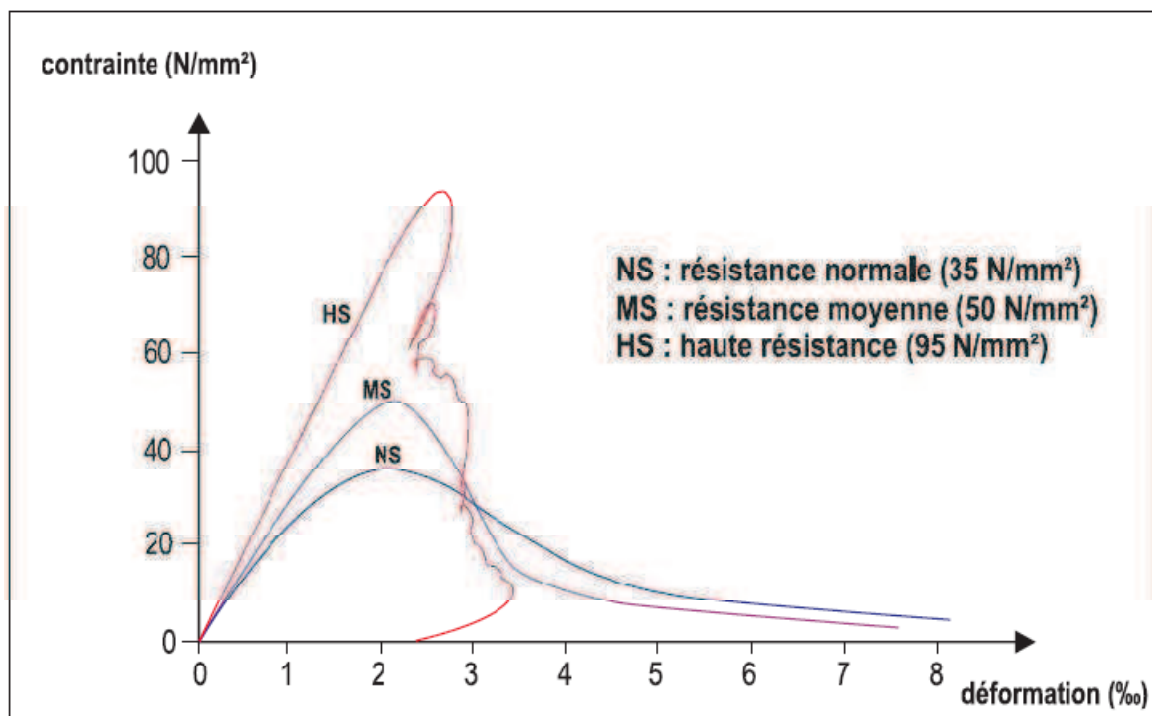


Figure II.4.3. Diagramme contraintes-déformation.

II.4.2. 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 ordinaire, différentes formules sont appliquées. Dans la norme EN 1992-1-1:2004, une formule différente est proposée pour le béton haute résistance par rapport au béton ordinaire (voir tableau I.1).

II.4.3. 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 hautes performances est toujours lié à la résistance à la compression (tableau I.1).

II.5. Dimensionnement dimensionnelles et volumique

II.5.1. Retrait

Le béton hautes performances est comme le béton ordinaire, il est soumis à un retrait plastique, à un retrait endogène (par auto-dessiccation) et à un retrait de dessiccation.

II.5.1.1. 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 venant se dilater, 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 ordinaire, caractérisé par un excédent d'eau, le retrait endogène demeure limité à environ 100×10^{-6} . En ce qui concerne le béton hautes

performances, où la quantité d'eau disponible est nettement moins importante, le ciment attire lui-même cette faible quantité d'eau. Les pores s'assurant progressivement sont soumis à des forces capillaires en augmentation constante, permettant au retrait endogène d'atteindre des valeurs clairement supérieures. Plusieurs valeurs sont présentées au tableau II.5.1. Il est manifeste que le retrait endogène augmente avec l'accroissement de la résistance et s'effectue essentiellement à court terme.

Étant 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 précieusement. De toute évidence, le retrait endogène du béton hautes performances requiert la nécessaire attention. Conjointement 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.

II.5.1.2. 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 ne 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 hautes performances. Par rapport au béton ordinaire, il sera dès lors moins sujet au phénomène du retrait de dessiccation. Le tableau II.5.1 présente un nombre de valeurs pour différentes humidités relatives. 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 à 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 est aussi très faible d'autant que la teneur en laitier des liantes est

importante, ce retrait est moins important par rapport au CPA [5]. Le retrait de dessiccation peut toujours se poursuivre, même plus long terme. L'ampleur de ce retrait peut être sensiblement influencée par des mesures de cure énergiques.

Tableau II.5.1– Retrait de dessiccation(*) et retrait endogène (***) en fonction de f_{ck} et de l'humidité relative(HR) suivant la norme EN 1992-1-1 :2004.

f_{ck}		20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	80	90
retrait endogène (10^{-6})		25	38	50	63	75	88	100	113	125	150	175	200
HR = 50 %	retrait de dessiccation (10^{-6})	746	706	668	632	598	566	536	507	480	430	385	345
	retrait total (10^{-6})	771	743	718	695	673	654	636	620	605	580	560	545
HR = 60 %	retrait de dessiccation (10^{-6})	668	632	598	566	536	507	480	455	301	385	345	309
	retrait total (10^{-6})	693	670	648	629	611	595	580	567	426	535	520	509
HR = 70 %	retrait de dessiccation (10^{-6})	560	530	501	475	449	425	402	381	361	323	289	259
	retrait total (10^{-6})	585	567	551	537	524	513	502	493	486	473	464	459
HR = 80 %	retrait de dessiccation (10^{-6})	416	394	372	353	334	316	299	283	268	240	215	193
	retrait total (10^{-6})	441	431	422	415	409	403	399	395	393	390	390	393
HR = 90 %	retrait de dessiccation (10^{-6})	231	219	207	196	185	175	166	157	149	133	119	107
	retrait total (10^{-6})	256	256	257	258	260	263	266	270	274	283	294	307

(*) hypothèses pour le calcul : épaisseur fictive = 100 mm, ciment rapide (R), à long terme (***) à long terme

II.5.2. Le fluage

Le fluage du béton hautes performances est fréquemment inférieur au fluage observé pour un béton ordinaire. 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 est de même en ce qui concerne le béton ordinaire.

La norme EN 1992-1-1:2004 définit les formules nécessaires au calcul du fluage ; le tableau II.5.2 mentionne quelques résultats. 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 l'esprit que les contraintes observées dans le BHP sont nettement supérieures à celles inhérentes au béton ordinaire. Les déformations immédiates peuvent devenir aussi importantes en fonction 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

d formations et des fl ches peut devenir le facteur d terminant du projet, plut t que la portance proprement dite. Le mat riau ne peut pas toujours tre utilis de mani re optimale.

Tableau II.5.2 – Coefficient de fluage(*) en fonction de f_{ck} et de l'humidit relative (HR) et du d lai de mise en charge suivant la NBN EN 1992-1-1.

f_{ck}		20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	80	90
HR = 50 %	mise en charge après 5 jours	3,91	3,60	3,21	2,82	2,52	2,27	2,08	1,91	1,77	1,55	1,38	1,25
	10 jours	3,62	3,34	2,97	2,61	2,33	2,11	1,92	1,77	1,64	1,44	1,28	1,16
	15 jours	3,44	3,17	2,82	2,48	2,21	2,00	1,83	1,68	1,56	1,36	1,22	1,10
	20 jours	3,30	3,04	2,71	2,38	2,12	1,92	1,75	1,61	1,50	1,31	1,17	1,05
	30 jours	3,10	2,85	2,54	2,23	1,99	1,80	1,64	1,51	1,40	1,23	1,09	0,99
	50 jours	2,84	2,62	2,33	2,05	1,83	1,65	1,51	1,39	1,29	1,13	1,00	0,91
HR = 80 %	mise en charge après 5 jours	2,69	2,48	2,24	2,00	1,82	1,66	1,54	1,43	1,34	1,20	1,08	0,99
	10 jours	2,50	2,30	2,07	1,86	1,68	1,54	1,43	1,33	1,25	1,11	1,00	0,92
	15 jours	2,37	2,18	1,97	1,76	1,60	1,46	1,35	1,26	1,18	1,05	0,95	0,87
	20 jours	2,27	2,09	1,89	1,69	1,53	1,40	1,30	1,21	1,13	1,01	0,91	0,845
	30 jours	2,13	1,97	1,77	1,59	1,44	1,32	1,22	1,14	1,06	0,95	0,86	0,78
	50 jours	1,96	1,80	1,62	1,45	1,32	1,21	1,12	1,04	0,98	0,87	0,79	0,72

(*) hypothèses pour le calcul : épaisseur fictive = 100 mm, ciment rapide (R), à long terme

II.6. Durabilit

Etant donn la structure plus dense des pores du b ton de hautes performances, ce mat riau affiche un meilleur comportement face aux m canismes d'agression. La plupart des processus de d gradation sont en effet caus s par l'entr e de substances agressives, telles que des chlorures, du dioxyde de carbone, des acides,...etc. Si la p n tration de ces substances dans le b ton est entrav e, comme dans le cas du BHP, les processus de d gradation y aff rant ne pourront bien videmment se produire que bien plus tard. Quoi qu'il en soit, il convient toujours de veiller la puret des l ments constitutifs du b ton, afin d'viter toute agression par des m canismes internes (pr sence de sulfates, d'alcalis, de granulats r actifs, ...etc).

Toutefois, la dur e d'utilisation d'une construction est en grande partie galement d termin e par les conditions d'ex cution. Une allusion au risque de fissuration pr matur e r sultant des effets thermiques et du retrait (principalement endog ne) est d j faite ci-dessus. La pr sence de telles fissures peut influencer sensiblement la durabilit de la construction. Dans ce cadre, il faut signaler que Les laitiers offrent une bonne r sistance aux agressions

chimiques. Les performances des liants contenant du laitier sont, moyen et long terme, gales celles des ciments portland [5].

II.7. R sistance au feu

M me si la durabilit du BHP est en r gle g n rale nettement sup rieur e celle du b ton ordinaire, la r sistance au feu est cependant un l ment sur lequel il convient d'attirer l'attention. En raison de la structure tr s dense des pores, la pression de vapeur, qui appara t l'int rieur du b ton des temp ratures exc dant 100 °C, peut difficilement tre r duite. La vapeur ne peut en effet pas tre rapidement vacu e l'ext rieur, en raison de la structure tr s dense du mat riau. Par rapport au b ton conventionnel, la r sistance du b ton haute r sistance diminuera plus rapidement si la temp rature est sup rieur e 100 °C. Les renseignements propos du facteur de r duction appliquer figurent dans la norme NBN EN 1992-1-2 (voir g alement figure II.7). En raison des pressions de vapeur accumul es, il convient g alement d'examiner les risques potentiels d' clatement du b ton. En ce qui concerne le b ton des classes de r sistance C 55/67 C 80/95, les r gles inh rentes au b ton conventionnel suffisent pour viter les clatements, pour autant que la teneur en fum es de silice soit inf rieur e 6 % de la masse de ciment. En cas de teneurs sup rieur es en fum es de silice et en cas de classe de r sistance C 90/105, il sera n cessaire de prendre des mesures particuli res, telles que le m lange d'au moins 2 kg/m³ de fibres de polypropyl ne. En cas de temp ratures lev es, ces fibres fondront, ce qui laissera de petits canaux ouverts via lesquels les pressions de vapeur pourront tre dissip es plus rapidement.

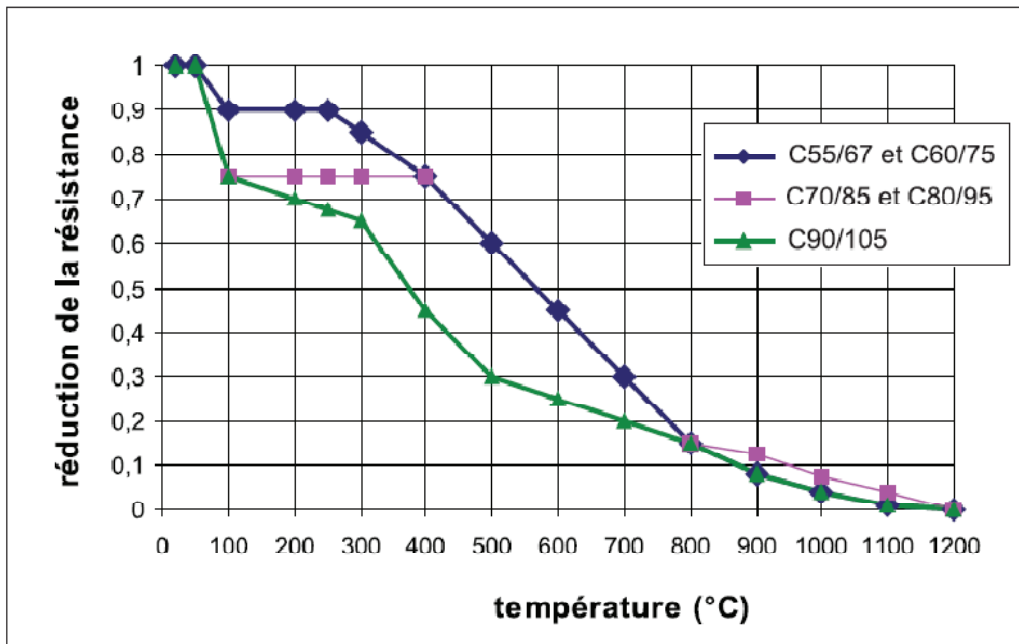


Figure II.7 – Diagramme de la résistance à la compression des bétons haute résistance selon l'EC2 Feu.

II.8. Microstructure

Le béton durci est un matériau très hétérogène. Cette hétérogénéité est le résultat de la large étendue granulométrique des granulats mais aussi de la diversité des produits d'hydratation, très sensibles aux conditions d'hydratation et de conservation (température, humidité relative). De manière plus générale le matériau béton, est un composite dans lequel on distingue deux phases : la matrice (pâte de ciment durcie) et les granulats (gravillons et sable). [35] ainsi que la structure de l'interface pâte/granat (appelée zone de transition). Les principaux composants du ciment Portland sont les suivantes :

60-65% - $C_3S = 3CaO-SiO_2$ - silicate tricalcique ($Ca_3[SiO_4]O$ - alite)

20-25% - $C_2S = 2CaO-SiO_2$ - silicate bicalcique ($\beta Ca_2[SiO_4]$ - belite)

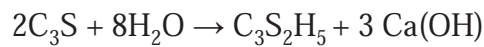
8-12% - $C_3A = 3CaO-Al_2O_3$ - aluminate tricalcique ($C_3[Al_2O_6]$ - celite)

8-10% - $C_4AF = 4CaO-Al_2O_3-Fe_2O_3$ - aluminoferrite tricalcique

Ces constituants du ciment présentent des réactions hydrauliques, c'est-à-dire qu'ils se transforment en présence d'eau en hydrates qui précipitent et s'organisent en une structure mécaniquement résistante. Les principaux hydrates simples formés sont les suivants: silicate de calcium hydraté CSH, portlandite Ca(OH)_2 (ou hydroxyde de calcium), aluminates de calcium hydraté, ettringite ($3\text{CaO}\cdot\text{A}_2\text{O}_3\cdot3\text{CaSO}_4\cdot32\text{H}_2\text{O}$) etc. La réaction principale de l'hydratation du ciment peut être présentée de façon simplifiée [36]:



Si on prend pour les CSH, un rapport molaire C/S=1,5 cette équation s'écrit :



Pour un ciment donné, les quantités de CSH et de Ca(OH)_2 formées dépendent essentiellement du rapport E/C et du temps de réaction. En moyenne, une pâte de ciment durcie ordinaire contient 50-70% de CSH et 25-27% de Ca(OH)_2 . Dans le cas des pâtes de ciment haute performance, la quantité de phase CSH est encore plus importante. Ceci est favorable à l'augmentation de la résistance. En effet, la portlandite n'a que peu d'importance du point de vue de la résistance mécanique, ses cristaux de taille importante sont susceptibles de limiter la résistance en compression du béton. De plus, la portlandite est facilement soluble dans l'eau ce qui diminue la durabilité du béton. Afin d'éliminer partiellement la portlandite, la fumée de silice ou autres adjuvants minéraux tels que le laitier de haut fourneau peuvent être ajoutés. Ces additions, du fait de la taille de ses grains, inférieure à celle de grains de ciment augmentent également la compacité de la matrice. De plus par leurs réactions pouzzolanique consomment de la portlandite et forment le gel CSH. Ceci permet ainsi d'augmenter les performances (résistance, durabilité ...etc) du béton [36].

Dans les bétons ordinaires, l'interface pâte granulats, appelée aussi l'auréole de transition, est plus poreuse et mieux cristallisée que la matrice. [37]. Autour des granulats, il y a une zone de pâte hydratée particulière. Sa première couche, plus proche de la surface des granulats, très compacte est composée de cristaux de portlandite orientés perpendiculairement aux granulats [38]. La deuxième couche d'épaisseur 0,5 μm , est composée de feuillets de CSH. Après cette couche se trouve la zone de forte porosité avec des grains de grande dimension et de faible cohésion et par conséquent de moindre résistance mécanique que la

matrice. Cette zone représente le point faible des bétons soumis aux sollicitations mécaniques et les premières fissures contournent les granulats et passent travers la matrice (figure II.8.1).

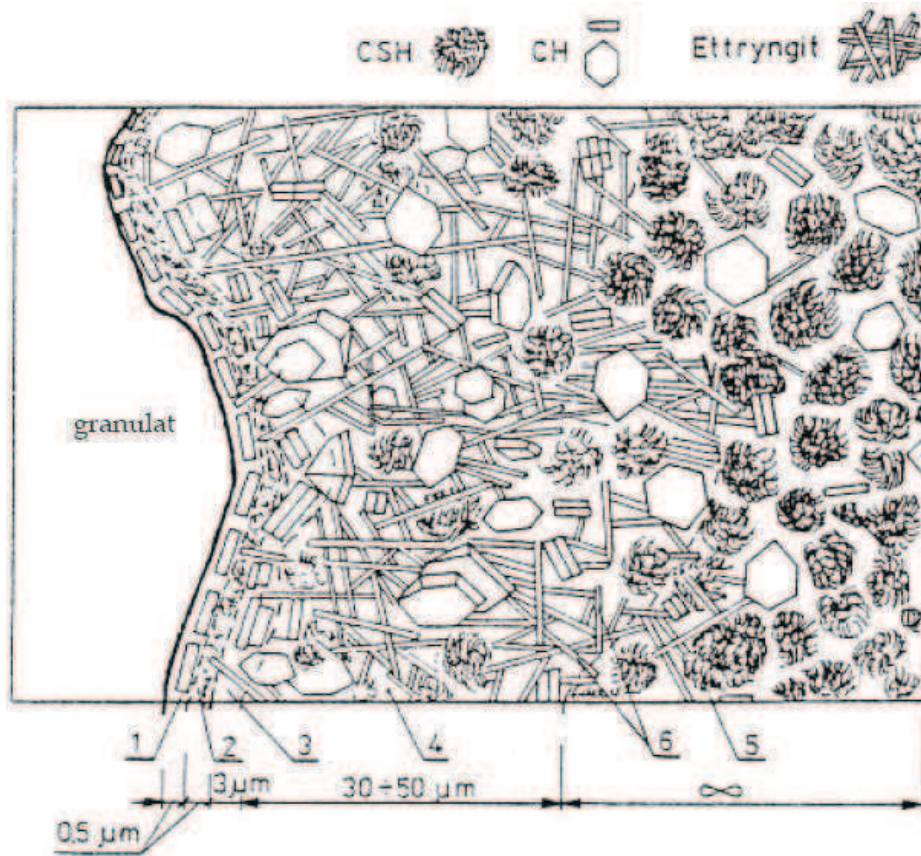


Figure II.8.1 : Modèle de la morphologie de l'auréole de transition d'un BO : 1- couche continue de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, 2 - couche de CSH, 3 - couche de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, 4 - zone poreuse, 5 - pâte de ciment hors de l'auréole de transition, 6 - ettringite, [34] .

