

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR - ANNABA
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY



جامعة باجي مختار – عنابنة

Faculté : Science de l'ingénierie
Département : Génie Civil
Domaine : Sciences de l'ingénieur
Filière : Génie Civil
Spécialité : Matériaux de génie civil

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème:

ELABORATION ET COMPORTEMENT DES BHP A BASE DE LIANT TERNAIRE
" Effet du taux substitution partielle du ciment par le laitier
granulé".

Présenté par : *LALLOUCHI IMED & BOUMAZA ANFELLE*

Encadrant : *Mr. ACHOURA DJAMEL Professeur Université d'annaba*

Jury de Soutenance :

BEHIM Mourad	Pr.	Université d'Annaba	Président
ACHOURA Djamel	Pr.	Université d'Annaba	Encadrant
MELAIS Fatma Zohra	MCB	Université d'Annaba	Examineur

Année Universitaire : 2019/2020

Remerciements

Au terme de ce travail nous tenant a remercié en premier le **BON DIEU** qui nous a donné la force, la volonté la patience pour achever ce mémoire.

En second lieu, nous tenons à remercier notre encadreur le professeur **ACHOURA DJAMEL**, d'avoir proposé et dirigé ce travail et pour sa total disponibilité, son précieux conseil et son aide durant toute la période du travail.

Nous tenons à exprimer nos gratitudees aux membres du jury. Tout d'abord, au professeur **BEHIM MOURAD** d'avoir accepté de présider notre jury de soutenance, mes remerciements s'adressent également au **Dr. MELAIS FATMA ZOHRA** maitre de conférence d'avoir accepté d'examiner ce mémoire.

je souhaite ici rendre hommage et exprimer ma profonde gratitude à tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation ce travail et à son aboutissement.

Pour terminer, nous tenant sincèrement à remercier du fond du cœur nos famille plus particulièrement nos parent et nos frères et nos sœurs.

Aucun remerciement ne saurait exprimer l'amour et le respect que j'ai toujours eu pour mes grands-parents décédés trop tôt, Benchikh Zibouda et Lahlah Mohamed, Paix à vos âmes.

A nos ami(e), Merci pour leurs amours et leurs encouragements.

A tous ceux que nous aimons et ceux qui nous aiment.

Merci à tous et à toutes.

Anfelle, Imed.

TITRE : Elaboration et comportement des bétons à hautes performances à base de liant ternaire : ciment – fumée de silice – laitier granulé broyé**Presented by: LALLOUCHI Imed & BOUMAZA Anfelle****Encadrant: Pr. ACHOURA Djamel**

Résumé

Le souci de prendre en compte et de protéger l'environnement, les ressources naturelles et de lutter contre la pollution amène à un nouveau comportement. A cette préoccupation environnementale est lié évidemment un volet économique lié à l'utilisation des déchets et des sous-produits locaux dans le secteur de construction.

La construction et le développement durable sont devenus très associés dans le monde du génie civil. Cependant, un des matériaux de construction les plus utilisés figure parmi les plus polluants. En effet, la production du ciment, l'ingrédient clé du béton, est responsable d'une quantité importante d'émission de CO₂. Une des solutions est de remplacer une partie du ciment par des ajouts cimentaires provenant de sous-produits industriels, comme le laitier granulé finement broyé, la pouzzolane naturelle locale présente une bonne alternative pour l'utilisation d'un liant moins polluant.

Les bétons à hautes performances présentent des caractéristiques mécaniques intrinsèques très satisfaisantes. Cependant, plusieurs questions restent encore posées notamment en ce qui concerne l'utilisation d'un dosage élevé en ciment sans ajouts dont la fabrication est associée une émission élevée de CO₂.

Ce travail présente une nouvelle approche de conception et de formulation de béton à hautes performances à base de liant ternaire moins-polluant dans l'objectif est l'amélioration accrue de la durabilité et l'obtention des performances mécaniques similaires à ceux béton à hautes performances conventionnel. Le travail expérimental réalisé a pour objectif l'étude de l'influence de la substitution partielle du ciment par le laitier granulé en présence de la fumée de silice sur le comportement physico-mécanique des bétons à hautes performances formulé on utilisant une combinaison de deux approche de formulation approche de l'université de Sherbrooke et méthode de DREUX GORISSE.

Les résultats obtenus montrent qu'il est possible de limiter fortement la teneur en CEMI grâce un taux de substitution de en laitier granulé allant jusqu'à 50 % dans la fabrication d'une nouvelle gamme de BHP. Ceci diminue l'émission de CO₂ dans l'atmosphère et diminue l'énergie nécessaire pour sa production ce qui est très bénéfique pour l'environnement. Des améliorations ont été aussi observées sur les propriétés rhéologiques des bétons à l'état frais et des performances mécaniques similaires ou légèrement inférieures à celles des BHP témoins sont obtenues.

Mots clés : béton à hautes performances – liant ternaire – fumée de silice — laitier granule - maniabilité – résistance mécaniques .

العنوان

تطوير وسلوك الخرسانة عالية الأداء على أساس الموثق الثلاثي: الأسمنت - دخان السيليكا - الخبث المحبب المسحوق

المشرف على الاطروحة : البروفيسور عشورة جمال

ملخص

إن الاهتمام بمراعاة وحماية البيئة والموارد الطبيعية ومكافحة التلوث يؤدي إلى سلوك جديد. ومن الواضح أن هذا القلق البيئي مرتبط بمكون اقتصادي مرتبط باستخدام النفايات المحلية والمنتجات الثانوية في قطاع البناء. أصبح البناء والتنمية المستدامة مرتبطاً بشكل كبير في عالم الهندسة المدنية. ومع ذلك ، فإن واحدة من أكثر مواد البناء استخداماً هي من بين أكثر المواد تلويثاً في الواقع ، إنتاج الاسمنت ، المكون الرئيسي للخرسانة ، مسؤول عن كمية انبعاث CO₂ . احد الحلول هو استبدال جزء من الاسمنت بإضافات أسمنتية من المنتجات الثانوية الصناعية ، مثل الخبث المحبب المطحون بدقة ، يقدم البوزولان الطبيعي المحلي بديلاً جيداً لاستخدام مادة رابطة أقل تلويثاً. خرسانة عالية الأداء لها خصائص ميكانيكية داخلية مرضية للغاية. ومع ذلك ، لا تزال هناك العديد من الأسئلة ، لا سيما فيما يتعلق باستخدام جرعة عالية من الاسمنت بدون إضافات ، والتي يرتبط تصنيعها بارتفاع انبعاثات ثاني أكسيد الكربون. يقدم هذا العمل نهجاً جديداً لتصميم وصياغة الخرسانة عالية الأداء استناداً إلى غلاف ثلاثي أقل تلويثاً بهدف تحسين المتانة والحصول على أداء ميكانيكي مشابه للخرسانة التقليدية عالية الأداء. الهدف من العمل التجريبي الذي تم إجراؤه هو التأثير على الاستبدال الجزئي للأسمنت بواسطة الخبث المحبب في وجود دخان السيليكا على السلوك الفيزيائي الميكانيكي للخرسانات عالية الأداء المصاغ باستخدام مزيج من نهجين للصياغة جامعة

شيربروك و طريقة DREUX GORISSE

أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أنه من الممكن تقليل محتوى CEMI بشكل كبير بفضل معدل استبدال الخبث المحبب بنسبة تصل إلى 50% في تصنيع مجموعة جديدة من BHP . هذا يقلل من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي ويقلل من الطاقة اللازمة لإنتاجه وهو مفيد للغاية للبيئة. كما لوحظت تحسينات في خصائص التدفق للخرسانة الجديدة والأداء الميكانيكي المماثل أو أقل بقليل من اداء BHPs الضابطة .

الكلمات المفتاحية : الخرسانة عالية الأداء - الموثق الثلاثي - دخان السيليكا - حبيبات الخبث المطحون - قابلية التشغيل - المقاومة الميكانيكية .

TITLE: Design and Behavior of High Performance concrete containing ternary binders: Cement - Silica fume - Blast furnace Slag

Présenté par: LALLOUCHI Imed & BOUMAZA Anfelle

DIRECTOR OF THESIS: Pr. ACHOURA DJAMEL

ABSTRACT

The concern to take into account and protect the environment, natural resources and to fight against pollution leads to a new behavior. To this environmental concern is obviously linked an economic component linked to the use of local waste and by-products in the construction sector. Construction and sustainable development have become very much associated in the world of civil engineering. However, one of the most used building materials is among the most polluting. Indeed, the production of cement, the key ingredient of concrete, is responsible for a significant amount of CO₂ emission. One of the solutions is to replace part of the cement with cement additions from industrial by-products, such as finely ground granulated slag, the local natural pozzolanic presents a good alternative for the use of a less polluting binder. High performance concretes have very satisfactory intrinsic mechanical characteristics. However, several questions still remain, notably with regard to the use of a high dosage of cement without additions, the manufacture of which is associated with a high emission of CO₂. This work presents a new approach to the design and formulation of high performance concrete based on a less polluting ternary binder with the aim of improving durability and obtaining mechanical performance similar to that of conventional high performance concrete. The aim of the experimental work carried out is to influence the partial substitution of cement by granulated slag in the presence of silica smoke on the physical and mechanical behavior of high performance concretes formulated using a combination of two formulation approach the University of Sherbrook and DREUX GORISSE method. The results obtained show that it is possible to strongly limit the CEMI content thanks to a substitution rate of granulated slag of up to 50% in the manufacture of a new range of BHP. This decreases the emission of CO₂ into the atmosphere and decreases the energy required for its production which is very beneficial for the environment. Improvements have also been observed in the rheological properties of concrete in the fresh state and mechanical performance similar to that of the control BHPs is obtained.

Keywords: high performance concrete - ternary binder - silica fume - blast furnace slag - workability - compressive strength.

Sommaire

Remerciements	i
Résumé	ii
ملخص	iii
Abstract	iv
Sommaire	v
Liste des figures	Ix
Liste des tableaux	Xiii
Introduction générale	1
Chapitre I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE	
Introduction	1
I- 1 les bétons à base de liants ternaires	1
I-1.1 définition	1
I-1 .2. Avantage technico-économique	2
I-1 . 3 Intérêt des liants ternaires	2
I.4 les différents types d'additions minérales	2
I.4.1 les additions minérales	2
I.4.2 bénéfiques et avantages de l'utilisation des additions minérales	3
I.4.2.1 Bénéfices fonctionnels	3
I.4.2.1 Bénéfices économique	4
I.4.2.2 Bénéfices écologiques et environnements	4
I.4.3 classification des ajouts minéraux	5
I.4.3.1 les cendres volantes	5
I.4.3.2 les laitiers de haut fourneau	6
I.4.3.3 Fillers calcaires	6
I.4.3.4 la fumée de silice	6
I.4.3.5 la pouzzolane	7
I.5 Rôle et effet de l'ajout cimentaire	8
I.5.1. Rôle granulaire ou effet fillers des ajouts cimentaire	8
I.5.2. Rôle pouzzolanique des ajouts cimentaires	8

Sommaire

I.5.3. Rôle mécanique des ajoutes cimentaires	9
I.6 Importance des additions minérales dans l'industrie cimentière	10
I.7 Additions industriel directement dans le béton	11
I.8 Processus d'hydratation des liants ternaires.....	12
I.8.1 Détermination de la composition d'un mélange ternaire	12
I.8.2 Evaluation de l'hydratation	13
I.8.3 Hydratation de ciments portland	15
I.8.4 Cas particulier des ciments à base de laitier de haute fourneau.....	16
I.8.4.1 L'hydratation du laitier granulé (réactivité hydraulique).....	18
I.8.5 Cas particulier des ciments à base de fumée de silice	19
I.8.5.1 Cinétique d'hydratation	20
I.8.6 Mélange ternaire CEMI /fumée de silice/ cendre volante	20
I.8.7 Mélange ternaire CEMI /fumée de silice/ laitier	21
I.8.8 Synthèse sur l'hydratation de ciment ternaire	21
I.9. Les bétons à base de laitier granulé	22
I.9.1 production du laitier de haut fourneau granulé	22
I.9.2 influence du laitier sur les propriétés des matériaux cimentaire	23
I.9.3 caractéristiques des bétons à base de laitier	23
I.10 durabilité des bétons à base de liants ternaires	24
I- 2 Béton a haute performances	26
I-2.1 introduction	26
I-2.2 Historique	26
I-2.3 définition des BHP	27
I-2.4 voies d'obtiens des BHP	27
I-2.5 Principe d'obtiens des BHP.....	27
I-2.6 Amélioration de la résistance de la pate de ciment hydraté	28
I-2.6.1 Porosité	29
I-2.6.2 diminution de la taille des grains des produits d'hydratation	31
I-2.7 microstructure des BHP	32
I-2.8 Méthode de formulation de BHP	35

Sommaire

I-2.8.1	Méthode de Dreux Gorisse	36
I-2.8.2	Méthode de baron –Lesage	36
I-2.8.3	Méthode de LARRAD	37
I-2.8.4	Méthode de SHERBROOK	37
I-2.8.5	autres méthodes de formulation	38
I-2.8.6	Méthode suggéré par la comité ACI 363	38
I-2.8.7	Méthode de colis du LCPC	39
I-2.8.8	La méthode simplifier de Mehta et aitein	40
I-2.9	Performances mécanique des bétons à haute performances	40
I-2.9.1	Resistance en compression	41
I-2.9.2	résistance en traction	41
I-2.9.3	le module d'élasticité	42
I-2.10	Déformation libres et sous chargement des BHP	42
I-2.10.1	Retrait	42
I-2.10.2	Retrait endogène	43
I-2.10.3	Retrait de dessiccation.....	44
I-2.10.4	fluage	46
I-2.11	durabilité de BHP	47
	Conclusion du chapitre	48
	Chapitre II : MATERIAUX ET FORMULATION	
II.1	Introduction	49
II.2	programme expérimentale prévisionnel	49
II.3	Matériaux d'étude	49
II.3.1	Caractéristiques des constituants des béton utilisés	50
II.3.1.1	Liants	50
II.3.1.1. A/	Ciment	50
II.3.1.1. B/	Fumée de silice	51
II.3.1.1. C/	Laitier granulé	53
II.3.1.1. D/	L'eau	55
II.3.1.2	Granulats	56

Sommaire

II.3.1.3 Adjuvants	63
II.3.2 Formulation des BHP d'études	63
II.3.2.1 Formulation de référence	64
II.3.2.1.1 Détermination des proportions de la fraction de sable et gravillon selon la méthode de Dreux Gorisse	64
II.3.2.1.2 Calcul de composition des BHP d'étude selon la méthode de Sherbrooke	66
II.3.3 fabrication et conservation	68
II.3.3.1 essais au cône d'Abrams.....	69
II.3.3.2 choix d'éprouvettes	70
II.3.3.3 masse volumique a l'état frais	70
conclusion de chapitre	71
Chapitre III : caractéristiques des BHP d'études à l'état frais et durci	
III.1 Introduction	72
III.2 optimisation et l'ajustement de la formulation du BHP témoin	72
III.2.1 Maniabilité et masse volumique des mélanges d'optimisation	73
III.2.2 évaluation de la résistance à la compression des différentes formulations de béton	74
III.3 Caractérisation des BHP d'étude à base de liants ternaire à l'état frais (effet du taux de substitution du ciment par le laitier granulé).....	76
III.3.1 Maniabilité	76
III.3.1.1 Essai d'affaissements au cône d'Abrams	76
III.3.1.2 interprétation des résultats	78
III.3.2 Masse volumique du béton frais	79
III.3.2.1 procédure	79
III.3.2.2 interprétation	80
III.4. Caractérisation des BHP d'étude à l'état durci.....	81
III.4.1 Effet de la substitution sur la masse volumique des BHP durcis	82
III.4.2 Evaluation de résistance mécanique en compression	82
III.4.2.1 procédure	82
III.4.2 .2 Interprétation	83
Conclusion	85

Sommaire

III.5 Description théorique des Indicateurs de durabilité	85
III.5.1 Introduction	85
III.5.2 Capillarité	86
III.5.3 Paramètres de transfert dans les bétons non endommagé.....	86
III.7.4 Mesures de la porosités accessible à l'eau (essais d'absorption totale).....	87
III.7.5 Absorption d'eau par capillarité	88
Conclusion générale	91
Référence bibliographique	93
ANNEXES	103

Liste des figures

Chapitre I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

Figure I.1 Détermination de la composition d'un mélange ternaire par les méthodes graphique (parallèle deux cotés et perpendiculaire aux côté opposé)	12
Figure I.2 localisation, dans un diagramme ternaire CaO – SiO ₂ – Al ₂ O ₃ , des composés minéraux couramment ajoutés au ciment portland	13
Figure I.3 Dégagement de chaleur lors de l'hydratation du ciment en fonction du temps	14
Figure I.4 paramètre influençant la réactivité des laitiers	18
Figure I.5 Echelles de porosité dans les matériaux cimentaires (Mehta,1986)	25
Figure I.6 BHP	27
Figure I.7 Béton ordinaire	27
Figure I.8 Produit d'hydratation externe	30
Figure I.9 Produit d'hydratation interne	30
Figure I.10 représentation schématique de deux pates de ciments fraiches de rapports respectifs de 0.65 et 0.25	32
Figure I.11 modèle de la morphologie de l'auréole de transition d'un BHP	34
Figure I.12 microstructure de la zone de contact entre la pâte et les granulats	35
Figure I.13 passerelle de Seoul	46
Figure I.14 le pont de Mila	46
Chapitre II : MATERIAUX ET FORMULATION	
Figure II.1 ciment utilisé	50
Figure II.2 Echantillon de la fumée de silice	52
Figure II. 3 Courbe granulométrique de fumée de silice (FS).....	53
Figure II.4 Courbe granulométrique de laitier granulé (L)	43
Figure II.5 Echantillon de laitier	55
Figure II .6 laitier LHF après broyage	55

Liste des figures

Figure II .7 diapositive de l'essai équivalent de sable	57
Figure II .9 Masse volumique apparente	57
Figure II .10 Masse volumique absolue	58
Figure II .11 dispositif de l'essai los Angeles	59
Figure II .12 Grille à fente	60
Figure II. 13 Courbe granulométrique (sable de dune, sable de carrière, gravier.....)	62
Figure II .14 Préparation des constituants	64
Figure II .15 Courbe granulométrique de BHP	66
Figure II .16 Présentation des éprouvettes et leurs conservations	70
Chapitre III : Caractéristiques des BHP à l'état frais et durci	
Figure III.1 Masse volumique a l'état frais des différents mélanges d'optimisation	73
Figure III. 2 Maniabilité des BHP à base de FS	74
Figure III.3 essais de compression aux éprouvettes cubiques de bétons témoins a 28j.....	75
Figure III.4 évaluation de la résistance à la compression des différentes formulations d'optimisation du bhp témoin.....	76
Figure III .5 Maniabilité des différents BHP.....	77
Figure III .6 Masse volumique apparentes des différentes BHP.....	80
Figure III .7 Effet de % de substance de LHF sur masse volumique apparente des différents BHP étudié	80
Figure III .8 masse volumique de BHP à l'état durci (90jours)	81
Figure III .9 Résistance mécanique en fonction de la durée de maturation	83
Figure III.10 Résultat de résistance BHPL a l'échéance de 90jours	83

Liste des tableaux

Chapitre I : Synthèse bibliographique

Tableau I.1 Classification des ajouts selon leur réactivité	5
Tableau I.2 Présente quelque résultats d'essais de compression	41
Tableau I.3 Retrait de dessiccation et retrait endogène en fonction de fck et de fonction de l'humidité relative (HR) suivant la norme EN 1992-1-1 :2004	45
Tableau I.4 Tableau extrait du guide pratique IREX a l'attention des bureaux d'études pour l'application des règles BAEL aux BHP	46

Chapitre II : matériaux et formulation

Tableau II.1 composition chimique du ciment	50
Tableau II.2 composition minéralogique du clinker	50
Tableau II.3 Caractéristiques physiques du ciment	51
Tableau II.4 Caractéristique mécanique du ciment (norme NF EN196-1/2016)	51
Tableau II.5 Composition chimique de la fumée de silice	52
Tableau II.6 propriétés physique de la fumée de silice	53
Tableau II.7 composition chimique du laitier El-Hadjar	53
Tableau II.8 Propriétés physiques de LHF après broyage.....	54
Tableau II.9 Impuretés admissibles dans l'eau de gâchage	56
Tableau II.10 Caractéristique physico-mécaniques des granulats	60
Tableau II.11 Analyse granulométrique du sable de dune de Tébessa.....	61
Tableau II.12 Analyse granulométrique du sable de carrière GREPCO.....	61
Tableau II.13 Analyse granulométrique du gravier (3/8) corriger.....	62
Tableau II.14 Analyse granulométrique du gravier (8/16)	62
Tableau II.15 Caractéristiques du super plastifiant TEKNACHEM SUPERIOR 126.....	63
Tableau II.16 Composition du BHP témoin (E/L= 0.28)	68
Tableau II.17 Classification et mesure de l'affaissement BHP témoin	69

Liste des tableaux

Chapitre III: Caractérisation des BHP d'études à l'état frais et durci

Tableau III.1 composition des mélanges préliminaire pour optimisation du bhp témoins	72
Tableau III.2 affaissement et masse volumique à l'état frais des autres bétons témoins (BHP) a base de fumée de silice	72
Tableau III.3 résistance des écrasements des autres bétons témoins (BHP) à base de FS	75
Tableau III .4 Valeurs de l'affaissement au cône d'Abrams des BHP d'études	77
Tableau III.5 résultat des masses volumique a l'état frais des bétons d'études (BHPL)	79
Tableau III.6 masse volumique à l'état durci des BHP 90 jours	81
Tableau III .7 évaluation des résistances a la compression	82
Tableau III .10 Tableau récapitulatif des expérimentations menées sur le thème du couplage perméabilité – endommagement avec des mesures de perméabilité à l'eau	90

Introduction

Le monde est en voie de développement très rapide comme l'éclair, pour faire face aux besoins humains, il nous faut beaucoup de matériaux, parmi ces derniers, le béton est le matériau le plus utilisé sur la planète. Il est composé essentiellement de granulats, de ciment et d'eau.

L'industrie du béton est confrontée à une double problématique. D'une part, l'emploi de certains ciments comme les CEM I s'avère très discutable du point de vue environnemental. En effet, la fabrication du clinker (95% en masse des CEM I) nécessite une grande quantité d'énergie et provoque un dégagement significatif de CO₂ dans l'atmosphère. [1].

A partir des années 1970, des études ont été mises en place et des conférences organisées, avec pour objectifs de limiter les impacts engendrés, de préserver les écosystèmes et de réduire les impacts environnementaux comme les émissions de gaz. Après avoir pris conscience au niveau international on trouve les associations comme **CNUED 1992 (Rio) = Sommet de la Terre, Protocole de Kyoto 1997, COP21 à Paris en 2015.**

D'autre part, depuis le protocole de Kyoto, entré en vigueur en 2005, donne l'obligation de réduire les émissions de gaz, il devient essentiel d'innover pour trouver des solutions à la fois viables économiquement, satisfaisantes du point de vue environnemental et qui soient adaptées à la réalisation de produits préfabriqués.

Pour pallier cette problématique environnementale et économique, une des solutions pouvant être envisagée est l'emploi d'addition minérale en substitution partielle du ciment portland par laitier granulé.

Actuellement, ces liants sont généralement constitués de ciments Portland de type CEM I. Les liants contenant des proportions importantes de laitier de haut fourneau et de Calcaire, à l'origine d'une plus faible émission de CO₂, commencent à être employés pour certaines applications spécifiques. Il peut s'agir de ciments contenant du laitier CEM II et CEM III, de ciments au calcaire CEM II ou de liants ternaires ciment + laitier et calcaire sous forme d'addition.

Dotés d'une activité hydraulique latente. Leur contribution chimique et mécanique à l'obtention de matrices cimentaires performantes est connue depuis longtemps et l'intérêt qu'on leur porte est croissant ces dernières années compte tenu des préoccupations liées au Développement durable.

La formulation des bétons qui, pendant très longtemps, a reposé sur une simple association ternaire ciment, eau et granulats, s'est progressivement compliquée au point

Introduction

qu'un béton actuel comporte de façon courante cinq constituants : ciment, eau, granulats, additions minérales et adjuvants. Cet accroissement du nombre de constituants est, d'un point de vue pratique, très avantageux Car il conduit, généralement, à l'amélioration très significative des performances mécaniques, Physiques et durabilités des bétons. Dite 'béton à haute performance'.

Avec l'apparition des nouveaux matériaux et l'exigence des chantiers vient le BHP de premier ordre qui est utilisés dans les constructions de toutes tailles. Qui se caractérise par la résistance mécanique très élevée et bonne durabilité. Les gains de résistance ne sont pas les seuls avantages de ces bétons qui tirent leurs propriétés de leur microstructure très dense, d'une forte réduction de leur porosité et d'un réseau capillaire non connecté.

Ces bétons sont, en fait, des matériaux à très haute compacité. Les BHP sont également, du fait de leur porosité extrêmement réduite, plus résistants aux agents agressifs et, de façon générale, présentent une Durabilité accrue. Ils permettent d'optimiser les structures, de réaliser des ouvrages soumis à des contraintes élevées ou subissant un environnement sévère (climat, agressions marines, effets du gel attaques acides, etc.)

Ces qualités sont obtenue grâce au développement récent en technologie de fabrication de ciment, des ajouts minéraux actifs (fumée de silice, cendre volante, pouzzolane, laitier granule.....) et de superplastifiants haute réducteur d'eau.

L'incorporation des additions minérales est maintenant une technique importante en Améliorant les propriétés du béton telle que la fluidité, la résistance, la durabilité, etc. ces Additions minérales affectent de manière significative la rhéologie des matériaux cimentaires à l'état frais, qui est directement relié avec le développement de la résistance, la durabilité des Matériaux durcis.

Cependant leur utilisation est très motivée en terme de valorisation des sous-produits industriel dans le cadre de conserver l'environnement. Depuis des décennies plusieurs recherches ont été élaboré pour améliorer les propriétés constructives du béton a l'Etat frais et durci.

Les soucis des chercheurs sont d'aboutir à des hautes performances avec un judicieux des matériaux et l'adjonction de nouveau produits tel que les additions fines, l'utilisation de ces produits en tant qu'ajouts cimentaires est très bénéfique du point de vue construction durable

Introduction

Néanmoins, pour profiter pleinement de ces avantages et ainsi choisir la meilleure solution qui nous permettent d'optimiser la formulation d'un BHP à base de liant ternaire (ciment - fumée de silice –laitier granulé broyé) dans le cadre de notre travail comme suit :

Dans la première partie du premier chapitre est consacré à l'étude bibliographique dans laquelle on a décrit le liant ternaire à travers ses caractérisations physico-chimiques comme une alternance au ciment. On exposera aussi les rôles joués dans le BHP. En revanche la deuxième partie du premier chapitre aborde les différents aspects des BHP notamment des généralités, les différentes méthodes de formulation les performances mécaniques et la durabilité.

Le deuxième chapitre décrit en détail la caractérisation minéralogique, physico-chimique et mécanique des matériaux utilisés. Ainsi une description des différents méthodes formulations et les protocoles expérimentaux de préparation conservation des éprouvettes.

Le troisième chapitre présent les résultats de caractérisation des BHP d'étude a l'état frais et durci dans laquelle on a mis en évidence l'effet de l'incorporation des additions minérale sur la maniabilité, la masse volumique et l'évolution des résistances mécaniques en compression des BHP. A partir des résultats obtenus à travers cette étude conclusion générale a été établi à la fin du mémoire.

CHAPITRE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

Introduction :

Le contexte actuel du réchauffement climatique et de ses effets génère, une prise de conscience croissante de nos sociétés. L'enjeu environnemental est d'actualité, les émissions de CO₂ étant directement prise en compte par intégration de nouvelles réglementations dans le secteur du bâtiment. Ces travaux de mémoire de fin d'étude s'inscrivent dans le programme d'actions de l'industrie du béton en recherchant des solutions innovantes toujours moins impactant tout en garantissant des performances techniques et économiques au moins équivalentes à celle des bétons traditionnels à base de ciment portland pour gain environnemental.

Ce chapitre présente, dans un premier temps, une description détaillée du matériau béton à base de liant ternaire. Il expose dans un deuxième temps une synthèse exhaustive des travaux réalisés sur les bétons à hautes performances et se termine par une conclusion justifiant l'intérêt de notre étude

I.1 Les Bétons à base de liants ternaires :

I.1.1 introduction

En ajoutant un ou plusieurs ajouts minéraux au ciment, on obtient des liants binaires, ternaires, voir quaternaires. Les ciments binaires et ternaires incorporent des ajouts cimentaires tels que : fumée de silice, cendre volante et laitier de fourneau. Ces ingrédients sont des résidus de procédé industriel, valorisés dans le ciment. Ces résidus sont ainsi détournés des sites d'enfouissement où ils auraient normalement terminé leur vie utile. L'utilisation d'ajouts cimentaires permet de remplacer une partie de ciment et d'en réduire considérablement son empreinte écologique. Ce type de liants est souvent exigé pour des projets à valeur environnementale comme les bâtiments visant une certification environnementale.

A cet effet, le ciment Portland peut être combiné avec d'autres additions minérales ou ajouts cimentaires pour formuler des matériaux capables de répondre à des exigences particulières. Ces propriétés peuvent être la prise rapide, les hautes résistances au jeune âge, l'expansion et un faible retrait. C'est le cas par exemple des mélanges à base de liant binaire et ternaire.

CHAPITRE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1.2. Avantages technico-économiques:

- L'utilisation de coproduits de l'industrie tels que le laitier de haut fourneau, les cendres volantes et la fumée de silice ou de produit brut tel que la pouzzolane naturelle, le filler calcaire ...etc. est une stratégie possible pour limiter l'impact sur le bilan carbone du liant.
- Ces mêmes considérations sont valables également pour les ciments alumineux (CAC). Les ciments alumineux trouvent leurs applications dans les bétons pour l'industrie du réfractaire, les réseaux d'assainissement et également dans les mortiers de l'industrie de la chimie de la construction.
- Le laitier de haut fourneau, qui génèrent peu de gaz à effet de serre pour leur fabrication, peuvent être en quantité majoritaire dans le liant. L'utilisation de tel liant binaire ou ternaire avec deux additions a pour but d'améliorer la durabilité et les caractéristiques rhéologiques et/ou mécaniques des bétons. Les pays industrialisés tels que les Etats-Unis, la Russie, la France, l'Allemagne, le Japon et l'Angleterre, sont les plus grands Producteurs de cendres volantes, de fumée de silice et de laitier de haut fourneau
- L'utilisation des ajouts cimentaires présente une réelle alternative pour réduire la consommation des grandes quantités de matières premières naturelles –argiles et roches calcaires donnant ainsi une large gamme de ciment composé qui présente non seulement des avantages environnementaux par une réduction de la consommation d'énergie et une faible émission de CO2 mais aussi des améliorations de la durabilité et des performances rhéologique et mécanique.

I.1.3. Intérêt des liants ternaires:

Les bétons formés de liants ternaires ont prouvé leur efficacité. On attribue aux bétons de liant ternaire des valeurs de retrait plus faible, une bonne durabilité et, de plus, une faible chaleur d'hydratation.

Les liants ternaires ont, sans doute, un potentiel d'utilisation en béton. Leur aspect écologique, est le premier atout. Le deuxième atout est l'amélioration de la durabilité tout en conservant les performances mécaniques du béton. Aucun effet négatif important n'est apporté par l'utilisation des liants ternaires, à l'exception de certaines conditions particulières de chantier. En effet la prise étant un peu plus lente, le temps entre la projection et la finition de surface peut être prolongé de quelques minutes, voir quelques heures. Dépendamment de la situation, cette dernière propriété peut être considéré dans certains cas comme un avantage.

CHAPITRE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

Chapdelaine (2004) [2], lors de ses travaux de doctorat, s'est penché sur la question si les liants ternaires peuvent contribuer à améliorer la fluidité et la pompabilité du béton par le seul fait de leur densité. Pour évaluer l'aptitude au pompage des différents liants, l'approche habituellement utilisée par les producteurs de béton est de comparer des mélanges de béton qui ont été fabriqués à masse de liant constante et à rapport E/L constant. Étant donné la plus faible densité des liants ternaires, pour un remplacement en masse égale de liant conventionnel, on obtient un plus grand volume de pâte dans le mélange de béton. Le volume de pâte, en augmentant, améliore la pompabilité, quand tout le reste demeure constant (squelette granulaire, rapport E/L) (**Chapdelaine et Beaupré, 2002) [3]**. Les liants ternaires ont également l'avantage de prolonger le temps de maniabilité.

L'objectif est de développer de nouveaux liants contenant peu de ciment, mais suffisamment pour garder les bénéfices de celui-ci en terme de performances mécaniques, et contenant principalement des produits ne rejetant pas ou peu de gaz à effet de serre lors de leur production qui contribue au réchauffement de la planète.

L'étude des matériaux cimentaires permet d'aboutir vers une meilleure compréhension des phénomènes qui agissent au sein de leur microstructure fortement hétérogène, et d'un point de vue pratique, c'est un moyen d'assister le matériau pendant ses premiers jours et d'assurer une meilleure durabilité, donc une plus importante durée de vie du matériau durci.

I.4. Les différents types d'additions minérales:

I.4.1. Les additions minérales:

Sont des Poudres d'origine minérale ajoutées au béton pour modifier certaines de ses propriétés. Ces additions ne doivent pas présenter des actions nocives sur les propriétés des ciments mais ils peuvent, suivant les cas, modifier certaines de leurs caractéristiques. **I.1.4.2.**

Bénéfices et avantages de l'utilisation des additions minérales:

L'utilisation d'ajouts cimentaires ou addition minérales dans les industries du ciment et du béton présente des avantages techniques, économiques et écologiques.

I.1.4.2.1. Bénéfices fonctionnels:

Incorporation des particules fines améliore la maniabilité et réduit la demande en eau (à l'exception des ajouts d'une grande finesse)

- amélioration des propriétés mécaniques et de la durabilité du béton.
- diminution de la chaleur d'hydratation dégagée dans le béton durcissant, ce qui diminue la Fissuration d'origine thermique.
- modification de la nature et la texture des hydrates formés.

CHAPITRE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

- Prise et durcissement pour les ajouts qui interviennent dans le processus réactionnel du Ciment avec l'eau. [4]

I.1.4.2.2. Bénéfices économiques:

La plupart des ajouts minéraux sont des sous-produits de différentes industries et leur Prix souvent égal au cout du transport et de la manipulation. Comme la production du ciment est un grand consommateur d'énergie, son remplacement par des ajouts minéraux réduit le prix du béton pour le cout du combustible [4].

I.1.4.2.3. Bénéfices écologiques et environnementaux

- diminution de l'émission du CO₂ par l'industrie cimentière.
- élimination des sous-produits de la nature.

La production d'une tonne de ciment Portland libère dans l'atmosphère une quantité quasi équivalente de gaz carbonique. De fait, le remplacement du ciment Portland par les ajouts Cimentaires réduit d'autant les émissions de CO₂. En générale. L'utilisation de cendre volantes et de fumées de silice comme ajouts cimentaires ne demande pas un traitement à forte intensité d'énergie. Le laitier, par contre, doit être granulé et sa granulation provoque l'émission d'environ 0.07 tonne de CO₂ par tonne de LGHF (Laitier granulé de haut fourneau) produit. À cela, il faut ajouter les émissions de CO₂ causées par le transport des matériaux jusqu'au chantier de construction. Les études montrent que le transport (par camion et chemin de fer) d'une tonne d'ajouts cimentaires sur une distance de 1000 Km libère environ 0.22 tonne de CO₂. Il convient donc de considérer tous les paramètres avant d'établir les avantages écologiques des ajouts cimentaires sur le ciment [4].

CHAPITRE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1.4.3. Classification des ajouts minéraux:

Ces matériaux proviennent principalement des sous-produits de l'industrie métallurgique, Des centrales thermiques à charbon, de la nature et sont classés selon la norme NF EN 197 1 en ajouts minéraux inertes et actifs [5]. Ils se divisent selon leur réactivité comme le montre le tableau I-1 ci-dessous

Type	Réactivité	Matériaux
hydraulique	Fortement réactif	Ciments spéciaux –chaux hydraulique
Hydraulique lente		Laitier granulé-cendres volantes riche en calcium (calciques)
Pouzzolanique	Fortement réactif	Fumée de silice
	Moyennement réactif	Cendres volantes pauvre en calcium, Pouzzolanes naturelles (verre volcanique, tufs volcanique, terres à diatomées
	Faiblement réactif	Scories cristallines
Inerte	Non réactif	Fillers (farine calcaire.) fibres, pigments Colorants, matières expansives, dispersions Synthétique

Tableau I-1 : Classification des ajouts selon leur réactivité. [5]

Généralement, on utilise dans les ciments et les bétons les additions minérales suivantes :

- Les cendres volantes,
- Les laitiers de haut fourneau,
- Les fillers calcaires,
- La fumée de silice.
- la pouzzolane.

I.1.4.3.1. Les cendres volantes:

Les cendres volantes utilisées dans les ciments et les bétons sont coproduits dans les centrales thermiques utilisant du charbon pulvérisé. Elles se présentent sous forme d'une poudre de couleur plus ou moins foncée suivant sa teneur en carbone et en impureté. Les cendres volantes sont sous forme de particules sphériques vitreuses, pleines ou creuses. La granulométrie s'échelonne de 1 à 200 μm et, en général, 50% des particules ont un diamètre inférieur à 30 μm leur surface spécifique Blaine varie entre 250 et 400 m^2/kg (domaine analogue à celui des ciments).

CHAPITRE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

La norme ASTM C-618-80 regroupe les cendres volantes en deux grandes classes suivant leur composition chimique :

- La classe F riche en oxyde ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 > 70\%$) avec une teneur faible en chaux ($\text{CaO} < 10\%$). Elle est qualifiée de silico alumineuse avec un faible potentiel pouzzolanique.
- La classe C riche en chaux ($\text{CaO} > 10\%$), avec une teneur en oxyde supérieur à 50%. Elle est Qualifiée de silicocalcaire avec un potentiel pouzzolanique élevé [6].

I.1.4.3.2. Les laitiers de haut fourneau:

Les laitiers sont des sous-produits de la fabrication de la fonte dans les hauts fourneaux des usines sidérurgiques. Ce sont des silico-aluminates de chaux traités de différentes façons à la Sortie du haut fourneau :

- Par refroidissement brusque dans l'eau ou par l'air ce qui empêche la cristallisation et permet son utilisation dans les ciments et les bétons comme pouzzolane,
- Par refroidissement lent à l'air ce qui donne un matériau cristallisé sans aucun pouvoir liant qui est utilisé comme granulats pour les travaux routiers et dans les bétons.

En Europe, les laitiers sont en général ajoutés au ciment. On parle de ciment au laitier. En Amérique du nord, ils sont incorporés directement dans le béton [6].

I.1.4.3.3. Fillers calcaires:

Les fillers calcaires sont des produits obtenus par broyage fin de roches naturelles tel que les calcaires, le Basalte, la bentonite, etc. présentant une teneur en carbonate de calcium CaCO_3 supérieure à 75%. Ces produits désignés dans le commerce comme fillers sont des poudres fines à granulométries contrôlées et dont les plus gros grains ne dépassent pas 80 micron. Les fillers se différencient les uns des autres par :

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

Un filler est dit calcaire s'il contient au moins 90% de carbonate de calcium. Dans les autres Cas, le filler est désigné par le nom de sa roche d'origine [7].

I.1.4.3.4. La fumée de silice:

Également appelées « fumées de silice » ou « poussières de silice » ou encore « micro silice », les fumées de silice sont un sous-produit de l'électrométallurgie du silicium et de ses alliages. On charge un four avec du quartz, de la houille et parfois des copeaux de métal.

L'ensemble est porté à une très haute température (1500-2000°C) par des arcs électriques. On

CHAPITRE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

Obtient d'une part le silicium liquide et d'autre part des gaz chargés de poussières dont certains s'oxydent à l'air libre pour donner des fumées de silice.

En tant que sous-produits industriels, leur nature ne fait l'objet d'aucun contrôle lors de sa fabrication. Leurs caractéristiques physico-chimiques peuvent être assez dispersées, non seulement d'une usine à l'autre mais encore à l'intérieur même d'une unité de fabrication : la Fumée de silice est un matériau très variable [8].

Le mécanisme de réaction pouzzolanique de la fumée de silice peut être brièvement décrit comme la réaction de la silice avec la chaux libérée par l'hydratation du ciment, en présence de l'eau. Il en résulte des C-S-H à pauvre rapport Ca/Si. Bien que cette réaction soit prompte et précoce, elle est limitée par la quantité d'eau dans les BHP. A 7 jours, les performances atteintes sont très significatives par rapport à 28 jours. Il a été montré que 10% de fumée de silice par rapport à la masse de ciment permettent d'obtenir un béton à haute résistance mécanique et une bonne durabilité aux agressions chimiques lorsque des dosages en super plastifiant sont optimisés [9].

I.1.4.3.5 La pouzzolane:

Roche siliceuse d'origine volcanique, faiblement agglomérée, friable, dont la couleur varie du gris au rougeâtre, utilisée depuis l'antiquité comme constituant secondaire des ciments, mortiers et bétons. Les pouzzolanes naturelles ont une des teneurs élevées en silice et en alumine (Entre 70 et 80% pour les deux composants ensemble), puis en fer, en alcalins, en magnésie et en chaux.

Les pouzzolanes sont des matériaux, naturels ou artificiels, capables de réagir en présence d'eau avec l'hydroxyde de chaux pour donner naissance à des composés nouveaux, stables, peu solubles dans l'eau et possédants des propriétés liantes. [10].

a. Pouzzolane naturelle :

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

CHAPITRE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

b. Pouzzolane artificielle :

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

Les pouzzolanes doivent leur nom aux cendres volcaniques de la région de Pouzzoles, en Italie, dont l'utilisation et les propriétés liantes étaient connues à partir de l'époque romaine [10]. Leur composition chimique est proche de celle des cendres volantes, mais elles sont Produites à haute température par les éruptions volcaniques.

Les matériaux pouzzolaniques naturels que l'on rencontre le plus communément sont les Cendres volcaniques, la pouzzolane naturelle, la pierre ponce, les argiles schisteuses, les Opalines, les terres à diatomées calcinées et l'argile cuite.

En raison de leurs propriétés physiques, certaines pouzzolanes naturelles peuvent poser des Problèmes. Par exemple, les terres à diatomées, du fait de leur nature anguleuse et poreuse, Nécessitent un dosage en eau élevé. Certaines pouzzolanes naturelles voient leur activité Améliorée par calcination entre 550 et 1100 C° selon le matériau concerné [11].

La sélection des pouzzolanes se fait sur la base du contenu en phase vitreuse, par la différence entre la teneur en silice et celle en chaux, respectivement, qu'on peut déterminer par les méthodes chimiques habituelles, une valeur limite se rapprochant de 34 % révélerait l'absence de phase vitreuse [12].

On classe les pouzzolanes en trois catégories :

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

I.1.5. Rôle et effet de l'ajout cimentaire:

I.1.5.1. Rôle granulaire ou effet fillers des ajouts cimentaires:

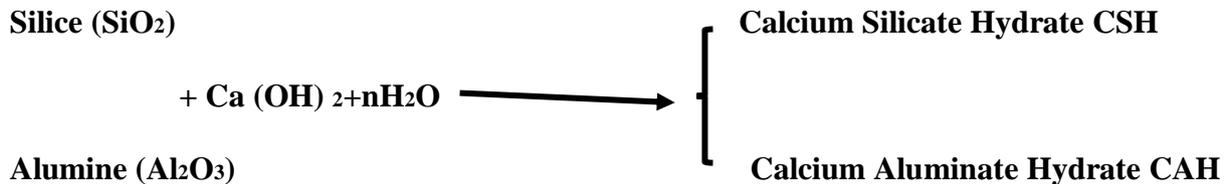
Les ajouts cimentaires combler les interstices granulaires inaccessibles aux grains de Ciment et rendent le mélange plus fluide en permettant la diminution de la quantité d'eau.

I.1.5.2. Rôle pouzzolanique des ajouts cimentaires:

Les ajouts cimentaires (actifs) réagissent avec la chaux libérée par l'hydratation du ciment pour donner des C-H-S secondaires, contribuant ainsi à densifier la matrice cimentaire et à l'augmentation des résistances mécaniques du matériau. L'idéal est d'avoir une ultrafine à grande cinétique de réaction, avec des grains lisses (à défloculation facile) et à très forte activité pouzzolanique. De façon générale, les pouzzolanes sont définies comme des

CHAPITRE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

matériaux ne possédant pas en eux des propriétés liantes, mais dont Les constituants peuvent se combiner avec la chaux à température ordinaire en présence de l'eau pour donner des produits insolubles possédant des propriétés liantes [13,14].



Les études cinétiques de l'hydratation du ciment indiquent que la présence de pouzzolane ou de micro silice accélère l'hydratation du C3S et le phénomène de prise. Les gels de silice C-S H formés ont un rapport Ca/Si moyen de 1,1, ils piègent ou absorbent plus facilement les alcalins que les C-S-H classiques. La quantité de portlandite au bout de 14 jours est moindre que dans la pâte témoin quel que soit le rapport eau/ciment. La portlandite est visiblement modifiée en présence de micro silice [15].

Taylor et al. [16] ont fait remarquer que la chimie des réactions silico-alcalines est la même que celle des ajouts pouzzolaniques.

Les réactions dites pouzzolaniques sont plus rapides en raison de la très faible dimension des particules réactives. Les produits néoformés sont d'une part plus facilement dispersés ou mieux repartis dans les matériaux, d'autre part leur composition est plus favorable à l'incorporation des alcalins dans leur structure cristalline. Les propriétés pouzzolaniques ont une cinétique plus rapide par augmentation de température [17].

La chaux se présentant sous forme de cristaux fragiles, sa consommation par réaction Pouzzolanique en présence des ajouts minéraux actifs et la disparition de l'auréole de transition induisent une très grande influence sur la résistance du béton [18].

I.1.5.3. Rôle mécaniques des ajouts cimentaires:

La réflexion s'oriente vers une ou plusieurs activités d'origine physique d'une poudre chimiquement inerte. Il a été montré par calorimétrie que l'hydratation du silicate tricalcique (C3S) est plus rapide en présence de fines calcaires [19]. Dans un tel cas, le calcaire n'entre dans aucune réaction chimique, l'accélération de l'hydratation du silicate tricalcique est due à un effet physique dit de « nucléation hétérogène » : les germinations du silicate de calcium hydraté se produisent plus facilement au contact des cristaux de calcite.

CHAPITRE I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

Cette germination entraîne une précipitation des C-S-H et donc, une précipitation plus rapide de la portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Une explication semblable a été avancée pour l'accélération de l'activité des cendres volantes avant vingt-huit jours en présence de fines calcaires.

Les réactions entre le ciment et l'eau sont plus rapides en présence de poudre calcaire et donc à chaque instant, il y a davantage d'hydrates formés. Cet effet ne peut expliquer directement une « activité » significative de l'addition.

Néanmoins, il est possible, de l'expliquer d'une façon indirecte. Il faut, en effet, distinguer entre l'avancement des réactions d'hydratation du ciment (phénomène d'ordre chimique), et le développement de résistances (phénomène d'ordre physique). Ce dernier dépend évidemment de la qualité d'hydrates fournis par l'hydratation, mais aussi de la façon dont ces Hydrates s'assemblent, de leur arrangement dans l'espace et de leurs liaisons.

En conséquence, la germination au contact de la surface des additions a deux conséquences :

- l'accélération de l'hydratation,
- la modification de l'assemblage des hydrates favorables à la résistance.

Ce deuxième effet expliquerait l'activité des additions même si, par ailleurs, elles peuvent être considérées comme chimiquement inertes. Contrairement à ce qui se passe avec les silicates tricalciques (C3S), les additions calcaires peuvent, ne pas être chimiquement inertes quand elles sont en présence du ciment. Il peut y avoir en effet, une réaction chimique entre le carbonate de calcium et l'aluminate tricalcique, donnant un carbo-aluminate de calcium, cette réaction est facile à reproduire au laboratoire où l'on peut synthétiser le carbo-aluminate à partir de ses composants.

Une analyse détaillée, par diffraction des rayons X, de ciment hydraté en présence d'une poudre calcaire, permet souvent d'observer ce produit parmi les hydrates formés. Toutefois, on peut penser que cette réaction contribue peu, en général, à l'activité des additions calcaires. En effet, quand elle se produit dans les ciments Portland, elle est toujours en concurrence avec une autre réaction très rapide, entre le gypse et le C3A qui a toujours lieu pour former de l'ettringite. Or le dosage en gypse est soigneusement optimisé pour réguler la prise tout en conservant la résistance normale du ciment.

1.1.6. Importance des additions minérales dans l'industrie cimentière :

Dans le domaine des travaux publics et du bâtiment, le ciment Portland artificiel sans ajout ne dépende : les laitiers de fonte non trempés (cristallisés et donc non vitrifiés) utilisés comme Ballast ou comme granulats et également les laitiers d'aciéries et tous les laitiers de métaux non ferreux qui peuvent contenir des éléments nuisibles aux bétons (sels métalliques). La norme distingue deux classes de laitiers A et B ; la dernière est la plus réactive, sa finesse

CHAPITRE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

étant la plus élevée. Tous les laitiers couverts par la norme sont de type II au sens de la norme ENV 206, mais seuls les laitiers de classe B sont substituables au ciment sous les conditions de la norme NF P18-305. Depuis que cette norme NF P18-506 est publiée (1992), aucune utilisation industrielle du laitier A comme addition au béton n'a été signalée en France plus à lui seul à toutes les exigences (mécaniques, durabilité, coût, ...). De plus, dans une même cimenterie et pour répondre aux différentes demandes commerciales, on a tendance à ne plus fabriquer qu'un seul clinker et à le broyer plus ou moins finement avec des additions minérales de provenances diverses pour fabriquer des ciments composés (CEM II).

I.1.7. Additions introduites directement dans les bétons:

Dans le cas où seule la résistance à 28 jours est recherchée « bétons de marque », et dans les Bétons où d'autres caractéristiques sont exigées « bétons à la norme » (dosage minimum en Liant, rapport E/C maximum, ...), les additions remplacent une partie du ciment. Alors que Dans les bétons spéciaux (bétons à hautes performances, bétons auto plaçant, ...), les additions sont utilisées pour augmenter les résistances mécaniques ou pour améliorer les propriétés rhéologiques, sans changer le dosage en ciment. Dans le cas de bétons spéciaux, De **Larrard [20]** a montré que certaines additions sont indispensables pour la confection de ces bétons. En effet, ces additions contribuent à la diminution de la porosité du matériau durcie et donc à l'amélioration de ses résistances et de sa durabilité. D'autre part, l'ensemble de ces additions (laitiers, cendres, fumée de silice, pouzzolanes, calcaires) participent aux réactions d'hydratation. Elles agissent comme correcteur granulaires et améliorent la cohésion inter granulaire.

Ces deux fonctions du filler diminuent la porosité du matériau durci et donc améliorent ses performances mécaniques et sa durabilité.

a. Correction granulaire :

Les fumées de silice et les fines calcaires sont ajoutées à la composition du béton pour rendre L'empilement granulaire le plus compact surtout dans le cas les bétons à hautes performances.

b. Amélioration de la cohésion inter granulaire :

Les fillers calcaires et les fumées de silice améliorent la cohésion des bétons auto plaçant. Comme de plus ces bétons sont souvent adjuvantés, le couple addition-adjuvant organique modifie la rhéologie du béton frais dans le sens d'une amélioration de sa maniabilité. Ces deux fonctions du filler diminuent la porosité du matériau durci et donc améliorent ses Résistances et sa durabilité.

CHAPITRE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1.8. Processus d'hydratation des liants ternaires:

Point de vue technologique, le diagramme de phase $\text{CaO-SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$ est très important, parce qu'il est utilisé par l'industrie du ciment portland, des ciments alumineux, des réfractaires, des verres et aussi par les métallurgistes au moment de l'ajustement de leur laitier. Le diagramme est basé sur une représentation triangulaire qui utilise les propriétés du triangle De **Rooseboom** En fonction de la composition chimique de chaque matériau, en se basant sur la quantité de la chaux, de la silice et de l'alumine, on peut aboutir à classer plusieurs ajouts cimentaires utilisés dans le domaine du béton.

I.1.8.1. Détermination de la composition d'un mélange ternaire:

Soit le mélange **L** composé de : 20% de A, 30% de B et 50% de C, cette composition est peut être représentée graphiquement comme il est illustré par la figure suivante :

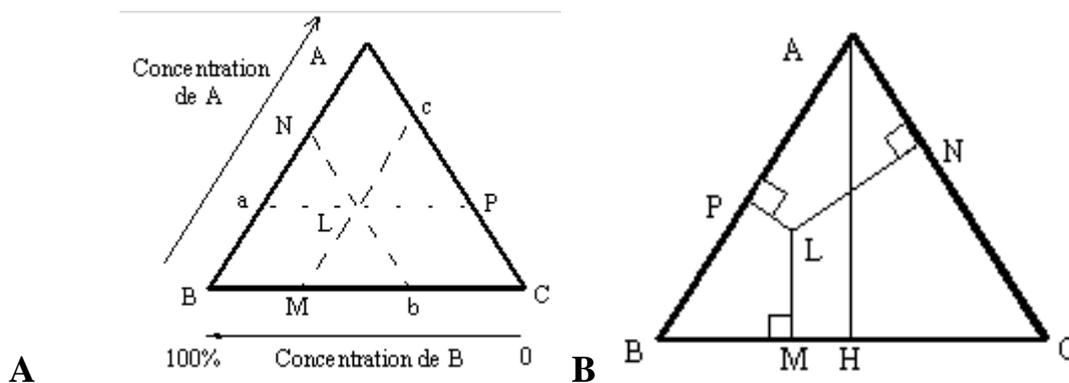


Figure 1.1 Détermination de la composition d'un mélange ternaire par les méthodes graphiques (parallèles deux côtés et perpendiculaire aux côté opposé) [21].

La figure 11.A représenté la représentation originale de *ROOZEBOOM*. Soit un point L. Par ce point traçons les trois parallèles aux trois côtés du triangle équilatéral. Le principe de cette représentation repose sur le fait que la somme des segments $LM + LN + LP = AB$. Par définition on pose :

$$\left. \begin{array}{l}
 - \text{masse de A} = w_A = a LM = a B_a \\
 - \text{masse de B} = w_B = a LP = a C_b \\
 - \text{masse de C} = w_C = a LN = a A_c
 \end{array} \right\} \Rightarrow \frac{w_A}{w_{\text{totale}}} = \frac{B_a}{BA}$$

Où a est un coefficient de proportionnalité.

Donc, si B_a représente la concentration de A, tous les mélanges ayant cette concentration se trouvent sur le segment aP et ainsi sur chacun des trois côtés. Cette représentation, quoique très judicieuse, oblige à établir le sens des graduations des pourcentages. La (figure 1.1.A) a retenu le sens trigonométrique inverse (les sens des aiguilles d'une montre). On aurait très bien pu "polariser" le triangle en sens contraire. Ce mode de représentation force donc à un effort particulier de lecture.

Il existe une autre façon plus commode de lire ce diagramme. En effet, si d'un point intérieur L (Figure 1.1.B) on élève les trois hauteurs relatives à chacun des côtés, les segments LM, LN

CHAPITRE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

et LP, la somme $LM + LN + LP = AH$ quelle que soit la position du point L. Par définition on pose :

$$\left. \begin{array}{l} - \text{masse de A} = w_A = b \cdot LM \\ - \text{masse de B} = w_B = b \cdot LN \\ - \text{masse de C} = w_C = b \cdot LP \end{array} \right\} \Rightarrow \frac{w_A}{w_{\text{totale}}} = \frac{LM}{AH}$$

Notons que les deux modes de représentation conduisent à la même position du point L pour un mélange de composition donnée. La représentation en est cependant plus symétrique puisqu'il n'est plus nécessaire d'indiquer comment est "polarisé" le triangle. On trouve d'ailleurs dans le commerce des diagrammes préparés dans l'esprit de cette représentation.

Quoiqu'il en soit, dans chacune des deux approches, un mélange ne contenant pas de A se trouve représenté par un point du côté BC. [21].