La qualité de la zone de transition dépend fortement de la nature des granulats. Nous distinguons les granulats réactifs et neutres en contact avec la pâte de ciment. Les granulats calcaire (reactifs) présentent les plus fortes liaisons avec la pâte de ciment du fait des réactions chimiques qui se produisent au cours du temps et augmentent les forces d'adhésion [40]. Contrairement aux granulats du type quartz, qui sont neutres par rapport à la pâte de ciment. Par ailleurs les liaisons entre la pâte et granulats concassés sont plus fortes qu'avec des granulats roulés [11].

Pour les b tons hautes performances, la r duction de la porosit et de l' paisseur de cette zone est obtenu gr ce l'ajout des additions min rales. En comparant avec le BO, o l'aur ole de transition est d'environ 50 μm , son paisseur pour les BHP est limit e 12 μm . Certaines sources signalent l'absence de la zone de contact dans les b tons haute performance (Figure II.8.2) o l'ajout de la fum e de silice permet la consommation de la portlandite, en densifiant la structure du mat riau, tout en am liorant ses performances m caniques [41]. La qualit e de la zone de transition d pend aussi du rapport E/C. Lorsque E/C augmente, cette zone devient plus paisse, plus poreuse et par cons quent moins r sistante.

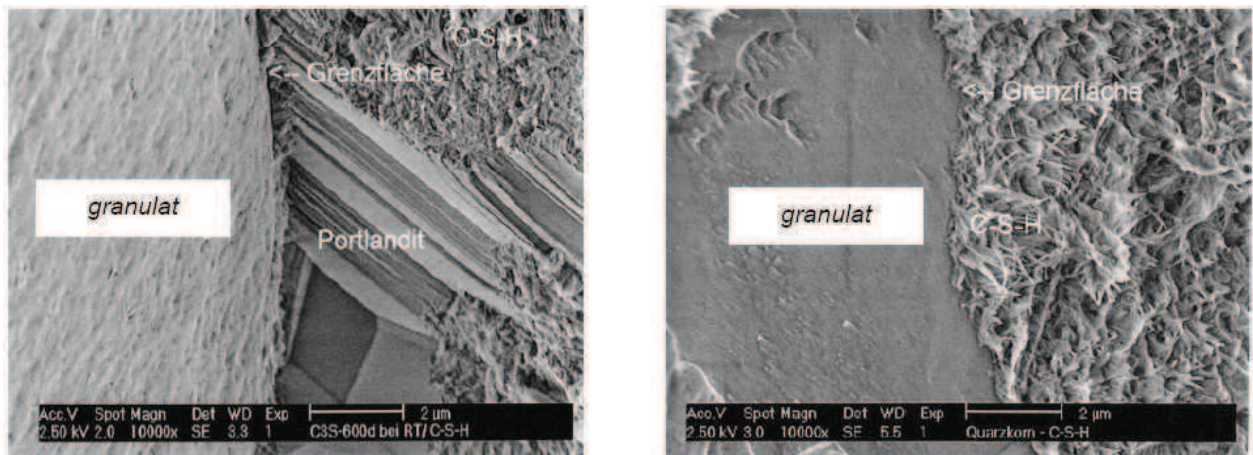


Figure II.8.2. Microstructure de la zone de contact entre la p te et le granulat [36].

- a) b ton sans fum e de silice ; les cristaux de portlandite dans la zone de transition sont orientes perpendiculairement aux granulats,
- b) b ton avec fum e de silice, absence de la zone de transition, homog n it du gel CSH.

II.9. Conclusion :

On peut fabriquer des BHP en utilisant seulement du ciment portland. Cependant, l'addition d'un ou plusieurs ajouts cimentaires lorsqu'ils sont disponibles des prix compétitifs peut être avantageuse, non seulement du point de vue économique, mais aussi du point de vue rhéologique et surtout du point de vue résistance. La fumée de silice est le matériau le plus souvent utilisé pour formuler les BHP, mais il y a aussi d'autres ajouts cimentaire qui présentent des propriétés pouzzolanique semblable à celle des fumées de silice tel que les fillers de laitier de haut fourneaux. Leurs dimension, plus faibles que les grains de ciment, contribuent à une baisse de porosité à l'interface pâte granulat restituant ainsi une meilleure cohésion d'ensemble à maturité et par la suite le développement de la résistance.

Les granulats connus pour les bétons ordinaires conviennent également pour un béton hautes performances. 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. 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.

Le béton hautes performances se caractérise par une meilleure adhérence entre les granulats et la matrice de ciment. En outre, la résistance de la matrice est pratiquement égale à la résistance des granulats et des fois plus. L'augmentation de la résistance à la compression des BHP 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.

Le béton hautes performances est comme le béton ordinaire, il est soumis à un retrait plastique, à un retrait endogène (par auto-dessiccation) et à un retrait de dessiccation. Il en ressort que le retrait de dessiccation diminue en cas d'augmentation de la résistance. 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 est aussi très faible d'autant que la teneur en laitier des liantes est importante, ce retrait est moins important par rapport au CPA. Le retrait de dessiccation peut toujours se poursuivre, même plus long terme. L'ampleur de ce retrait peut être sensiblement influencée par des mesures de cure énergiques.

Chapitre III :
**Matériaux utilisés et Procédure
expérimentale**

Chapitre III :

Matériaux utilisés et procédure expérimentale

III.1. Introduction

Ce projet expérimental a pour objectif d'élaborer un BHP par amélioration progressive des propriétés physiques et mécaniques d'un béton ordinaire. Pour cela, plusieurs formulations de béton ont été mises au point en quatre phases, à partir de matériaux locaux:

- les formulations de béton usuel ont été établies à partir d'une méthodologie basée sur un volume minimum de pâte et l'appartenance à un fuseau granulaire.
- les formulations de BHP suite à la même approche que la norme ACI 211-I. il s'agit d'une combinaison des résultats empiriques et de calcul basée sur la méthode des volumes absolus. La quantité d'eau contenue dans le superplastifiant est considérée comme faisant partie de la quantité d'eau de gâchage.

III.2. Matériaux utilisés

III.2.1. Eau

Les conditions imposées à l'eau de gâchage sont précisées par la norme FP18-303. Cette eau doit être propre et sans matières organiques. Dans cette étude, l'eau utilisée pour la confection des bétons est l'eau du réseau d'aqueduc de la ville d'Annaba. Aucune analyse chimique n'a été réalisée sur cette eau puisqu'elle est propre à la consommation.

III.2.2. Ciment

Le ciment utilisé pour tous les bétons confectionnés dans cette étude est un ciment Portland composé de type CPJ-CEM IIA 42,5. Ce ciment est principalement constitué de 75% de clinker, 5% de gypse et 20% de laitier de haut fourneau, de provenance de la Société des Ciments de HADJAR -SOUD (Filiale du Groupe ERCE) et qui est conforme à la norme

NA442 version 2000. Les caractéristiques physiques et mécaniques ainsi que la composition chimique et potentielle de ce ciment sont présentées dans le Tableau III.2.1.

Tableau III.2.1. Caractéristiques du ciment CPJ-CEM IIA 42,5 utilisé.

Composition chimique (%)		Composition potentielle (%)		Caractéristique physique		
CaO	56-63	C ₃ S	50 - 65	Consistance normale	25 – 27.5	
SiO ₂	19-27	C ₂ S	10 -25	Durée de prise	100 - 170	
Al ₂ O ₃	4-6	C3A	9 - 12	Fin de prise	180 - 270	
Fe ₂ O ₃	2.5-3.5	C4AF	7 – 11	Masse volumique (g/cm ³)	3.05 – 3.12	
MgO	1-2			Refus au tamis 45 µ	18 - 28	
K ₂ O	0.3-0.6			Retrait sur mortier (µm/m)	≤ 800	
Na ₂ O	0.1-0.16					
SO ₃	2-3			Caractéristique mécanique		
CaO	0.5-0.02				2 j	7 j
CL ⁻	0-0.02				28 j	
		Compression (MPa)		> 12.5	> 22	> 42.5
		Traction (MPa)		3 - 4	5 - 6	6.2 - 8

III.2.3. Filler de laitier de haut fourneau

Le laitier granulé de haut fourneau utilisé dans ce projet est de provenance du complexe sidérurgique d'EL-HADJAR. La préparation des fillers de ce laitier granulé a été faite par broyage sec en laboratoire des matériaux au niveau du département de génie civil de l'université Badji Mokhtar-Annaba. Dont la composition chimique est donnée dans le tableau III.2.2.

Tableau III.2.2. Caractéristiques des fillers de laitier granulé d'El-Hadjar.

Composition chimique	(%)	Propriétés	
CaO	36-46		
SiO ₂	35-45	Humidité totale H ₂ O	≤ 8%
Al ₂ O ₃	4-8	Indice de basicité (CaO/ SiO ₂)	1.00 ± 0.15
Fe ₂ O ₃	<1.5	Densité sur humide	0.88 – 0.92
MgO	4-8	Masse volumique absolue (g/cm ³)	2.82
K ₂ O	<0.25	Finesse de mouture	10.6 %
Na ₂ O	<0.25	Surface spécifique de Blaine (cm ² /g)	2822
SO ₃	<1		
MnO	<3		
P ₂ O ₅	<0.1		



Figure III.2.1 : fillers de laitier granulés d'El-hadjar

III.2.4. Granulats

Tous les bétons ont été fabriqués avec du gravier concassé et calcaires dont le diamètre maximal (D_{max}) est de 20 mm. Trois (03) fractions granulaires ont été employées : un gravier (G1) de classe granulaire 1.6/6 cm, de la carrière de Ben-Azouz wilaya de Skikda, un gravier (G2) de classe granulaire 5/12.5, et un gravier (G3) de classe granulaire 12.5/20 cm, de la carrière de Chelghoum-laid wilaya de Mila.

Tandis que les granulats fins employés étaient de deux (02) provenances ; naturel et artificiel, trois (03) catégories de sable ont été utilisées : un sable siliceux naturel (S1) avec un module de finesse $MF1=1.62$ (sable de dune de la wilaya d'Annaba), un sable de carrière (S2) avec un module de finesse $MF2=2.13$, de la carrière de Chelghoum-laid wilaya de Mila, et un sable corrigé (S3) qui a été employé afin d'améliorer le module de finesse obtenu par le mélange de 50% du sable S1 et 50% du sable S2, avec un module de finesse $MF3=1.87$.



Figure. III.2.2. Fractions des graviers utilisés

Nota :

La nature, les propriétés mécaniques et chimiques des granulats utilisés sont des facteurs qui ont une grande influence sur les caractéristiques du béton et qui n'ont pas pris en considération dans cette étude, (cela peut être l'objet d'une autre recherche).

Les courbes granulométriques des granulats utilisés pour tous les mlanges sont présentées dans la figure III.2.3, et les propriétés physiques sont illustrées dans le tableau III.2.3.

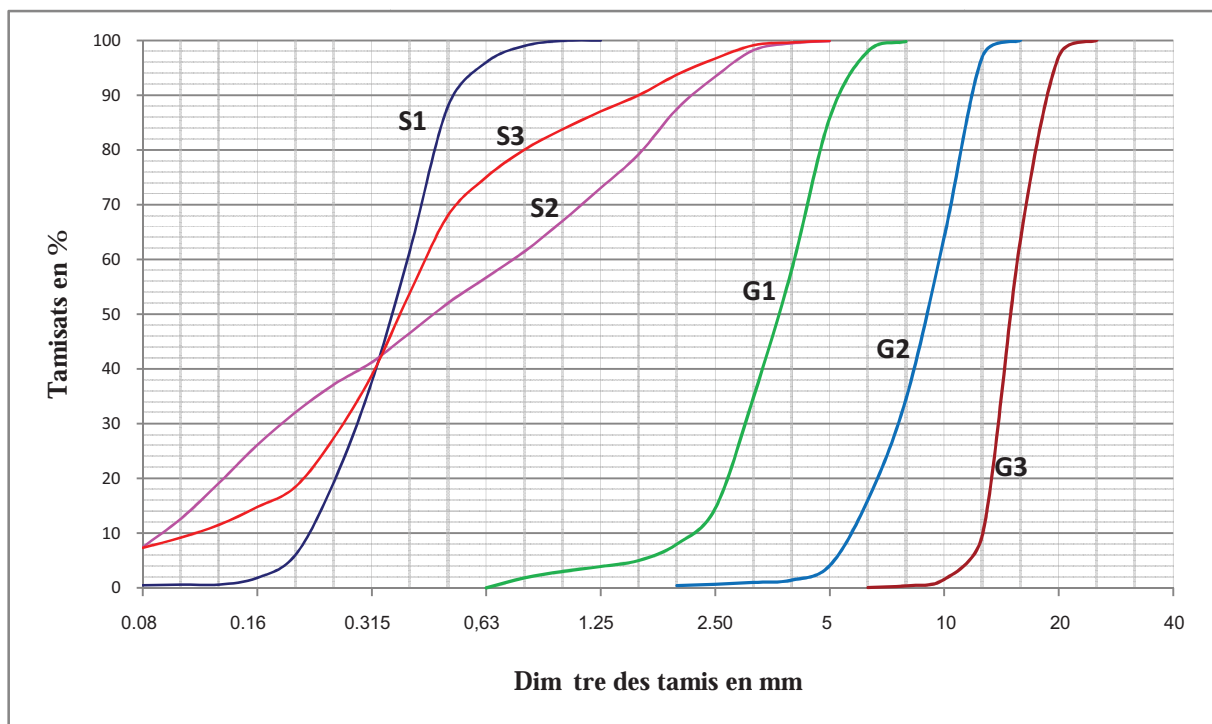


Figure III.2.3. courbes granulométriques des granulats utilisés

Tableau III.2.3. Caractéristiques des granulats utilisés.

Caractéristiques	Matériaux					
	S1	S2	S3	G1	G2	G3
Masse volumique apparente (g/cm ³)	1.46	1.41	1.44	1.37	1.36	1.40
Masse volumique absolue (g/cm ³)	2.56	2.65	2.63	2.65	2.67	2.68
d/D	0.2/0.63	0/3.15	0/3.15	1.25/6	5/12.5	12.5/20
Equivalent de sable (%)	95	97	96	-	-	-
Module de finesse	1.62	2.13	1.87	-	-	-
Coefficient volumétrique	-	-	-	-	0.34	0.24
Porosité intergranulaire (%)	42.88	46.79	45.25	48.30	49.06	47.76

III.2.5. Superplastifiant

Le superplastifiant – haut réducteur d'eau (Sp) utilisé est le MEDAPLAST- SP 40 (produit GRANITEX), qui est conforme à la norme EN 934-2 ainsi qu'aux normes établies par le CNERIB) en janvier 2007. Ses propriétés sont les suivantes :

- Forme..... Liquide
- CouleurMarron
- PH 8,2
- Densité1,20 ± 0,01
- Teneur en chlore< 1g/L

III.3. Proc dure exp rimentale

Le programme exp rimental est pr sent dans l'organigramme ci-dessous (figure III.3), sous forme de phases accomplies pour chacun des objectifs g n raux du projet. Les diff rents m langes des b tons produits pour chacune des phases r alis es dans le cadre de ce projet y sont g alement pr sent s.

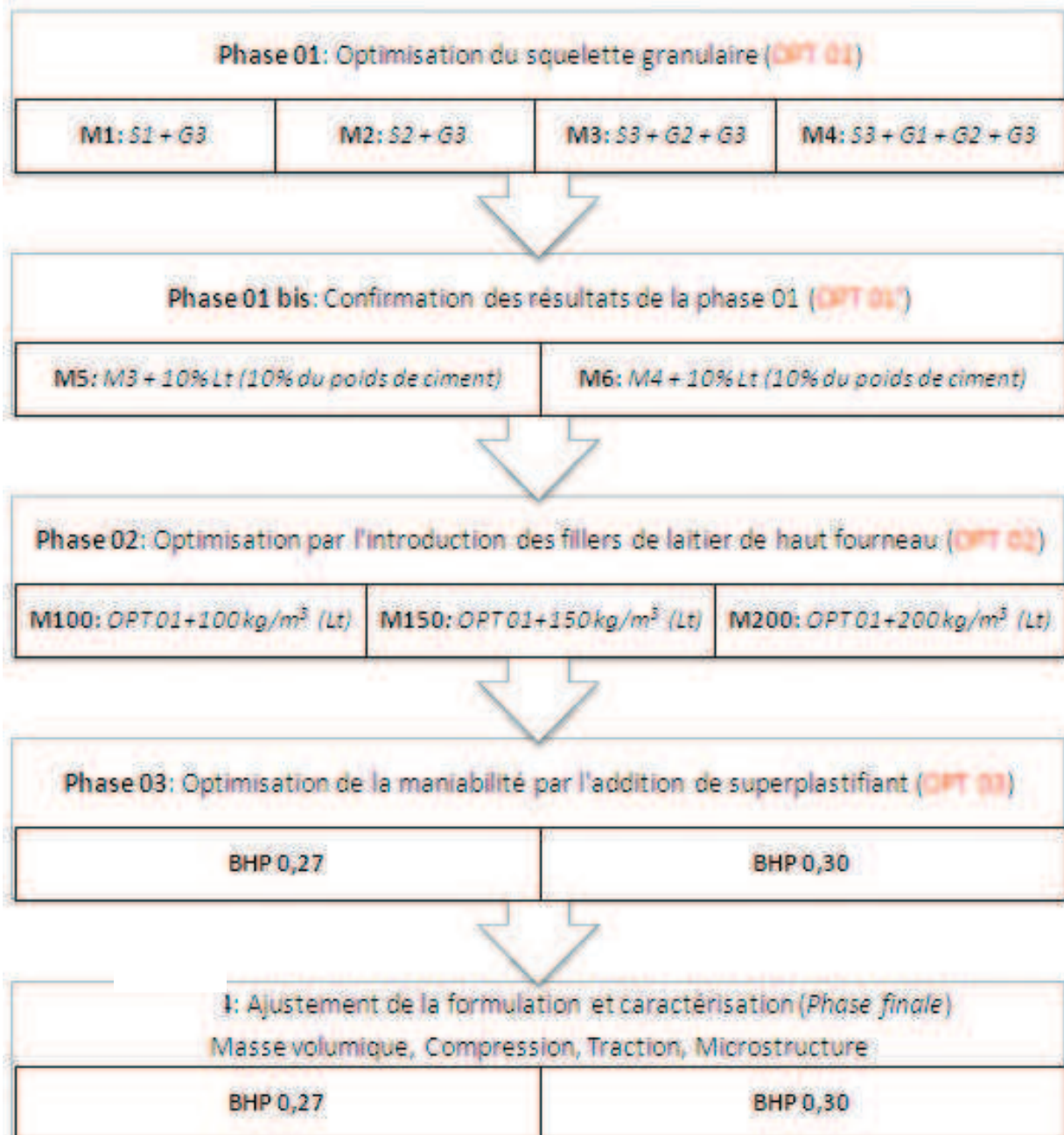


Figure III.3. Organigramme repr sentant le Programme exp rimental

La méthodologie de cette étude est basée sur l'amélioration des paramètres du béton en quatre (04) phases, chaque phase est basée sur les résultats des phases qui la précèdent, dont le but est l'optimisation des mlanges de béton successivement jusqu'à l'obtention d'un BHP et cela par :

- **Phase 01:** Optimisation du squelette granulaire (OPT 01),
- **Phase 02:** Optimisation par l'introduction des fillers de laitier de haut fourneau (OPT 02),
- **Phase 03:** Optimisation de la maniabilité par l'addition de superplastifiant (OPT 03),

Ajustement de la formulation et caractérisation (Phase finale) :

- Masse volumique,
- Compression,
- Traction,
- Retrait,
- Microstructure.