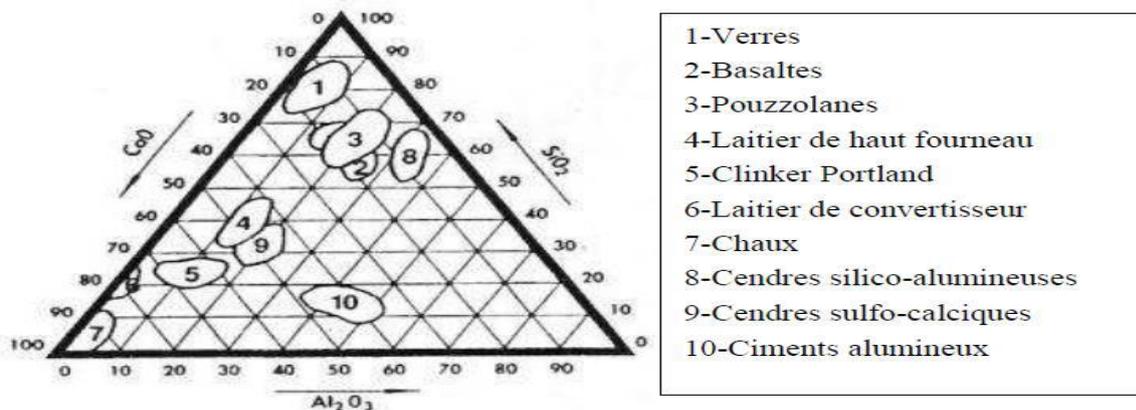
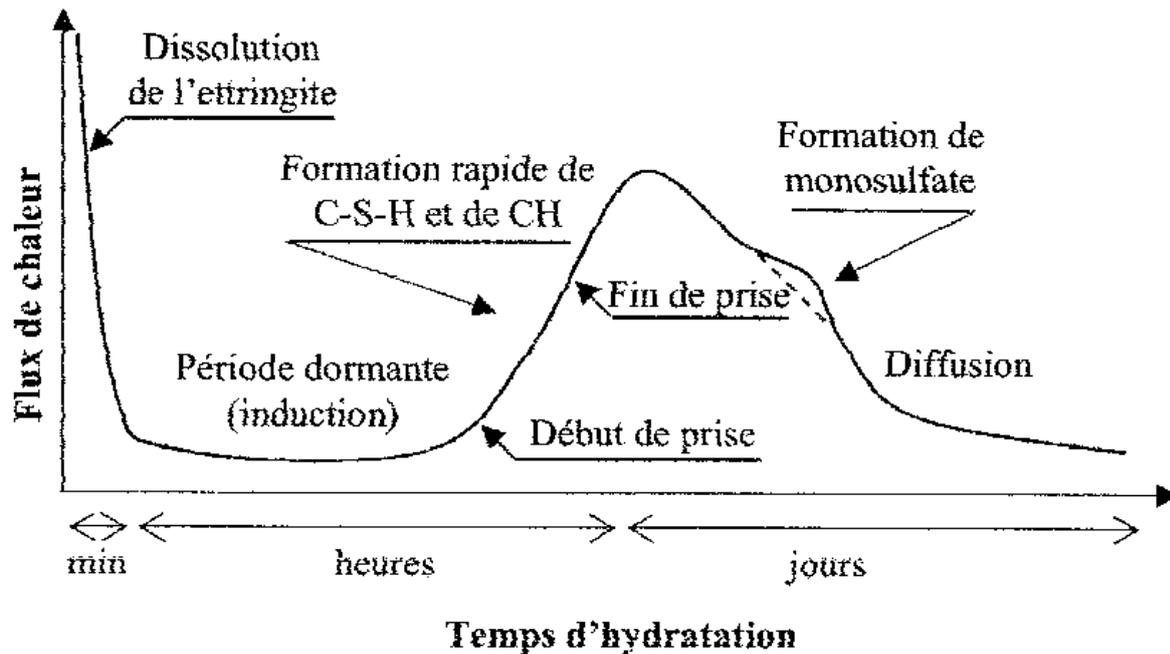


Figure 1.2 : Localisation, dans un diagramme ternaire $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$, des composés minéraux couramment ajoutés au ciment Portland [22].

I.1.8.2. Evolution de l'hydratation:

Le dégagement de chaleur qui accompagne les réactions d'hydratation peut être mesuré par Calorimétrie. La chaleur dégagée donne une indication sur l'avancement du processus d'hydratation. [23]. La courbe du flux de chaleur d'hydratation présente généralement trois pics qui correspondent à trois maxima comme l'indique la figure I.3.



La figure I.3. Dégagement de chaleur lors de l'hydratation du ciment en fonction du temps [24].

Premier pic : Il s'agit de plus haut, mais il est de courte durée. Au cours de cette période (≈ 10 mm), le C3S et le C3A réagissent immédiatement avec l'eau, formant des C-S-H et de l'ettringite. Ce pic est suivi d'une « période dormante » au cours de laquelle le dégagement de chaleur est relativement faible (sans jamais être nul). Durant cette période des ions Ca^{2+} et OH^- sont libérés. Ceci augmente alors le PH de la solution, ralentissant la dissolution des constituants. Le dégagement de chaleur est alors faible.

Les transformations physiques dans cette période sont détectées par l'augmentation du Raidissement de la pâte [24]. Les phénomènes physico-chimiques régissant cette phase (Période dormante) sont, d'un point de vue pratique, très importants car ils ont un effet sur L'ouvrabilité du béton. Par exemple, pour un rapport $E/C = 0.5$, on devra couler le béton dans La structure au plus tard au milieu de la « période dormante ».

Deuxième pic : La « période dormante » prend fins avec l'accélération du dégagement de chaleur. Le second pic atteint son maximum (pour un ciment ordinaire à 200C) entre 9 heures et 10 heures. Cette phase d'accélération débute lorsque la concentration en ions Ca^{2+} et OH^- de la solution devient critique. Cette sursaturation induit la précipitation de la portlandite. Il s'ensuit alors les mécanismes de dissolution, de nucléation et de précipitation des différentes phases, permettant la formation des hydrates (C-S-H) et des phases cristallins (ettringite, portlandite). Cette grande activité chimique dégage beaucoup de chaleur, augmentant la

CHAPITRE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

température du matériau. Les hydrates formés commencent à s'enchevêtrer et permettent alors la formation d'un solide d'un solide rigide.

Troisième pic : tous les ciments ne présentent pas de troisième pic de dégagement de chaleur. Lorsqu'il se présente, son intensité et le moment de son apparition varient beaucoup d'un Ciment à un autre.

Pour comprendre les réactions qui se déroulent lors de l'hydratation du ciment, et faire un lien Avec sa prise et le développement des résistances, il faut s'intéresser à :

- ✓ L'effet de l'hydratation de chaque phase du ciment sur la chaleur d'hydratation ;
- ✓ Les raisons des variations considérables du dégagement de chaleur dans le temps ;
- ✓ Le processus d'agglomération des produits d'hydratation pour remplir l'espace poreux ;
- ✓ La nature des liens entre les produits d'hydratation dans la pâte durcie.

I.1.8.3. Hydratation du ciment portland:

Pour bien comprendre l'hydratation du ciment, il ne faut pas se baser uniquement sur l'hydratation des phases pures. En effet, dans le ciment, ces phases interagissent entre elles.

L'hydratation du C3S est accélérée par la présence de sulfates alcalins tandis que la chaux produite accélère l'hydratation du C3A et C4AF. L'hydratation du C3S contribue majoritairement à la formation du deuxième pic de la courbe calorimétrique 1.10.

L'hydratation du C3A, pour former de l'ettringite, participe également à la formation du Deuxième pic. Si un troisième pic apparaît, il y a alors un excès de C3A. En raison de sa faible chaleur d'hydratation, le C4AF ne contribue que très peu à la formation du deuxième pic.

Les réactions qui se déroulent lors de la formation du premier pic sont plus complexes, car au départ, toutes les phases réagissent rapidement avec l'eau avant que la concentration de la solution en ions sulfates soit assez importante pour influencer l'hydratation du c3S et C4AF.

Par ailleurs, la chaux libre, la magnésie libre et l'hémihydrate réagissent aussi de façon Exothermique avec l'eau. Si la quantité d'ions SO_4^{-2} en solution n'est pas suffisante, le C3A va alors s'hydrater et donner lieu à la prise, tandis que si la concentration en ions SO_4^{-2} est trop élevée, le gypse précipite et donne lieu à la fausse prise. La « période dormante » prend fin avec une augmentation brusque de la quantité d'eau liée dans le C-S-H et dans l'ettringite. L'enchevêtrement des produits d'hydratation entre les grains de ciment augmente les résistances mécaniques de la pâte et donne naissance à la prise. [23].

CHAPITRE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1.8.4. Cas particulier des ciments à base de laitier de hauts fourneaux:

a. Fabrication et utilisation :

L'industrie cimentière est un très gros producteur de CO₂. C'est pourquoi elle a déjà réduit

L'émission du CO₂ due à la cuisson du clinker en améliorant le rendement énergétique des

Fours. La part chimique due à la décarbonatation du calcaire est quant à elle irréductible.

Toutefois, il existe une autre voie possible pour réduire les rejets de CO₂ de l'industrie du

Ciment : elle consiste à remplacer une partie du clinker contenu dans les ciments par des

Additions, telles que des fillers calcaires, des cendres volantes issues des centrales thermiques

Et de laitier granulé de haut-fourneau, coproduit de l'industrie sidérurgique.

Les ciments à base de laitiers de haut fourneau (CSH) sont composés de ciment Portland (de

20 à 64%) additionné de laitiers de haut fourneau. L'addition des laitiers se fait pendant

L'opération de broyage. Cette étape consiste à doser les différents constituants, puis à les

mélanger et à les broyer de façon à obtenir une poudre homogène et très fine.

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

Enterrés utilisés pour les :

- Travaux en eaux agressives : eau de mer, eaux séléniteuses, eaux industrielles, eaux pures,
- Ouvrages massifs : fondations, piles d'ouvrages d'art, murs de soutènement, barrages.
- Travaux hydrauliques, souterrains, fondations et injection, [23].

b. Interactions entre les laitiers et l'hydroxyde de calcium (CH)

Plusieurs études ont été faites sur l'hydratation des ciments à base de laitiers [25-26-27].

Les résultats obtenus montrent, la formation d'une couche de produits d'hydratation autour

Des grains de laitiers, la réduction du rapport calcium/silicate (Ca/Si) dans le gel de C-S-H

Formés autour des grains de laitiers, probablement la formation d'hydrotalcite (M₄O₆

6,32AH_x) et la diminution des sulfates (S) qui participent à la formation de

monosulfoaluminate tétra calcique (AFM) [28].

D'après Taylor [29], les produits d'hydratation des laitiers sont les mêmes que ceux issus

d'un Ciment Portland ordinaire, excepté que, les C-S-H formés autour des grains de laitiers

ont un Rapport de Ca/Si (1,55) inférieur à celui obtenu pour un ciment portland ordinaire

(1,7). Biernacki et al. [30] ont estimé à environ 1,3 à 1,4, le rapport Ca/Si dans les C-S-H

autour des grains de laitiers.

Une réaction chimique peut avoir lieu entre les grains de laitiers et l'hydroxyde de calcium

(CH) issue de l'hydratation du ciment Portland ordinaire [30]. Biernack et al. [30] ont montré

Qu'une mole de laitier consommait 2,6 moles de CH et que la quantité d'eau consommée par

CHAPITRE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

Un gramme de laitiers était d'environ 12 grammes.

c. Réactivité des laitiers :

La réactivité des laitiers est estimée par la dissolution des produits d'hydratation et du ciment Anhydre, la procédure employée est celle basée sur la méthode appelée « éthylène diamine Tétracétique Acid » (EDTA), décrite par **Luke et Glasser [31]**. Le pourcentage de laitiers ayant réagi est calculé à partir de la formule suivante :

$$\%LR = 100 - \frac{Wm + (Pldm)(\%laitier)(WS) - (Pcn)(\%CIMENT)}{(Ws)(\%LAITER)(100)}$$

Avec :

Wm : la masse de résidu du ciment non dissoute [g]

$Pldm$: le pourcentage de laitier dissout qui n'a pas réagit

Ws : la masse de l'échantillon (après la perte au feu) [g]

Pcn : le résidu de ciment non dissout [g]

% Ciment : le pourcentage du ciment dans la phase solide

% laitiers : le pourcentage de laitiers dans la phase solide

D'après **Escalante-Garcia et al. [26]** la réactivité des laitiers dépend de plusieurs paramètres. Elle est une fonction croissante de la température, elle diminue quand le pourcentage de laitiers augmente et augmente en fonction de la quantité d'eau initialement présente dans l'échantillon. **La figure 1.4** résume les paramètres qui ont un effet direct sur la réactivité.

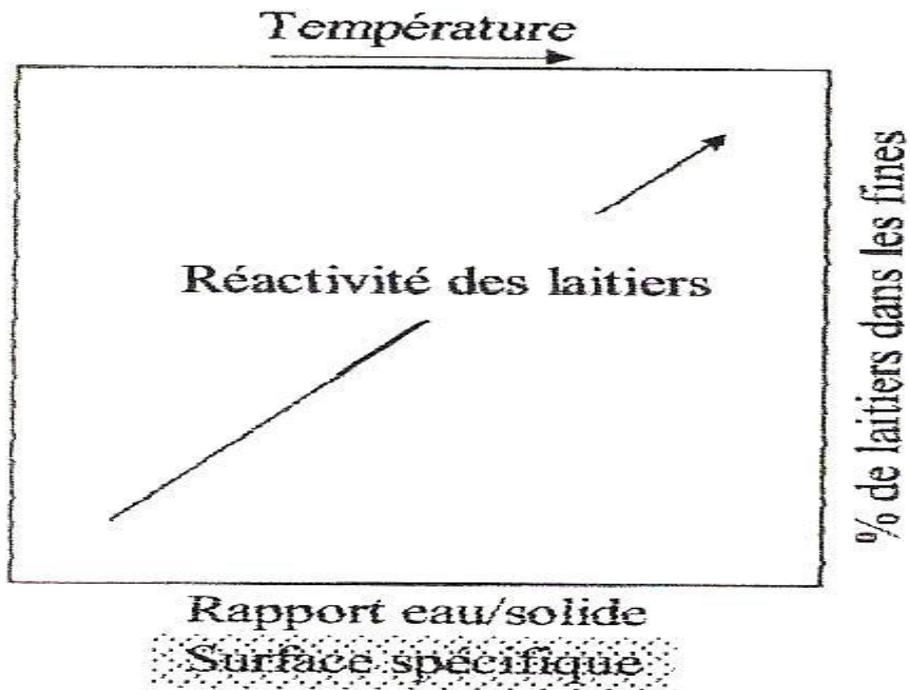


Figure 1.4 : Paramètres influençant la réactivité des laitiers [26]

I.8.4.1. L'hydraulicité du laitier granulé (réactivité hydraulique) : [32]

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

L'hydraulicité du laitier (sa réactivité 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 cristallisée. 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 composés 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 réactivité.

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 à priori favorable, les modules de basicité les plus couramment utilisés :

$$P1 = \frac{C}{S}, \quad P2 = \frac{C+M}{S}, \quad P3 = \frac{C+M}{S+A}$$

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

CHAPITRE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

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

I.1.8.4.2. 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, où 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. A partir des années 70, l'activation alcaline du laitier a bénéficié de plusieurs études et publications, et a connu plusieurs applications [33].

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 . (Où R représente Na, K et Li)

I.1.8.5. Cas particulier des ciments à base de fumée de silice : [34].

La fumée de silice (FS) est une addition pouzzolanique reconnue pour son efficacité Vis-à-vis des résistances mécaniques. Elle est un coproduit recueilli sur les filtres du processus de fusion permettant de produire du silicium métal et des alliages de Ferro silicium. Il s'agit d'une silice amorphe presque pure [35]. pouvant contenir un pourcentage faible d'impuretés. Les particules ont une forme sphérique de diamètre moyen de l'ordre de 0,1 μm et ont une très grande surface spécifique, à titre de comparaison, 10 fois supérieure à celle du ciment. La fumée de silice doit être conforme à la norme [NF EN 13263-1, 2009].

La fumée de silice possède une réactivité élevée uniquement si elle est bien dispersée dans le liant [36] ; [37]. Sous forme d'agglomérats, sa cinétique est plus lente et une fraction non consommée non négligeable peut rester à l'échéance de 180 jours. Son utilisation avec le ciment CEM I présente plusieurs avantages d'un point de vue mécanique puisqu'elle améliore les résistances [38]., mais aussi d'un point de vue de la durabilité car elle permet un affinement de la structure poreuse [39] ; [40]. Et la diminution des coefficients de diffusion [41] ; [42]. Dans le contexte de notre étude, l'avantage majeur de cette addition reste la diminution du pH et de la concentration en alcalins de la solution interstitielle [43]. En revanche, lorsqu'elle est utilisée en grande quantité, plusieurs inconvénients apparaissent. En effet, un temps de malaxage plus long est nécessaire pour assurer la dispersion homogène de la fumée de silice. La demande en eau devient aussi plus importante [44]. En raison de l'accroissement de la surface spécifique du liant. Enfin, l'affinement de la structure poreuse se traduit aussi par un accroissement du retrait endogène [45]. En ce qui concerne le dégagement

CHAPITRE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

de la chaleur d'hydratation, il dépend du taux de substitution ; lorsque la substitution est supérieure à 20 %, la quantité de chaleur dégagée devient plus faible que celle d'un ciment CEM I pur, en raison de la « dilution » de la quantité de ciment. [46].

I.1.8.5.1. Cinétique d'hydratation : [47].

La FS peut jouer un double rôle dans les milieux à matrice cimentaire. C'est une pouzzolane très réactive qui se combine avec la CH issue de l'hydratation du ciment pour former du C-S-H mais peut aussi jouer le rôle de fillers grâce à son très faible diamètre [48]. La FS peut ne pas exhiber une réactivité pouzzolanique élevée si elle n'est pas bien dispersée. En effet, dû à sa grande finesse, la FS peut se trouver sous forme d'agglomérats conduisant à une cinétique de réaction très lente [49]. De plus, les très fines particules de la FS constituent des sites de nucléation pour la germination des produits de CH, ce qui peut accélérer la réaction d'hydratation. D'ailleurs, la chaleur dégagée en présence d'un faible pourcentage en FS est plus importante que celle dégagée par le ciment portland [50].

I.1.8.6. Mélanges ternaires CEM I / fumée de silice / cendres volantes: [51].

Les mélanges CEM I / fumée de silice / cendres volantes ont fait l'objet d'études en nombre restreint, mais dont les résultats présentent un intérêt dans la perspective de l'élaboration de liants bas pH.

Mehta [52] montrent qu'une pâte de ciment comportant 15% de cendres volantes et 15% de fumée de silice contient, aux échéances de 7, 28 et 90 jours, une teneur en Portlandite intermédiaire entre celle des pâtes incorporant 30% de l'une ou l'autre des deux Pouzzolanes. Selon **Lilkov [53]**, la réaction pouzzolanique de la fumée de silice serait prédominante pendant les 7 premiers jours de l'hydratation, tandis que les cendres volantes réagiraient aux échéances ultérieures.

Par ailleurs, l'association de cendres volantes et de fumée de silice permet de réduire rapidement et durablement la teneur en alcalins dans la solution interstitielle d'un matériau Cimentaire.

L'ajout en faible concentration (5 % de la masse de liant) de fumée de silice à un ciment aux cendres volantes induit une augmentation de la porosité totale, mais un affinement de la structure poreuse du matériau hydraté. De plus, cet ajout de fumée de silice, même en très faible concentration, à un matériau élaboré à partir de ciment aux cendres volantes améliore nettement sa résistance en compression, en particulier au jeune âge.

CHAPITRE I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1.8.7. Mélanges ternaires CEM I / fumée de silice / laitier: [51].

De la même manière que pour un liant ternaire CEM I / fumée de silice / cendres volantes, la fumée de silice est l'ajout le plus réactif des deux additions minérales. De ce fait, l'ajout de fumée de silice à des ciments au laitier modifie beaucoup les propriétés du matériau obtenu.

Sioulas et Sanjayan [54] ont montré que l'introduction de fumée de silice dans un liant binaire CEM I / laitier accélère l'hydratation et augmente l'échauffement du matériau

L'association de ciment Portland, de laitier et de fumée de silice conduit par ailleurs à une diminution du pH de la solution interstitielle. **Xi [55]**, ont étudié un liant constitué de 32.5% de CEM I, 60.5% de laitier et 7% de fumée de silice. Après 24 h d'hydratation, la suspension cimentaire (masse d'eau / masse de solide = 0.75 ml/g) présente un pH de 12.3, mais celui-ci est réduit à 11.3 après 14 j d'hydratation.

Enfin, l'ajout de fumée de silice à un liant composé de CEM I et de laitier augmente la porosité totale du matériau mais diminue la taille des pores. De plus, cet ajout permet d'améliorer les résistances en compression à long terme.

I.1.8.8. Synthèse sur hydratation de ciment ternaire :

➤ Les ciments obtenus par ajout de composés pouzzolaniques à un ciment Portland faiblement alcalin offrent des perspectives intéressantes pour la réalisation de liants bas pH. Lorsqu'elles sont finement broyées, les pouzzolanes présentent en effet la propriété de former, en présence d'eau et d'hydroxyde de calcium, des silicates de calcium hydratés dont le rapport C/S est inférieur à celui des hydrates du ciment Portland. Ceci présente un triple avantage si l'on cherche à réduire le pH de la solution interstitielle du matériau hydraté :

- selon le type et la concentration de la pouzzolane ajoutée, la portlandite résultant de l'hydratation du clinker peut être consommée en totalité,
- la concentration d'alcalins dans la solution interstitielle peut être réduite, la capacité des C-S-H à sorber les ions Na⁺ et K⁺ augmentant lorsque la concentration en Ca (OH)₂ diminue,
- le pH d'équilibre des C-S-H diminue avec le rapport C/S.

➤ Le laitier, composé aux propriétés hydrauliques, produit moins de portlandite que le clinker par hydratation. Il conduit à des C-S-H de rapport C/S inférieur présentant une plus faible capacité de sorption des alcalins.

➤ Le remplacement d'une fraction du ciment Portland par un composé pouzzolanique modifie les propriétés du matériau obtenu. Certains effets sont bénéfiques. Citons par exemple :

- pour les deux pouzzolanes étudiées, la réduction du ressuage, l'affinement de la porosité, la réduction de la perméabilité et des coefficients de diffusion,

CHAPITRE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

- pour les cendres volantes, la fluidification de la pâte et la réduction de l'échauffement en cours d'hydratation,
- pour la fumée de silice, l'augmentation des résistances mécaniques. Néanmoins, l'ajout de pouzzolanes peut également être source de difficultés.

L'utilisation d'un liant ternaire constitué de ciment Portland et de deux pouzzolanes (L'une à cinétique rapide (fumée de silice), l'autre à cinétique lente (cendres volantes)) ou de ciment Portland, de laitier et d'une pouzzolane permet de résoudre certains des problèmes observés avec les mélanges binaires.

I.1.9. Les bétons à base de laitier granulé:

I.1.9.1. Production du laitier de haut-fourneau granulé:

Lors du soutirage, après séparation d'avec la fonte, plus lourde, le laitier est dirigé vers un dispositif dans lequel il va subir un arrosage violent et abondant d'eau sous haute pression (trempe) destiné à le vitrifier. L'énergie calorifique contenue dans le laitier en fusion provoque son explosion et forme instantanément du laitier vitrifié. Ce dispositif s'appelle un granulateur et le laitier ainsi vitrifié, laitier granulé.

Par la suite, le laitier est finement moulu dans un broyeur pour permettre son utilisation dans les ciments ou les bétons.

Le laitier vitrifié, granulé est un produit hydraulique, c'est à dire susceptible de donner par activation basique, des produits d'hydratation stables. Il est obtenu par refroidissement brutal par l'eau sous pression, c'est un sable de granulométrie 0/5 mm. Contrairement au ciment qui est soluble dans l'eau et s'hydrate par simple addition d'eau, le laitier vitrifié n'est soluble que dans une eau alcalinisée et a donc besoin, pour faire prise, d'un agent d'addition appelé activant.

L'hydratation intervient d'abord par dissolution du laitier dans l'eau de gâchage basique. Cette dissolution aboutit à une solution concentrée, d'où résulte une précipitation de composés hydratés qui fait à son tour chuter la concentration des éléments dans la solution. Ce qui permet la solubilisation d'une nouvelle quantité de produits jusqu'à une concentration entraînant une nouvelle précipitation de composés hydratés. C'est cette répétition du cycle dissolution – concentration – précipitation (plusieurs années) qui constitue la prise et le durcissement du laitier vitrifié [56].

Les précipitations résultantes sont normalement destinées à obturer les grands pores. Cependant les précipitations des ciments au laitier sont fixes et imperméables alors que celles

CHAPITRE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

des ciments Portland ne le sont pas. Par conséquent le béton ordinaire est plus poreux que le béton au laitier [57].

Dans les ciments au laitier, le clinker est l'actif principal du laitier. Cependant les premiers hydrates produits seront ceux du clinker ; C-S-H et $\text{Ca}(\text{OH})_2$ qui recouvrent uniformément les grains du laitier et du clinker. Par la suite, l'excès de chaux active l'hydratation du laitier avec une texture C-S-H semblable à celle des ciments ; il en résulte alors des silicates de calcium hydratés et des aluminates tétra calciques hydratés [58]. [59].

Sarkar et al. [60] avaient montré qu'avec un laitier broyé à une finesse de 800 m²/kg, on obtient une réduction significative de la chaleur d'hydratation du ciment, un béton à hautes résistances et à structure plus compacte.

Péra et al. [61]. Ont montré que plus la finesse de mouture du laitier est élevée, meilleures sont ses performances.

I.1.9.2. Influence Du Laitier sur les propriétés des matériaux cimentaire

Présents dans les matériaux cimentaires, les laitiers de haut-fourneau augmentent l'ouvrabilité (**Wainwright and Rey, 2000**) [62], abaissent la chaleur d'hydratation (**Douglas and Shenker, 1990**) [63], améliorent la durabilité en affinant la structure porale et en diminuant la perméabilité et la diffusion d'ions chlorure (**Jau and Tsay, 1998**) [64], améliorent la résistance mécanique à long terme. Toutefois, massivement ajoutés, ils retardent la prise (**Javelle and Ponteville, 1968**) [65], réduisent la résistance mécanique au jeune âge (**Chern and Chan, 1989**) [66], augmentent le retrait endogène et diminuent la résistance à la carbonatation.

I.1.9.3. Caractéristiques des bétons à base de laitier:

Le laitier granulé peut intervenir comme constituant dans la composition des bétons hydrauliques. Il peut être ainsi utilisé dans les bétons classiques comme sable actif de par son caractère hydraulique, soit à l'état brut, soit sous forme de laitier pré broyé. Il peut également être moulu et incorporé dans le béton comme filler actif. L'incorporation du laitier granulé brut dans un béton classique de granulats naturels, en remplacement de tout ou partie du sable, se traduit par une augmentation des résistances mécaniques (à dosage en ciment constant). Le malaxage et la mise en œuvre provoquent l'attrition des fines hydrauliques dont l'action vient se cumuler avec celle de la liaison pâte de ciment – sable de laitier granulé (les deux produits sont hydrauliques et présentent une affinité réciproque). Par contre, la rhéologie des mélanges peut se trouver affectée, le béton devenant rêche et perdant sa maniabilité, à dosage en eau constant (**Bessa et al., 2003**). [67].

CHAPITRE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

Pour améliorer la rhéologie des mélanges, on introduit des ajouts tels les cendres volantes qui, non seulement améliorent la rhéologie de ces bétons, mais ont de surcroît des propriétés Pouzzolaniques. Elles lubrifient les mélanges et augmentent leur compacité par remplissage des vides. L'amélioration de la maniabilité peut aussi être assurée par une charge inerte telle qu'un filler naturel, le plus souvent du calcaire. Indépendamment de son action sur l'ouvrabilité (onctuosité du produit, plastifiant rétenteur d'eau), la chaux grasse jouera un rôle d'activation du laitier (Bessa et al., 2003). [67].

I.1.10. Durabilité des bétons à base de liants ternaires :

Tous les matériaux cimentaires sont des matériaux poreux (c'est ce qui permet essentiellement l'avancée des agents agressifs dans la matrice cimentaire). Cette porosité plusieurs origines :

- ✓ des bulles d'airs incorporées lors du gâchage,
- ✓ des pores de C-S-H,
- ✓ les espaces inter grains des anhydres partiellement hydratés,
- ✓ des capillaires remplis ou partiellement remplis de la solution interstitielle [68].

La porosité est de l'ordre de 50 % pour les pâtes de ciment et de 10 à 20 % pour les bétons.

Cette différence s'explique par la faible porosité des granulats dans les bétons inférieurs à 5 % (XING 2011) [69]. La connectivité et la taille de ces pores varient en fonction du liant utilisé.

Les Liants avec additions minérales et surtout les laitiers sont réputés pour donner des pores plus petits que ceux d'un CEM I et des réseaux plus tortueux ce qui freine la diffusion d'espèces comme les chlorures ou les sulfates (Lammertijn and De Belie, 2008) [70]. (Saillio, 2012) [71].

La porosité conditionne en grande partie ses propriétés physiques et mécaniques des matériaux cimentaires. Elle est structurée à plusieurs échelles comme des intra-espaces et inter-espèces, les tailles de pores s'étendent du nm à la centaine de microns, et les géométries sont très diverses (tube, plan, polyèdre, bulles). Les plus grosses cavités millimétriques proviennent de l'élaboration, où de l'air a été emprisonné dans le matériau frais (figure I.5).

Entre 30 et 1000 μm , nous retrouvons le réseau de bulles d'air (ou de pores sphériques) formé par les éthers de cellulose et les latex. Les espaces intra Portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) et intra agrégats de CSH sont de l'ordre du micron. La porosité capillaire formée par le départ de l'eau s'étend de 10 nm à 1 μm . Ces capillaires dépendent fortement du rapport E/C et des conditions thermo hydriques dans lesquelles l'hydratation s'est déroulée. Pour des rapports

CHAPITRE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

$E/C > 0.7$, la porosité par capillarité est continue (Regourd, 1982) [72]. Les espaces nanométriques formés par les CSH représentent la plus petite porosité des matériaux cimentaires. La porosimétrie par intrusion de mercure permet d'obtenir des informations qualitatives et quantitatives, la tomographie et les traitements numériques associés sont des techniques émergentes pour sa caractérisation

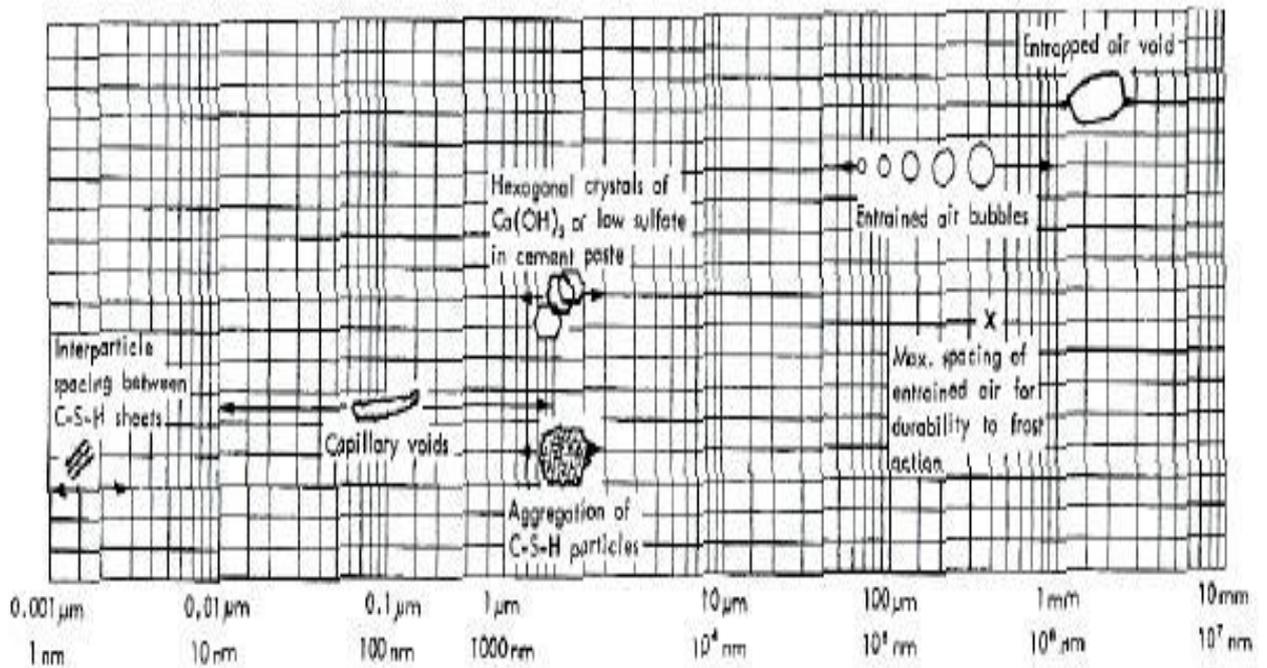


Figure I-5 Échelles de porosité dans les matériaux cimentaires (Mehta, 1986) [73].

I.2. BETON A HAUTES PERFORMANCES :

I-2.1 Introduction :

Durant les dernières décennies, plusieurs travaux scientifiques ont été élaborés dans la perspective d'améliorer les propriétés constructives du béton frais et durci. Aussi, des études et des découvertes n'ont cessé de lui conférer des performances et des aptitudes nouvelles. Dans le but de trouver un compromis entre l'ouvrabilité et la résistance.

Les soucis des constructeurs sont d'aboutir à des hautes performances ou résistances avec un choix judicieux des matériaux et l'adjonction de nouveaux produits, telle que les adjuvants et additions minérales fines. L'ajout de tels matériaux permet d'accomplir deux fonctions lune physique et l'autre chimique. La première fonction assure le remplissage des micro vides de l'empilement des grains de ciment tout en améliorant la compacité du mélange et en faisant progresser encore les qualités de sa rhéologie à l'état frais, tandis que la deuxième fonction (fonction chimique) concerne la fixation de la portlandite produite lors de l'hydratation du ciment pour former un composant de silicate de calcium hydraté plus dense et plus résistant que celui des bétons ordinaires.

I-2.2 Historique :

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 une échelle microscopique par l'ajout d'additions extrafines) [74].

Ces deux voies de recherche sont abouties à des résultats très intéressants, et à la découverte des nouveaux bétons qui ont des performances très élevées et surtout au niveau de la résistance et de la durabilité.

Les bétons à hautes performances sont apparus à la fin des années 1980. Ces bétons sont obtenus par une réduction de la porosité en agissant sur le squelette granulaire (granulométrie) par l'addition de particules ultrafines type "fumée de silice », par l'ajout d'un adjuvant superplastifiant/haut réducteur d'eau et par la réduction du rapport eau/ciment. La faible porosité et perméabilité de ces bétons ont permis d'autre part d'améliorer considérablement la durabilité.

CHAPITRE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

I-2.3. Définition de BHP :

Les Bétons à Hautes Performances (BHP) se caractérisent par :

- Une résistance à la compression à 28 jours supérieure à **60 MPA**
- Un rapport Eau efficace/liant équivalent inférieur à 0,4. [75]

La performance signifie aussi la facilité de mise en œuvre et souplesse d'adaptation aux contraintes d'exécution des ouvrages. En effet, les BHP offrent des résistances exceptionnelles à l'état frais (rhéologie, pompabilité, etc...) et des performances aux jeunes âges, ce qui permet par exemple d'accélérer les cadences de fabrication en usine ou sur chantier ou de pomper le matériau sur de longues distances.

Ils confèrent une pérennité architecturale aux ouvrages et augmentent considérablement leur durabilité en réduisant corrélativement les frais de maintenance et d'entretien. [76]

Les BHP sont également, du fait de leur porosité extrêmement réduite, plus résistants aux agents agressifs et de façon générale, présentent une durabilité accrue. Ils permettent

D'optimiser les structures, de réaliser des ouvrages soumis à des contraintes élevées ou subissant un environnement sévère (climat, agressions marines, effets du gel, attaques acides, etc. [77]

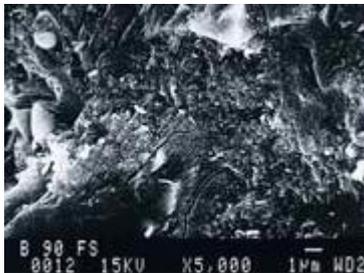


Figure I.6 BHP

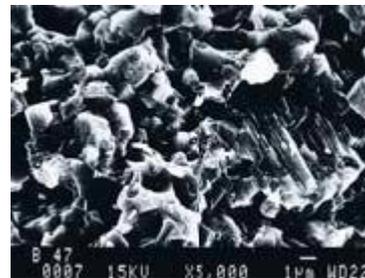


Figure I.7 Béton ordinaire

I-2.4. Voies d'obtention des BHP :

Les études ont montré les effets néfastes pour la résistance et la durabilité des excès d'eau non hydratée mais nécessaire à la maniabilité et la mise en œuvre. Il était donc nécessaire de chercher à réduire raisonnablement ce dosage en eau en introduisant des fluidifiants. En parallèle les chercheurs voulaient du béton une roche massive et compacte en incorporant des ultrafines. Ainsi deux voies se constituèrent pour obtenir les hautes performances [78].

CHAPITRE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

A- Défloculation des grains de ciment :

Obtenue grâce à l'emploi de produits organiques (condensés de formaldéhyde et mélanine sulfonâtes). Elle permet aux grains en suspension dans l'eau de retrouver leur granularité originelle donc à une réduction sensible de l'eau qui n'est plus bloquée dans les flots de grains.

B- Extension du spectre du mélange granulaire :

Obtenue en introduisant des éléments ultrafins (fumée de silice ; fillers calcaires ; pouzzolane ; laitier) chimiquement réactifs, qui remplissent les vides pour augmenter la compacité et la rhéologie du béton.

Du point de vue applicabilité avec des matériaux locaux, on peut obtenir des bétons ayant une résistance atteignant à la compression entre 60 et 80 MPA. Avec d'autres approches plus strictes et avec un bon choix de matériaux (ciments et granulats de qualités exceptionnelles, adjonction de polymères, ...) ,, on peut atteindre des performances dépassant 90 MPA.

I-2.5. Principes d'obtention des BHP :

Il faut admettre que pendant longtemps les progrès réalisés dans le domaine des BHP ont été plutôt le fruit d'une approche empirique que d'une approche fondamentale et scientifique. Cependant, à l'heure actuelle, on peut quand même expliquer les meilleures performances des BHP en se basant sur des principes scientifiques établis, bien qu'il ne soit pas toujours possible d'expliquer toutes les propriétés des BHP dans leurs moindres détails.

En fait, tant et aussi longtemps que les BHP seront fabriqués avec des matériaux aussi simples et peu coûteux que ceux que l'on utilise pour faire des bétons usuels, il n'est pas évident qu'une recette magique simple puisse donner directement la composition optimale d'un BHP donné. Il faudra donc toujours, en un endroit donné, rechercher la meilleure combinaison de matériaux locaux pour obtenir un BHP ayant un rapport eau/ciment désiré.

Comme on le verra, fabriquer un BHP est une opération un peu plus compliquée que de produire un béton usuel. Les raisons en sont simples : au fur et à mesure que la résistance à la compression visée augmente, les propriétés du béton ne sont plus simplement reliées au rapport eau/liant, le paramètre fondamental qui gouverne les propriétés des bétons usuels par L'intermédiaire de la porosité de la pâte de ciment hydraté [79].

I-2.6. Amélioration de la résistance de la pâte de ciment hydraté : [79].

La pâte de ciment hydraté (C-S-H) peut, en première approximation, être considérée comme un matériau monocristallin. La dépendance de la résistance à la traction d'un matériau monophasique cristallin par rapport à sa porosité s'exprime généralement par la relation exponentielle suivante :

CHAPITRE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

$$S = S_0 e^{-bh} \quad \text{equation 1.1}$$

Où :

S : la résistance à la traction du matériau qui a une certaine porosité ;

S₀ et p : la résistance à la traction intrinsèque du matériau lorsque la porosité est nulle ;

b : paramètre qui dépend de la taille et de la forme des pores.

La résistance à la compression d'un matériau fragile est plus grande que sa résistance à la traction parce que, en traction, un matériau se rompt par la propagation rapide d'une simple Fissure alors qu'il faut qu'un certain nombre de fissures de traction se réunissent pour causer Une rupture en compression.

Il n'y a pas encore eu d'approche spécifique pour dériver la résistance à la compression d'un matériau poreux à partir de la connaissance des caractéristiques de sa microstructure.

$$f_c = f_c (1 - p)^m \quad \text{équation 1.2}$$

f_c : c'est la résistance à la compression du matériau contenant une porosité ;

f_c et p : représente la résistance à la compression intrinsèque d'un matériau donné lorsqu'il a Une porosité nulle ; et **m** : est un paramètre qui dépend de la nature des liens inter cristallins que l'on trouve dans le Solide.

La résistance d'une pâte de ciment hydraté peut être améliorée en considérant de façon plus détaillée les paramètres suivants :

A/ Porosité : un grand nombre de gros pores ou de vides de diamètre supérieur à 50 nm, concentrés en un endroit donné peuvent diminuer considérablement la résistance d'un matériau ;

B/ La taille des granulats : en général, la résistance d'une phase cristalline augmente lorsque la taille des grains diminue ;

C/ Hétérogénéité : avec des matériaux multiphasiques, les hétérogénéités microstructurales sont une source de perte de résistance.

I-2.6.1. Porosité :

Quand les silicates anhydres des grains de ciment entrent en contact avec l'eau, leur hydratation commence toujours par une mise en solution. Au fur et à mesure que l'hydratation se développe et que la taille des pores capillaires diminue, si bien l'hydratation des portions non encore hydratées des grosses particules de ciment se fait plutôt par diffusion.

CHAPITRE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

Comme les premiers produits d'hydratation cristallisent à l'extérieur dans l'espace remplis d'eau qui entoure les graines de ciment (c'est-à-dire à l'extérieur des limites d'une particule de ciment qui s'hydrate), on les appelle des produits d'hydratation externe (**Figure I.8**). Par contre, lorsque les produits de l'hydratation se forment par des réactions à l'intérieur des limites des particules de ciment, on les appelle des produits d'hydratation interne, ils sont plus compacts et moins bien cristallisés que les produits d'hydratation externes (**figure I.9**).

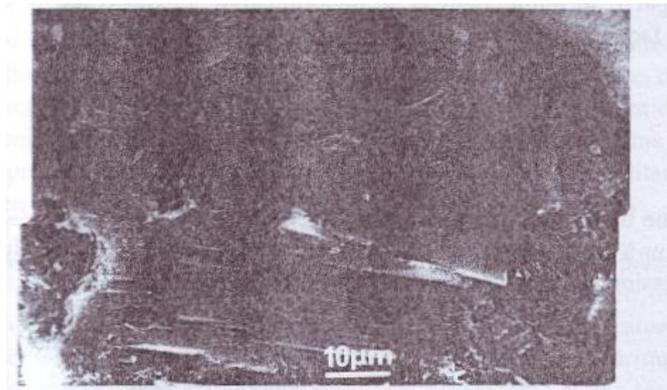


Figure I.8-Produits d'hydratation externe [79].



Figure I.9- Produits d'hydratation interne. [79]

Du point de vue de la résistance, il est donc très important d'obtenir une microstructure qui rassemble des produits internes plutôt qu'à celle des produits externes.

Comme on le verra plus tard, le concept de produits d'hydratation interne et externe d'un ciment est utile pour apprécier le rôle des faibles rapports eau/ciment, des superplastifiants et des matériaux cimentaires que l'on utilise pour fabriquer des BHP.

CHAPITRE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

Les principaux facteurs qui affectent la porosité de la pâte de ciment hydraté sont le rapport de l'eau disponible au volume de la phase de silicates qui peut s'hydrater et la quantité d'air piégé durant le malaxage. En 1892, **Féret** a exprimé sous forme d'une loi :

$$f'c = K \left(\frac{C}{C+a+e} \right)^2 \quad \text{équation 1.3} \quad \text{Où :}$$

f'c : représente la résistance à la compression de la pâte de ciment hydraté ;

C, e, a : les volumes du ciment, de l'eau et d'air respectivement ; et

K : est une constante qui dépend du type de ciment (Féret, 1892).

En divisant par c le numérateur et le dénominateur, l'expression **f'c** peut être réécrite de la façon suivante :

$$f'c = K \left(\frac{1}{1+a/c+e/c} \right)^2 \quad \text{équation 1.4}$$

Le volume d'air piégé est généralement inférieur à 1 ou 2 % du volume total du béton ; on peut donc négliger le terme a/c dans l'expression précédente :

$$f'c = K \left(\frac{1}{1+e/c} \right)^2 \quad \text{équation 1.5}$$

Si l'on désire augmenter la résistance à la compression d'un béton, il devient évident-il qu'il faut absolument réduire le rapport eau/ciment. Quand le rapport eau/ciment de la pâte de ciment hydraté est réduit, les particules de ciment se rapprochent les unes des autres dans mélange fraîchement malaxé (**Figure I.10**). Les particules de ciment étant maintenant plus rapprochées les unes des autres, les produits d'hydratation externes ont moins d'espace à remplir pour relier les différentes particules de ciment et développer une certaine résistance initiale.

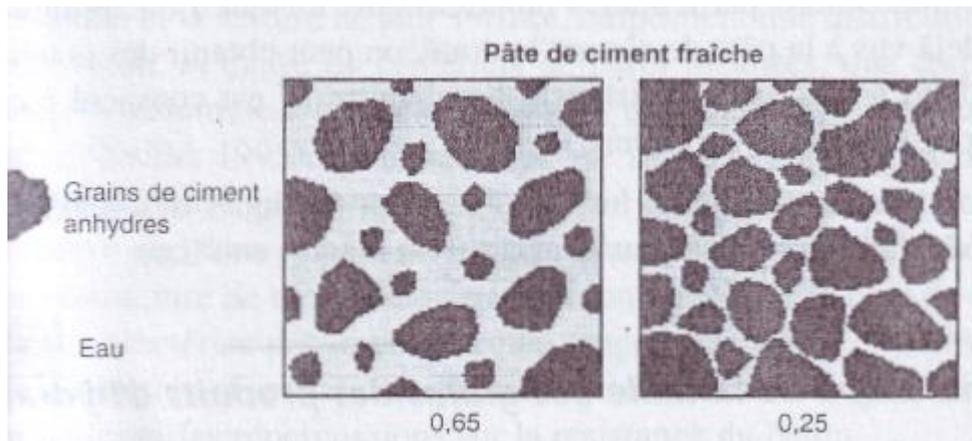


Figure I.10- représentation schématique de deux pâtes de ciment fraîches de rapports respectifs de 0,65 et 0,25. Dans cette représentation schématique, le rapport de la surface d'eau et de celle des grains de ciment est égal au rapport massique eau/ciment. [79].

I-2.6.2. Diminution de la taille des grains des produits d'hydratation :

La diminution du rapport eau/liant favorise la formation de produits d'hydratation internes qui sont caractérisés par une texture très fine, les C-S-H dans ces produits d'hydratation internes ressemblent beaucoup plus à une phase compacte ayant une apparence amorphe [79].

I-2.7. Microstructure des BHP :

Le béton durci est un matériau très hétérogène. Cette hétérogénéité est le résultat de la large étendue granulométriques 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 du ciment durcie) et les granulats (gravillons et sable). [80] ainsi que la structure de l'interface pâte/granat (appelé auréole de transition). Les principaux composants du ciment Portland sont les suivantes :

60 à 65% - C3S = $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ - silicate tricalcique ($\text{Ca}_3[\text{SiO}_4] \text{O}$ - alite)

20 à 25% - C2S = $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ - silicate bi calcique ($\text{Ca}_2[\text{SiO}_4]$ - bélite)

8 à 12% - C3A = $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ - aluminate tricalcique ($\text{C}_3[\text{Al}_2\text{O}_6]$ - célit)

8 à 10% - C4AF = $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ - alumino-ferrite tétra calcique

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 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (ou hydroxyde de calcium), aluminates de

CHAPITRE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

calcium hydraté, ettringite ($3\text{CaO} \cdot \text{A}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$) etc. La réaction principale de l'hydratation du ciment peut être présentée de façon simplifiée [81] :



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 à 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 additions minérale tel que le laitier de haut fourneau peut être additionnée. 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 pouzzolaniques consomme de la portlandite et forme le gel CSH. Ceci permet ainsi d'augmenter les performances (résistance, durabilité...etc.) du béton [81].

Dans les bétons ordinaires, l'interface pâte granulats, appelée aussi l'auréole de transition, est plus poreuse et mieux cristallisée que la matrice. [82]. 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 [83]. 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 à travers la matrice (**figure I.11**).

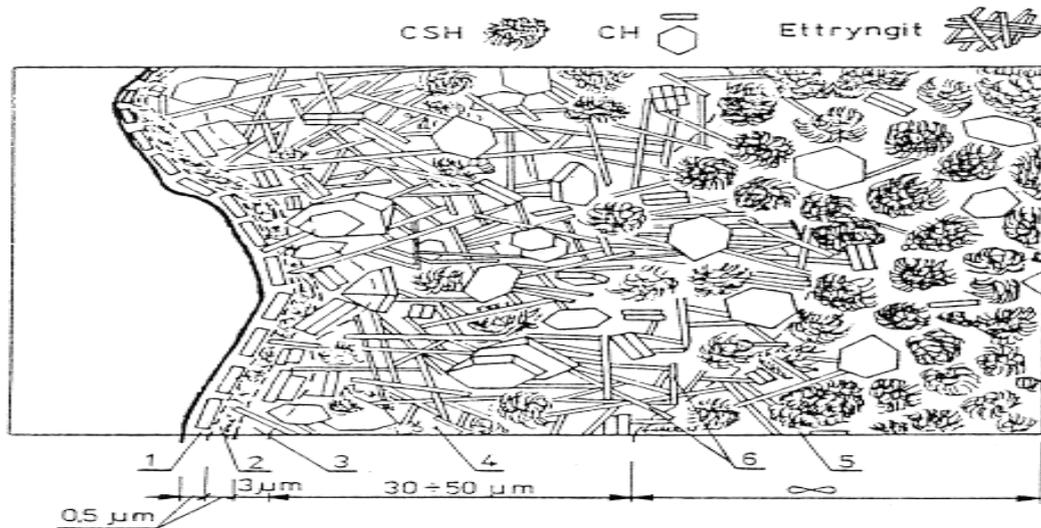


Figure I.11. : Modèle de la morphologie de l'auréole de transition d'un BHP : 1- couche Continue de $C a(OH)_2$, 2 - couche de CSH, 3 - couche de $C a(OH)_2$, 4 - zone poreuse, 5 – pâte du ciment hors de l'auréole de transition, 6 - Ettringite, [84] [85]

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 (réactifs) 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. 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 [86].

Pour les bétons à hautes performances, la réduction de la porosité et de l'épaisseur de cette Zone est obtenu grâce l'ajout des additions minérales. En comparant avec le BO, où l'auréole de transition est d'environ 50 μm , son épaisseur pour les BHP est limitée à 12 μm . Certaines sources signalent l'absence de la zone de contact dans les bétons à haute performance (Figure I.12.) où l'ajout de la fumée de silice permet la consommation de la portlandite, en densifiant la structure du matériau, tout en améliorant ses performances mécaniques [87]. La qualité de la zone de transition dépend aussi du rapport E/C. Lorsque E/C augmente, cette zone devient plus épaisse, plus poreuse et par conséquent moins résistante.

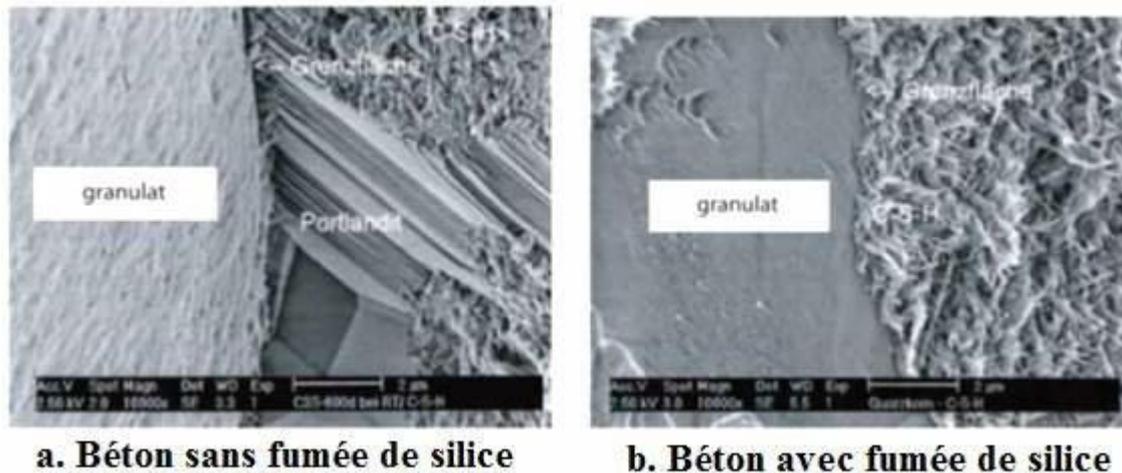


Figure I.12. Microstructure de la zone de contact entre la pâte et le granulat [81].
a) béton sans fumée de silice ; les cristaux de portlandite dans la zone de transition sont orientés perpendiculairement aux granulats,
b) béton avec fumée de silice, absence de la zone de transition, homogénéité du gel CSH.

I.2.8. Méthode de formulation de BHP :

L'objectif de toutes les méthodes de formulation de bétons est de déterminer la combinaison de matériaux à utiliser pour produire le béton qui aura les propriétés désirées et qui sera le plus économique possible. Il a toujours été très difficile de développer une méthode théorique universelle permettant de formuler un béton avec n'importe quelle combinaison de ciment portland, d'ajout cimentaire, de granulat et d'adjuvant. Même si tous ces matériaux de base doivent satisfaire à des critères d'acceptation plus ou moins sévères, on peut obtenir un béton ayant les propriétés visées à l'état frais et à l'état durci de différentes façons en utilisant les mêmes matériaux. Cette situation, loin de constituer un désavantage, doit être plutôt perçue comme un avantage puisque l'on peut obtenir un béton ayant des propriétés données de façon différente en utilisant des matériaux localement disponibles (**Aitcin et Neville, 1993**). En règle générale, une méthode de formulation permet aussi de calculer un mélange de départ que l'on pourra plus ou moins modifier pour obtenir les propriétés désirées à partir de quelques gâchées d'essai. Bien que les méthodes de formulation Des BHP relèvent encore plus d'un art que d'une science, il est certain qu'elles reposent aussi sur des principes scientifiques qui sont à la base de toutes les formulations de béton.

Il est intéressant de noter un regain d'intérêt pour les méthodes de formulation des bétons (**Day, 1996 ; Ganju, 1996 ; de Larrard et Sedran, 1996 ; Popovics, 1996**). En fait, cet intérêt ne fait que traduire les limitations des méthodes actuelles qui ont été surtout développées pour formuler des bétons usuels et qui ont été utilisées sans créer trop de

CHAPITRE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

problèmes pendant de nombreuses années. Tant et aussi longtemps que le béton usuel restera essentiellement un mélange de ciment portland, d'eau, de granulats et quelquefois d'air entrainé. Ces méthodes serviront seulement de guide ayant une valeur prédictive plus ou moins valable pour formuler un béton ayant un affaissement et une résistance à la compression donnée.

Ces méthodes de formulation ont perdu beaucoup de leur valeur parce que :

- La plage des rapports E/C ou des rapports E/L des bétons modernes est beaucoup plus étendue que celle des bétons d'il y a quelques années surtout dans la gamme des faibles valeurs grâce à l'utilisation des superplastifiants ;
- Les bétons modernes contiennent souvent un ou plusieurs ajouts cimentaires qui remplacent une plus ou moins grande quantité de ciment ;
- L'affaissement peut être ajusté en utilisant un super plastifiant plutôt que de l'eau sans altérer le rapport E/C ou le rapport E/L

I.2.8.1. Méthode de Dreux – Gorisse

La méthode de G. Dreux et L. Gorisse (1970) rassemble les différentes méthodes de l'époque (Valette, Faury, Joisel, etc.) et en déduit une méthode pratique et simplifiée la formulation adaptée aux matériaux utilisés même actuellement, notamment les BHP avec quelques ajustements propres. Cette méthode est basée sur l'obtention d'une courbe granulométrique continue permettant de produire un squelette granulaire le plus dense possible, et d'optimiser le dosage en ciment et en eau des bétons ordinaires[32].