III.3.1. Phase 01: Optimisation du squelette granulaire (OPT 01)

Cette étape est le pas de démarrage de cette étude, elle consiste à chercher d'un optimum du squelette granulaire qui donne la résistance - 28 jours- la plus élevée parmi 04 mlanges (M1, M2, M3 et M4) confectionnés par la méthode de Dreux corrigée.

III.3.2. Phase 02: Optimisation par l'introduction des fillers de laitier de haut fourneau (OPT 02)

La recherche du dosage optimal en fillers de laitier parmi les trois mlanges (M100, M150 et M200), on se basant sur le squelette granulaire optimum de la première phase, qui donne la meilleure résistance à la compression- 28 et 60 jours.

III.3.3. Phase 03: Optimisation de la maniabilité par l'addition de superplastifiant **Ajustement de la formulation et caractérisation**

L'amélioration du mélange obtenu par la 2^{ème} phase, par la réduction du rapport E/L et l'introduction d'un superplastifiant ; pour obtenir un BHP on utilise la méthode de formulation des BHP de l'université de Sherbrooke, qui permet de formuler des BHP sans air entrainé, et qui suit le même principe de la norme ACI 211-1[Aitcin 2001].

III.4. Méthodes de formulation suivies

III.4.1 Formulation des bétons usuels

La méthode de formulation suivie est celle de Dreux corrigée.

III.4.1.1. Principe de la méthode de formulation de Dreux corrigée

1. Fixation de la résistance à la compression 28 jours souhaitée.

$$f_c = f_{c28} + 15\% f_{c28}$$

Avec :

f_{c28} : Résistance caractéristique en compression désignée (28 jours) en MPA,

f_c : Résistance moyenne en compression en MPA,

2. Fixation de l'ouvrabilité désignée qui est caractérisée par l'affaissement au cône d'Abrams *Tableau III.4.1.*

Tableau III.4.1. Evaluation de l'ouvrabilité par référence à l'affaissement au cône ou au test d'ouvrabilité C.E.S

Plasticité	Serrage	Affaissement A en cm	N nombre de chocs test C.E.S
			>60
Béton très ferme	Vibration puissante	0 - 2	30 - 50
Béton ferme	Bonne vibration	3 - 5	
Béton plastique	Vibration courante	6 - 9	15 - 25
Béton mou	Piquage	10 - 13	10 - 15
Béton fluide	Léger piquage	≥14	<10

3. Calcul du rapport C/E par la formule : $f_c = G f_{CE} \left(\frac{C}{E} - 0.5 \right)$

Avec :

f_{CE} : La classe vraie de résistance du ciment en (MPa).

C : Dosage en ciment en (Kg/m³).

E : Dosage en eau total sur matériau sec.

G : Coefficient granulaire (donné par le tableau III.4.2)

Tableau III.4.2 : Valeur approximative du coefficient G

Qualité des granulats	Dimension D des granulats		
	Fins (D ≤ 16 mm)	Moyens (20 ≤ D ≤ 40 mm)	Gros (D ≥ 50 mm)
Excellente	0,55	0,60	0,65
Bonne, Courante	0,45	0,50	0,55
Passable	0,35	0,40	0,45

4. Evaluation du dosage en ciment à partir de l'abaque représenté dans la figure III.4.1.

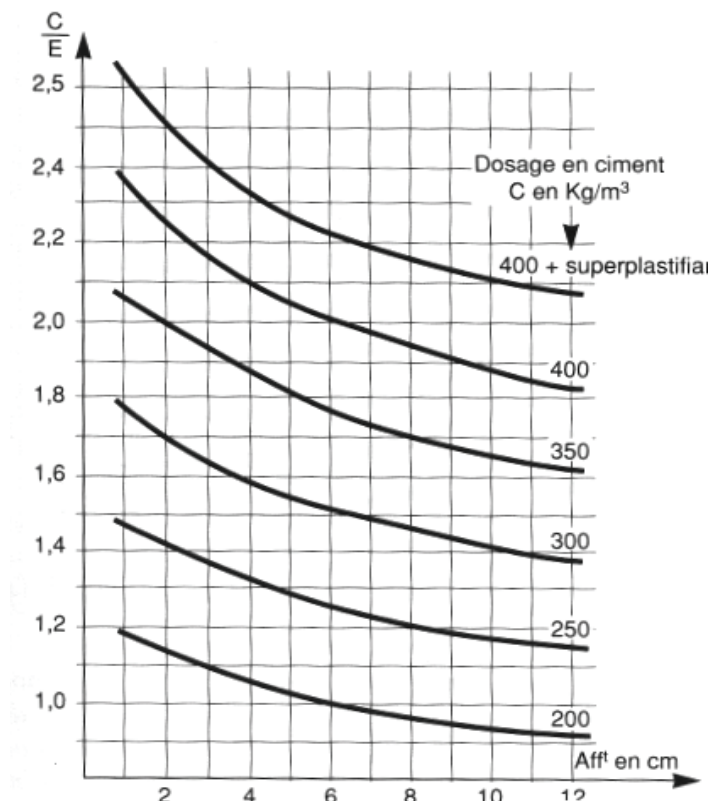


Figure III.4.1. Abaque de détermination du dosage en ciment

5. Evaluation du dosage en eau partir du rapport C/E et du dosage en ciment

$$E = C/(C/E)$$

6. Obtention du coefficient de compacit (γ) ; c'est le rapport un m tre cube du volume absolu des mati res solides (ciment et granulats) r ellement contenues dans un m tre cube de b ton frais en œuvre, et qui est donn dans le tableau III.4.3 en fonction de la consistance et de la capacit de serrage.

Tableau III.4.3 : Valeur du coefficient de compacit γ

Consistance	Serrage	γ Coefficient de compacit						
		D = 5	D = 10	D = 12.5	D = 20	D = 31.5	D = 50	D = 80
Molle	Piquage	0.750	0.780	0.795	0.805	0.810	0.815	0.820
	Vibration faible	0.755	0.785	0.800	0.810	0.815	0.820	0.825
	Vibration normale	0.760	0.790	0.805	0.815	0.820	0.825	0.830
Plastique	Piquage	0.730	0.790	0.805	0.815	0.820	0.825	0.830
	Vibration faible	0.765	0.795	0.810	0.820	0.825	0.830	0.835
	Vibration normale	0.770	0.800	0.815	0.825	0.830	0.835	0.840
	Vibration puissante	0.775	0.805	0.820	0.830	0.835	0.840	0.845
Ferme	Vibration faible	0.775	0.805	0.820	0.830	0.835	0.840	0.845
	Vibration normale	0.780	0.810	0.825	0.835	0.840	0.845	0.850
	Vibration puissante	0.785	0.815	0.830	0.840	0.845	0.850	0.855

7. Obtention des diff rents dosages en (%) des granulats et cela graphiquement partir de la courbe granulom trique, on se basant sur la courbe granulaire de r f rence (OAB) qui se trace comme suit (exemple d'une courbe de r f rence OAB dans la figure III.4.2.) :

- Le point B (l'ordonn e 100%) correspond la dimension D du plus gros granulat.

- Le point de brisure A correspond des coordonnées ainsi définies :

En abscisse : (partir de la dimension D_{max} des granulats)

Si $D \leq 20$ mm, l'abscisse est $D / 2$.

Si $D \geq 20$ mm, l'abscisse est située au milieu du « Segment gravier » limité par le module 38 (5mm) et le module correspondant D .

En ordonnée :

$$y = 50 - \sqrt{D} + k$$

k : est un terme correcteur qui dépend du dosage en ciment, de l'efficacité du serrage, et de la forme des granulats roulés ou concassés, donné par le tableau III.4.4.

Tableau III.4.4. Valeur du terme correcteur k en fonction du dosage en ciment, de la puissance de la vibration et de l'angularité des granulats.

Vibration		Faible		Normale		Puissante	
Forme des granulats (du sable en particules)		Roul	Concass	Roul	Concass	Roul	Concass
Dosage en ciment	400 + SP	- 2	0	- 4	- 2	- 6	- 4
	400	0	+ 2	- 2	0	- 4	- 2
	350	+ 2	+ 4	0	+2	- 2	0
	300	+ 4	+ 6	+ 2	+4	0	+ 2
	250	+ 6	+ 8	+ 4	+ 6	+ 2	+ 4
	200	+ 8	+ 10	+ 6	+ 8	+ 4	+ 6

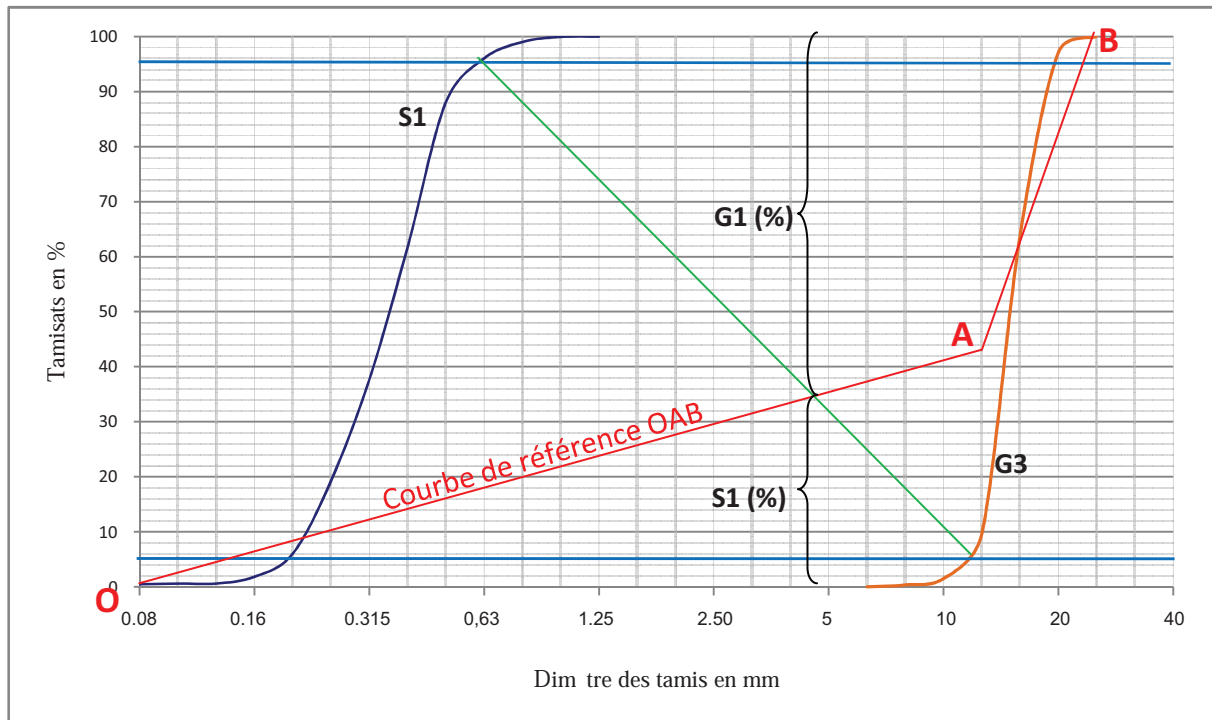


Figure III.4.2: exemple d'une courbe de référence OAB

8. Déduire la composition finale à partir du coefficient de compacité, du dosage en ciment et des pourcentages des granulats.

III.4.2. Méthodes de formulation des BHP [1].

Dans la documentation, on trouve plusieurs méthodes de formulation des BHP et même dans certains cas des logiciels sont disponibles. Dans ce chapitre on va présenter brièvement trois de ces méthodes, avant d'expliquer en détails la méthode de formulation développée à l'université de Sherbrooke et qui a été adoptée pour la confection des BHP de cette étude. Cela ne signifie pas que les autres ne sont pas aussi valables que celles présentées.

Ces trois méthodes sont celles proposées par le comité ACI 363 (1993) sur les bétons haute résistance, la méthode proposée par Larrard en 1990, qui est maintenant disponible dans sa version informatique BETONLAB et la méthode simplifiée présentée par Mehta et Aitcin (1990).

III.4.2.1. Méthode suggérée par le comité ACI 363 sur les bétons haute résistance

Cette méthode comporte neuf étapes

Étape 1 : Affaïssement et choix de la résistance nécessaire,

Étape 2 : sélection de la taille maximale du gros granulat,

Étape 3 : sélection de la quantité de gros granulat,

Étape 4 : estimation de la quantité d'eau libre et de la teneur en air,

Étape 5 : sélection du rapport eau/liant,

Étape 6 : teneur en ciment,

Étape 7 : premier essai avec le ciment,

Étape 8 : autres essais d'essai avec des variations du volume de ciment,

Étape 9 : gestion de l'essai.

III.4.2.2. Méthode des coulis du LCPC :

Cette méthode est basée sur deux règles semi-empiriques. La résistance à la compression du béton est prédite par une formule qui est en fait une extension de la formule originale de Fret dans laquelle on utilise un certain nombre de paramètres :

$$f'_c = \frac{Kg \times R_c}{\left[1 + \frac{3.1 \times \frac{e}{c}}{1.4 - 0.4 \left(\frac{11s}{c} \right)} \right]}$$

O

f'_c : Résistance à la compression du béton mesurée sur cylindres 28 jours

e, c, s : Masse d'eau, de ciment, de fumée de silice par unité de volume de béton frais

Kg : paramètre qui dépend du type de granulat (une valeur de 4.91 s'applique au gravier de rivière)

R_c : Résistance à la compression du béton 28 jours (c'est-à-dire la résistance d'un cube normalisé fabriqué en mélangeant trois parties de sable pour chaque partie de ciment et une demi-partie d'eau)

La maniabilité de ce béton est reliée à la viscosité du mélange qui est calculée d'après le modèle de Farris. Dans un béton qui contient n classes de grains monodisperses de dimension telle que $D_i > D_{i+1}$, la viscosité de la suspension est égale :

$$\eta = \eta_0 H \left(\frac{\Phi_1}{\Phi_1 + L\Phi_n + \Phi_0} \right) H \left(\frac{\Phi_2}{\Phi_2 + L\Phi_n + \Phi_0} \right) \dots H \left(\frac{\Phi_n}{\Phi_n + \Phi_0} \right)$$

O

Φ_i : Volume occupé par l' i ème classe dans un volume unitaire du mélange

Φ_0 : Volume d'eau

η_0 : Viscosité de l'eau

H : Fonction qui représente la variation de la viscosité relative de la suspension monodisperse comme une fonction de sa concentration solide

III.4.2.3. La méthode simplifiée de Mehta et Aitcin

Mehta et Aitcin ont proposé une version simplifiée de la procédure permettant de formuler un BHP qui s'applique des bétons de masse volumique normale ayant des résistances à la compression comprise entre 60 et 120 MPa. Cette méthode peut être utilisée avec de gros granulats qui ont une taille maximale comprise entre 10 et 15 mm et des affaissements comprises entre 200 et 250 mm. On suppose que le béton ne contient pas d'air entrainé et que le volume d'air piégé est de 2 % (il peut être augmenté à 5 ou 6 % quand le béton contient de l'air entrainé). On prend un volume optimal de gros granulat égal à 65 % du volume du BHP. Cette méthode comporte huit étapes.

Etape 1 : détermination de la résistance,

Etape 2 : teneur en eau,

Etape 3 : sélection du liant,

Etape 4 : sélection du gros granulat,

Etape 5 : calcul des masses,

Etape 6 : dosage en superplastifiant,

Etape 7 : ajustement de la teneur en eau,

Etape 8 : ajustement pour une gâche d'essai,

III.4.2.4. La méthode de formulation de l'université de Sherbrooke :

La méthode de formulation développée à l'université de Sherbrooke permet de formuler un BHP sans air entrainé ; elle peut être aussi utilisée pour formuler un BHP à air entrainé condition de tenir compte de la réduction de la résistance à la compression due à la présence du réseau des bulles d'air contenus dans le béton.

Cette méthode est très simple suite à la même approche que la norme ACI 211-I. il s'agit d'une combinaison des résultats empiriques et de calcul basée sur la méthode des volumes absolus. La quantité d'eau contenue dans le superplastifiant est considérée comme faisant partie de la quantité d'eau de gâchage. L'organigramme de cette méthode est présenté à la figure III.4.3

La procédure de formulation commence par le choix de cinq caractéristiques particulières du BHP ou des matériaux utilisés :

1. Le rapport eau/liant ;
2. Le dosage en eau ;
3. Le dosage en super plastifiant ;
4. Le dosage en gros granulats ;
5. La teneur en air.