La courbe granulaire de référence est exprimée en échelle semi-logarithmique (échelle des analyses granulométriques), et le point de brisure est défini par :

❖ Son abscisse : $D_{max}/2$ si $D_{max} < 25$ mm et $(D_{max}-5\text{mm})/2$ si $D_{max} > 25$ mm, et son ordonnée : $Y = 50 - D_{max} + K + K_s$.

Avec K un terme correcteur d'arrangement granulaire prenant en compte le dosage en fines (Ciment et fillers), l'angularité des granulats et la puissance de serrage ; K_s une fonction du module de finesse du sable [32].

I.2.8.2. Méthode de baron – Lesage :

L'approche classique adoptée en France est la méthode de Baron - Lesage tirée de l'expérimentation et développée au LCPC dans les années 1980.

Cette méthode pratique est basée sur des essais au maniabilimètre LCPC et permet avec cet outil de déterminer la maniabilité maximale du béton en fonction du rapport sable sur gravillons (S/G). Elle a l'avantage de mener à des bétons qui présentent des risques de ségrégation minimaux [32].

CHAPITRE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

La théorie de Baron - Lesage est fondée sur les hypothèses suivantes qui ont été vérifiées par l'expérience (Rossi, 1998) :

- ❖ Pour un rapport E/C fixé, le béton le plus maniable est celui dont le squelette granulaire est le plus compact ;
- ❖ Le rapport S/G correspondant à cet optimum de compacité est indépendant de la quantité de pâte de ciment [32] ;

I.2.8.3. Méthode de LARRAD :

Les modèles théoriques présentent l'intérêt majeur de réduire le nombre de gâchées effectuées au laboratoire. Le Modèle d'Empilement Compressible MEC a été développé par **Sedran et de Larrard**. L'avantage de ce modèle est qu'il décrit mathématiquement un empilement granulaire en prenant en compte le squelette granulaire dans son ensemble, depuis les particules micrométriques jusqu'aux particules centimétriques, tout en s'appuyant sur les notions de compacités virtuelles. Il vise à prévoir la compacité d'un mélange à plusieurs classes granulaires, à partir des caractéristiques des grains qui le composent (forme, distribution granulaire, compacités des tranches monodimensionnelles) et pour une énergie de mise en place de l'empilement granulaire décrite par un indice représentatif de son degré de serrage, traduisant l'énergie fournie pendant la mise en place. Cette méthode d'optimisation a l'avantage de prendre en considération la granulométrie des particules, leur forme et l'interaction entre les grains. Ce modèle a été utilisé avec succès pour la formulation de mélange de béton ordinaire, à haute performance et auto nivelant. Le logiciel René-LCPC a été développé à la suite de ce travail et programme le MEC sur la base de l'optimisation granulaire. Il prédit la viscosité plastique, le seuil de cisaillement, l'affaissement au cône et différentes propriétés du béton (résistance, déformations différées, *etc.*) à partir de sa composition et du modèle granulaire. Cela permet d'évaluer l'importance d'un paramètre de formulation sur la performance du béton [32].

I.2.8.4. La méthode 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 à 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 [88].

Cette méthode très simple suit 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 super plastifiant est considérée comme faisant partie de la quantité d'eau de gâchage [88].

CHAPITRE I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

La procédure de formulation commence par le choix de cinq caractéristiques particulières du BHP ou des matériaux utilisés : [88]

- 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 ;

I.2.8.5. Autres méthodes de formulation :

Il y a plusieurs autres méthodes de formulation des BHP et même, dans certains cas, des logiciels sont disponibles (WeIch, 1962 ; Hughes, 1964 ; Blick et coil, 1974 ; Petermann et CalTasquillo, 1986 ; Haug et Sandvik, 1988 ; Addis et Alexander, 1990 ; de Lauard, 1990 ; Mehta et Aitcin, 1990 ; Domone et Soutsos, 1994 ; Gutierrez et Canovas, 1996 ; de Larrard, 1999). Pour montrer la diversité de ces approches, 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 à haute résistance, la méthode proposée par de Larrard en 1990, qui est maintenant disponible dans sa version informatique BETONLAB et la méthode simplifiée présentée par Mehta et Aitcin (1990).

I.2.8.6. Méthode suggéré par le comité ACI 363 :

Cette méthode comporte neuf étapes

Etape 1 : Affaissement et choix de la résistance nécessaire,

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

Etape 3 : sélection de la quantité de gros granulat,

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

Etape 5 : sélection du rapport eau/liant,

Etape 6 : teneur en ciment,

Etape 7 : premier essai avec le ciment,

Etape 8 : autres gâchées d'essai avec des variations du volume de ciment,

Etape 9 : gâchée d'essai.

CHAPITRE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

I.2.8.7. Méthode des coulis du LCPC :

Cette méthode est basée sur deux modèles 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 **Féret** dans laquelle on utilise un certain nombre de paramètres :

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

f'c : Résistance à la compression du béton mesurée sur cylindres à 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)

Rc : Résistance à la compression du béton à 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 demie partie d'eau)

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

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

Φ_i : Volume occupé par l'éniesme classe i 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 mono dispersé comme une fonction de sa concentration solide

I-2.8.8 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 à 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.

- 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 super plastifiant,
- Etape 7 : ajustement de la teneur en eau,
- Etape 8 : ajustement pour une gâchée d'essai,

I.2.9. Performances mécaniques des bétons à hautes performance

Les diverses propriétés des BHP découlent de leur faible porosité et de leur durabilité élevée.

On sait très bien que la formation des silicates de calcium hydratés créés durant l'hydratation des silicates di et tricalciques soit essentiellement responsable des gains de résistance de béton.

Les phénomènes complexes liés à l'hydratation du ciment (mouvements thermiques ou retrait) provoquent la création des défauts. Dans le cas des bétons classiques, ces défauts sont particulièrement localisés dans l'auréole de transition.

Dans les BHP cette zone est inexistante [89] et, les défauts prennent naissance dans la matrice, siège des phénomènes d'hydratation. C'est à partir de ces défauts (microfissures, microcavités ...) que vont se développer les micros ruptures lors des sollicitations mécaniques.

CHAPITRE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

I.2.9.1. Résistance en compression :

C'est la propriété d'usage la plus importante, c'est aussi celle dont l'amélioration est plus spectaculaire : on a pu réaliser en laboratoire [90] des bétons dont la résistance à la compression dépassait 200 MPA. Cependant, si l'on cherche à fabriquer des bétons maniables avec des granulats ordinaires, on devra se limiter, dans l'état actuel de la technologie à des valeurs comprises entre 100 et 120 MPA en résistance moyenne à 28 jours

Une explication de cette augmentation de la résistance est due au rôle accélérateur de la fumée de silice, selon la nouvelle loi de **Féret [91]**.

Où : - f_{c28} est la résistance moyenne en compression du béton à 28 jours.

- ❖ E, C et S sont le poids respectif d'eau, du ciment et de fumée de silice par mètre cube de béton.
- ❖ k_g est un paramètre qui dépend de la qualité des granulats (pour des granulats courants $K_g = 4,91$).

Résistances à la compression simple et module d'élasticité des bétons (Confectionnés avec différents types de granulats) et des mortiers, en fonction du rapport E/L [91].

Tableau I.2 : Présente quelques résultats d'essais de compression[91].

Rapport E/L		Résistance à la compression (MPa)			Module d'élasticité (GPa)		
		0,50	0,27	0,22	0,50	0,27	0,22
Béton de calcaire	28j	56,2	92,1	117,2	33	42	48
	90j	69,4	111,2	126,5	36	44	52
Béton de granite	28j	59,5	100,3	127,4	32	42	45
	90j	64,1	118,3	134,5	34	43	47
Béton de quartz	28j	53,4	93,4	103,3	33	45	42
	90j	58,5	113,4	118,6	34	47	52
Béton de grès	28j	57,2	113,3	118,6	21	30	31
	90j	64,7	127,6	121,2	22	31	35
Mortier	28j	45,1	88,6	104,6	30	39	42

I.2.9.2. Résistance en traction :

Comme dans le cas de la résistance à la compression, il a été établi et vérifié que la résistance en traction des BHP progressait linéairement en fonction de la compacité de la pâte de ciment durcie [90].

PE dèches [92] a montré que la résistance en traction par flexion à 28 jours avec un BHP à la fumée de silice varie entre 5 et 9 MPA. Il a montré dans la même étude que l'ensemble des points (R_t et R_c) se situait au-dessus de la courbe représentant la relation adoptée par les règlements de béton armé [93] et de béton précontraint [94] :

$$R_t = 0,6 + 0,06 R_c$$

équation (I.8)

CHAPITRE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

Il a proposé la relation suivante pour des résistances en compression comprises entre 30 et 130 MPA

$$R_t = 5,5 + 0,027 R_c \quad \text{équation (I.9)}$$

Ahmad et al. [95] avaient déjà proposé une relation pour des résistances en compression supérieures à 84 MPA :

$$R_t = 0.44R_c^{2/3} \quad \text{équation (I.10)}$$

I.2.9.3. Le module d'élasticité

Le module d'élasticité des BHP est supérieur à celui des bétons traditionnels. [96].

Nota

Les règles BAEL fournissent une expression qui permet d'évaluer la valeur du module E_i , en fonction de la résistance à la compression par la formule : $E_{ij} = 11000 f_{cj}^{1/3}$

I.2.10 Déformations libres et sous chargement des BHP

I.2.10.1 Retrait :

Le retrait total du BHP est globalement identique à celui d'un béton traditionnel mais avec une cinétique différente (il se produit plus tôt et se développe principalement pendant les premiers jours après le coulage).

Le retrait de dessiccation à l'état durci est plus faible compte tenu du faible dosage en eau. Le retrait endogène (ou d'auto-dessiccation), compte tenu de la finesse de la microstructure et de la forte réduction du rapport E/C, est d'un coefficient plus élevé ($150 \text{ à } 250 \times 10^{-6}$) pour un BHP que pour un béton traditionnel (60×10^{-6}). Le retrait d'auto-dessiccation est d'autant plus précoce et élevé que le rapport E/C est faible. [96].

Le retrait est principalement dû à l'évaporation de l'eau du béton, au contact de l'atmosphère.

De façon générale, l'eau existe dans le béton dans les états suivants :

- sous forme de gel dans les sels hydrates.
- en fermée dans les petits interstices sous forme capillaire.
- libre dans les vides les plus importants entre les granulats et la pâte.

Le processus du séchage de l'eau dans le béton est le suivant : lorsque le béton sèche, l'eau s'évapore d'abord à la surface des tubes capillaires ; il en résulte un accroissement de la courbure du ménisque de capillaire, et une tension qui attire l'eau des vides les plus importants ; qui se déplace vers les capillaires. Ce processus se répète, le béton se dessèche de plus en plus au voisinage de la surface. Au fur et à mesure il recule des ménisques intérieurs, les gels d'hydratation arrivent au contact direct avec l'atmosphère.

CHAPITRE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

A priori, on pourrait penser que pour un béton qui contient une grande quantité de pâte de ciment et d'eau, les pores capillaires sont nombreux et le séchage est accéléré.

Dans le béton à haute résistance, la réaction chimique de la chaux $\text{Ca}(\text{OH})_2$ avec la silice SiO_2 donne naissance à un silicate du calcium $\text{CaOSiO}_2, n\text{H}_2\text{O}$. Ce silicate, qui remplit les pores capillaires réduit leur volume libre, ce qui évite la migration de l'eau et le séchage des gels. Par conséquence, la déformation de retrait est réduite.

D'après **chaid et al [97]**. : Le retrait total des bétons avec ajouts cimentaires, mesuré sur éprouvettes 7 x 7 x 28 cm, est plus faible que celui mesuré sur celles de béton de référence. Cependant, le béton avec ajout de calcaire se comporte mieux. Ce fait, est dû en particulier à la grande finesse de cet ajout, qui avantage la densification dès les premières échéances et diminue par conséquent le retrait. [98].

I.2.10.2. Retrait endogène

Le ciment réagit avec une quantité d'eau donnée. Ce processus s'accompagne d'une réduction du volume. Par rapport au volume initialement occupé par l'eau et par le ciment, le volume du produit de la réaction après hydratation complète sera réduit d'environ 10 %. Au début de la réaction, le béton encore plastique absorbe sans difficulté la réduction volumique. Dès que le béton se rigidifie, la contraction est empêchée. Ce phénomène entraîne le développement de contraintes de traction dans les espaces remplis d'eau. Ces pores en devenir se dilatent, ce qui provoque une sous-pression aspirant l'air extérieur. Dans cet espace désormais partiellement rempli d'eau, apparaissent des forces capillaires qui contractent les pores. Ce retrait interne est donc le résultat de deux processus : un processus chimique et un processus physique. Dans un béton ordinaire, caractérisé par un excédent d'eau, le retrait endogène demeure limité à environ 100×10^{-6} . En ce qui concerne le béton à hautes performances, où la quantité d'eau disponible est nettement moins importante, le ciment attire à lui cette faible quantité d'eau. Les pores s'asséchant progressivement sont soumis à des forces capillaires en augmentation constante, permettant au retrait endogène d'atteindre des valeurs clairement supérieures. Plusieurs valeurs sont précisées au tableau I.3. Il est manifeste que le retrait endogène augmente avec l'accroissement de la résistance et s'effectue essentiellement à court terme.

Etant donné que le retrait endogène résulte du processus d'hydratation, il sera toujours présent, même en cas de cure parfaite du béton. Seuls de nouveaux concepts relatifs à la cure intérieure pourraient s'avérer précieux. De toute évidence, le retrait endogène du béton à hautes performances requiert la nécessaire attention. Conjugué aux éventuelles contraintes

CHAPITRE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

thermiques résultant de la chaleur d'hydratation élevée, le retrait endogène pourrait en effet provoquer l'apparition d'importantes fissures dans un BHP frais. [32].

I.2.10.3. Retrait de dessiccation :

Le retrait de dessiccation se produit dans un environnement qui n'est pas saturé en eau.

Dans ce cas, de l'eau peut s'évaporer des pores. Ce phénomène donne lieu à des forces capillaires qui contractent les pores et génère par voie de conséquence une réduction du volume. Le niveau du retrait de dessiccation dépend en grande partie de la quantité d'eau évaporable présente dans le béton. Dans des circonstances normales, une fraction importante ne s'évaporerait pas, car elle est liée chimiquement ou est fixée entre les produits d'hydratation. L'eau présente dans les pores capillaires, de plus grandes dimensions, peut quant à elle s'évaporer. Le volume réduit des pores capillaires est une caractéristique typique du béton à hautes performances. Par rapport au béton ordinaire, il sera dès lors moins sujet au phénomène du retrait de dessiccation. Le tableau I.5. 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 aussitôt 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 à plus long terme. L'ampleur de ce retrait peut être sensiblement influencée par des mesures de cure énergiques. [32].

CHAPITRE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

Tableau I.3. – Retrait de dessiccation (*) et retrait endogène () en fonction de f_{ck} et de fonction de l'humidité relative(HR) suivant la norme EN 1992-1-1 :2004.**

Tableau 2 – Retrait de dessiccation (*) et retrait endogène (**) en fonction de f_{ck} et de l'humidité relative (HR) suivant la 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

Tableau 3 – Coefficients de fluage (*) en fonction de f_{ck} , de l'humidité relative (HR) et du délai 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

CHAPITRE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

I.2.10.4. Fluage :

Les BHP présentent un fluage (déformation différée sous chargement permanent) plus faible que les bétons traditionnels (surtout avec des formulations à base de fumées de silice). La cinétique de fluage propre est très rapide (le fluage est accéléré et se manifeste dès les jeunes âges du béton) et se stabilise plus vite. Le fluage de dessiccation est très faible. Le fluage est d'autant plus faible que la résistance en compression est plus élevée. [96].

Tableau I.4. tableau extrait du guide pratique IREX a l'attention des bureaux d'études pour l'application des règles BAEL aux BHP [96].

Ordre de grandeur des principales caractéristiques des BHP		
	BHP sans fumée silice	BHP avec fumée silice
Résistance en MPA		
Compression sur cylindres		
28jours	60	80-90
1jours	25	30
7jours	50	75
Résistance en traction 28j	4,2	5,5
MPA		
Module d'élasticité 28jours	42000	52000
Coefficient de fluage	1,5	0,8
E eff/Liant eq	0,38	0,34
Dosage en ciment kg/m³	400	420
Teneur en fumée de silice (de % de ciment)	-	8

Exemples d'application du BHP :



Figure I.13: Passerelle de Seoul.



Figure I.14. Le pont de Mila

CHAPITRE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

I.2.11. Durabilité des BHP :

Étant donné la structure plus dense et plus compacte du béton à hautes performances, ce matériau affiche un meilleur comportement face aux mécanismes d'agression. La plupart des processus de dégradation sont en effet causés par l'entrée de substances agressives, telles que des chlorures, du dioxyde de carbone, des acides, etc. Si la pénétration de ces substances dans le béton est entravée, comme dans le cas du BHP, les processus de dégradation y afférant ne pourront bien évidemment se produire que bien plus tard. Quoi qu'il en soit, il convient toujours de veiller à la pureté des éléments constitutifs du béton, afin d'éviter toute agression par des mécanismes internes (présence de sulfates, d'alcalis, de granulats réactifs, ...etc.).

Toutefois, la durée d'utilisation d'une construction est en grande partie également déterminée par les conditions d'exécution. Une allusion au risque de fissuration prématurée résultant des effets thermiques et du retrait (principalement endogène) est déjà faite ci-dessus. La présence de telles fissures peut influencer sensiblement la durabilité de la construction. Dans ce cadre, il faut signaler que Les laitiers offrent une bonne résistance aux agressions chimiques. Les performances des liants contenant du laitier sont, à moyen et à long terme, égales à celles des ciments portland [99]

CHAPITRE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

Conclusion du chapitre

La première partie du chapitre I a rappelé les principaux mécanismes et phénomènes physico-chimiques liés à l'hydratation du ciment, principalement aux jeunes et très jeune âges. L'objectif de cette synthèse bibliographique est de passer en revue les connaissances actuelles les plus pertinentes sur l'action des additions dans les matériaux cimentaires afin d'éclaircir en particulier comment elles contribuent à l'activité liante du ciment.

Notre recherche bibliographique s'appuie sur les études les plus récentes dans le domaine d'utilisation des additions minérales et bétons à base de ces ajouts cimentaires. Ceci qui nous a permis de dégager les principaux arguments sur lesquels nous appuyons notre approche méthodologique pour la formulation des BHP à base de liants ternaires en incorporant des additions minérales.

Dans la deuxième partie de ce premier chapitre nous avons présenté une synthèse bibliographique des recherches réalisées sur les bétons à hautes performances dans le but de faire le point sur les connaissances relatives à ce type de bétons objet de notre étude.

Nous avons traité l'essentiel de la littérature des éléments qui concerne dans notre étude en l'occurrence les constituants élémentaires pour la réalisation de ce type de béton, les méthodes de formulation utilisées et une synthèse des travaux réalisés les propriétés mécaniques (compression, traction, module d'élasticité), les déformations volumiques et la durabilité des BHP.

La lecture de cette littérature nous a permis de se familiariser avec le BHP à base de liant ternaire qui présente de nombreux avantages technicoéconomique et environnementaux. Ces avantages doivent faire du BHP le matériau durable et d'avenir dans les secteurs de bâtiment et travaux publics et justifie le choix du sujet de recherche que nous avons abordé.

CHAPITRE II : MATERIAUX ET FORMULATION

II.1 Introduction :

Ce chapitre est composé de trois parties. Nous décrivons dans la première partie une caractérisation et une identification des matériaux entrant dans la formulation des bétons d'études.

La deuxième partie est consacrée à la formulation des BHP objets de notre étude ainsi qu'aux procédures utilisées pour la confection, conservation des éprouvettes et les différents tests utilisés pour la caractérisation des bétons d'étude à l'état frais.

II.2. Programme expérimental prévisionnel :

Le programme expérimental a été réalisé en trois phases successives. Dans une première phase préliminaire et dans le but d'ajuster la composition du BHP témoins, Six mélanges ont été confectionnés à base d'un liant composé de 10 % fumée de silice et 90% de ciment sans ajouts en faisant varié le rapport E/L et le dosage en superplastifiants.

Dans une deuxième phase, une série de BHP d'étude à base de liant ternaire a été formulée. Ces bétons sont confectionnés avec un liant composé de fumée de silice avec un dosage fixé à 10 % et de laitier granulé en substitution partielle au ciment.

Le taux de substitution est variable de 10 à 50% avec un pas de 10%. Le rapport E/L est fixé à 0.28 et le dosage en SP est de l'ordre de 1.2 %

La troisième phase avait pour objet d'évaluer l'influence du taux de remplacement du ciment par le laitier granulé sur les propriétés des bétons à l'état frais (maniabilité et masse volumique) et à l'état durci (résistance mécaniques en compression, masse volumique absorption)

Le BHP est caractérisé par des essais spécifiques à l'état frais, pour cela, une étude

Expérimentale systématique à l'état frais et durci de tous les BHP a été réalisée, Il s'agit des

Essais suivants :

- L'affaissement,
- Mesure la masse volumique apparente.
- Résistance à la compression

II.3. Matériaux d'étude :

La formulation des bétons nécessite une connaissance rigoureuse de la nature et les caractéristiques de ses composants. Par ailleurs, la détermination des dosages optimaux, ainsi que l'illustration des certaines interprétations ne pourraient être possible que si les différents constituant sont bien identifiés.

CHAPITRE II : MATERIAUX ET FORMULATION

II.3.1. Caractéristiques des constituants utilisés :

II.3.1.1. Liant :

A/ ciment :

Le ciment de type CEM I/ 42.5 N-LH/SR5, Ce ciment est obtenu grâce à d'un mélange de 95 % de clinker et de 5% de gypse provenant de la cimenterie de la AIN KBIRA « SETIF

La composition chimique et minéralogique du ciment ainsi que ses caractéristiques physiques sont données dans les tableaux 1, 2 et 3.

Tableau II.1: Composition chimique du ciment.

Oxydes	CaO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	PAF	CaO, libre	total
en %	63,40	4.16	21.46	4.95	1.43	0,06	0,33	1.66	1.94	1.23	100

Tableau II.2 : Composition minéralogique du clinker.

Minéraux	C3S	C2S	C3A	C4AF
% massique	65.69	11.97	1.86	15.90



Figure II.1: ciment utilisé

CHAPITRE II : MATERIAUX ET FORMULATION

Tableau II.3 : Caractéristiques physiques du ciment selon la fiche technique

Essais physiques Norme (EN 196-3et 6)	Garantie NA442 :2013	Mesures	unité
Consistance normale		24,6	%
Début de prise	≥ 60	230	mn
Fin de prise	-	345	mn
Expansion à chaud	≤ 10	0	mm
Masse volumique absolue (spécifique)		3,18	g/cm ³
Masse volumique apparente		1,090	g/cm ³
Surface Spécifique Blaine (SSB)		3517	cm ² /g
Chaleur hydratation (EN196-8)	≤ 270	218,5	J/g
Refus % 90μ		0,85	
Refus % 45μ		6,28	

Tableau II.4 : Caractéristiques mécaniques du ciment (Norme NF EN 196-1 :2016).

Age	Résistance (MPa)		
	Compression		Flexion
2 jours	Li≥10	21,1	4,5
28 jours	Li≥42.5	59,2	9,0

B/fumée de silice :

La fumée de silice incorporée dans le béton améliore de manière considérable les performances du béton. Cette addition a permis le développement des bétons à hautes performances.

Description :

La fumée de silice utilisée dans cette étude est : **MEDAPLAST HP** de **GRANITEX**. C'est un Produit en poudre, constitué par une excellente silice active micronisée, couramment appelée « fumée de silice ».

le MEDAPLAST HP par sa haute composition en silice et micro silicates actives et par sa grande surface spécifique est considéré aujourd'hui, comme l'un des meilleurs produits à haute activité pouzzolanique.

CHAPITRE II : MATERIAUX ET FORMULATION



Figure II.2: Echantillon de la fumée de silice

➤ **Caractéristiques selon la fiche technique :**

MEDAPLAST HP est constitué de $\geq 85\%$ de particules sphériques de SiO_2 amorphes avec des dimensions de quelques dixièmes de microns, c'est ainsi que sa surface spécifique s'élève à $> 15 \text{ m}^2/\text{g}$ (Blaine). Cette caractéristique lui permet de capter et de fixer l'hydrate de calcium $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ et de le transformer en un premier temps, en silicate hydraté et successivement en silicate de calcium stable et irréversible.

Cette particularité permet de modifier le comportement des bétons à l'état humide, comme à l'état durci.

➤ **Mode d'utilisation :**

MEDAPLAST HP est principalement utilisé dans tous les bétons et mortiers de hautes performances. Selon sa fiche technique il permet en effet :

- d'obtenir des bétons durables à résistances mécaniques élevées,
- d'obtenir des bétons résistants aux agressions chimiques et atmosphériques

Tableau II.5 Composition chimique de la fumée de silice

Minéraux	SiO_2	SO_3	Cl-
% massique	>85	$< 2,5$	$< 0,2$

CHAPITRE II : MATERIAUX ET FORMULATION

Tableau II.6 Propriétés physiques de la fumée de silice

Type	Couleur	Surface spécifique (m ² /gr)	Densité (gr/cm ³)	Masse volumique apparente (g/cm ³)
Ferro- silicium	Grise	> 15	0,5	0.271

Le dosage du **MEDAPLAST HP** varie de 5 % à 10 % poids du ciment. Ce dosage dépend des performances recherchées. On a choisi Le dosage optimal en fumée de silice dans le BHP, 10% de la masse de ciment.

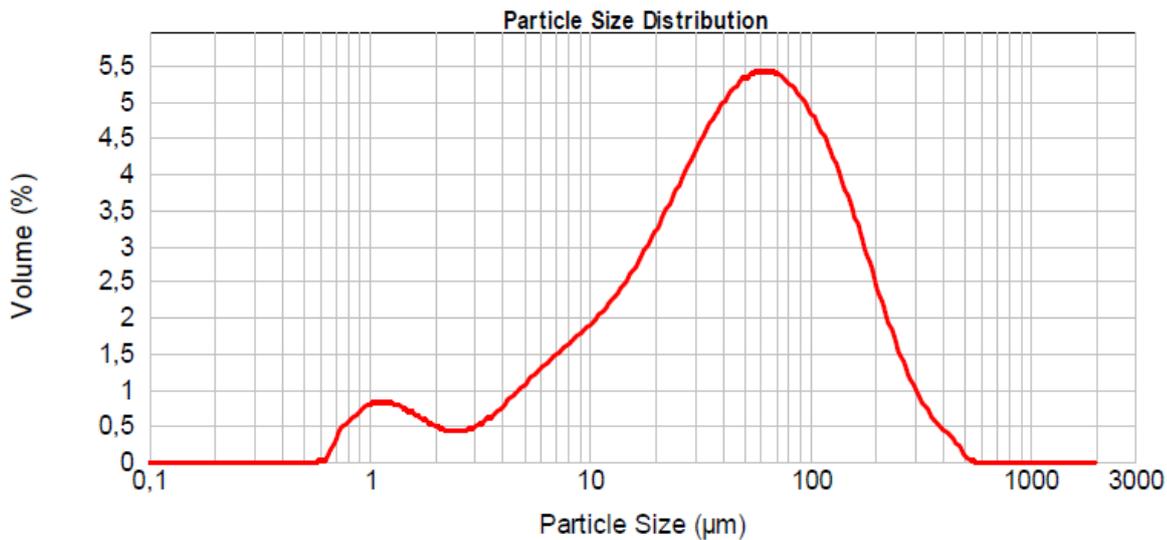


Figure II.3 Courbe granulométrique de la fumée de silice (FS) [100].

C/ laitier granulé :

Le laitier granulé de haut fourneau D'El -Hadjar (Annaba), est utilisé en qualité d'ajout, obtenue par refroidissement par trempe dans l'eau et chute dans un grand bassin, il se présente sous forme de sable de couleur gris clair de granulométrie 0 à 5 mm

Sa composition chimique est donnée au tableau II. 7, c'est un silico-aluminat de calcium et de magnésium, il est constitué essentiellement de quatre oxydes qui sont : (SiO₂- Al₂O₃-CaO-MgO).