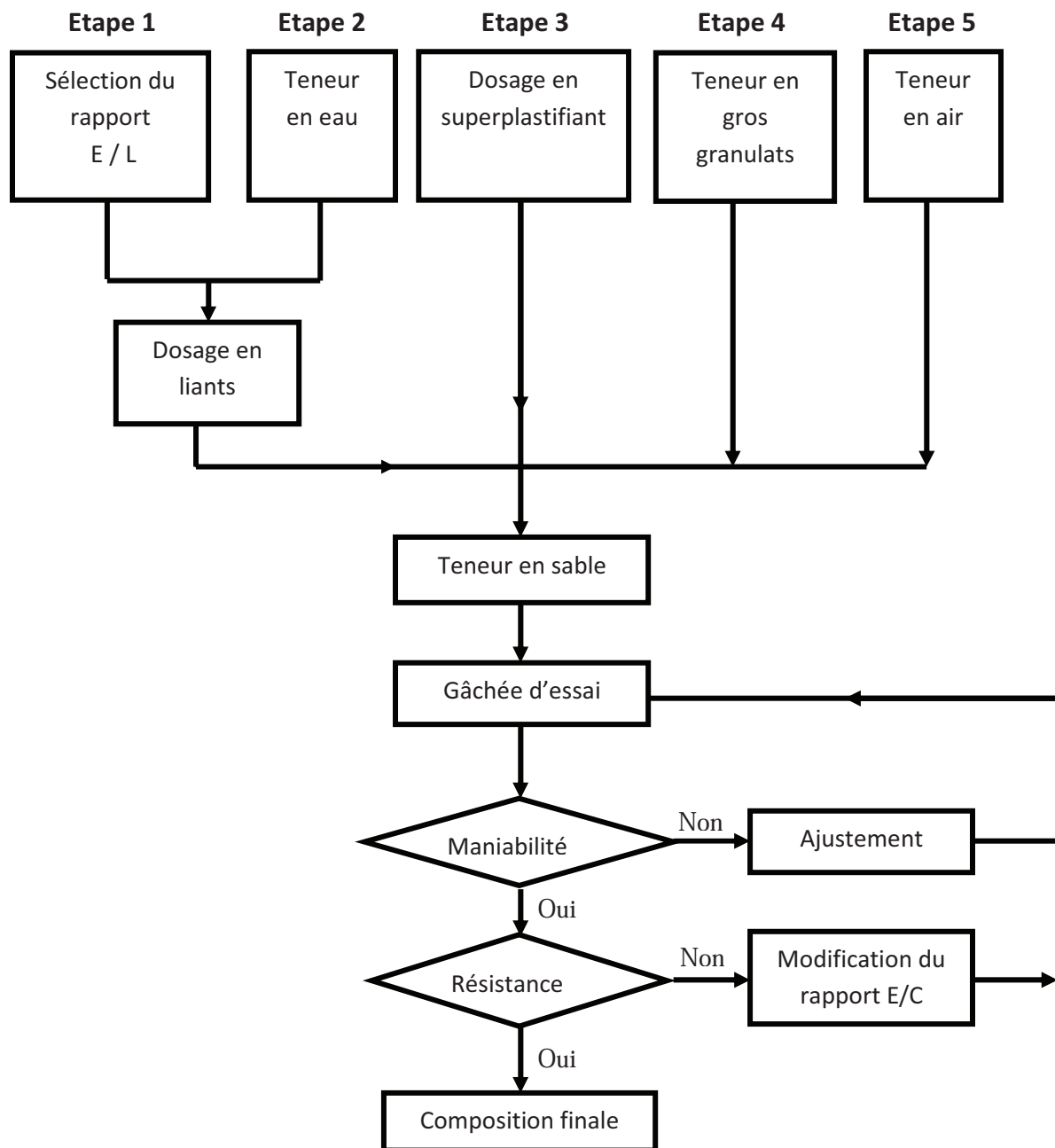


Figure III.4.3. Organigramme de la méthode proposée pour formuler des BHP

III.4.2.4.a. Le rapport eau/liant :

On peut trouver le rapport eau/liant en utilisant la figure III.4.4 pour des bétons ayant des résistances à la compression données à 28 jours (cette résistance à la compression correspond à celle mesurée sur des cylindres de 100 x 200 mm) par suite des variations de résistance dues aux différences d'efficacité des liants, le fuseau de la figure III.4.4 donne une gamme relativement étendue du rapport E/C pour une résistance donnée. Si l'on ne connaît pas

l'efficacité du liant que l'on utilise on peut commencer par prendre la valeur moyenne donnée par ce fuseau.

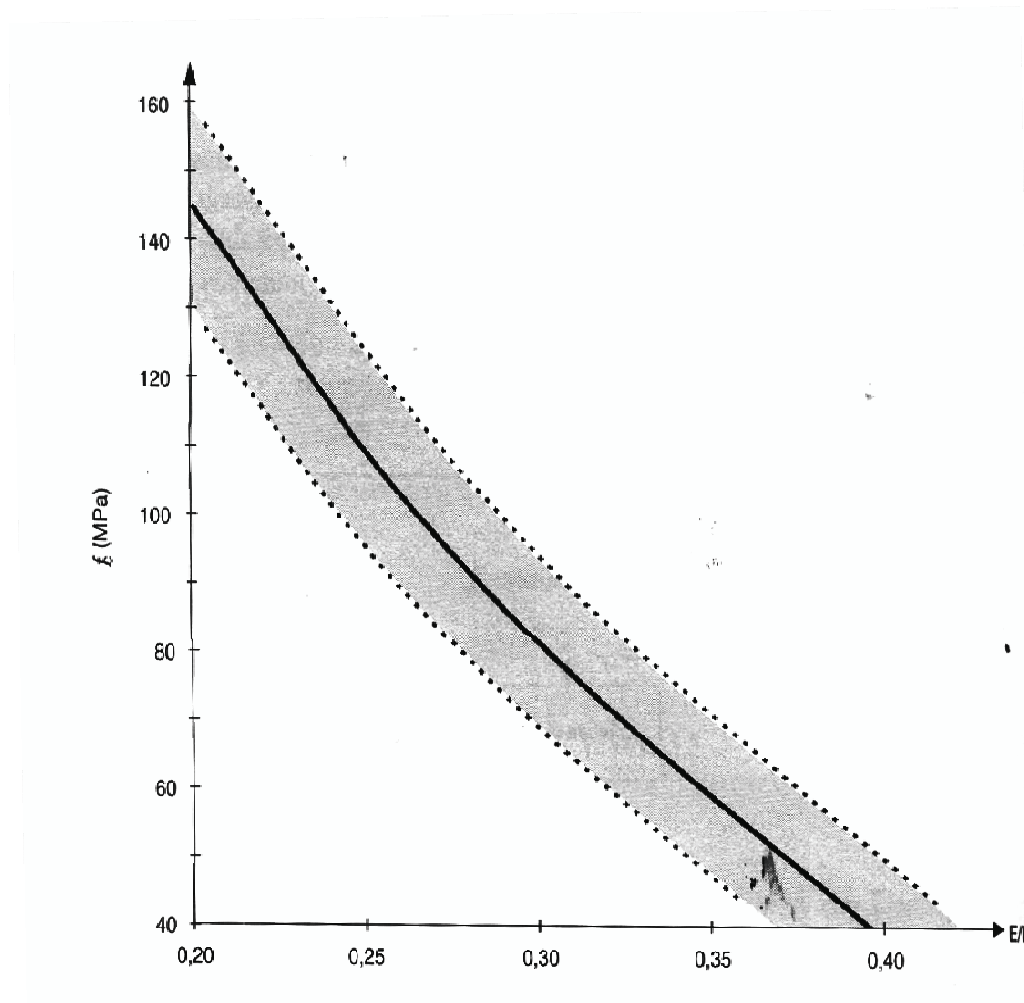


Figure III.4.4. Relation proposée entre le rapport E/L et la résistance à la compression.

III.4.2.4.b. Dosage en eau :

Une des plus grandes difficultés rencontrées lorsque l'on calcule la composition d'un BHP est de déterminer la quantité d'eau qu'il va falloir utiliser pour fabriquer un béton qui aura un affaissement de 200 mm plus d'une heure après son malaxage. En effet, la maniabilité d'un BHP est contrôlée par plusieurs facteurs : la quantité initiale d'eau, la « réactivité du ciment », la quantité de superplastifiant et son degré de compatibilité avec ce ciment particulier. On peut concevoir un BHP de 200 mm d'affaissement en utilisant un faible dosage en eau et un fort dosage en superplastifiant, inversement, un dosage en eau plus élevé et un dosage en

superplastifiant plus faible. De point de vue économique il n'y a pas tellement de différence entre ces deux options, mais, du point de vue rhéologique, la différence peut être très significative selon la réactivité rhéologique du ciment et l'efficacité du superplastifiant. Ainsi, la quantité minimale d'eau de gâchage qui permet de fabriquer un béton de 200 mm d'affaissement peut varier sensiblement selon la finesse, la composition phasique, la réactivité des phases et selon la composition et la solubilité des sulfates de calcium et des sulfates alcalins du ciment. Si la quantité d'eau de gâchage est trop faible, le béton peut devenir rapidement collant et perdre de l'affaissement. Il faudra alors utiliser une assez grande quantité de superplastifiant pour obtenir un affaissement élevé, mais il ne faudra pas s'attendre alors à faire face à un certain retard dans le durcissement de ce béton.

La meilleure façon de trouver le bon rapport entre la quantité d'eau et de superplastifiant est d'utiliser un plan d'expérience. Toutefois, comme cette méthode n'est pas toujours pratique la figure III.4.5 présente une approche simplifiée, basée sur le concept de point de saturation. Pour calculer une formulation robuste, on peut ajouter 5 l/m³ à toutes les valeurs présentées sur la figure III.4.5 lorsque le point de saturation du superplastifiant n'est pas connu, on suggère de commencer avec une quantité d'eau de malaxage égale à 145 l/m³.

Point de saturation	0,6	0,8	1	1,2	1,4	%
Dosage en eau	120	125	135	145	155	l/m ³
	125	135	145	155	165	

Figure III.4.5. Détermination du dosage en eau

III.4.2.4.c. Le dosage en super plastifiant :

Le dosage en superplastifiant se déduit du dosage au point de saturation. Si l'on ne connaît pas le point des saturations, on peut toujours commencer avec un dosage en superplastifiant égal à 1.0 %.

III.4.2.4.d. Dosage en gros granulats :

Le dosage en gros granulats peut être déduit de la figure III.4.6 en fonction de la forme des granulats. S'il y a quelque doute sur la forme des granulats ou si on ne la connaît pas, on peut toujours commencer avec une quantité de gros granulats de 1000 kg/m^3 .

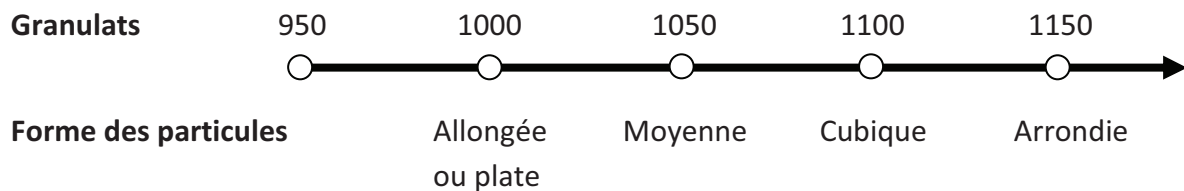


Figure III.4.6. Dtermination du dosage en gros granulats

III.4.2.4.e. Teneur en air :

Les BHP qui sont utilisés dans des environnements où il n'y a pas de cycle de gel et dégel n'ont évidemment pas besoin de contenir de l'air entrainé, de telle sorte que la seule quantité d'air que l'on retrouvera dans les BHP est le volume d'air piégé. Cependant de façon à améliorer la manipulation et la mise en place des BHP, certains auteurs suggèrent de rajouter systématiquement une très faible quantité d'air entrainé dans les BHP.

III.4.2.4.f. Méthode de calcul de la formulation (feuille de calcul)

Tous les calculs nécessaires à la formulation d'un BHP sont présentés sur une seule feuille de calcul figure III.4.7 cette feuille de calcul est divisée en trois parties. Dans la partie supérieure, on retrouve les propriétés spécifiques du BHP qui doit être fabriqué ainsi que les caractéristiques de tous les ingrédients qui entreront dans sa composition.

Avant d'effectuer quelque calcul que ce soit, cette partie de la feuille doit être remplie puisque chacune de ses données est essentielle aux calculs subséquents. Si certaines des propriétés physiques des granulats ne sont pas connues, il sera nécessaire de fixer leurs

valeurs en se basant sur la meilleure information disponible. Dans la partie médiane de la feuille, on trouve les calculs relatifs au dosage en superplastifiant.

La feuille de calcul utilise les symboles suivants :

d_c : Densité du ciment ou des ajouts cimentaires ;

d_{SSS} : Densité des granulats l'état saturé superficiellement sec ;

E_{abs} : Quantité d'eau absorbée dans les granulats (en pourcent) ;

E_{tot} : Teneur en eau total des granulats (en pourcent) ;

E_h : Humidité des granulats (en pourcent) : $E_h = E_{tot} - E_{abs}$

d_{sup} : Densité du superplastifiant liquide ;

s : Teneur en solide du superplastifiant (en pourcent) ;

M_{sol} : Masse du solide dans le superplastifiant ;

d : Dosage du superplastifiant exprimé sous forme de pourcentage de la masse de solide par rapport à la masse de matériaux cimentaires ;

V_{liq} : Volume de superplastifiant liquide ;

V_E : Volume d'eau dans le superplastifiant ;

V_{sol} : Volume de solide dans le superplastifiant ;

E : Masse d'eau en kg/m^3 dans le béton ;

L : Masse de liant par m^3 de béton ;

f'_c	MPa
--------	-----

	G_c	%
Ciment		

		%		
Granulat	G_{SSS}	E_{abs}	E_{tot}	E_h
Gros				
Fin				

$$E_h = E_{tot} - E_{abs}$$

$$M = M_{SSS}(1 + E_h)$$

Superplastifiant		$M_{sol} = C \times \frac{D}{100}$	$V_{liq} = \frac{M_{sol}}{S \times G_{sup}} \times 100$	$V_E = V_{liq} \times G_{sup} \times \frac{100 - S}{100}$	$V_{sol} = V_{liq} - V_E = V_{liq}(1 - (\frac{100-S}{100}) G_{sup})$
Densit (G_{sup})	Teneur en solides S(%)	15 E	24 F	21 G	11 H

Mat riaux	1		2		3		4		5		6		
	Teneur Kg/m ³		Volume l/m ³		Dosage tat SSS Kg/m ³		Correction d'humidit l/m ³		Composition				
									1 m ³		G ch e d'essai		
Eau	2		2		2				23		25		
Ciment	$\frac{E}{L} = 1$	3		4-1		8-1			4-1		26-1		
				4-2		8-2			4-2		26-2		
				4-3		8-3			4-3		26-3		
Gros granulat	5		9		5		18		17		27		
Granulat fin			13		14		20		19		28		
Air	pourcentage		10		0								
	6 %												
Super-plastifiant	7 %		11		15		21		24 V_{liq}		29 V_{liq}		
Total			12		16		22				30		

Figure III.4.7. Feuille de composition d'un BHP

Pour faciliter les corrections apporter la teneur en eau pour tenir compte de la quantité d'eau contenue dans le superplastifiant en utilise les différentes équations que l'on trouve dans la section médiane de la feuille de calcul.

La partie inférieure de la feuille de calcul comprend des cases numérotée dans l'ordre dans lequel il faut les remplir. Cette partie de la feuille de calcul est divisée en six colonnes, numérotées leur partie supérieure. Dans la première colonne, on reporte les données initiales et les premiers calculs ; dans la colonne 2, on calcul le volume du granulat fin ; dans la colonne 3, on retrouve les proportions du béton avec des granulats légers SSS ; dans la colonne 4, on calcul les corrections d'eau ; dans la colonne 5, on retrouve les proportions du béton dans l'état où l'on utilise les matériaux ; dans la colonne 6, on retrouve les proportions de la gâche d'essai prévue.

Les paragraphes ci-dessous expliquent les calculs détaillés qu'il faut effectuer pour remplir chacune des cases de la figure III.4.7.

Case 1 : rapporter la valeur du rapport eau/liant tel que choisi la figure III.4.4

Case 2 : écrire la quantité d'eau nécessaire, selon la figure III.4.4, et recopier cette valeur dans les colonnes 1, 2 et 3 où l'on retrouve la case 2.

Case 3 : partir des valeurs qui apparaissent dans les cases 1 et 2, calculer la masse de liant.

Case 4-1, 4-2 et 4-3 : calculer la masse de chaque ajout cimentaire nécessaire selon la composition sectionnelle qui apparaît dans le tableau A la partie supérieure de la feuille de calcul et reporter ces valeurs dans les colonnes 1, 3 et 5 où l'on retrouve ces cases.

Case 5 : reporter la masse de gros granulat trouvé la figure III.4.6 et écrire cette valeur dans la case 5 des colonnes 1 et 3.

Case 6 : écrire la quantité d'air piégé que l'on prévoit obtenir dans le BHP.

Case 7 : écrire la quantité de superplastifiant qu'il sera nécessaire d'utiliser en se basant sur la valeur du point de saturation.

A cette étape, la seule information manquante est la masse de granulats fins qu'il faut utiliser. Cette valeur peut se calculer par la méthode des volumes absolus, c'est-à-dire que l'on soustrait de 1 m^3 le volume de tous les ingrédients définis de façon à trouver le volume restant pour le granulats fins, ce qui se fait dans la colonne 2.

Case 8-1, 8-2 et 8-3 : calculer les volumes des différents ajouts cimentaires en divisant leur masse (case 4-1, 4-2 et 4-3) par leur densité respective (ces valeurs se retrouvent dans la partie supérieure de la feuille de calcul).

Case 9 : calculer le volume de gros granulats en divisant la masse du gros granulats apparaissant dans la case 5 par sa densité SSS.

Case 10 : multiplier la quantité d'air (case 6) par 10 pour obtenir le volume d'air piégé en l/m^3 .

Case 11 : calculer le volume V_{sol} (volume des solides contenus dans le superplastifiant) en utilisant la formule que l'on retrouve dans la partie médiane de la feuille de calcul.

Case 12 : inscrire la somme de tous les volumes définis.

Case 13 : calculer le volume de granulats fins (en l/m^3) en soustrayant de 1000 l/m^3 la somme définie dans la case 12.

On peut alors calculer dans la colonne 3 la masse de granulats fins et la masse volumique du béton.

Case 14 : calculer la masse de granulats fins en multipliant son volume apparaissant dans la case 13 par sa densité SSS.

Case 15 : calculer la masse de solide dans le superplastifiant (M_{sol}) et reporter sa valeur dans cette case.

Case 16 : calculer le total de toutes les masses qui apparaissent dans la colonne 3 pour obtenir la masse volumique du béton.