Tableau II.7. Composition chimique du laitier D'El -Hadjar (Annaba)

élément	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Cl-	MnO
Oxydes (%)	41,69	7,05	1,41	39,77	5,49	0,15	0,44	0,10	-	-

CHAPITRE II : MATERIAUX ET FORMULATION

Les indice de basicité « I_b » indique si ce laitier est basique ou acide. Les indices les plus utilisés sont les suivants :

$$I_{b1} = \frac{\text{CaO \%} + \text{MgO \%}}{\text{SiO}_2 \%} = 1,08, \quad I_{b1} < 1,51 \quad \text{et} \quad I_{b2} = \frac{\text{CaO \%}}{\text{SiO}_2 \%} = 1, \quad I_{b2} \geq 1$$

Module d'activité : $Ma = \frac{\text{Al}_2\text{O}_3 \%}{\text{SiO}_2 \%} = 0.17$ (acceptable).

A partir des résultats obtenus, le laitier utilisé est un laitier basique, ce qui le rend apte à l'activation alcaline. Le diffractogramme du laitier granulé du haut fourneau d'Annaba présenté à la figure II.2 est typique de laitier amorphe qui présente cependant deux pics caractéristiques correspondant à la calcite et au fer. [100].

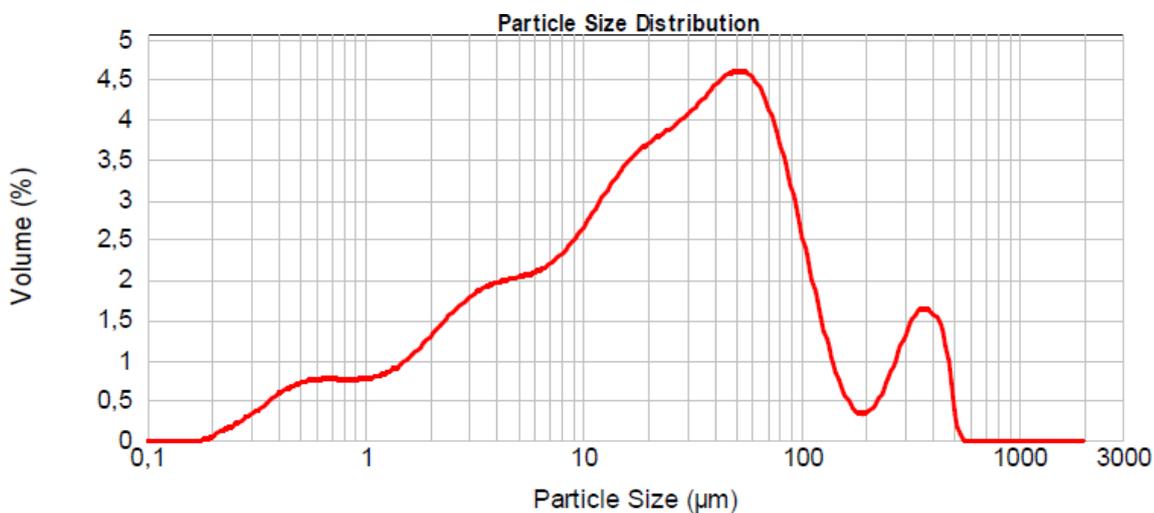


Figure II.4. Courbe granulométrique du laitier granulé (L) [100].

La préparation des fillers de ce laitier granulé a été faite par broyage à sec en laboratoire des matériaux au niveau de département de génie civil de l'université Badji Mokhtar-Annaba. Dont la composition chimique est donnée comme suite dans le tableau II.8

Humidité totale H ₂ O	≤ 8%
Indice de basicité (CaO/ SiO ₂)	1.00 ± 0.15
Densité sur humide	0.88 – 0.92
Masse volumique absolue (g/cm ³)	2.93
Masse volumique apparente (g/cm ³)	1,22
Finesse de mouture	10.6 %
Surface spécifique de Blaine (cm ² /g)SSB	5000

Tableau II.8 Propriétés physiques de LHF après broyage

CHAPITRE II : MATERIAUX ET FORMULATION



Figure II.5: Echantillon de laitier LHF



Figure II.6 laitier LHF après broyage

.D/ L'EAU :

L'eau de gâchage utilisé est une eau de robinet, elle est propre et ne contient pas de matière en suspension ni de matières nocive au-delà des tolérances réglementaires suivantes :

- 2 g/l pour les bétons à haute résistance
- 5 g/l pour les bétons à faible résistance

L'eau de gâchage ne doit pas contenir des sels dissous au-delà de :

- 15 g/l pour les bétons à hautes résistances.
- 30 g/l pour les bétons à faibles résistances [101].

Une partie de l'eau ajoutée au béton est mobilisée par les granulats (absorption et adsorption), alors qu'une deuxième partie est consommée par l'hydratation et une troisième partie reste libre dans la matrice du béton. Cette dernière est principalement responsable de la fluidité du béton.

A part son rôle majeur dans le phénomène de l'hydratation, l'eau est l'un des facteurs les plus importants au niveau de l'ouvrabilité du béton

L'augmentation du dosage en eau augmente la fluidité du béton et entraîne la diminution de la concentration en solides ; au niveau rhéologique, le seuil de cisaillement et la viscosité diminuent.

Cependant, l'introduction excessive d'eau provoque la chute de la résistance mécanique du béton à l'état durci, ainsi que l'apparition des phénomènes de ségrégation à l'état frais.

CHAPITRE II : MATERIAUX ET FORMULATION

Tableau II.9. : Impuretés admissibles dans l'eau de gâchage [101].

Qualité de béton	Impuretés	
	en suspension	Dissoluble
Béton qualité	2g/L	15g/L
Autres béton	5g/L	30g/L

II.3.1.2 Granulats (Sable et gravillon)

Tous les bétons ont été fabriqués avec du gravillon concassée calcaires dont le diamètre maximal (Dmax) est de 16 mm Deux (02) fractions granulaires ont été employées : un gravillon (G1) de classe granulaire 3/8 cm ; un gravillon (G2) de classe granulaire 8/16, de la carrière de GREPCO GUELMA de la Wilaya de GUELMA.

Tandis que les granulats fins employés sont composé d'un sable de carrière de GREPCO GUELMA de fraction (0/3) et d'un sable fin siliceux de dune de la région de Tébessa.

Essais de caractérisation :

1. Analyse granulométrique :

L'analyse granulométrique permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs. Pour les sables, on utilisera en général les tamis de modules 0.08 - 0.16 - 0.315 - 0.63 - 1.25 - 2.5 - 5.0. Et pour les graviers, on utilisera en général les tamis de modules 5.0 - 6.3 - 8 - 10 - 12 - 16 - 20. L'essai selon la norme NF P 18-560

2. Module de finesse :

La norme XP P 18-540[102] définit le module de finesse d'un sable, qui caractérise sa granularité, comme le 1001 de la somme des refus, exprimés en pourcentage, sur les différents tamis de la série suivante : 0,16 - 0,315 - 0,63 - 1,25 - 2,5 - 5,0 mm

Les deux sables utilisés dans cette étude sont de deux natures différentes :

- Le premier est un sable moyen roulé, siliceux de dune de la sablière de TEBESSA de module de finesse de **1,56** ce qui correspond à un sable (0/2).
- Le deuxième est un sable concassé, de carrière GREPCO (GUELMA) plus gros que le sable de dune, son module de finesse est de **3,96**

CHAPITRE II : MATERIAUX ET FORMULATION

3. Mesure de la propreté (l'essai de l'équivalent de sable) :

Cet essai a pour but de mesurer la propreté des sables entrant dans la composition des bétons. L'essai consiste à séparer les flocules fins contenues dans le sable. Une procédure normalisée permet de déterminer un coefficient d'équivalent de sable qui quantifie la propreté de celui-ci selon la norme P 18-597[103].



Figure II.7: Dispositif de l'essai de l'équivalent de sable

4- Masse volumique apparente :

La masse volumique apparente est la masse par unité de volume de la matière qui constitue le granulat, y compris les vides et des pores entre des grains. Cet essai est réalisé selon la norme NF EN 1097-3[104]

L'essai consiste à remplir un récipient vide de volume connu de matériau sec sans le tasser et à peser ensuite cette quantité de matériau. On calcule la valeur de la masse volumique par le rapport : $\rho = MV \text{ g/cm}^3$



Figure II.8. Masse volumique apparente

CHAPITRE II : MATERIAUX ET FORMULATION

5. Masse volumique absolue :

La masse volumique absolue est la masse d'un corps par unité de volume sans vides entre les grains. Cet essai est réalisé selon la norme NF EN 1097-3[104]. Il s'agit de mesurer la masse, par unité de volume de matière pleine sans aucun vide entre les grains en versant une quantité connue de la poudre dans un liquide inerte, si la matière est hydraulique, sinon, dans de l'eau.



Figure II.9. Masse volumique absolue

6.Porosité intergranulaire :

La porosité est le rapport de volume des vides par unité de volume apparent (c'est le degré de remplissage par les vides et les pores). Le pourcentage de porosité inter-granulaire se calcule à partir la masse volumique apparente et de la masse volumique absolue.

7.L'essai Los Angeles (NF P 18-573) : Cet essai consiste à mesurer la quantité d'éléments inférieurs à 1,6 mm, produite en soumettant le matériau au choc de boulets normalisés dans la machine Los Angeles. La granularité du matériau soumis à l'essai est choisie parmi les 6 classes granulaires : 4/6,3mm ; 6,3/10mm ; 10/14mm ; 10/25mm ; 16/31,5mm ; 25/50mm. Le coefficient Los Angeles est par définition le rapport :

$$LA = \frac{5000 - M'}{5000} \times 100$$

Avec M' : masse sèche après essai et tamisage au tamis 1,6mm.



Figure II.10 : Dispositif de l'essai Los Angeles

8.L'essai Micro Deval (NF P 18-572) :

Cet essai consiste à mesurer l'usure produite dans un cylindre en rotation dans des conditions bien définies, par frottement entre les granulats et une charge abrasive. La granularité du matériau soumis à l'essai est choisie parmi les trois classes granulaires : 4/6,3mm ; 6,3/10mm ; 10/14mm. Le coefficient Micro Deval est par définition le rapport :
$$\text{MDE} = \frac{500 - m'}{500} \times 100\%$$

- Avec m' : masse sèche après essai et tamisage au tamis 1,6 mm

9.Le coefficient d'aplatissement (NF P 18-561) :

Le coefficient d'aplatissement « A » qui caractérise la forme des granulats à partir de leur plus grande dimension et de leur épaisseur est par définition le pourcentage d'éléments tel que : $G/E > 1,58$.

Avec : G : représente la dimension de la maille carrée minimale à travers de laquelle passe l'élément. E : épaisseur des granulats. Le coefficient d'aplatissement « A » est déterminé par un double tamisage d'abord à travers la série de tamis à mailles carrées utilisée pour l'étude de la granulométrie, puis par un second tamisage des refus retenus sur les différents tamis sur une série de grilles à fente parallèles, le rapport entre les dimensions des tamis et des grilles étant de 1,58.

CHAPITRE II : MATERIAUX ET FORMULATION



Figure II.11 : grille à fente.

Tableau II-10 : Caractéristiques Physico – Mécaniques des granulats

Caractéristiques	Unité	Sable de dune	Sable concassé	Gravillon 3/8	Gravier 8/16
Masse volumique apparente	Kg/m ³	1500	1660	1400	1430
Masse volumique absolue	Kg/m ³	2650	2660	2670	2680
Porosité intergranulaire	%	43,40	37,6	47,57	46,65
d/D	Mm	0/2	0/3	3/8	8/16
Module de finesse		1.56	3.96	-	-
Equivalent de sable visuel	%	80.89	68.56	-	-
Equivalent de sable piston	%	76.78	65.37	-	-
Equivalent de sable de mélange visuel	%	76.15			
Equivalent de sable de mélange piston	%	71.82			
Teneur en fine				1.07	0.59
Essai Los-Angeles	%	-	-	-	20.65
Essai Micro Deval	%	-	-	-	16.94
Coefficient d'Aplatissement	%	-	-	22.89	12.38

CHAPITRE II : MATERIAUX ET FORMULATION

Tableau II-11 : Analyse granulométrique du sable de dune de Tébessa

Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé(%)	Tamisât(%)
5	4,35	4,35	0,43	99,57
3,15	5,6	9,95	0,99	99,01
2,5	3,9	13,85	1,38	98,62
2	3,95	17,8	1,78	98,22
1,25	20,3	38,1	3,81	96,19
0,63	82	120,1	12,02	87,98
0,315	346,45	466,55	46,70	53,30
0,2	409,85	876,4	87,73	12,27
0,16	53	929,4	93,04	6,96
0,125	52,55	981,95	98,30	1,70
0,05	14,8	996,75	99,78	0,22
fond	2,15	998,9	100	0

Tableau II-12 : Analyse granulométrique du sable de carrière corrigé GREPCO GUELMA

Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé(%)	Tamisât(%)
5	21,4	21,4	1,85	98,15
4	36	57,4	4,95	95,05
3,15	126,7	184,1	15,88	84,12
2,5	158,3	342,4	29,53	70,47
2	127,6	470	40,53	59,46
1,6	177,6	647,6	55,86	44,14
1,25		805,9	69,51	30,49
1	271,4	919	79,27	20,73
0,63	190,5	1109,5	95,7	4,30
0,5	43,7	1153,2	99,47	0,53
0,315	0,4	1153,6	99,50	0,50
0,25		1155,3	99,65	0,35
0,20	3,3	1156,9	99,78	0,22
0,16	1,8	1158,7	99,94	0,06
0,125	0,2	1158,9	99,96	0,04
0,08	0,4	1159,3	99,99	0,01
0,05	0,1	1159,4	100	0

CHAPITRE II : MATERIAUX ET FORMULATION

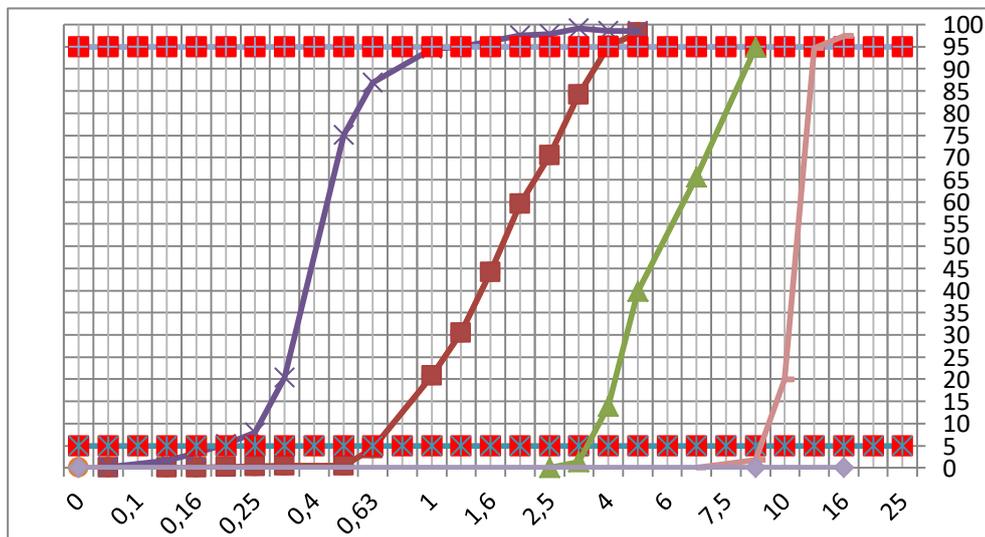
Tableau II- 13 : Analyse granulométrique du gravier 3/8 corrigé

Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé(%)	Tamisât(%)
8	83,3	83,3	5,13	94,87
6,3	475,1	558,4	34,43	65,57
5	417,2	975,6	60,16	39,84
4	421,6	1397,2	86,15	13,85
3,15	203,4	1600,6	98,69	1,31
Fond	21,1	1621,7	100	0

Tableau II- 14 : Analyse granulométrique du gravier 8/15 corrigé

Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé(%)	Tamisât(%)
16	87,6	87,6	2,60	97,40
12,5	1199,6	1287,2	38,30	61,70
10	1405,0	2692,2	80,10	19,90
8	611,1	3303,3	98,28	1,72
6,3	56,7	3360	99,97	0,03
Fond	1	3361	100	0

Figure II.12: Courbes granulométriques (sable 0/2, sable de carrière 0/3, gravier 3/8, gravier 8/16).



CHAPITRE II : MATERIAUX ET FORMULATION

II.3.1.3 Adjuvants

L'adjuvant employé est un super plastifiant Superior 126 à base de poly-carboxylates de nouvelle génération, qui permet de réaliser des bétons très fluides avec des rapport E/C très faibles, conforme à la norme NF EN 934-2, sa densité est de $1,13 \pm 0,03$, son pH = $5,5 \pm 1$, la teneur en ions chlore $\leq 0,1 \%$ et la teneur en Na₂O $\leq 2,5 \%$.

La plage d'utilisation recommandée : 0,6 à 2,0% du poids de ciment.

Tableau II- 15 Caractéristiques du super plastifiant TEKNACHEM SUPERIOR 126

Caractéristiques	Valeur
Forme	Liquide
Couleur	Brun
PH	$5,5 \pm 1$
Densité	$1,13 \pm 0,03$
Teneur en chlore	$\leq 0,1 \text{ g/l}$
Extrait sec	$(38 \pm 2)\%$
Dosage recommandé	0,6% à 2%
Dosage usuel	0,6% à 1,0%

II.3.2. Formulation des BHP d'études

L'objectif de toutes les méthodes de formulation des bétons est de déterminer la combinaison de matériaux à utiliser pour produire le béton qui aura les propriétés désirées et qui sera le plus économique possible, [P.C. Aitcin 2001].

Pour formuler des bétons ordinaires, la méthode la plus utilisée dans l'industrie est celle dite de **Dreux Gorisse**. Elle propose différents abaques pour estimer les dosages en eau et en ciment permettant d'obtenir la résistance et l'affaissement souhaité. Elle se distingue également par une méthode originale pour proportionner les granulats, qui consiste à caler la courbe granulométrique du mélange sable / gravillons sur une courbe de référence. [P. Turery.2004].

En règle générale, une méthode de formulation permet aussi de calculer un mélange de départ que l'on pourra plus ou moins modifier pour obtenir les propriétés désirées à partir de quelques gâchées d'essai. Bien que les méthodes de formulation des BHP relèvent encore plus d'un art que d'une science, il est certain qu'elles reposent aussi sur des principes scientifiques qui sont à la base de toutes les formulations de béton [P.C. Aitcin,2001].

CHAPITRE II : MATERIAUX ET FORMULATION

II.3.2.1. Formulation de référence :

La formulation joue un rôle important par ses paramètres qui permettent d'apporter un nouveau regard sur béton, elle consiste à choisir des proportions de chacun des constituants d'un béton afin d'obtenir les propriétés mécaniques et de mise en œuvre, elle doit intégrer avant tout les exigences de la norme NF EN 206-1, laquelle, en fonction de l'environnement dans lequel sera mis en place le béton, sera plus ou moins difficile vis-à-vis de la quantité minimale de ciment à insérer dans la formule ainsi que la quantité d'eau maximum tolérée. De même, à chaque environnement donné, une résistance garantie à 28 jours sur éprouvettes sera exigée aux producteurs, pouvant justifier des dosages de ciments plus ou moins supérieurs à la recommandation de la norme, et basée sur l'expérience propre à chaque entreprise, laquelle étant dépendante de ses matières premières dont la masse volumique peut varier, notamment celle des granulats [105].



Figure II.13 : préparation des constituants

II.3.2.1.1 Détermination des proportions des fractions de sable et gravillon selon la méthode de Dreux Gorisse

- LES DONNEES :
- f_{c28} : Résistance en compression à 28 jours,
- La plasticité désirée mesurée par l'affaissement au cône d'Abraham (AC) pour avoir un béton peu plastique.
- D : Dimension maximale des granulats en mm
- Résistance nominale caractéristique f_c .

CHAPITRE II : MATERIAUX ET FORMULATION

Composition : d'un BHP avec 10% de FS (fumés de silice),

La résistance moyenne :

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

$$f_{c28} = 1.5 \times 30 = 34,5 \text{ MPA}$$

1- Dosage en ciment et en eau :

$$\sigma_{28} = G \cdot F_c \cdot (C/E - 0, 5)$$

$$\frac{C}{E} = \frac{f_{c28}}{G \cdot F_c} + 0.5$$

$$\frac{C}{E} = \frac{34,5}{0.45 \times 55} + 0.5$$

$$\frac{C}{E} = 1,89$$

D'après l'abaque (C/E = 2 et Aff. = 6 cm) on a C= 400 kg.

- La résistance nominale $f_{c28} = 30 \text{ MPA}$;
- Le dosage en ciment : 400 kg/m³ ;
- La résistance moyenne à 28 j $f_c = 34,5 \text{ MPA}$;
- Le dosage en en eau : $E = 200 \text{ Kg} / \text{m}^3$, E corriger = 4 % E + E = 208 LITRE
- Rapport C / E = 2 ;
- Tracé de la courbe de référence OAB : Xa= (8 mm) Ya= 47.56

O (Xo, Yo) —————> O (0,0)

A (Xa, Ya) —————> $Xa = \frac{D_{max}}{2} = \frac{16}{2} = 8 \text{ mm.}$ (Si Dmax < 20).

B (Xb, Yb) —————> $Ya = 50 - \sqrt{D + K + K_s + K_p}$

$K = 0$, $K_s = 6Mf - 15$, $K_p = 0$ (béton non pompable).

$K = 0$, $K_s = (6 \times 2,76) - 15 = 1,56$, $K_p = 0$.

$Ya = 50 - \sqrt{D + K + K_s + K_p} = 50 - \sqrt{16 + 1,56 + 0 + 0}$

$Ya = 47,56$

- ▶ 14% de Gravier (3/8), 48% de Gravier (8/16), et 16 % Sable carrière, 22 % sable dune

CHAPITRE II : MATERIAUX ET FORMULATION

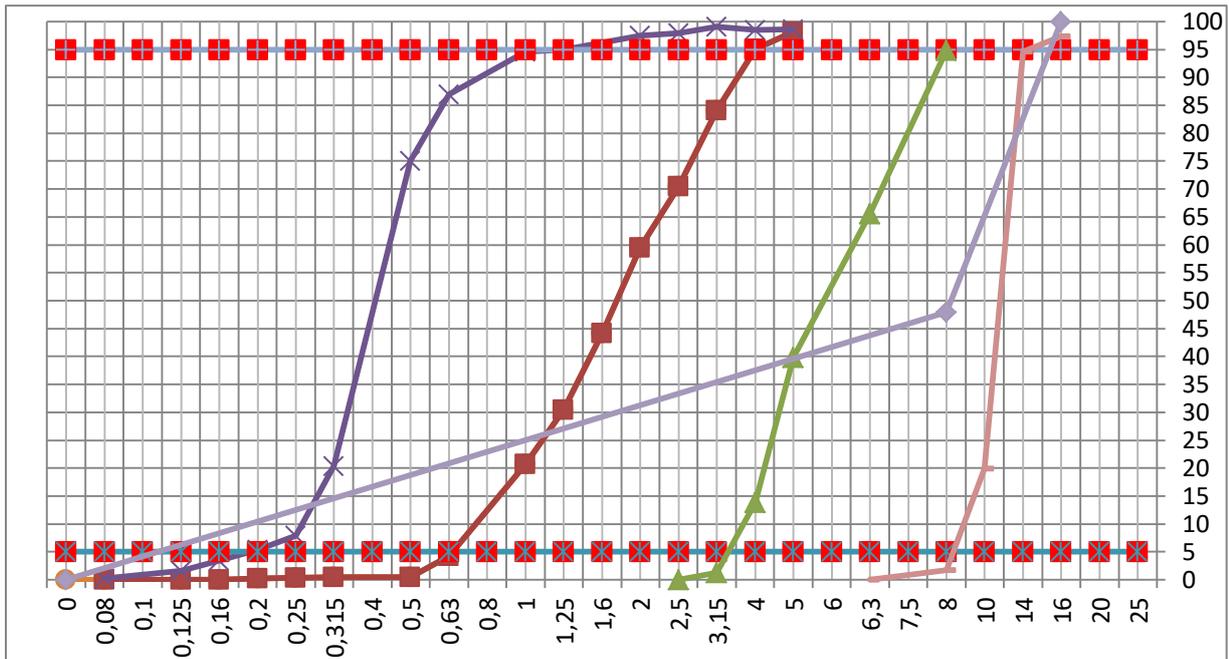


Figure II.14 : Courbe granulométrique de BHP (48 % gravier 8/16, 14 % gravier 3/8, 16% sable carrière, 22 % sable dune, courbe de référence OAB)

II.3.2.1.2 Calcul de la composition des BHP d'étude selon la méthode de l'université de Sherbrooke.

➤ **Calcul du rapport Eau/ Liant**

Pour une résistance de On a choisi le **rapport E/L = 0,28**

Le point de saturation de l'adjuvant 1,2 % (selon la fiche technique)

➤ **Dosage en eau et liant**

$$E/L = 0,28, \quad E = \frac{145+155}{2} = 150 \text{ LITRE} \quad \text{Eau} = 150 \text{ L}$$

$$L = \frac{E}{E/L} = 150/0,28 = 535,71 \text{ KG} \quad \text{Liant} = 535,71 \text{ KG}$$

➤ **Dosage de ciment et fumée de silice**

$$FS = 535,71 * 0,1 = 53,57 \text{ KG} \quad \text{fumée de silice} = 53,57 \text{ KG}$$

$$C = 535,71 * 0,9 = 482,14 \text{ KG} \quad \text{ciment} = 482,14 \text{ KG}$$

$$\text{Volume fumée de silice } V_{fs} = 53,57 / 0,5 = 107,14 \text{ litre}$$

$$\text{Volume de ciment } V_c = 482,14 / 3,18 = 151,61 \text{ litre}$$

➤ **► Dosage de superplastifiant**

$$SP = 535,71 * 1,2 \% = 6,428 \text{ KG}$$

CHAPITRE II : MATERIAUX ET FORMULATION

$$V_{sp} = 6,428 / 1,13 = \mathbf{5,68 \text{ litre}}$$

➤ ► Dosage en gros granulats

$$V_{gg} = 1050 / 2,68 = 391,79 \text{ litre}$$

$$\% 3/8 + \% 8/16 = 14 + 48 = 62 \%$$

$$62 \% \longrightarrow 100 \%$$

$$14 \% \longrightarrow \%$$

$$48 \% \longrightarrow \%$$

On trouve $\% 3/8 = 22,6 \%$ et $\% 8/16 = 77,4 \%$

$$\mathbf{VG1 (3/8) = 22,6 \% * 391,79 = 88,54 \text{ litre}}$$

$$\mathbf{VG2 (8/16) = 77,4 \% * 391,79 = 303,24 \text{ litre}}$$

$$\mathbf{G1 (3/8) = 88,54 * 2,67 = 236,40 \text{ kg}}$$

$$\mathbf{G2 (8/16) = 303,24 * 2,68 = 812,69 \text{ kg}}$$

➤ ► Dosage des sables

$$V_s + V_{gg} + V_c + V_e + V_{sp} + V_{fs} = 1000 \text{ litre}$$

$$V_s = 1000 - (V_{gg} + V_c + V_e + V_{sp} + V_{FS})$$

$$V_s = 193,78 \text{ litre}$$

$$\% SC + \% SD = 16 + 22 = 38 \%$$

$$38 \% \longrightarrow 100 \%$$

$$22 \% \longrightarrow \% S1$$

$$16 \% \longrightarrow \% S2$$

On trouve $\% SD = 57,9 \%$ et $\% SC = 42,10 \%$

$$\mathbf{VS1 (dune) = 57,9 \% * 193,78 = 112,19 \text{ litre}}$$

$$\mathbf{VS2 (carrière) = 42,1 \% * 193,78 = 81,58 \text{ litre}}$$

$$\mathbf{S1 = 112,19 * 2,65 = 297,30 \text{ kg,}}$$

$$\mathbf{S2 = 81,58 * 2,66 = 217 \text{ kg}}$$

CHAPITRE II : MATERIAUX ET FORMULATION

Tableau II.16 : Composition du BHP Témoin (E/L=0.28)

Constituants	Volume des constituants (l/m ³)	Dosage en (Kg/m ³)
Ciment CM I/A 42,5	151,61	482,14
Eau de gâchage	150	150
Sable de carrière S2	81,58	217,00
Sable de dune S1	112,19	297,30
Gravier 3/8	88,54	236,40
Gravier 8/16	303,24	812,69
Fumée de silice %	10	-
Fumée de silice	107,14	53,57
Super plastifiant	5,68	6,428
Super plastifiant(%)	1,2	-
E/L	0,28	
Masse volumique béton frais	2,54 (g/cm ³)	

II.3.3 Fabrication et conservation :

Le malaxage des bétons a été réalisé à l'aide d'une bétonnière d'une capacité de 30 litres qui assure le mélange des constituants par simple rotation de la cuve, suivant un axe qui peut être horizontal ou légèrement penché. Le meilleur brassage des éléments est obtenu lorsque l'inclinaison de la cuve sur l'horizontale ne dépasse pas 15 à 20° environ.