Il faut noter que, jusqu'à présent, les masses de granulats ont toujours été calculées dans des conditions SSS. Il faut donc corriger le dosage en eau de gâchage pour tenir complètement compte de l'état SSS et pour tenir compte de la quantité d'eau contenue dans le

superplastifiant. Ces corrections sont faites dans les colonnes 4 et 5, dans les cases 18, 20 et 21 selon la convention arbitraire de signes suivante : si un granulat apporte de l'eau au b ton (c'est-à-dire si sa teneur en eau total est supérieure à son absorption à l'état SSS), cette quantité d'eau devra être soustraite de la quantité d'eau de charge et l'on utilisera un signe moins dans la case correspondante, tandis que l'on utilisera un signe plus lorsque le granulat absorbera une partie de l'eau contenue dans le b ton.

Case 17 : multiplier la masse SSS du gros granulat par $(1+E_h/100)$.

Case 18 : soustraire la valeur trouvée dans la case 17 de la valeur de la case 5 et écrire ce résultat dans la case 18.

Case 19 : calculer la masse SSS du granulat fin.

Case 20 : soustraire la valeur apparaissant dans la case 19 de celle apparaissant dans la case 14.

Case 21 : écrire la quantité d'eau contenue dans le superplastifiant tel que calculée dans la case G (le signe négatif apparaît dans cette case).

Case 22 : ajouter algèbrement toutes les corrections d'eau.

La composition finale de 1 m^3 de b ton avec des granulats humides est maintenant calculée dans la colonne 5.

Case 23 : ajouter (en tenant compte du signe) la correction en eau que l'on retrouve dans la case 22 au volume d'eau la valeur qui apparaît dans la case 2.

Case 24 : écrire le dosage en superplastifiant V_{liq} que l'on trouve dans la case F.

La charge d'essai peut être calculée dans la colonne 6. Chaque valeur apparaissant dans la colonne 5 doit être multipliée par un facteur F égale à la masse de b ton que l'on désire fabriquer dans la charge d'essai exprimée en kg, divisée par la masse volumique du b ton qui apparaît dans la case 16. Le facteur F peut être aussi calculé sur une base volumétrique. Si la charge d'essai doit avoir un certain volume, chacun des nombres qui apparaissent dans la colonne 5 devra être multiplié par un facteur égale au volume de la charge d'essai exprimé en l divisé par 1000.

Case 25 - 29 : multiplier les valeurs de la colonne 5 par le facteur F.

Case 30 : calculer la masse de la g ch e d'essai en additionnant les masses des diff rents ingr dients du b ton que l'on retrouve dans les case 25 - 29. V rifier les calcules en multipliant les r sultats de la case 16 par F : le r sultat devrais tre le m me que celui qui est inscrit dans la case 30.

III.5. Conclusion

Pour formuler un BHP il faut bien choisir les mat riaux constitutifs car c'est eux de fournir les performances souhait es au produit final, mais ce choix peut conduire des difficult s d'ordre conomique (disponibilit et prix).

Dans ce chapitre, on illustre les diff rents mat riaux utilis s pour la confection des BHP base de fillers de laitier de hauts fourneaux d'El-Hadjar, qui sont des mat riaux locaux parfaitement disponibles. On choisit l'eau de g chage ainsi que les granulats sans rentrer dans leurs d tails de nature ou de composition chimique, et cela peut influencer largement les r sultats obtenus. (Cela peut faire l'objet d'un autre projet de recherche).

On a s tudi aussi les diff rents phases et tapes qu'on a fix es pour le cheminement de ce travail exp rimental jusqu' l'obtention d'un BHP de m me performances que celui dans la documentation tout en suivant une m thode de formulation bien d termin e.

La formulation d'un BHP ne rel ve pas uniquement du plus pur empirisme, elle s'appuie plut t sur un certain nombre de r sultats de l'exp rience et sur la m thode de calcul dite des volumes absolus. Plusieurs approches ont t propos es par des diff rents chercheurs, nous avons pr sent e celle qui est utilis e l'universit de Sherbrooke n'en pas parce que nous sommes convaincus que c'est la meilleure, mais parce que cette m thode est simple et facilement comprise par les tudiants et les techniciens et selon la documentation elle a donn e satisfaction au cours des ans.

Quel que soit la m thode de calcul qui aura t utilis e, il faudra bien finir des g ches d'essai, mais si on peut limiter ce nombre au strict minimum, c'est autant de gagner.

Chapitre IV :
Caractérisation des Bétons à Hautes Performances

Chapitre IV :

Résultats et Discussions

IV.1. Introduction

Lors de la conception de toute structure en béton armé, il est nécessaire de connaître les propriétés mécaniques des matériaux utilisés. En effet, le dimensionnement des éléments de construction et les prévisions de leur comportement dans le temps ne peuvent se faire qu'à partir des propriétés mécaniques instantanées et différées des matériaux, et en particulier celles du béton. De plus, cette conception doit être justifiée par des codes réglementaires. L'une des sections de ces règlements concerne la définition du matériau béton et notamment ses caractéristiques mécaniques instantanées et différées.

Les résultats présentés dans la suite de ce chapitre touchent par conséquent à la fois aux propriétés mécaniques instantanées des bétons étudiés, savoir la résistance mécanique en compression (et son évolution dans le temps) et la résistance à la traction par flexion, aux déformations différées libres, autrement dit le retrait du béton durci, et à la microstructure.

Ces résultats découlent d'essais expérimentaux réalisés sur les différentes formulations de béton décrites en détail au chapitre III. Les essais de la résistance mécanique sont exécutés ponctuellement des chances bien précises, alors que le retrait nécessite un suivi dans le temps.

Tous ces résultats feront l'objet d'une comparaison systématique par famille de béton présentant la même phase.

IV.2. Fabrication des btons, mise en place et conservation

Le malaxeur utilis pour la fabrication des btons est un malaxeur lectrique plan taire de laboratoire d'une capacit de 20 litres.

La s quence de malaxage des btons usuels retenue a t la suivante :

- Mouillage de la paroi interne du malaxeur,
- Introduction des granulats secs dans le malaxeur (Gravier, Sable, et Ciment),
- Malaxage sec pendant 2 minutes des constituants granulaires (ciment et granulats),
- Introduction de 2/3 de l'eau de g chage et malaxage pendant 2 minutes
- Introduction de l'eau de g chage restant puis malaxage pendant 1 minute 30 secondes.

Pour les BHP La s quence de malaxage retenue a t la suivante :

- Mouillage de la paroi interne du malaxeur,
- Introduction des granulats secs dans le malaxeur (Gravier, Sable, et Ciment),
- Malaxage sec pendant 2 minutes des constituants granulaires (ciment et granulats),
- Introduction de 2/3 de l'eau de g chage plus une partie ventuelle du superplastifiant et malaxage pendant 2 minutes
- Introduction de l'eau de g chage restant plus la partie restante du superplastifiant puis malaxage pendant 1 minute 30 secondes.

La mise en place a t effectu e dans les diff rents moules destin s aux chantillons correspondants aux essais programm s. Les btons ont t mis en place par vibration l'aide des dispositifs vibratoires traditionnels (principalement table vibrante).

Les diverses formes d'chantillons coul es selon les essais envisag s taient les suivantes :

- cylindres 11 x 22 cm : 3 pour la r sistance m canique en compression
- cubes 10x10x10 cm : 3 pour la r sistance m canique en compression
- prismes 10x10x40 cm : 3 pour la r sistance en traction par flexion
- prismes 7x7x28 cm : 3 quip s de plots pour le retrait du bton durci.

Le dé moulage a été effectué un jour. Une fois dé moulés, les échantillons conçus pour la résistance mécanique (cylindres 11x22 cm, les cubes 10x10x10 cm et les prismes 10x10x40 cm) ont été conservés dans un bac rempli d'eau potable à une température et humidité ambiante jusqu'à l'échéance de terminaison (7 jours, 28 jours ou plus). Les prismes conçus pour la détermination du retrait (prismes 7x7x28 cm) sans conservés à l'air libre à une température et humidité ambiante (25 °C, 60%).

IV.3. Descriptions des essais exécutés

IV.3.1. Essais physiques

IV.3.1.1. maniabilité

Pour toutes les géométries des bétons réalisés ; La maniabilité a été mesurée par l'affaissement au cône d'ABRAMS conformément à la norme NF EN 12350-2.

IV.3.1.2. Retrait de dessiccation (Retrait de béton durci au-delà de 24 heures)

L'objectif de cet essai est de mesurer, en fonction du temps, la variation de longueur due aux effets de l'hydratation et de la dessiccation des matériaux cimentaires.

Cet essai est réalisé sur matériau durci grâce à un rétractomètre figure IV.3.1. permettant de mesurer les variations de longueur d'échantillons placés dans une salle climatisée à $20 \pm 1^\circ\text{C}$ et $50 \pm 5\%$ d'humidité relative, Avec le changement hydrique du matériau avec l'ambiance : on obtient le retrait total,

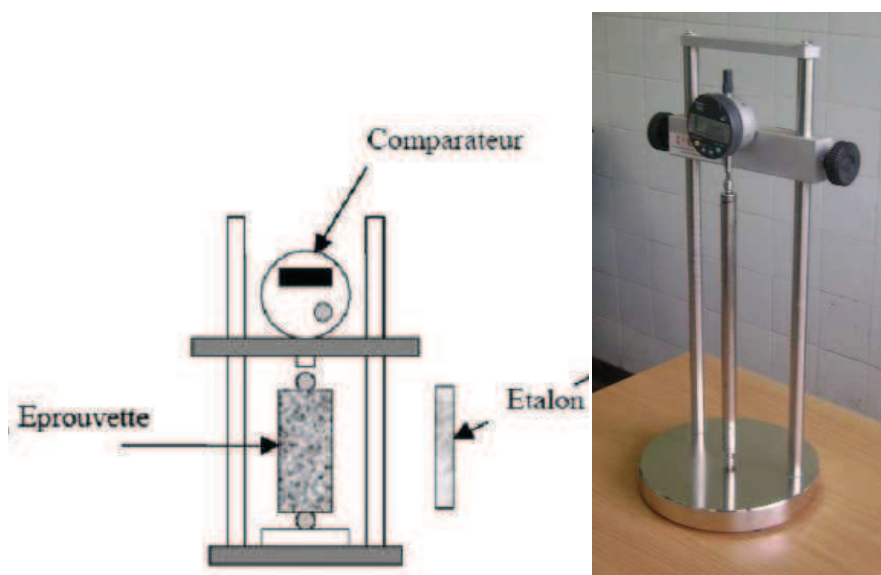


Figure IV.3.1. Appareil de mesure du retrait (rétractomètre)

Apr s d moulage (24 heures), les mesures de retrait total sont effectu es des ch ances tr s courtes au d but, la p riodicit de mesure augmentant ensuite avec le temps (les prouvettes sont dispos es de mani re ce que chacune d'elles soit distante des voisines d'au moins 1 cm, et qu'elle soit entour e d'air sur toutes ses faces). Les mesures sont faites dans l'axe des prouvettes, entre deux plots m talliques noy s dans le b ton au coulage. L' talonnage du r tractom tre est effectu l'aide d'une tige talon en Invar qui sert de r f rence de mesure. Les chantillons test s dans notre tude sont prismatiques (de dimensions 7x7x28 cm). (Figure IV.3.2)



Figure IV.3.2. Les chantillons pour le retrait (3 prismes de 7x7x28 cm)

L'expression du retrait se traduit par le rapport de la variation de longueur de l' prouvette (ΔL) sur sa longueur de base (L). Malgr la diminution de longueur des prouvettes, ce rapport est g n ralement exprim positivement en $\mu\text{m}/\text{m}$ et est repr sent en fonction du temps (Figure IV.3.3).

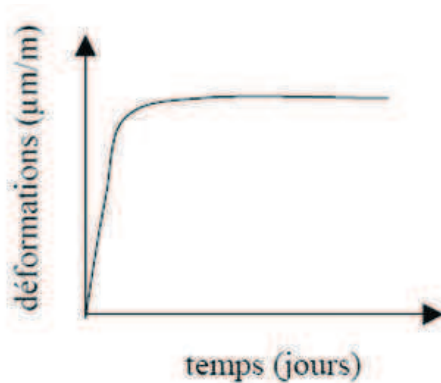


Figure IV.3.3. Expression des résultats de retrait du béton durci

IV.3.2. Essais mécaniques

IV.3.2.1. Détermination de la résistance mécanique en compression uniaxiale

La résistance mécanique en compression est une caractéristique essentielle du matériau béton et l'un des paramètres fondamentaux de notre étude. Par conséquent, sa détermination et son évolution ont été suivies pour toutes les compositions de béton étudiées dans ce projet.

Selon les formulations, cette résistance mécanique a été calculée à différentes échéances (en conservant une échéance indispensable réglementaire 28 jours) par la moyenne des résistances d'une série de trois échantillons cylindriques 11x22 cm rectifiés.

Les échantillons utilisés pour déterminer la résistance mécanique en compression des différents bétons étudiés sont : soit des poutres cylindriques de diamètre 11 cm et de hauteur 22 cm, ou bien des cubes de 10 cm de cotés, qui ont été conservés après le moulage dans un bac à 20°C et 100 % d'humidité relative jusqu'à l'échéance déterminée (7 jours, 28 jours ou plus).

Avant essai, les bases des cylindres ont été rectifiées par usinage à la rectifieuse, pour assurer la perpendicularité des faces par rapport à l'axe génératrice et leur planité.

Deux presses ont été utilisées : la première d'une capacité maximale de 50 MPa, utilisée pour les bétons usuels, la deuxième d'une capacité maximale de plus de 120 MPa

asservie en force. La résistance en compression a été évaluée suivant la norme NF P 18-406 : les essais ont été réalisés avec une vitesse de chargement de 0,5 MPa/s.

IV.3.2.2. D termination de la résistance mécanique la traction par flexion

Les chantillons utilisés pour déterminer la résistance mécanique la traction par flexion des différents bétons étudiés sont des cubes prismes de 10x10x40 cm de dimensions, qui ont été conservés après moulage dans un bac à 20°C et 100 % d'humidité relative jusqu'à l'achèvement de la cure (28 jours) selon la norme NF EN 12390-5.

Pour la première phase, la résistance en compression axiale a été testée après 28 jours de conservation dans l'eau et réalisée sur 3 éprouvettes cylindriques 110x220mm selon la norme NF EN 12390-4. Pour la 2ème phase, la résistance en compression axiale a été testée après 28 et 60 jours de conservation dans l'eau -pour bien déterminer l'effet des fillers de laitier, car les bétons aux laitiers présentent des résistances un peu faibles aux jeunes âges et également réalisées sur les éprouvettes identiques à celles testées dans la phase 1 et 2. Pour la dernière phase (phase n°3), la résistance en compression axiale a été testée après 7, 28, 60 et 90 jours de conservation dans l'eau par 3 éprouvettes cylindriques 110x220mm et 3 éprouvettes cubiques 100x100x100 mm. Les essais de traction par flexion Pour tous les bétons ont été réalisés sur des éprouvettes prismatiques de dimension 100x100x400 mm après 28 jours de conservation dans l'eau selon la norme NF EN 12390-5. L'ensemble des valeurs moyennes des résistances en compression axiale et en traction par flexion, sont consignés dans les figures par la suite.

IV.4. M lange des b tons par phase

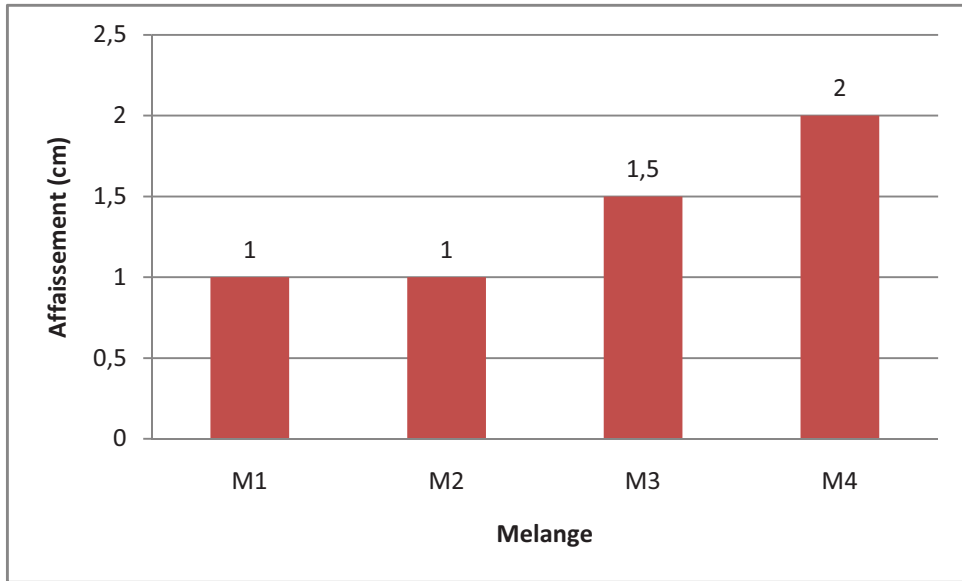
IV.4.1. Phase 01: Optimisation du squelette granulaire (OPT 01)

La recherche d'un optimum du squelette granulaire qui donne la résistance - 28 jours- la plus élevée parmi les 04 m langes (M1, M2, M3 et M4) confectionnées par la méthode de Dreux corrigée, la composition et le dosage des m langes sont représentés par la suite [TableauIV.4.1].

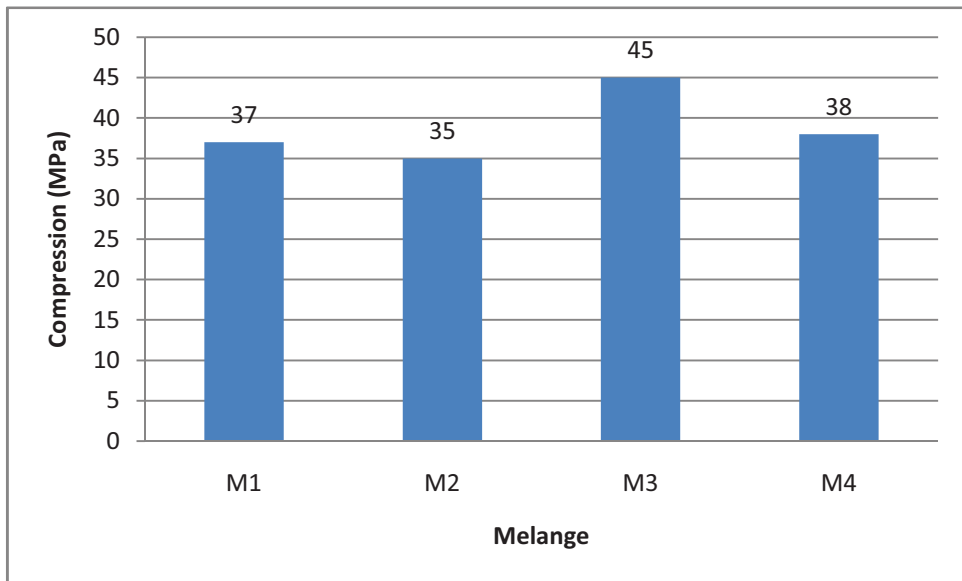
Tableau IV.4.1. Compositions et dosages des m langes de la 1^{ère} phase pour 1 m³.

Désignation des m langes	E/C	C (kg)	FL (kg)	Dosage en granulats utilisés (Kg)					
				S1	S2	S3	G1	G2	G3
Mix 1	0.36	400	-	656,76	-	-	-	-	1203,5
Mix 2	0.36	400	-	-	595,01	-	-	-	1278,72
Mix 3	0.36	400	-	-	-	533,13	-	355,96	977,84
Mix 4	0.36	400	-	-	-	405,98	148,75	318,49	996,65

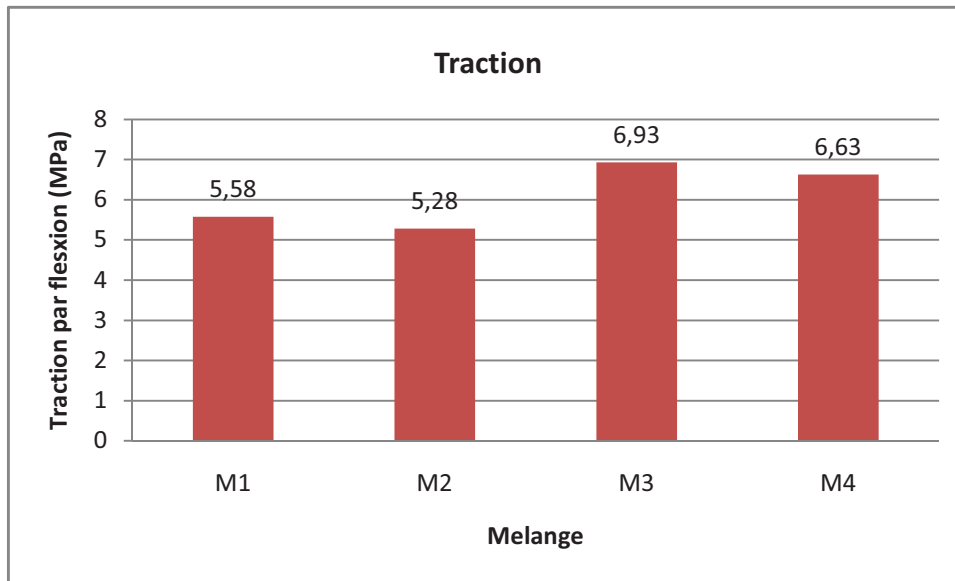
Dans cette phase le but est de choisir le squelette granulaire optimum pour cela on a fixé le rapport E/C, et on a testé l'influence de l'étendu granulaire sur les propriétés rhéologique et mécanique du béton. Les résultats sont représentés dans les figures suivantes.



(a) Affaissement au cône d'Abrams



(b) Resistance à la compression 28 jours



(c) Resistance a la traction par flexion 28 jours

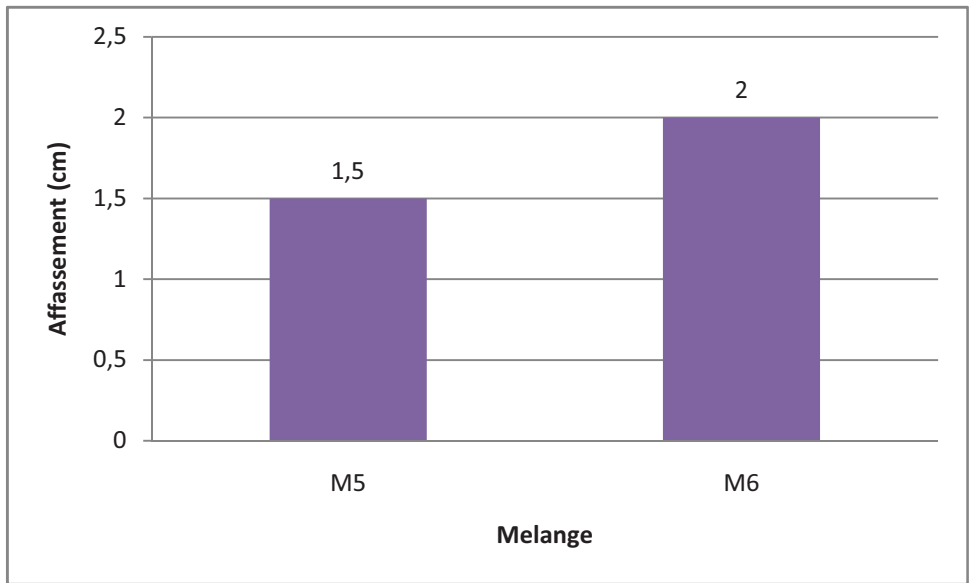
Figure IV.4.1. R sultat de la phase n° 1

On remarque un faible affaissement au c ne qui est logique cause du faible rapport E/C, mais qui s'augmente a chaque fois qu'on ajoute une fraction granulaire. On remarque aussi l'augmentation de la r sistance a la compression et aussi a la traction par flexion en fonction de l' tendu granulaire jusqu' un certain optimum, avec un nombre de fraction granulaire limite.

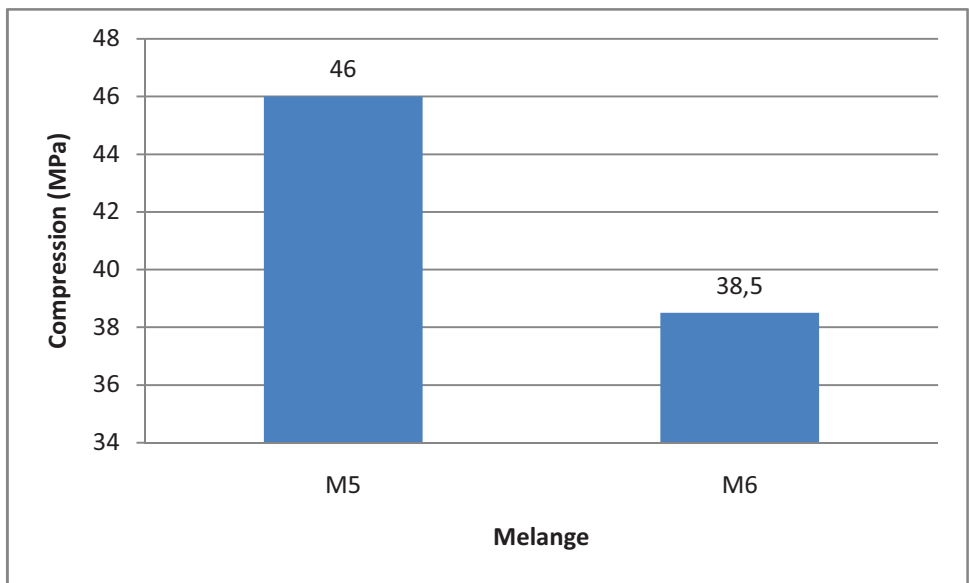
Les m langes M5 et M6 avec une l g re addition de fillers de laitiers (10% du poids de ciment) confirment des r sultats de la 1^{iere} phase par, [Tableau 3].

Tableau IV.4.2. Compositions et dosages des m langes M5 et M6 pour 1 m³.

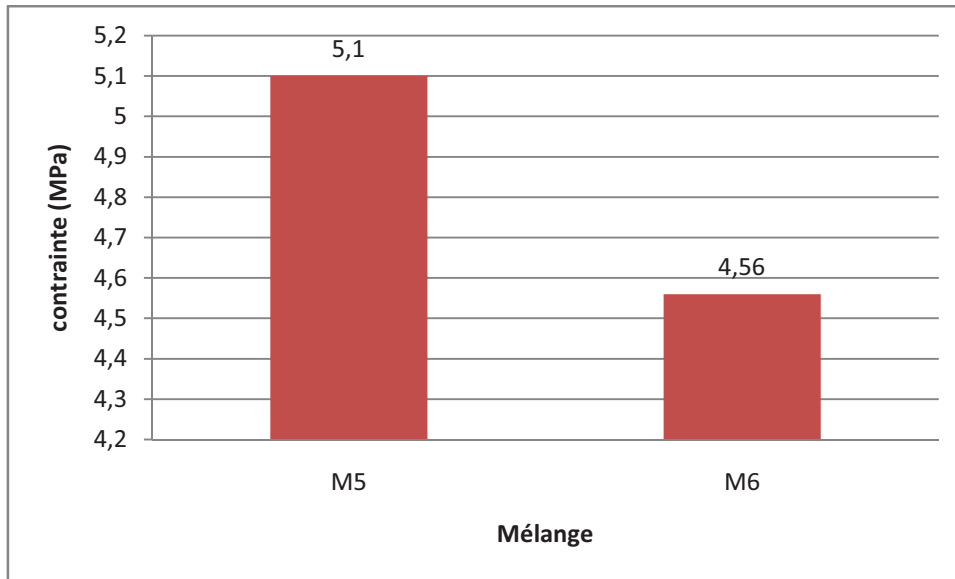
D signation des m langes	E/L	C (kg)	FL (kg)	Dosage en granulats utilis s en Kg					
				S1	S2	S3	G1	G2	G3
Mix 5	0.36	400	40	-	-	399,14	-	268,55	737,721
Mix 6	0.36	400	40	-	-	306,29	112,23	240,28	751,91



(a) Affaissement au cône d'Abrams



(b) Resistance à la compression 28 jours



(c) *Resistance a la traction par flexion 28 jours*

Figure IV.4.2. Confirmation des r sultats de la phase 1.

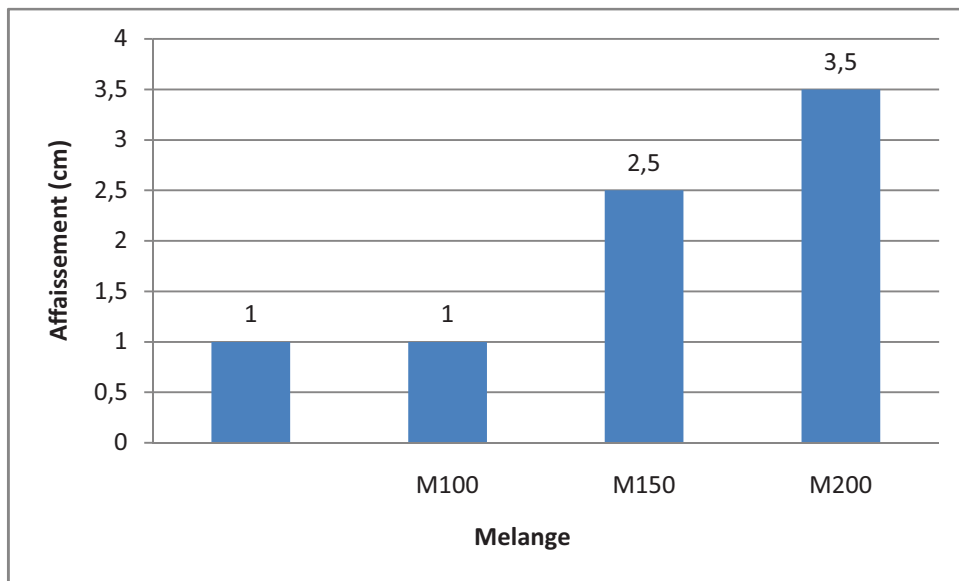
Les r sultats obtenus dans les figures ci-dessus confirment les r sultats de la 1^{iere} phase avec une l g re augmentation de la r sistance la compression due la pr sence du laitier.

IV.4.2. Phase n° 2: Optimisation par l'introduction des fillers de laitier de haut fourneau (OPT 02)

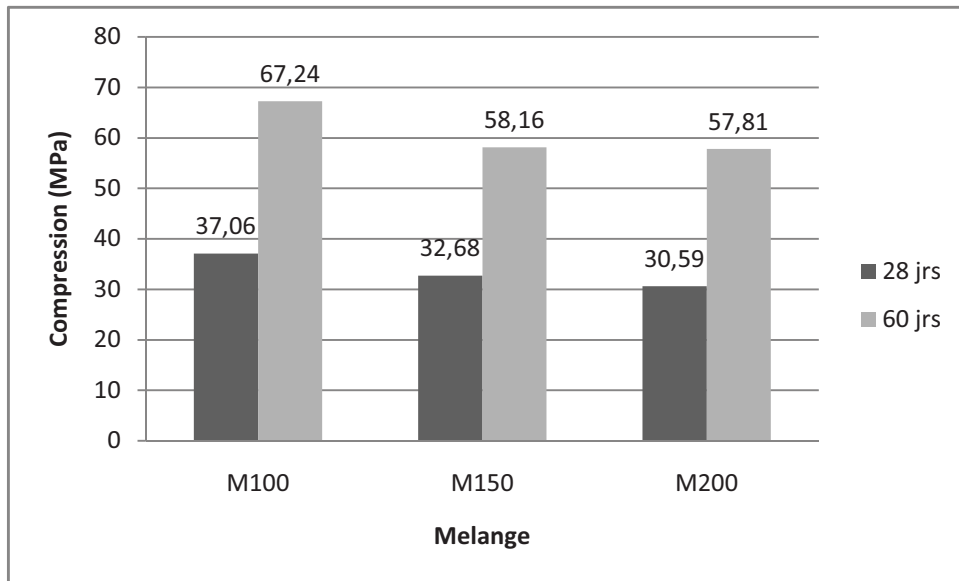
La recherche du dosage optimal en fillers de laitier parmi les trois m langes (M100, M150 et M200), on se basant sur le squelette granulaire optimum de la premi re phase, qui donne la meilleure r sistance la compression- 28 et 60 jours (Tableau IV.4.3).

Tableau IV.4.3. Compositions et dosages de la 2^{ème} phase pour 1 m³.

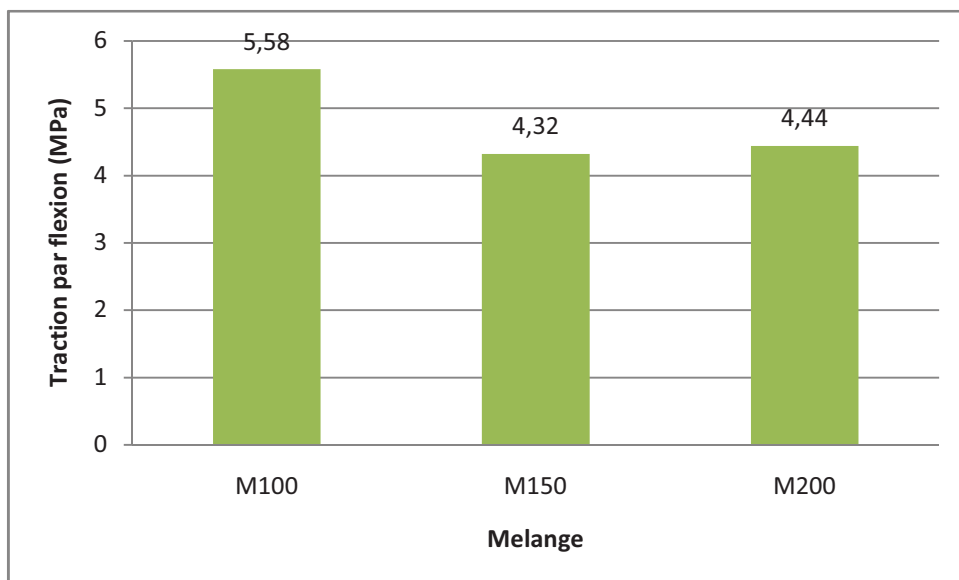
D signation des m langes	E/L	C (kg)	FL (kg)	Dosage en granulats utilis s en Kg					
				S1	S2	S3	G1	G2	G3
M 100	0.36	400	100	-	-	502,6	-	338,16	928,94
M 150	0.36	400	150	-	-	489,37	-	329,26	904,5
M 200	0.36	400	200	-	-	476,14	-	320,36	880,05



(a) Affaissement au c ne d'Abrams



(b) Resistance a la compression 28 et 60 jours



(c) Resistance a la traction par flexion 28 jours

Figure IV.4.3. Resultat de la phase n° 2

L'introduction du laitier broyé augmente la maniabilité du béton 'fig. 3.a', mais donne des résistances à la compression et à la traction par flexion court terme inférieures à la résistance du béton avec la même formulation et sans ajout de laitier (M5) de la phase n°2, et par contre, donne une bonne résistance remarquable long terme qui dépasse les 65 MPa pour le mélange M100 60 jours, voire 'fig. 3.b' et 'fig. 3.c', cette résistance se diminue avec

l'augmentation du dosage en laitier broyé ; donc le dosage optimal en laitiers granulés broyés est inférieur à 150 kg/m^3 . Dans notre cas on va considérer le dosage optimal en laitier gale 100 kg/m^3 parce que la détermination du dosage optimal exacte nécessite beaucoup de temps et plusieurs tentatives (c'est une autre étude).

IV.4.3. Phase n° 3 Optimisation de la maniabilité par l'addition de Superplastifiant -Ajustement de la formulation et caractérisation

L'amélioration du mélange obtenu par la 3^{ème} phase, par la réduction du rapport E/L et l'introduction d'un superplastifiant ; pour obtenir un BHP on utilise la méthode de formulation des BHP de l'université de Sherbrooke, qui permet de formuler des BHP sans air entrainé, et qui suit le même principe de la norme ACI 211-1[Aitcin 2001]. dans cette phase on a réalisé 02 mélanges :

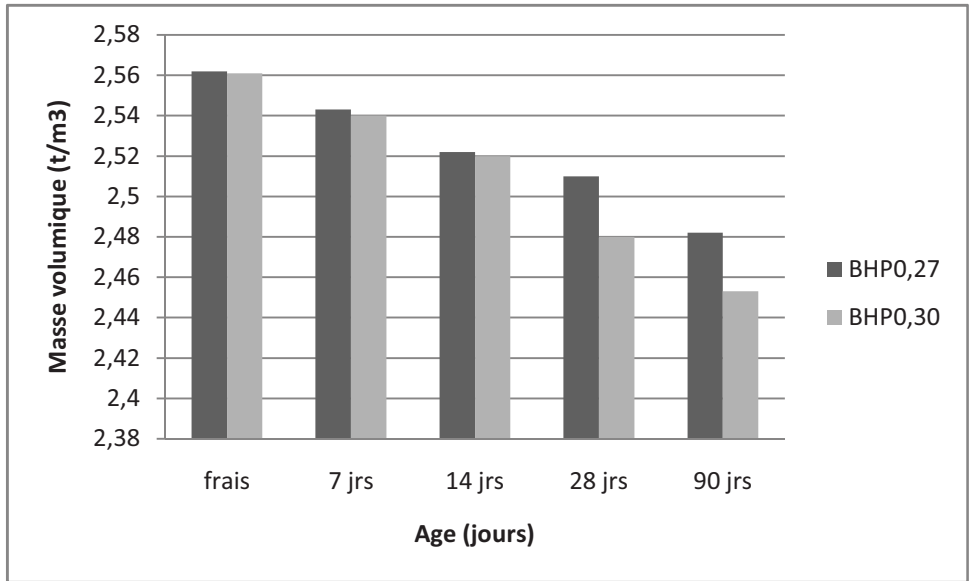
- BHP 0.27 : par l'application directe de la méthode de formulation des BHP de l'université de Sherbrooke (E/L= 0.27); le dosage total en gros granulats se déduit à partir de cette méthode mais leurs répartitions (pourcentages partielles des fractions granulaires des gros granulats) se font à l'aide des résultats obtenus par la méthode de Dreux corrigée (optimum du squelette granulaire).
- Le deuxième BHP 0.30 : par la même formulation et le même principe pour les gros granulats, mais avec une correction de l'affaissement au cône d'Abrams (06 cm) et cela après plusieurs essais en faisant varier le rapport E/L, et on a adopté à la fin un rapport E/L gale 0.30 (*Figure IV.4.4*)

Tableau. IV.4.4. Compositions et dosages de la 4^{ème} phase pour 1 m³.