Les pales collées à la paroi intérieure du tambour sont d'une grande importance, et leurs dispositions permettent le bouleversement des constituants dans la cuve, ainsi une bonne homogénéisation du mélange.

La séquence de malaxage des différents constituants est décrite comme suit :

- Chaque constituant est introduit dans la bétonnière dans l'ordre suivant : gros gravier, gravillon, sable concassé, sable roulé et ciment et fumée de silice.
- Puis malaxage à sec pendant 60 secondes.

CHAPITRE II : MATERIAUX ET FORMULATION

- Introduction de 75 % d'eau et malaxage pendant 2 minutes.
- L'adjuvant est noyé dans les 25 % d'eau restante, ensuite introduit dans la bétonnière.
- Puis malaxage pendant 2 minutes. Alors la durée totale du malaxage est de 5 minutes

La mise en place a été effectuée dans les moules destinés aux échantillons Correspondants aux essais programmés. Les bétons ont été mis en place par vibration à l'aide des dispositifs vibratoires traditionnels (principalement table vibrante).

D'abord, on détermine les essais d'ouvrabilité, ensuite on remplit le béton afin d'effectuer la mise en place dans les différents moules. Les moules sont remplis de béton et placés à la table vibrante.

Les éprouvettes sont démoulées 24 heures après le remplissage et conservées sous l'eau jusqu'au jour de l'écrasement.

II.3.3.1. Essais au cône d'Abrams :

L'essai d'affaissement est le plus couramment employé pour caractériser le béton sur chantier. Il permet de mesurer la consistance d'un béton qui est une grandeur qui sert à caractériser l'aptitude à sa mise en œuvre. L'essai a été effectué conformément aux Prescriptions de la norme à l'aide du cône d'Abrams.

La plaque d'appui est légèrement humidifiée et le moule légèrement huilé y est fixé.

Le béton est introduit dans le moule en 3 couches d'égales hauteurs qui seront mises en place au moyen de la tige de piquage actionnée 25 fois par couche.

Après avoir arasé en roulant la tige de piquage sur le bord supérieur du moule, le démoulage s'opère en soulevant le moule avec précaution.

Le béton n'étant plus maintenu s'affaisse plus ou moins suivant sa consistance. Celle-ci est caractérisée par cet affaissement, noté Aff. [106].

Mesure grâce au portique et arrondi au centimètre le plus proche. La mesure doit être effectuée sur le point le plus haut du béton et dans la minute qui suit le démoulage.

Tableau II.17. Classification et mesure de l'affaissement BHP témoin

Affaissement au cône d'Abrams	120 mm	Classe S3	Très plastique
-------------------------------	--------	-----------	----------------

CHAPITRE II : MATERIAUX ET FORMULATION

II.3.3.2. CHOIX DES EPROUVETTES :

Dans notre travail, la forme cubique des éprouvettes est la plus adoptée pour les essais de compression. Les dimensions de ses derniers sont (10×10×10 cm), les moules sont en acier doux (non déformable lors de l'usage), lubrifiés à l'aide d'une huile synthétique (commun pour les véhicules et les engins) au quel assure un surfacage parfait sans collage aux parois des moules au moment de décoffrage. Pour chaque essai on utilise trois éprouvettes.



Figure II.15 : présentation des éprouvettes et leur conservation.

II.3.3.3. Masse volumique a l'Etat frais :

Cet essai permet d'ajuster la formulation étudiée pour le même type de granulat en comparant le volume expérimental au volume théorique et de voir l'effet de la nature des granulats sur la variation la masse volumique et effet de variation de %SP. Pour effectuer cette mesure conformément à la réglementation en vigueur [NF EN 12350-6 2012], un récipient de volume connu est rempli entièrement de béton puis pesé. Le rapport entre la masse et le volume du béton donne la masse volumique du matériau à l'état frais comme il est indiqué dans la formule ci-dessous :

$$\rho = \frac{M2 - M1}{V}$$

Où :

m1 : masse du récipient vide en kg,

m2 : masse du récipient rempli de béton en kg,

V : volume du récipient en m³.

La valeur de la masse volumique adoptée est la moyenne de trois valeurs.

Les résultats de la variation de la masse volumique de BHP à l'état frais en fonction de la nature des granulats et d'additions sont présentés au **tableau II.17**

CHAPITRE II : MATERIAUX ET FORMULATION

Conclusion du chapitre

On ne peut pas fabriquer des BHP en utilisant seulement du ciment portland. Cependant, l'addition d'un ou plusieurs ajouts cimentaires lorsqu'ils sont disponibles à 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 cimentaires qui présentent des propriétés pouzzolane semblable à celle des fumées de silice tel que les fillers de laitier de haut fourneau. Leurs dimensions, 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.

Qui est notre objectif principal pour notre étude BHP à base de liant ternaire

Les granulats utilisés pour béton à hautes performances doivent d'être bien sélectionnés sur le plan de granulométrie, morphologie, propreté, résistance mécanique et module d'élasticité.

Ce deuxième chapitre étude nous a permis de bien identifier par une caractérisation physico-chimique les différents constituants utilisés, de choisir les méthodes de formulation appropriées et de voir l'influence de la nature minéralogique des granulats et des additions minérales sur les propriétés du béton à l'état frais. A l'issue de cette première étude les constatations suivantes peuvent être dégagées :

- D'après les résultats de la caractérisation des constituants entrant dans la formulation des BHP d'étude, on peut conclure que les matériaux utilisés presque répondent aux exigences des normes en vigueur.
- La méthode de formulation choisie est une combinaison entre les méthodes de Dreux et la méthode de l'université de Sherbrooke.
- Pour formuler un BHP il faut bien choisir les matériaux constitutifs mais ce choix peut conduire à des difficultés d'ordres rhéologique et mécanique.
- La maniabilité des BHP est très affectée par la nature des additions minérales

CHAPITRE III : caractérisation des BHP d'études à l'état frais et durci

III.1 Introduction :

Dans ce dernier chapitre, nous présenterons dans la première partie les résultats l'optimisation et l'ajustement de la formulation du BHP témoin en jouant sur deux paramètres à savoir le rapport Eau/ Liant et dosage en superplastifiant.

La deuxième partie concerne la présentation et l'analyse des résultats de caractérisation à l'état frais et durci des trois BHP de notre étude (BHP témoin et BHP avec 10 et 20% de laitier granulé en substitution partielle au ciment.

III.2 Optimisation et ajustement de la formulation du BHP témoin :

Afin d'ajusté et d'optimiser la formulation du béton de référence, une série d'essais de convenance sur cinq mélanges de BHP a été réalisée en jouant sur deux paramètres à savoir le dosage en superplastifiant et le rapport Eau / Liant. La composition des différents mélanges préparés sont représentée au tableau III.1.

Tableau III.1 : composition des mélanges préliminaire pour optimisation du BHP témoins.

Constituant		Dosage des constituants par type de béton (Kg/m ³)					
		BHP1	BHP2	BHP 3	BHP 4	BHP 5	BHP6
Ciment CMI/42,5		499,99	533	465,51	514,26	482,14	516,66
Eau de gâchage		150	160	150	160	150	155
Sable de dune S1		343,28	301	330,08	255,72	297,30	259,78
Sable carrière S2		339,86	323	207,86	185,87	217,00	188,94
Gravier 3/8		144,76	211	242,78	235,52	236,40	236,18
Gravier 8/16		905,16	843	806,29	809,65	812,69	812,90
Fumes de silice	En %	10 %					
	Kg	55,55	59	51,72	57,14	53,57	57,40
SP(%)		1,2	1,5	1,2	1,4	1,2	1,3
Super plastifiant		6,66	8,3	6,20	7,99	6,428	7,46
Rapport E/L		0,27	0,27	0,29	0,28	0,28	0,27
Affaissement au cône d'Abrams) cm		10	2,0	5	17	12	9,5

CHAPITRE III : caractérisation des BHP d'études à l'état frais et durci

III.2.1. Maniabilité et masse volumique des mélanges d'optimisation

Pour chaque gâchée on procède après le malaxage, à la mesure de la maniabilité caractérisée par l'affaissement au cône d'Abram et de la masse volumique du béton frais. L'affaissement au cône d'Abram visé est fixé dans l'intervalle de 10 et 20 cm. La moyenne des résultats d'ajustement de la maniabilité et l'effet du dosage en SP et du rapport Eau/Liant sont représentés au tableau III.2 et illustré par les figures III.1 et III.2

Tableau III.2 : Affaissement au cône et masse volumique à l'Etat frais mélanges d'optimisation du BHP témoin à base de la fumée de silice

Nomination	BHP1	BHP2	BHP 3	BHP 4	BHP 5	BHP6
Affaissement au cône d'Abrams) cm	10	2,0	5	17	12	9,5
Masse volumique béton frais (kg/m3)	2500	2524	2531	2536	2542	2530

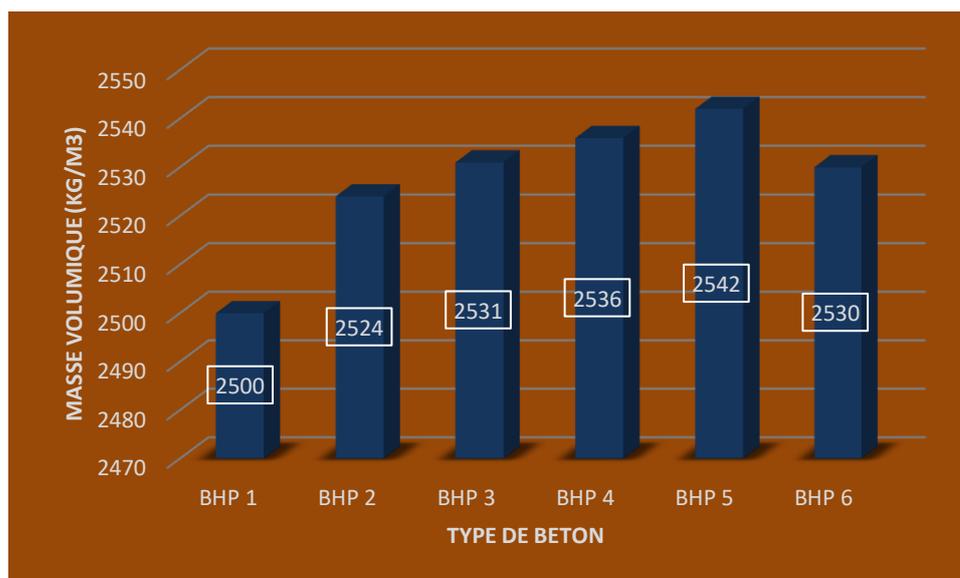


Figure III.1 : masse volumique a l'état frais des différents mélanges d'optimisation.

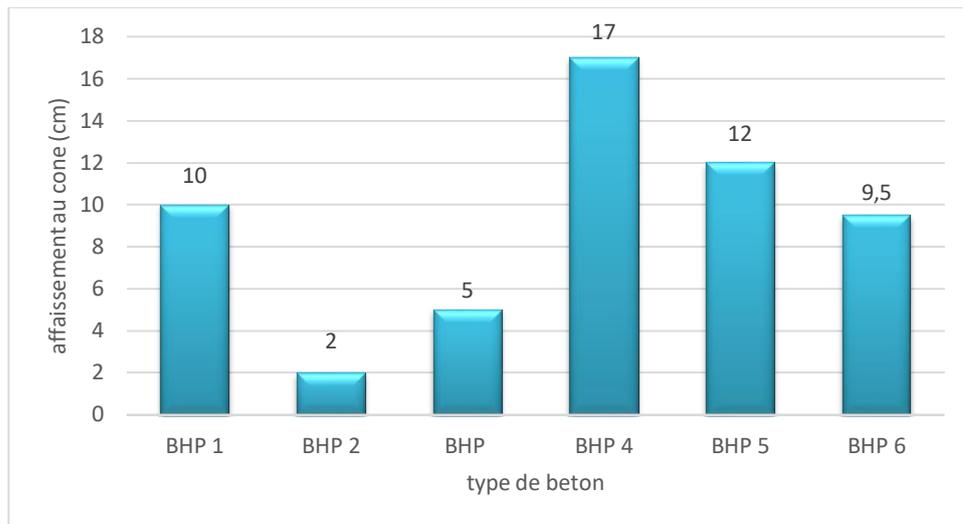


Figure III.2.maniabilite des différents BHP à base de FS

Selon les figures III.1 et III.2 les constatations suivantes peuvent d'être tirées :

- Le mélange BHP4 présente la meilleure maniabilité avec un affaissement de 17cm mais avec une masse volumique de 2536 g/cm³.
- Le mélange BHP5 présente maniabilité très acceptable avec un affaissement de 12cm avec une meilleure masse volumique qui de l'ordre de 2542 g/cm³.
- Ces deux mélanges ont donné satisfaction de point de vue maniabilité, mais nécessite un ajustement de la résistance en compression.

III.2.2. Evolution de la résistance à la compression des différentes formulations d'optimisation du BHP témoin :

La résistance mécanique en compression est le repère principal pour caractérisation de la résistance mécanique et de la qualité des bétons hautes performances. Le test de compression a été réalisé à l'aide d'une presse hydraulique de capacité maximale de 2000 KN asservie en force avec une vitesse de chargement de $2,4 \pm 0,2$ KN/ sec (voir la figure III.3) .la charge de rupture correspond à la charge maximale enregistrée au cours de l'essai. La résistance à la compression à 'j'jours f_{cj} est le rapport entre la charge de rupture et la section transversale de l'éprouvette.

$f_{cj} = P/S$ (MPA) Où : P : charge de rupture en N S : section transversale de l'éprouvette en mm².

CHAPITRE III : caractérisation des BHP d'études à l'état frais et durci

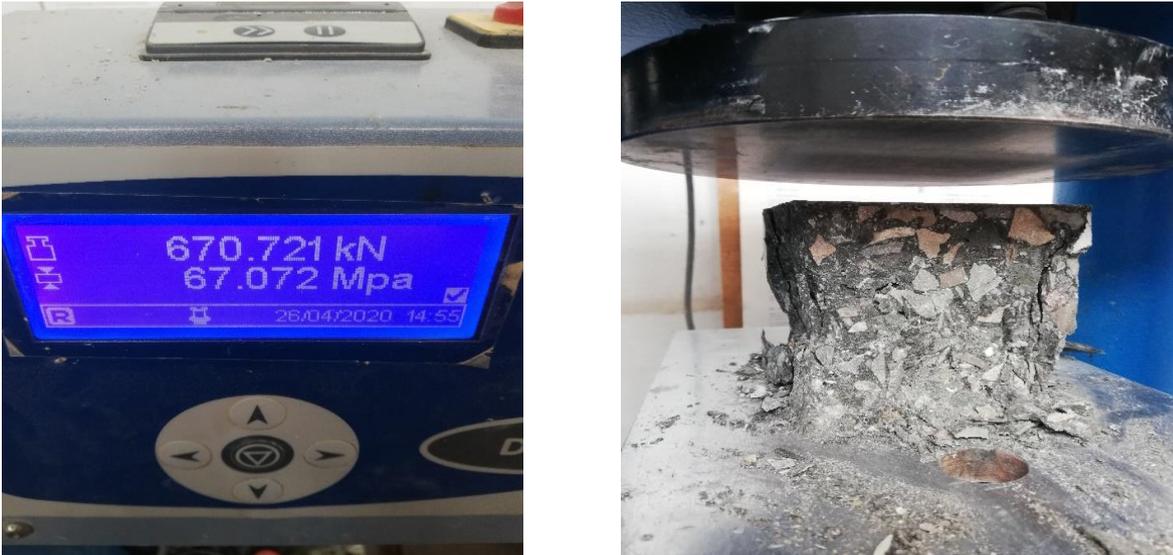


Figure III.3 : Essai de compression sur éprouvettes cubiques 10x10x10 (cm) de béton témoin (Béton de référence) a 28j. (LMGE université ANNABA).

L'essai de compression est réalisé sur des éprouvettes cubiques de 10x10x10 cm³. La valeur de la résistance de chaque formulation est obtenue à partir de la moyenne de la résistance de six échantillons. Les résultats de l'évolution des résistances sont donnés au tableau III.3 et illustré par la figure III.4

Tableau III.3 : résistance des écrasements des autres bétons témoins (BHP) à base de FS

ESSAI	Compression (MPA)					
AGE	BHP1	BHP2	BHP3	BHP4	BHP5	BHP6
3 JOURS	1,30	35,85	33,63	33,6	40,42	30,87
7 JOURS	30,81	58,08	51,5	50,63	55,99	45,36
14 JOURS	-	56,65	54,96	54,42	64,99	52,56
28 jours	-	61,15	54,08	63,6	67,07	60,85

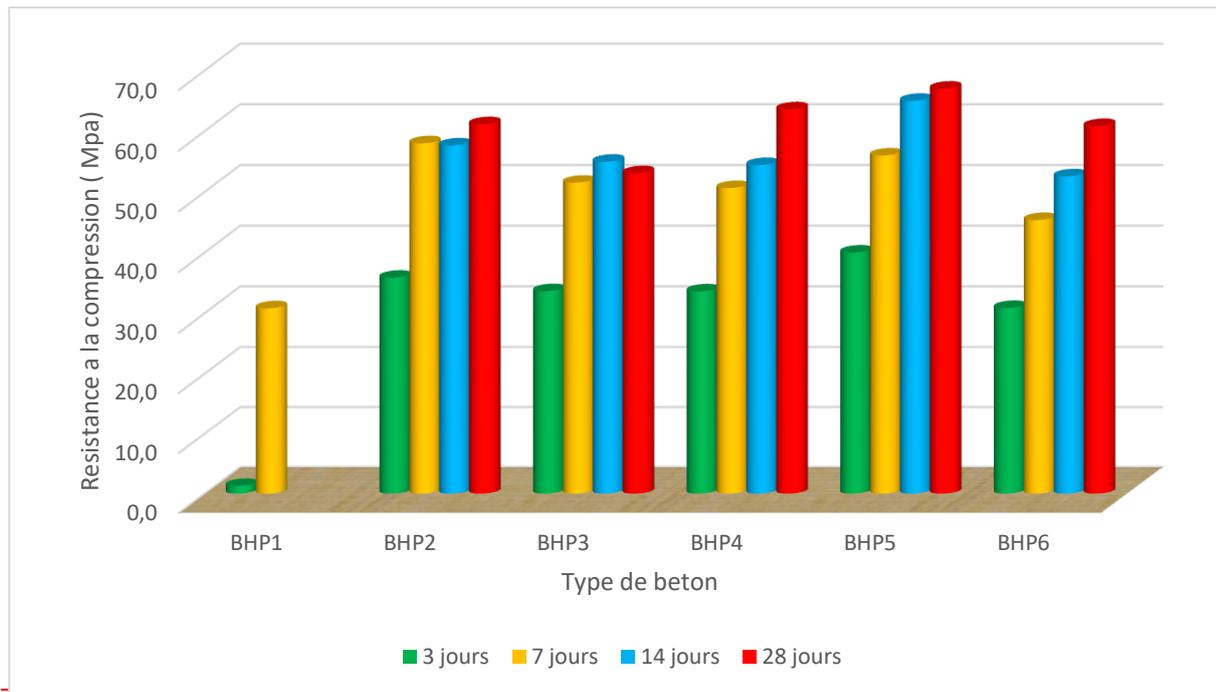


Figure III.4 : Evolution de la résistance à la compression des différentes formulations d'optimisation du BHP témoin

Selon les résultats de la résistance de compression illustrés par le tableau III.3 et figure III. 4 et ceux de la maniabilité présentée au paragraphe III.2.1 on peut conclure que le BHP5 répond conjointement aux exigences de la maniabilité et de la résistance mécanique et par conséquent il est choisi comme béton de référence ou BHP témoin.

III. 3. Caractérisation des BHP d'étude à base de liants ternaire à l'état frais (Effet du taux de substitution du ciment par le laitier granulé) :

III.3. 1. Maniabilité :

La maniabilité (ouvrabilité) peut se définir comme la facilité de mise en place du béton sans anomalie. L'ouvrabilité n'est pas une grandeur physique mesurable, elle est la résultante de plusieurs facteurs. Il existe de nombreux essais et tests. Le test appliqué ici est celui de l'affaissement au cône d'Abrams (NF EN 12350-2)

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

III.3.1.1. Essai d'affaissement au cône d'Abrams

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

CHAPITRE III : caractérisation des BHP d'études à l'état frais et durci

consistance d'un béton frais en mesurant l'affaissement qui n'est autre que la différence entre la hauteur du moule tronconique utilisé et le point le plus haut du corps d'épreuve affaissé.

Le cône utilisé est de dimensions (diamètre de la base de 200 mm, diamètre de la partie supérieure de 100 mm et de hauteur de 300 mm). Le cône doit être posé sur un plateau métallique horizontal légèrement humidifié au préalable. Le remplissage du cône se fait en trois couches de même hauteur, chaque couche étant piquée par 25 coups à l'aide d'une tige de piquage normalisée. Une fois rempli, le moule doit être retiré verticalement de façon régulière et effectuée en 5s à 10s. La hauteur de l'affaissement h est mesurée après stabilisation par l'intermédiaire d'une règle.

Les valeurs de mesure de l'affaissement au cône d'Abrams sont données au tableau III.4 et représenté par la figure III.5.

Tableau III.4. Valeurs de l'affaissement au cône d'Abrams des BHP d'étude.

Dénomination BHP	BHP témoin (FS)	BHPL(FS+LHF)	BHPL(FS+LHF)	BHPL(FS+LHF)	BHPL(FS+LHF)	BHPL(FS+LHF +PZ)
% addition	10	10+10	10+20	10+30	10+40	10+25+25
AFF (mm)	120	190	170	-	-	-

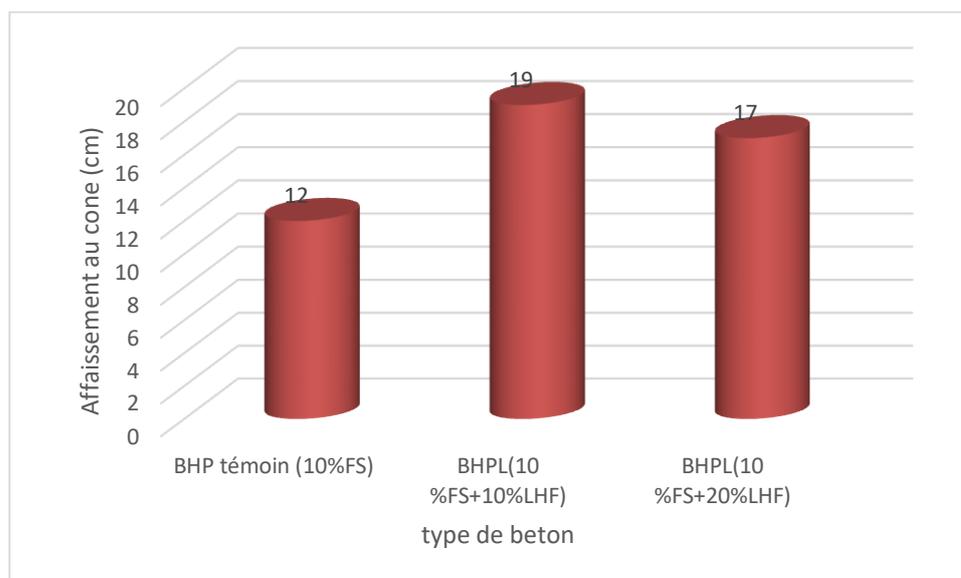


Figure III.5. Maniabilité des différents BHP

III.3.1.2. interprétation des résultats:

Selon les résultats obtenus on peut constater que l'ensemble des mélanges des BHP présentent des bétons très plastiques ou fluides avec des valeurs d'affaissements aux alentours de 120 mm à 200 mm

Les BHP témoin à base de la fumée de silice sont légèrement moins maniable par rapport à ceux à base de laitier broyé. Cela est dû principalement à la morphologie sphérique des particules de la fumée de silice qui offre au BHP une certaine viscosité et un écoulement inférieure à celui des BHP à base de LHF broyée. L'amélioration des mélanges avec laitier granulé en substitution partielle au ciment est due à la nature des particules de laitier qui ont surface très lisse et qui sont moins absorbent par rapport celles du ciment dans la phase initiale d'hydratation.

Pour ce qui concerne les bétons étude le dosage en SP est fixé à 1,2 %(point de saturation) avec un rapport Eau/Liant de l'ordre de 0,28.

La quantité de super plastifiant est ajustée afin de maintenir l'affaissement au cône d'Abrams entre 10 et 21 cm.

En effet, la maniabilité d'un BHP est contrôlée par plusieurs facteurs :

- La quantité initiale d'eau.
- La réactivité du ciment.
- La quantité de Super plastifiant et son degré de compatibilité avec ce ciment particulier.

L'incorporation du laitier granulé en substitution partielle du ciment dans les mélanges des BHP affecte positivement la maniabilité du béton. En effet, la nature morphologique en particulier son état de surface très lisse des fines de laitier granulé améliorent la maniabilité du béton est donne un comportement rhéologique très plastique. Il est important d'insister sur l'influence de la finesse de laitier lorsqu'on cherche à fabriquer des bétons plus plastiques.

on peut observer que tous les formulations de BHP avec ajout de laitier granulé ont donné une meilleure maniabilité par rapport au béton de contrôle avec des valeurs d'affaissement allant de 17 à 19 cm. Ceci est en accord avec d'autres résultats sur le sujet trouvé précédemment où il y avait une fluidité améliorée des bétons à l'état frais de ces types avec incorporation de ciment avec les ajouts cimentaires [*FOLAGBADE, 2013*].

CHAPITRE III : caractérisation des BHP d'études à l'état frais et durci

III.3.2 Masse volumique du béton frais :

III.3.2.1 procédure

Cet essai permet d'ajuster la formulation étudiée pour le même type de granulat en comparant le volume expérimental au volume théorique et de voir l'effet de la nature des granulats sur la variation la masse volumique et effet de variation de %SP. Pour effectuer cette mesure conformément à la réglementation en vigueur [NF EN 12350-6 2012], un récipient de volume connu est rempli entièrement de béton puis pesé. Le rapport entre la masse et le volume du béton donne la masse volumique du matériau à l'état frais comme il est indiqué dans la formule ci-dessous :

$$\rho = \frac{M_2 - M_1}{V}$$

Où : m1 : masse du récipient vide en kg. m2 : masse du récipient rempli de béton en kg,

V : volume du récipient en m³.

La valeur de la masse volumique adoptée est la moyenne de trois valeurs.

La moyenne des résultats de la variation de la masse volumique des différents BHP à l'état frais en fonction de la nature des granulats et d'additions sont présentés au tableau III.5 et

figure III. -6-7

Tableau III.5 : résultats des masses volumique a l'Etat frais des bétons études (BHPL).