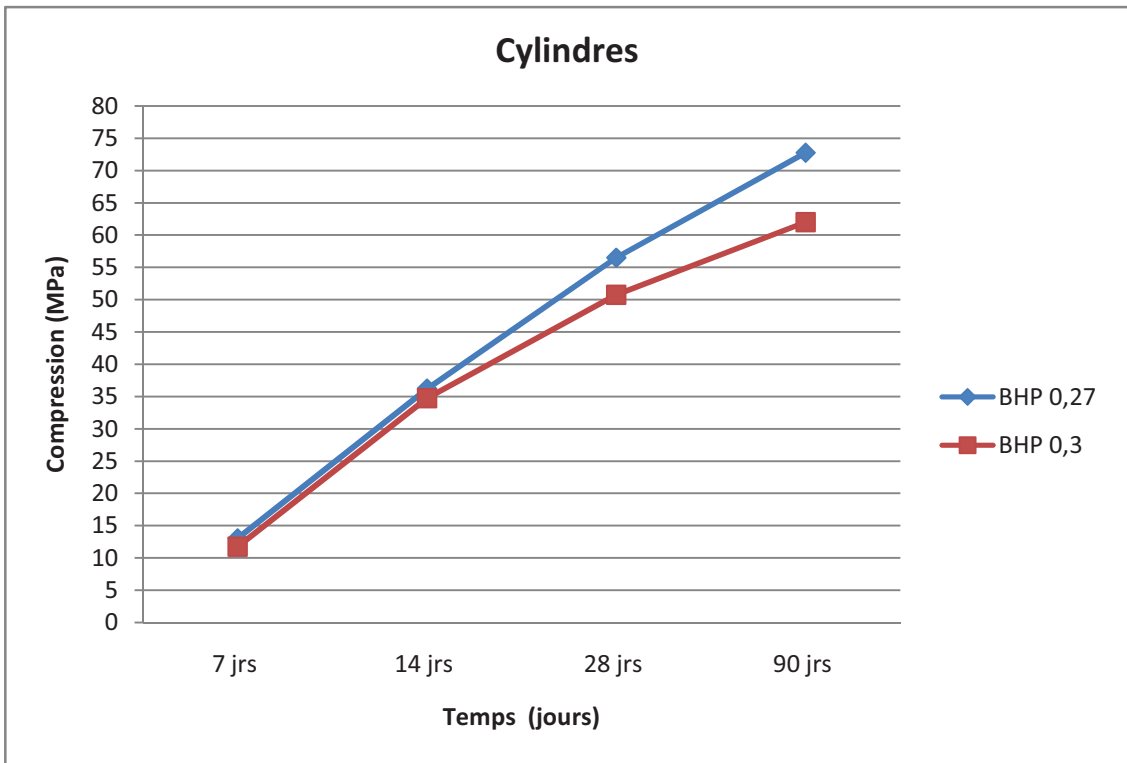
<i>D</i> signation des <i>m</i> langes	<i>E/L</i>	<i>C</i> (kg)	<i>FL</i> (kg)	<i>Sp</i> (kg)	<i>Dosage en granulats utilis s</i> (Kg)		
					<i>S3</i>	<i>G2</i>	<i>G3</i>
<i>BHP 0,27</i>	0.27	429,63	107,41	13,41	682,91	280,98	769,01
<i>BHP 0,30</i>	0.30	429,63	107,41	14,92	587,64	280,98	769,01



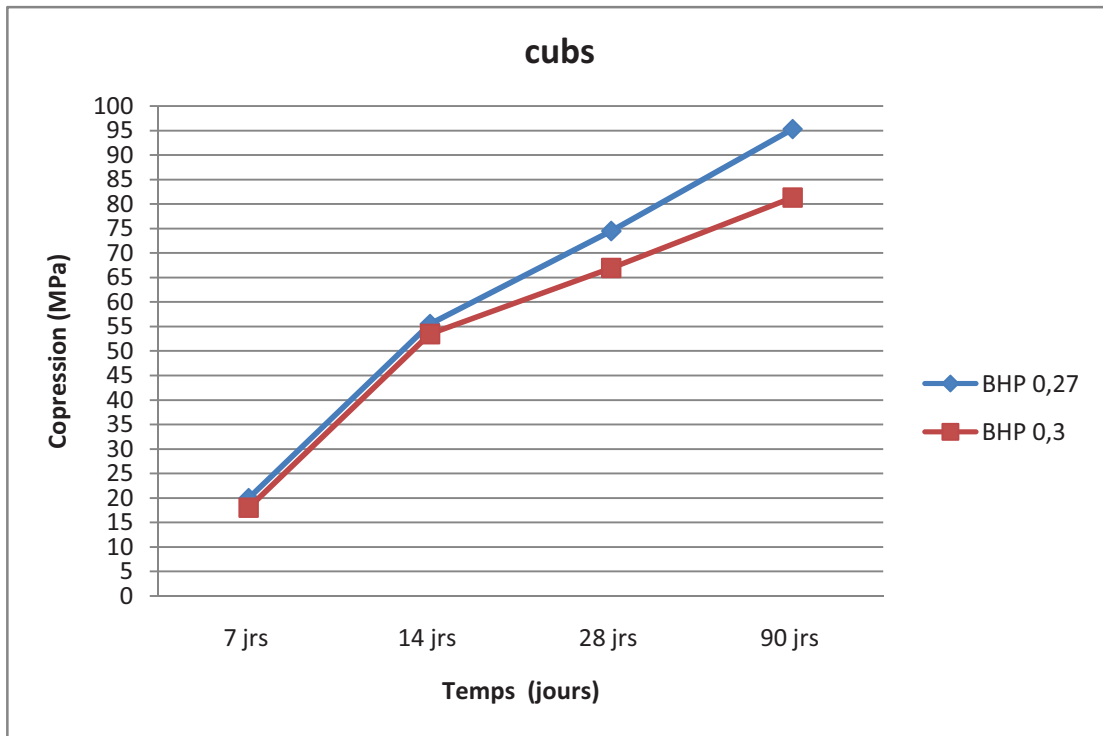
Figure IV.4.4. Correction d'affaissement au cône d'abrams



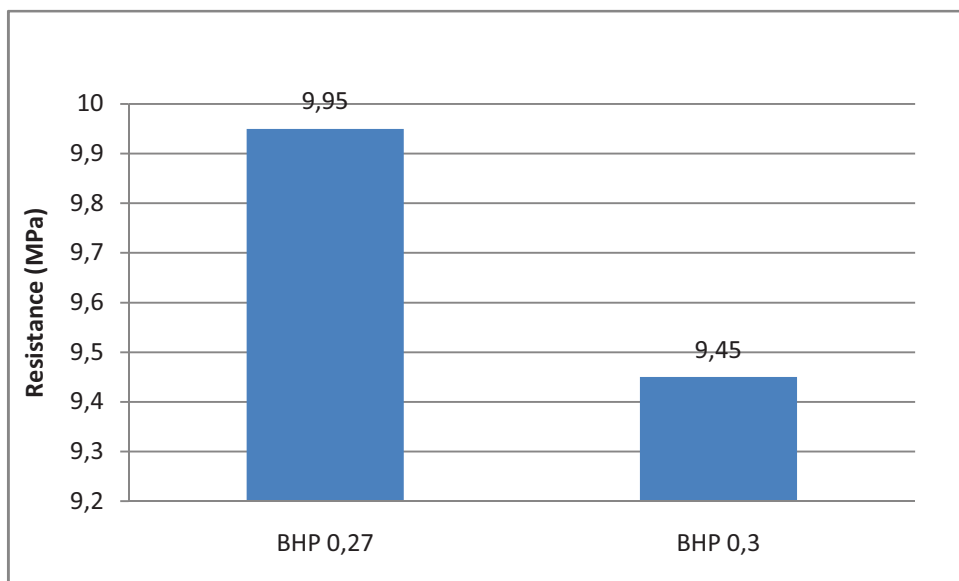
(a) Masse volumique du béton durci en fonction de l'âge (7, 14, 28, et 90 jours)



(b) Résistance à la compression des cylindres 7, 14, 28, et 90 jours



(c) Resistance a la compression des cubes 7, 14, 28, et 90 jours



(D) Resistance a la traction par flexion 28 jours

Figure IV.4.5. R sultat de la phase n° 4

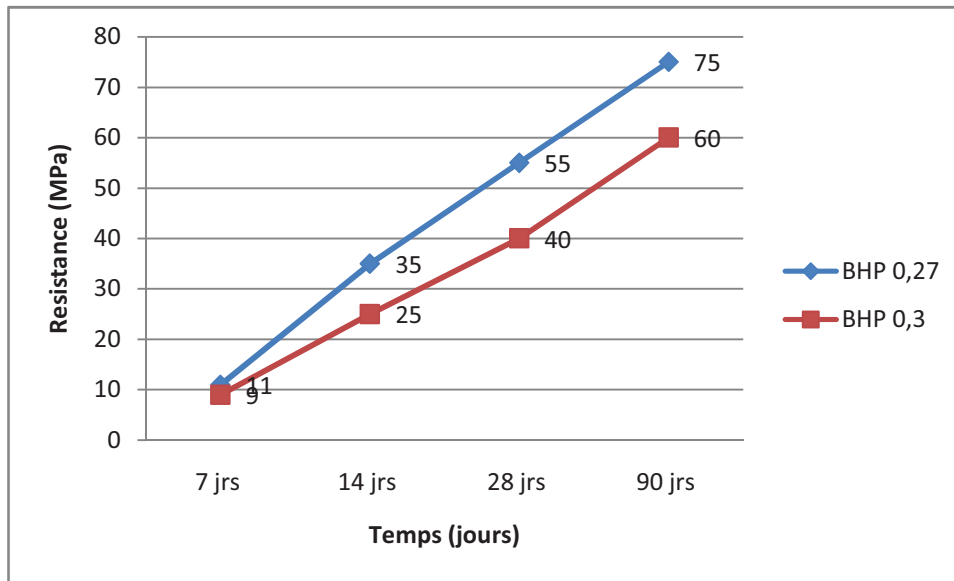


Figure IV.4.6. Niveau de contrainte de l'apparition des fissures dans le cas des les cubes

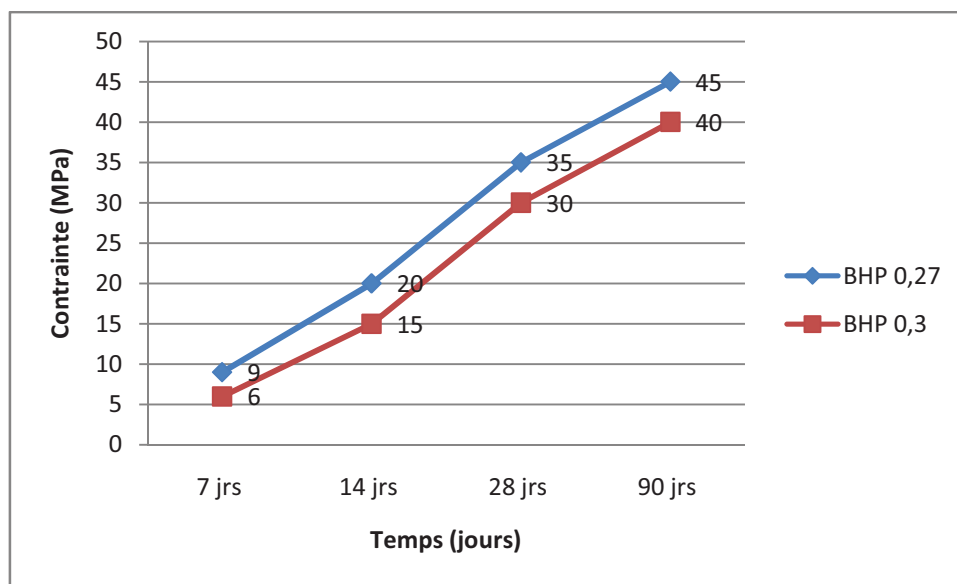


Figure IV.4.7. Niveau de contrainte de l'apparition des fissures dans le cas des cylindres

Les r sultats obtenus dans cette phase montre qu'il y une am lioration de la r sistance du b ton apr s l'ajout du laitier granul broy et l'introduction du superplastifiant, car on a pu atteindre des r sistance tr s lev s et qui d passe les 55 MPa l'ge de 14 jours, et on a abouti un b ton hautes performances avec une r sistance 90 jours de l'ordre de 95 MPa pour la compression, et de 10 MPa 28 jours pour la traction par flexion, voire Figure IV.4.6 Mais cette r sistance reste sensiblement inferieure la r sistance pr vue (100 MPa)

lors de la formulation par la méthode suivie par l'université de Sherbrooke pour les BHP base de la fumée de silice.

Les fissures apparaissent dans les deux BHP des résistances élevées (Figures IV.4.6, et Figure IV.4.7)

Les observations au microscope électronique balayage effectuées sur des chantillons des BHP 0.27 et BHP 0.30 montrent qu'il y a une bonne adhérence entre la pâte de ciment et les granulats (Figure IV.4.8), et que l'écaillement se produit aux niveaux des granulats avant la pâte de ciment. Cela confirme que la résistance de la pâte de ciment de ces bétons est très élevée et que la zone d'interface pâte de ciment-granat est très résistante. (Figure IV.4.9)

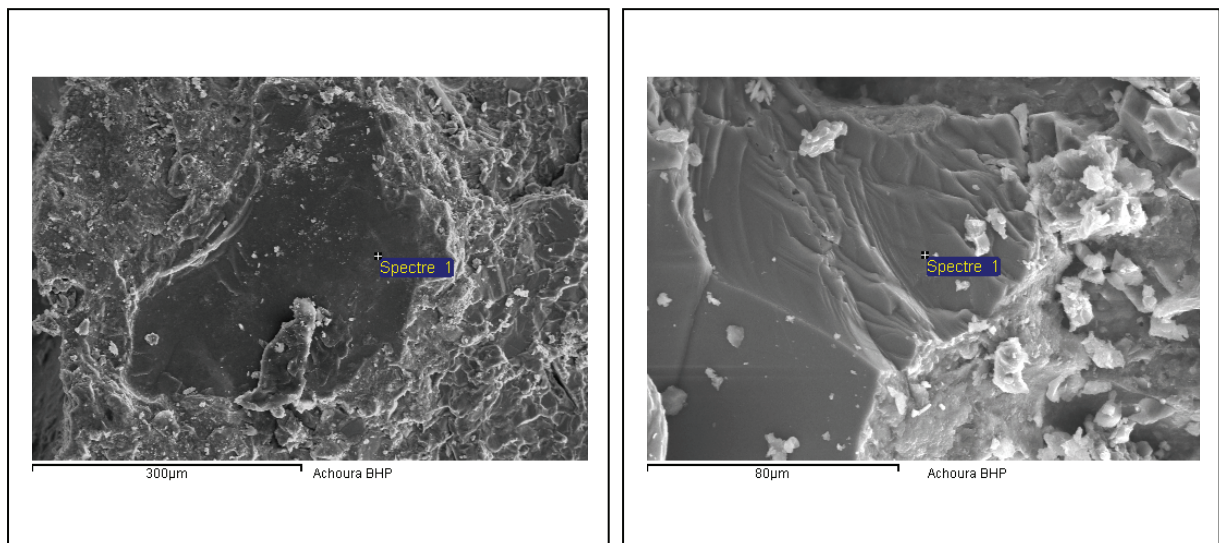


Figure IV.4.8 observations au microscope électronique balayage effectuées sur des chantillons des BHP 0.27 et BHP 0.30

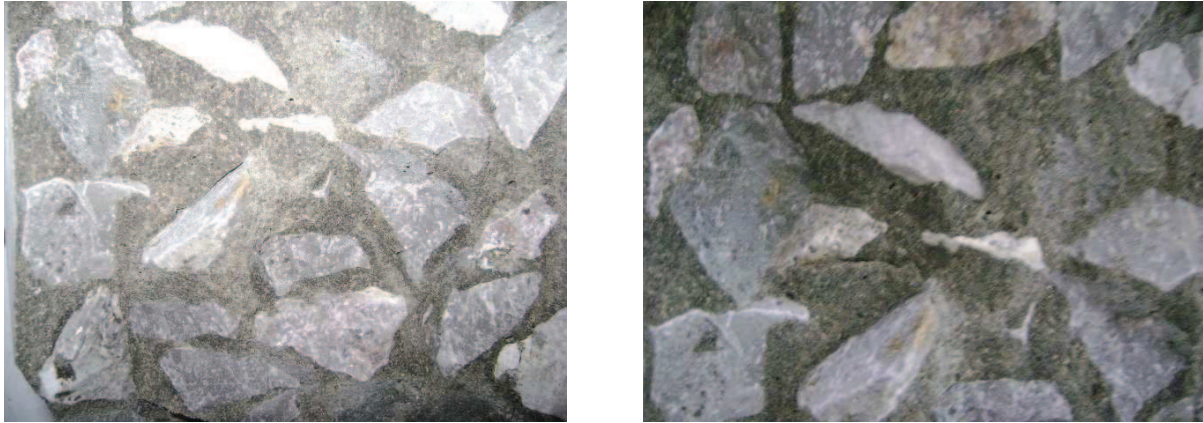


Figure IV.4.9. Observations à l'œil sur des chantillons des BHP 0.27 et BHP 0.30

On a constaté aussi qu'il y'a une différence entre les résultats obtenus par l'écrasement des prouvettes cylindrique et des cubes de l'ordre suivant :

$$(R_{\text{résistance du Cube}}/R_{\text{résistance du cylindre}} = 1.38)$$

IV.5. Retrait du béton durci (au-delà de 24 heures)

Les bétons sélectionnés pour l'étude du retrait de dessiccation sont choisis selon leur résistance mécanique. L'étude consiste à comparer le retrait d'un BHP à base des fillers de laitier de hauts fourneaux d'El-Hadjar avec un béton usuel de résistance moyenne qui ne dépasse pas 40 MPa. Donc on a pris les deux bétons suivants :

Le BHP 0.27

Méthode de formulation : la méthode de l'Université de Sherbrooke

E/L= 0,27

Résistance visée = 100 Mpa Dosage en C = 450 Kg

Dosage en Laitier = 20% du poids de ciment

Dosage en super plastifiant(40% solid)= 1 %

Affaissement au cône = 9 cm

Teneur en air = 1,5 %

B ton M3

Méthode de formulation : de Dreux corrigé

E/L= 0,43

Résistance visée = 40 Mpa

Dosage en C = 400 Kg

Affaissement au cône = 3 cm

Les proportions des constituants de ces deux bétons sont illustrées dans le tableau suivant

Tableau. IV.5. Compositions et dosages des bétons pour le test de retrait, pour 1 m³

<i>Désignation des mélanges</i>	<i>E/L</i>	<i>C (kg)</i>	<i>FL (kg)</i>	<i>Sp (kg)</i>	<i>Dosage en granulats utilisés (Kg)</i>		
					<i>S3</i>	<i>G2</i>	<i>G3</i>
<i>BHP 0,27</i>	0.27	429,63	107,41	13,41	682,91	280,98	769,01
<i>M3</i>	0.36	400	-	-	533,13	355,96	977,84

Les bétons hautes performances à base des fillers de laitier de hauts fourneaux d'El-Hadjar présentent un retrait de dessiccation moins important qu'un béton usuel est qui est de l'ordre de 210 µm 24 heures de sonde et qui ne dépasse pas les 260 µm 28 jours (Figure IV.5) par contre le béton usuel utilisé M3 présente un retrait de l'ordre de 230 µm 24 heures et dépasse les 280 µm 28 jours

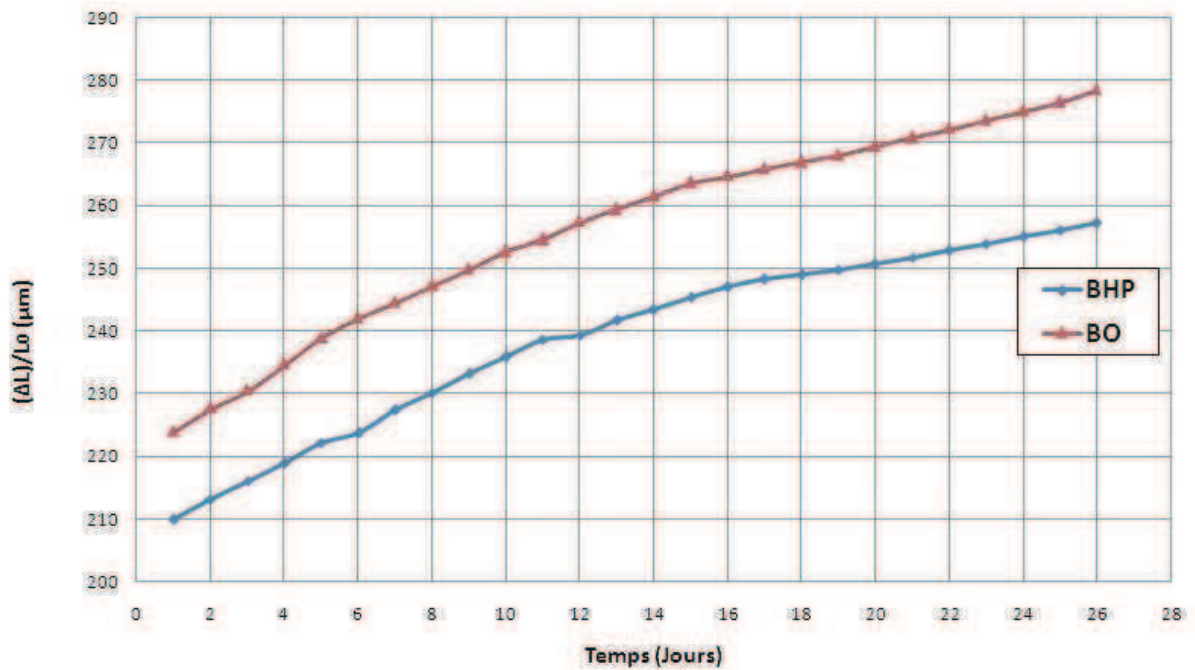


Figure IV.5. Retrait des BHP 0.27 et B ton usuel M3

IV.6. Conclusion

Ce chapitre avait pour objectif d'obtenir un BHP base de fillers de laitiers de Hauts fourneaux d'El-Hadjar en passant par l'optimisation du squelette granulaire d'un b ton usuel et la caractérisation de ses propriétés physiques et mécanique. De nombreux résultats expérimentaux ont été obtenus sur plusieurs séries d'échantillons, ce qui conforte les conclusions, relatives à ces b tons. Les principaux résultats sont les suivants.

Le laitier granulé de haut fourneau du complexe sidérurgique de l'usine d'EL HADJAR broyé (sous forme de fillers) convient pour la confection des b tons hautes performances en substitution totale des fines de la fumée de silice.

Les essais à l'état frais montrent que le laitier granulé broyé offre une certaine maniabilité au b ton, malgré la rétention d'eau par le laitier granulé est assez importante raison de leur porosité.

La méthode de formulation des BHP de l'université de Sherbrooke et applicable pour la confection des BHP à base du laitier granulé broyé et donne de bons résultats.

On peut compléter la méthode de formulation des BHP de l'université de Sherbrooke par les résultats obtenues pour l'étendu granulaire à partir de la méthode de formulation des bétons ordinaire de Dreux corrigée, au niveau du dosage en gros granulats ; car cette première ne donne que le dosage total en gros granulats sans rentrer dans les détails de la répartition (dosage) des différentes fractions granulaires.

Les bétons hautes performances à base des fillers de laitier présentent des résistances un peu faibles aux jeunes âges, mais au cours de leurs cycles de durcissement, ils présentent des évolutions importantes des résistances surtout après 14 jours.

L'augmentation de la maniabilité due à l'introduction d'un superplastifiant a permis une augmentation plus au moins considérable de la résistance moyen et long terme.

Nous signalons la différence entre les résultats obtenus par l'écrasement des prouvettes cylindrique et les prouvettes cubique lors de l'essai de compression axial dans notre cas est de l'ordre de 1,38.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Les BHP constituent une nouvelle avancée pour la construction en béton et ils offrent en cela des avantages aussi bien d'ordre économique, technique que sociaux. La possibilité de construire avec de grands ports et de sections minimum permet en effet de réduire les coûts globaux de production, de construire des éléments géométrie complexe et également de réduire la pénibilité du travail qu'ils nécessitent.

Pourtant, bien que ces avantages soient tangibles et que l'intérêt qu'ils suscitent chez les constructeurs soit grandissant, les BHP demeurent en dessous de l'utilisation qui pourrait être faite en raison de questions sans réponses posées par de nombreux chercheurs, maîtres d'ouvrage et maîtres d'œuvre. Certaines des inconnues qui les concernent nécessitent donc d'apporter des résultats de recherches probantes quant à leur facilité de formulation à base des matériaux disponibles, notamment en terme de performances.

Les objectifs de ce travail de thèse étaient donc de donner des réponses claires à deux questions majeures. Ainsi, le premier objectif était de trouver une solution économique à l'absence des ajouts cimentaire rentrants dans la formulation des BHP notamment la fumée de silice qui est un produit d'importation très cher par une substitution totale par le laitier de hauts fourneaux qui est disponible en grandes quantités. Le deuxième objectif était de chercher la possibilité de formuler un BHP local (matériaux locaux) à base du laitier de hauts fourneaux d'El-Hadjar par la méthode de formulation de l'université de Sherbrooke.

À partir de cette étude préliminaire et sur la base des résultats des essais physiques et mécaniques réalisés au cours de ce travail expérimental dans ces différentes phases, nous pouvons conclure ce qui suit :

- Le laitier granulé de haut fourneau du complexe sidurgique de l'usine d'EL HADJAR broyé (sous forme de fillers) convient pour la confection des bétons hautes performances en substitution totale des fines de la fumée de silice.

- Les essais à l'état fraîche montre que le laitier granulé broyé offre une certaine maniabilité au béton, malgré la rétention d'eau par le laitier granulé est assez importantes raison de leur porosité .
- La méthode de formulation des BHP de l'université de Sherbrooke et applicable pour la confection des BHP à base du laitier granulé broyé d'El-Hadjar et donne de bons résultats.
- On peut compléter la méthode de formulation des BHP de l'université de Sherbrooke par les résultats obtenues pour l'étendu granulaire à partir de la méthode de formulation des bétons ordinaire de Dreux corrigée, au niveau du dosage en gros granulats ; car cette première ne donne que le dosage total en gros granulats sans rentrer dans les détails de la répartition (dosage) des différentes fractions granulaires.
- Les bétons hautes performances à base des fillers de laitier granulé d'El-Hadjar présentent des résistances un peu faibles aux jeunes âges, mais au cours de leurs cycles de durcissement, ils présentent des évolutions importantes des résistances surtout après 14 jours.
- L'augmentation de la maniabilité due à l'introduction d'un superplastifiant a permis une augmentation plus au moins considérable de la résistance moyen et long terme.
- La formulation d'un BHP est tout autant un art qu'une science à l'heure actuelle. Il est en effet difficile de formuler un BHP en ne connaissant que la fiche technique des matériaux qui le composent. En effet plusieurs combinaisons des mêmes matériaux permettant d'obtenir une résistance 28 jours donnés.
- Nous signalons la différence entre les résultats obtenus par l'écrasement des poutres cylindrique et les poutres cubique lors de l'essai de compression axial. dans notre cas la moyenne du rapport de la résistance en compression des cubes celle des cylindres est de l'ordre de 1,38.

Notre travail a ainsi donné certaines réponses aux questions qui se posaient au départ de ce projet sur les BHP. Cependant, les hypothèses choisies au début du projet nous ont conduits à étudier certains paramètres préférentiellement d'autres (résistance mécanique). De nouvelles études pourront faire suite à ce travail en envisageant de faire varier des

paramètres tels que les matériaux constitutifs des formulations et d'estimer leur influence sur les propriétés mécaniques et physico-chimiques des BHP. Sont concernés les granulats, et l'influence du diamètre maximal des granulats (D_{max}) ou leur teneur en éléments fins ainsi leur composition chimique, et les adjuvants, notamment l'utilisation d'un entraîneur d'air.

En ce qui concerne les propriétés nécessitant la continuité de recherches, on peut principalement citer les déformations au jeune âge auxquelles sont liés certains problèmes de fissuration du béton. Cette fissuration qui peut apparaître dans les premières phases de durcissement.

Références bibliographique

References bibliographique

- [1]. AITCIN P C. 'Developments in the application of high-performance concretes', Construction and building materials, Vol. 9, No. 1, 1995.
- [2]. MLADENKA S C et AITCIN P C., « B tons haute performance base de ciments compos s contenant du laitier et de la fum e de silice » Can. J. Civ. Eng. Vol. 30, 2003, CNRC Canada.
- [3]. NEHDI M, MINDESS S et AITCIN C P. 'Rheology of high-performance concrete: effect of ultrafine particles', Cement and Concrete Research, Vol. 28, No. 5, 1998.
- [4]. BAALBAKI W., AITCIN P.C. et BALLIVY G. 'on predicting elastic modulus of high-strength concrete', ACI Materials Journal, 89(5), septembre – octobre 1992.
- [5]. GUETTECHE M.N., « Contribution à la valorisation des laitier de haut-fourneau d'EL HADJAR dans le domaine de la construction – caractérisation des matériaux labor s » - th se de doctorat, universit mentori- constantine, 2002.
- [6]. SHAH S.P.; AHMAD S.H. "High performance concretes and applications" Edward Arnold, ISBN 0-340-58922-1, 1994.
- [7]. Aitcin C P, "Developements in the application of high-performance concretes Construction and bulding materials", Vol. 9, No. 1, 1995.
- [8]. FEVRE C. (Ed.), « Projet National BHP 2000 – Les b tons hautes performances Guides pratiques (3 tomes) », Paris : IREX, 2002, 2003.
- [9]. DE SHUTTER ; « le b ton hautes performances ». Bulletin publi par : FEBELCEM-f d ration de l'industrie Belge – (juillet 2007)
- [10]. ISMAIL, M., « avec la cicatrisation dans les fissures pour prolonger la dur e de service des infrastructures » (ponts, centrales nucléaires), th se de doctorat INSA, 2006.
- [11]. MALIER, Y., « les b tons hautes performances -caractérisation, durabilit , applications », presse de l' cole nationale des ponts et chauss es, 1992.
- [12]. FERNON V. et coll., "Interaction Between Portland Cement Hydrates and Polynaphtalenesulfonates". SP 173-12.
- [13]. RAMACHANDRAN V.S., MALHOTRA V.M., JOLICŒUR S., SPIRATOS N., "Superplasticizers: Properties and Applications in Concrete", CANMET, Ottawa, Canada, 1998.

- [14]. KIM B.-G., JIANG S., JOLICŒUR C., AİTCIN P.-C., “The Adsorption Behavior of PNS Superplasticizer and its Relation to Fluidity of Cement Paste”, *Cement and Concrete Research*, 30, 2000.
- [15]. UCHIKAWA H., HANEHARA S., SAWAK D., “The Role of Steric Repulsive Force in the Dispersion of Cement Particles in Fresh Paste Prepared with Organic Admixtures”, *Cement and Concrete Research*, 27, 1, 1997.
- [16]. AİTCIN P C, JIANG S, KIM B G, PÉTROV, « L’interaction ciment/superplastifiant Cas des polysulfonates ». *Bulletin des laboratoires des ponts et chauss es - 233 - Juillet-Aout 2001 - RÉF. 4373 - Universit de Sherbrooke, Qu bec, Canada.*
- [17]. EDWIGE Nicolas, « Compatibilit s et Incompatibilit s Liants / Superplastifiant », *XXVIemes Rencontres Universitaires de G nie Civil 2008 - PRIX RENE HOUPERT.*
- [18]. “Seventh International Symposium on the Utilization of High-Strength/High-performance concrete”, *ACI Symposium Publication 228, Volumes 1 & 2, 2005.*
- [19]. BEHIM; Cours de mat riaux “structuration et hydratation des ciments”, *Cours du Premi re ann e Post Graduation G nie Civil Option Mat riaux et durabilit , universit d’Annaba 2006 / 2007.*
- [20]. REGOOURD, M « caracterisation et activation des produits d’addition, rapport principal, theme III », *9eme congres international de la chimie du ciment, rio de janeiro, vol. 1. 1983.*
- [21]. DRON R. et VOINOVICH, IA « l’activation hydraulique des laitiers, pouzzolanes et cendres volantes, dans le b ton hydraulique », *presses de l’ cole nationale des ponts et chauss es, 1982.*
- [22]. J. ALEXANDRE, J-L. SEBILEAU. « Le laitier de haut fourneau : laboration, traitements, propri t s, emplois ». *C.T.P.L, Paris 1988.*
- [23]. MELOLEEPSZY J, DEJA J. “The effect of variable curing conditions on the properties of mortars with silica fume”. *ACI SP-132. 2; 1992.*
- [24]. MAZLOOM M, RAMEZANIANPOUR AA, BROOKS JJ. “Effect of silica fume on mechanical properties of high-stength concrete”. *Cement and Concrete Composites 2004.*
- [25]. AITCIN PC; LAPLANTE P, BEDARD C. “Development and experimental use of a 90MPa field concrete”. *High Strength Concrete (ACI SP- 87); 1985.*
- [26]. AITCIN P. C., AUTPAGE F., “comparative study of de cementitious properties of different fly ashes”. *ACI SP-91, 1986.*

- [27]. HACHAICHI Samah "Substitution du sable roulé par les sables concassés et le laitier granulé de hauts fourneaux". Thèse du magister, université d'Annaba, 2008.
- [28]. Guide technique régional relatif à la valorisation des laitiers de hauts fourneaux. Laboratoire régional des ponts et chaussées de Lille (PREDIS – Groupe de travail n°5 : « améliorer la valorisation des déchets industriels en BTP »).
- [29]. Laitier de haut fourneau vitrifié (granulé ou boulet) bulletin du centre technique et de promotion des laitiers sidérurgiques. Avril 2004.
- [30]. MALHOTRA V.M. « Matériaux complémentaires en cimentation pour le béton ». Publié par le centre canadien de la technologie et de l'énergie, Ottawa, Canada, 1987.
- [31]. MLADENKA Saric-Coric, AITCIN P. c. « Bétons haute performance base de ciments composés contenant du laitier et de la fumée de silice » Can. J. Civ. Eng. Vol. 30, 2003, CNRC Canada.
- [32]. ZEGHICHI, B. MEZGHICH, A. MERZOUGUI. « L'influence de l'activation du laitier sur le comportement mécanique des bétons ». Lebanese Science Journal, Vol. 8, No. 2, 2007.
- [33]. RUNZHANG, Y. "Study on structure and latent hydraulic activity of slag and its activation mechanism". Silicates industriels, 1988.
- [34]. ZEGHICHI, L. « Etude de l'influence des composés alcalins sur les propriétés du ciment au laitier ». 11th International Conference for Building and Construction, Interbuild, Cairo, 2004.
- [35]. PIMIANTA, P. « Evolution des caractéristiques des BHP soumis à des températures élevées - Résistances en compression et modules d'élasticité ». Cahiers du CSTB – n° 3353 – Livraison 421 – Juillet Août 2001.
- [36]. ONOFFREI M., BALLIVY G., KHAYAT K. H. « Microstructural characteristics of HPC under different thermo-mechanical and thermo-hydraulic conditions » Materials and Structures/Matériaux et Constructions, Vol. 32, December 1999.
- [37]. GAWĘSKA HAGER Izabela « Comportement haute température des bétons haute performance - Evolution des principales propriétés mécaniques » Thèse de doctorat l'École Nationale des Ponts et Chaussées et l'École Polytechnique de Cracovie 2004.
- [38]. VOINOVITCH I.A., DRON R. « Action des différents activants sur l'hydratation du laitier granulé ». Bulletin – liaison l'ob, Ponts et Chaussées, 83 mai-juin 1976.
- [39]. DIAMOND, S., 'The Microstructure of Cement Paste in Concrete'. VIII International Cong. Chem.Cem., vol I, Rio de Janeiro 1986.

- [40]. PHAN, L.T., LAWSON, J.R. « Effect of elevated temperature exposure on Heating Characteristic, Spalling, and Residual Properties of High Performance Concrete ». Materials and Structures, Vol.34, March 2001.
- [41]. SLIWINSKI J., LEONARD R., TRACZ T. « Influence of High Temperature on the Residual Permeability of High Performance Concrete (in Polish) », Proc. Of 2nd Conf. "Dni Betonu", Polski Cement, Wisła 2004.