Dénomination BHP	BHP témoin (FS)	BHPL FS+LHF	BHPL FS+LHF	BHPL FS+LHF	BHPL FS+LHF	BHPL(FS+ LHF +PZ)
% Addition	10	10+10	10+20	10+30	10+40	10+25+25
Mvapp(kg/m ³)	2542	2545	2564	-	-	-

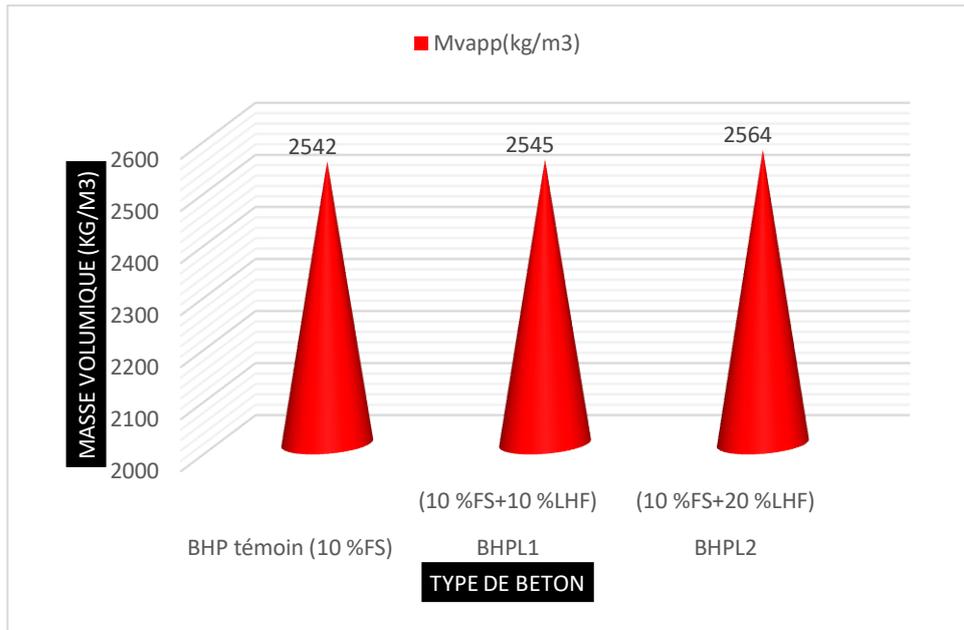


Figure III.6. Masse volumique apparente des différents BHP

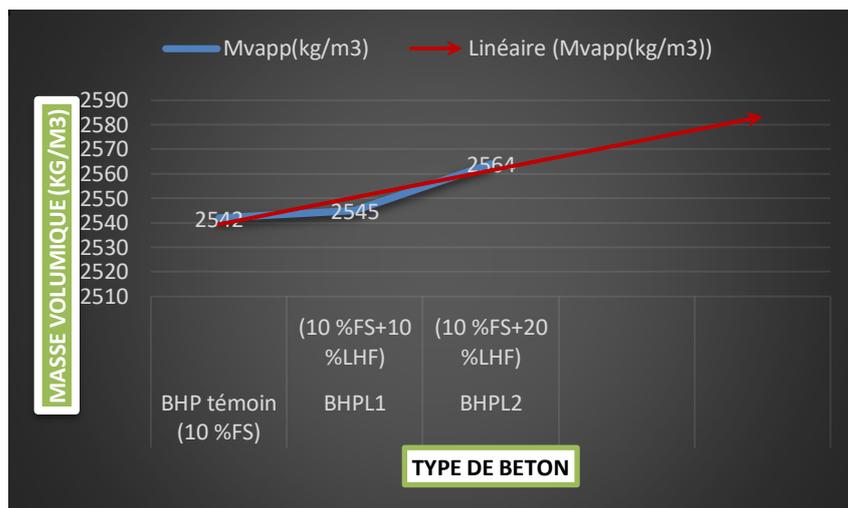


Figure III.7. Effet de % de substitution de LG sur Masse volumique apparente des différents BHP à l'état frais

III.3.2.1 interprétation

On constate selon la figure III.6 et III.7 une augmentation de la masse volumique à l'état frais avec l'augmentation du dosage en laitier granulé. Cela peut s'expliquer par l'amélioration de la compacité des mélanges à cause de la grande finesse des particules de laitier granulé par rapport à celles du ciment. En effet, plus la finesse du laitier et de la fumée de silice est élevée, combinée à interaction avec portlandite pour former des calciums hydrosilicates solubles, favorise l'augmentation de la compacité du béton frais. Cela explique l'augmentation de sa masse volumique apparente par rapport au béton de contrôle à des valeurs d'environ 2565 kg/m³ pour le

CHAPITRE III : caractérisation des BHP d'études à l'état frais et durci

béton incorporé avec un mélange de ciment plus ajouts cimentaire et 2540 kg/m³ pour référence sans ajout.

III. 4. Caractérisation des BHP d'étude à l'état durci

III. 4.1 Effet de la substitution sur la Masse volumique des BHP durcis

Les résultats de la variation de la masse volumique des BHP à l'état durci en fonction de différents paramètres de formulation et le type de l'addition minérale utilisés sont présentés au tableau III.6 et illustrés par les figures III.8

Nomination	% fumée de silice	%laitier	La moyenne Masse volumique (Kg/m ³)
BHP T	10	0	2484,5
BHPL 1		10	2501,1
BHPL 2		20	2517,1

Tableau III.6. Masses volumiques à l'état durci des BHP (90 jours).

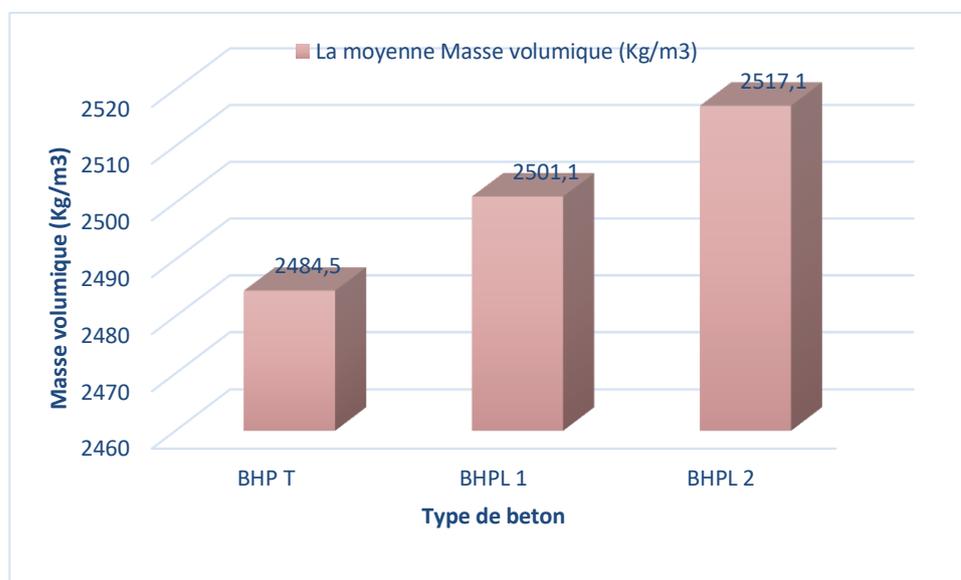


Figure III.8. La masse volumique des différents BHP à l'état durci (90 jours)

D'après la Figure III.8 qui montre l'effet du dosage en laitier granulé en substitution partielle au ciment sur la masse volumique des BHP à l'état durci, on peut constater que la masse volumique des BHPL1 BHPL2 respectivement avec 10 et 20% la laitier granulé est plus élevée que celle du béton témoin (BHPT). Cette densification du béton avec ajout de laitier. Est obtenue grâce à la

CHAPITRE III : caractérisation des BHP d'études à l'état frais et durci

mouture élevée du laitier, conjuguée à son interaction avec la portlandite qui forme des hydrosilicates de calcium non solubles, favorisant l'accroissement de la compacité du béton durcis. Ce qui explique l'augmentation de sa masse volumique par rapport au béton de contrôle. La microstructure du ciment avec ajout de laitier est caractérisée par une matrice dense avec une croissance des C-H-S sur la surface des particules du laitier. Comparé au ciment, les produits d'hydratations du mélange ciment-laitier ont également un faible rapport Ca/Si mais riche en magnésium et en alumine.

D'autres arguments peuvent être apportés :

- La mouture poussée du laitier a favorisé l'accroissement de la compacité des bétons.
- L'incorporation du laitier finement broyé engendre également un effet granulaire relatif aux modifications induites sur la compacité du squelette granulaire.

III.4.2. Evolution de résistance mécanique en compression

III.4.2.1 Procédure

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

Les essais de compression ont été effectués dans le but de mettre en évidence l'effet des additions minérales sur la résistance mécanique en compression. Afin d'étudier l'effet de ces paramètres, deux types d'additions minérales à savoir la fumée de silice et laitier broyé.

Cet essai est réalisé sur des éprouvettes cubiques de 10x10x10 cm³. Les échantillons de chaque formulation sont étudiés en utilisant une presse. Avant l'écrasement, l'éprouvette est retirée de son milieu de conservation, essuyée avec un tissu sec et laissée pendant 2 heures à l'air libre du laboratoire.

Les résultats de résistance en compression à 3, 7, 14, 28, 90 jours de durcissement ainsi que leurs résistances moyennes, sont présentés aux tableaux **III.7** et **figure III.9**

Tableau III.7. Évolution des résistances à la compression

Nomination	Compression (MPa)				
	3j	7j	14j	28j	90j
BHPT	40,42	55,99	64,99	67,07	77,5
BHPL1	25,81	52,35	57,33	64,94	78,5
BHPL2	20,26	41,87	59,5	63,7	76,2

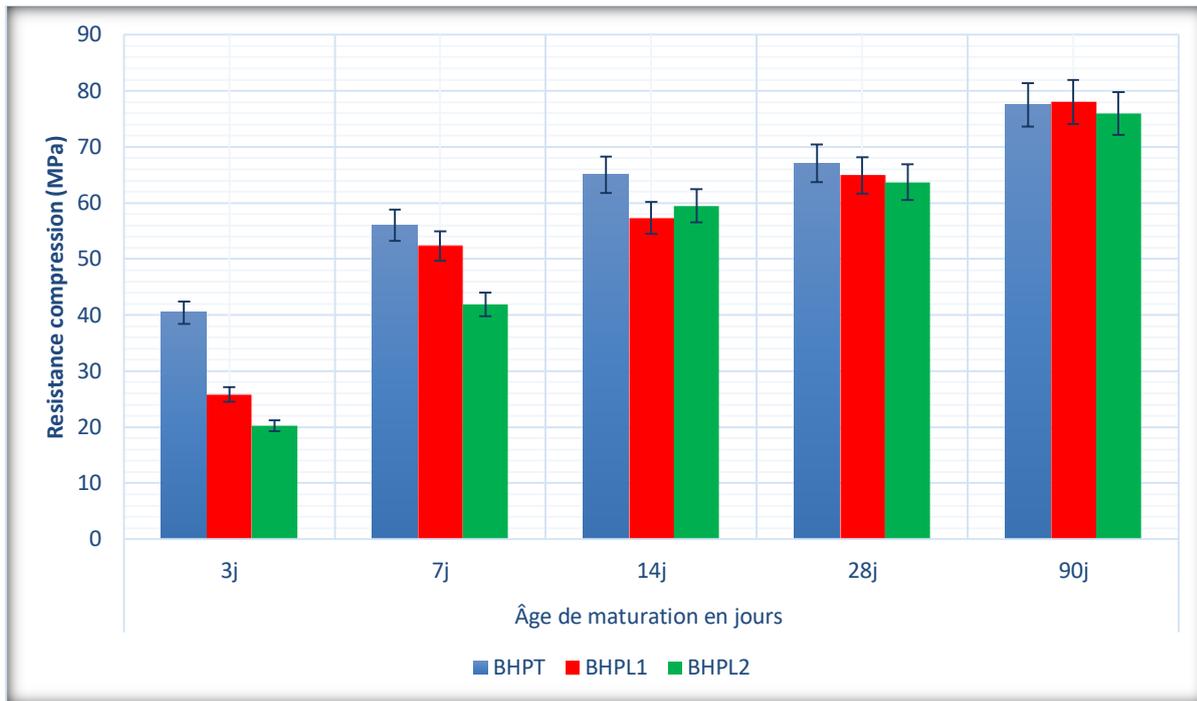


Figure III.9. Résistance mécanique en fonction de la durée de maturation



Figure III.10. Résultat de résistance BHPL a l'échéances de 90jours

III.4.2.2 Interprétation :

Selon les résultats présentés dans le tableau III.7 est illustrés par La figure 9 on peut observer une augmentation de la résistance, en fonction de la durée de maturation. Les trois BHP d'étude présentent des résistances en compression à 28 jours supérieures à 60 MPa et par conséquent ils répondent aux normes des BHP.

Avec l'augmentation de % de laitier granulé on peut tirer les constatations suivantes :

CHAPITRE III : caractérisation des BHP d'études à l'état frais et durci

- Au jeune âge (2 jours) l'augmentation du dosage en laitier dans le ciment conduit à une diminution approximativement directement proportionnelle des résistances mécaniques en compression.
 - A 7 jours pour des dosages de 10 % on constate une augmentation des résistances mécaniques qui se rapproche à celle du BHPT dû probablement à une germination hétérogène.
 - La mouture poussée du laitier a favorisé l'accroissement de la compacité du BHPL, ce qui explique l'augmentation de sa masse volumique par rapport au BHPT.
1. A partir de 28 jours et plus on constate un rapprochement progressive de la résistance en compression des BHP11 et BHPL2 par rapport à celles du béton témoin obtenu grâce aux phénomènes physico-mécanique, en effet le laitier réagit par sa finesse et son réactivité hydraulique, engendrant ainsi un squelette plus cohérent et par conséquent un béton plus résistant et plus durable.
- Les bétons à 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 à long terme plus proche à celle de béton à base de FS
 - Le laitier granulé de haut fourneau broyé (sous forme de fillers) convient pour la confection des bétons à hautes performances en substitution avec la fumée de silice (liant ternaire)
 - Au terme de ce travail, il est important d'insister sur le fait que l'influence de la finesse du laitier est d'autant plus significative, selon que l'on cherche à fabriquer des bétons plus performants.
 - La cinétique de développement des résistances (figure III) est assez lente pour des pourcentages élevés, tout en devenant plus favorable à partir de 28 jours jusqu'à 90 jours et même au-delà.

Conclusion du chapitre

L'élaboration des BHP à base de liants ternaires avec incorporation des ajouts cimentaires reste toujours bénéfique. Actuellement, les matériaux de substitution partielle ont d'excellentes performances comparativement à celle du béton au ciment tout seul. La disponibilité des ajouts cimentaires présente un grand avantage quant à leur utilisation dans le béton à hautes performances. Les conclusions qui peuvent être tirées des résultats obtenus sont notées comme suit :

- A l'état frais Pour un rapport E/L donné, les BHP à base de laitier granulé en substitution partielle au ciment présentent une maniabilité plus meilleure et une masse volumique plus élevée en comparaison avec celles du BHP témoin.
- Les bétons à hautes performances à base des fillers de laitier présentent des résistances en compression un peu faibles aux jeunes âges, mais au cours de leurs cycles de durcissement, ils présentent des évolutions importantes des résistances surtout à longue (96 jours) plus proche à celles du BHP témoin.
- Le rapport E/L est le paramètre le plus influent sur les résistances en compression.
- la résistance en compression à 28 jours des bétons incorporant 10% de laitier granulé est très proche à celle du BHP témoin et elle le dépasse à 90 jours.

III.5. Description théorique des indicateurs de Durabilité :

III.5.1. Introduction :

Les BHP possèdent des propriétés remarquables, aussi bien en termes de performances mécaniques que de durabilité. Ces propriétés sont obtenues grâce à une microstructure très compacte, due à une utilisation d'une grande quantité de liant, de sable fin, d'adjuvant et d'un faible rapport E/C. Nous avons vu auparavant qu'un traitement thermique peut également être appliqué en complément pour accélérer les évolutions des performances mécaniques, ou les accroître par transformation des hydrates afin d'en former de plus résistants.

De nombreux travaux ont été développés pour mesurer directement ces paramètres ou pour établir et appliquer des modèles au matériau considéré comme sain et homogène. Or, dans une structure en béton le matériau est rarement "sain". En service, l'endommagement du matériau est lié aux diverses agressions extérieures, mécaniques et/ou chimiques, subies.

Indépendamment des agressions d'origine chimique, les sollicitations mécaniques créent et développent une fissuration qui modifie la structure poreuse du matériau et par suite ses paramètres de transfert.

La perméabilité d'un matériau sous-entend une valeur intrinsèque, indépendante du fluide de percolation considéré. Dans le cas des bétons, le fait que l'eau ne soit pas inerte vis à vis de la matrice cimentaire, rend délicate la mesure de leur perméabilité à l'eau. La perméabilité des bétons trouve pourtant très souvent son application dans le cadre de la prédiction de la circulation d'eau en phase liquide à travers le matériau. Les méthodes expérimentales employées permettent de déterminer et de comparer les mesures de perméabilité au gaz et à l'eau pour des matériaux sains ou peu endommagés ou fissurés. [110].

III.5.2. Capillarité

Lorsque les diamètres des pores sont fins, l'eau vient à condenser. Les couches pluri moléculaires tendent à saturer rapidement le volume du pore pour se transformer en eau capillaire. Celle-ci est alors retenue dans les pores par des forces capillaires. [110].

III.5.3. Paramètres de transfert dans les bétons non endommagés :

III.5.3.1. Incidences des caractéristiques structurelles :

1. Composition :

La perméabilité des bétons peut être en première approche corrélée à la porosité du matériau. De nombreuses études conduites notamment sur des pâtes de ciment où la porosité est directement liée au rapport E/C, ont corroboré cette hypothèse. Les perméabilités mesurées pour des degrés de saturation contrôlés augmentent très souvent avec le rapport E/C initial des bétons [111], [112], [113], [114], [115], [116], ... Il n'existe cependant pas de relation universelle entre le rapport E/C et la perméabilité des bétons. A porosité égale, le type de liant utilisé peut aussi modifier la porosité. L'ajout de fumée de silice dans les BHP, comme l'ajout de laitiers ou de cendres volantes, modifie la texture des hydrates. La réduction de la proportion de portlandite s'accompagne d'un affinement des pores et des capillaires, et donc d'une réduction de la perméabilité [117].

La nature des granulats peut ensuite influencer la perméabilité. En général les granulats sont moins perméables que la matrice cimentaire qui les entoure et sont souvent considérés dans les modélisations comme des inclusions imperméables au sein d'une matrice perméable.

L'emploi de granulats calcaires, plus poreux que des granulats siliceux, peut augmenter alors légèrement la perméabilité globale d'un béton, cependant l'auréole de transition dans ce cas présente une porosité et une perméabilité faibles. Sur ce sujet, il paraît donc difficile de dégager une tendance générale d'après les observations réalisées [118], [114].

L'efficacité du malaxage peut aussi avoir une influence significative sur la perméabilité. Il est apparu que le temps de malaxage qui est souvent minimisé pour des questions de coût lors du gâchage du béton en centrale de fabrication, peut avoir des conséquences sur les microstructures du matériau à long terme. De légères variations de perméabilité, indépendantes des variations de résistance mécanique préalablement observées ont été mesurées sur plusieurs bétons malaxés à des temps différents [119].

2. Perméabilité :

Les "Bétons Hautes Performances" sont de manière générale moins perméables que les bétons ordinaires. Concernant la relation entre la résistance en compression du béton et sa perméabilité, il est à noter qu'il peut souvent être observé que la perméabilité décroît lorsque la résistance mécanique des bétons croît. Cependant, il a été démontré expérimentalement que les relations empiriques qui ont pu être établies pour certains bétons ne peuvent pas être généralisées [120]. La perméabilité dépend pour l'essentiel de la connectivité de la structure poreuse, tandis que la résistance en compression est essentiellement liée à la porosité globale du matériau. Les paramètres de transfert du matériau sain ne peuvent donc pas être évalués à partir de ses propriétés mécaniques originelles.

Lors de mesures de perméabilité à l'eau, deux raisons peuvent conduire à une sous-évaluation de la perméabilité du béton testé :

- La réactivité du fluide de percolation vis à vis du milieu poreux.
- Les difficultés de mesure de débits très faibles, et/ou l'application de gradients de pression importants.

En pratique, la perméabilité à l'eau présente l'avantage d'être plus représentative du matériau en service. Cependant, le principal inconvénient de la perméabilité à l'eau réside dans le fait que, étant donné les caractéristiques et la composition de la microstructure des bétons, l'eau n'est pas inerte vis à vis du milieu poreux.

III.5.4 - Mesure de la porosité accessible à l'eau (essais d'absorption totale)

L'absorption d'eau par immersion d'un mortier est déterminée selon la prescription de la Norme NBN B15-215 :1989 [121].

Cet essai a été effectué afin d'avoir une idée sur la porosité interne du matériau, en déterminant la masse d'eau que peut absorber les éprouvettes après immersion totale durant une période donnée.

Rappelons que l'essai consiste à une charge des éprouvettes (4×4×16) cm³ du mortier jusqu'à masse sèche constante dans une étuve ventilée dont la température est maintenue à 150°C.

CHAPITRE III : caractérisation des BHP d'études à l'état frais et durci

Ensuite l'émersion totale des éprouvettes dans un bac à eau à $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ durant un minimum de 48h et jusqu'à saturation du matériau. Avant la pesée l'éprouvette est essuyée avec une éponge humide de manière à la débarrasser de son eau superficielle. La masse est considéré constante lorsque deux pesées successives à 24h d'intervalle ne donnent pas une différence supérieure à 0.1%. Une fois la masse saturée obtenue et la masse à sec préalablement connue, nous avons déterminé la masse d'eau absorbée.

L'absorption d'eau par immersion A_b est exprimée en % de la masse sèche et est calculée par la relation suivante :

$$A_b = \frac{M_a - M_s}{M_s} * 100$$

M_a : masse de l'échantillon imbibé d'eau.

M_s : masse de l'échantillon sec après passage à l'étuve à 105°C .

Les résultats obtenus sur 3 éprouvettes de chaque type de mortier sont exprimés, en pourcentage, sous la forme de la moyenne de 3 valeurs mesurées.

III.5.5 - Absorption d'eau par capillarité

L'absorption par capillarité est le phénomène physique susceptible de faire pénétrer des substances agressives extérieures à l'intérieur du mortier et béton. C'est aussi une propriété qui caractérise la disposition des pores du matériau qui absorbent et transmettent l'eau par capillarité. Il est utilisé en complément à d'autres essais pour caractériser la durabilité du béton et du mortier.

L'essai d'absorption d'eau par capillarité mesure le taux d'absorption de l'eau par succion capillaire des éprouvettes de mortier non saturées, mises en contact avec de l'eau sans pression hydraulique.

III.5.5. 1. Conduite de l'essai

Après démoulage, les éprouvettes prismatiques de mortier ($4\times 4\times 16$) cm^3 sont conservées jusqu'à l'âge de 28 jours dans l'eau (deux échantillon par composition). Les éprouvettes sont ensuite extraites de l'eau, puis conservées dans une étuve ventilée à 60°C . Durant cette période, le suivi de la masse est réalisé à intervalle de temps régulier jusqu' à une masse constante. Les éprouvettes sont ensuite préalablement imperméabilisées par la résine sur les quatre faces latérales (4×16). Après le séchage complet de la résine, les éprouvettes sont posés sur des petits supports (non absorbants) dans un bac à eau de telle manière que seuls les 5 premiers millimètres de la surface (4×4) de l'éprouvette soient immergés dans l'eau afin d'obtenir un écoulement

CHAPITRE III : caractérisation des BHP d'études à l'état frais et durci

unidirectionnel, le bac d'eau muni d'un système d'alimentation automatique en eau permet de maintenir le niveau d'eau constant tout le long de l'expérience

L'essai d'absorption capillaire a été réalisé conformément au mode opératoire de la norme européenne NF EN 480-5 [122], et consiste à déterminer la quantité d'eau absorbée par le mortier en fonction du temps. Le taux d'absorption par remontée capillaire due à la force de succion d'une éprouvette. Puis on procède à de relevés de masse successifs à l'aide d'une balance de précision de 0,01g sur des intervalles de temps très courts au début puis de plus en plus espacés au fur et à mesure que l'on avance dans l'expérience (5,10,15,20, 30, 1h, 2h, 3h, 1J, 2J, 3J.) À chaque échéance, les éprouvettes sont sorties du récipient, essuyées à l'aide d'une éponge humide, pesées puis replacées dans le récipient.

Pour une échéance donnée, l'absorption capillaire « CA » est exprimée en grammes par millimètre carré (g/mm²), par la formule suivante :

$$CA = \frac{M_j - M_0}{S}$$

Avec

M₀ : masse sèche de l'éprouvette avant immersion dans l'eau en gramme.

M_j : masse de la même éprouvette après le temps requis d'absorption en grammes.

S : section de la base de l'éprouvette en millimètre carré, c'est-à-dire 1600mm².

CHAPITRE III : caractérisation des BHP d'études à l'état frais et durci

III.5.5 .2. exemple de mesure de la perméabilité a l'eau par des auteurs

auteurs	éprouvette	sollicitation	Essais de perméabilité	Evaluation de la fissuration	Remarques et conclusion
Kermani. A	Cylindre de B.O et béton avec cendre volantes fc=30mpa d=100mm h=200 mm	Compression uni axiale de 0,3 à 0,7 fc maintenue durant 5 min	Liquide, eau durant 48 h Cylindre 100 *100 mm Ap=10,5mpa d=100mm h=100mm	% fc 2.10 ⁻¹⁴ < k1 < 1.10 ⁻¹⁰ m/s	La perméabilité de l'éprouvette augmente de manière significative lorsque le chargement dépasse 0,4 fc
HEA	Cylindre de B.O et béton avec cendre volantes fc=30mpa d=100mm h=200 mm	Compression uniaxiale de 0,3 à 0,8 fc durant 30 min jusqu'à $\varepsilon = 3.10^{-3}$	Disque de béton extrait de la partie médiane d'éprouvette D=40 mm H = 200 mm	La perméabilité Des échantillons Séchés et saturés Sous vide est plus Grande mais Beaucoup moins Dispersée que la Perméabilité des Échantillons en L'état, après la cure Humide. 5.10 ⁻¹³ < K < 10 ⁻¹⁰ m/s	La dispersion des mesures de perméabilité due aux interactions eau matrice cimentaire ne permet pas la distinction d'éprouvettes endommagées Mécaniquement. Cependant la Fissuration augmente Les propriétés de transfert du matériau

Tableau III.8. Tableau récapitulatif des expérimentations menées sur le thème du couplage perméabilité – endommagement avec des mesures de perméabilité à l'eau [110].

Conclusion générale

Dans cette étude sur les BHP à base de liants ternaires formulés avec de laitier granulé en substitution partielle au ciment. Nous avons pu mettre en évidence l'intérêt du remplacement du ciment par le laitier granulé dans l'élaboration des bétons à hautes performances. L'objectif de ce travail était consacré à apporter une contribution aux nombreuses recherches qui visent à réduire la consommation du ciment et la fabrication du clinker nécessitant une grande quantité d'énergie et provoque un dégagement significatif de CO₂ dans l'atmosphère.

Après les essais préliminaires, des essais sur les BHP d'études ont été réalisés en tenant en compte du paramètre principal adopté à savoir le taux de substitution en laitier granulé. Les principales conclusions qu'on peut tirer de cette campagne d'essais sont :

- ❖ • Une bonne configuration granulaire permet d'avoir une bonne compacité, notamment par un bon choix rigoureux de l'étendu granulaire.
- ❖ Les résistances mécaniques des bétons à hautes performances témoin avec fumée de silice développe à court terme une cinétique d'évolution des résistances plus élevée que celle avec fumée de silice et de laitier granulé en substitution partielle au ciment.
- ❖ Le BHP avec addition de de fumée de silice et Laitier granule bien broyée est plus maniable que celui du BHP témoin, donc plus meilleure et plus facile à mettre en place.
- ❖ Les bétons confectionnés présentent des résistances exceptionnelles à la compression au jeune âge qui varie entre 54 et 63 MPA à 14 jours seulement.
- ❖ L'addition de laitier granulé nous donne performances mécaniques à moyen terme plus proche de celles des BHP témoin.
- ❖ hydratation et l'évolution des résistances en compression des BHP avec laitier granulé est plus lente mais plus longue, de sorte que les résistances à moyen et long terme sont similaires à celle de BHPT (FS). En plus de ces performances mécaniques, Il nous a paru intéressant de signaler l'intérêt écologique ou environnemental le BHP à base de liant ternaire à base de laitier granulé.
- ❖ Les résultats obtenus permettent aussi de mettre en évidence l'intérêt d'un broyage fin du laitier granulé surtout sur la question de durabilité.
- ❖ L'utilisation du laitier granulé dans les BHP en substitution partielle ou totale ouvre une autre voie pour la valorisation de ces matériaux.
- ❖ amélioration de résistances est attribuée d'un côté à la bonne qualité des granulats locaux utilisés, Et d'un autre côté l'introduction du laitier et du FS qui a conduit à une croissance appréciable de résistances, cela est due évidemment au double rôle que joue le laitier et

CHAPITRE III : caractérisation des BHP d'études à l'état frais et durci

les FS dans la matrice du béton. Premièrement elle densifie la pâte de ciment grâce à-la caractère de ces particules ultrafines qui placer entre dans les pores Deuxièmement, le laitier qui est stable dans l'eau et s'hydrate par simple addition d'eau environ en se précipitant sous forme de C-S-H forme par réaction hydraulique avec l'hydroxyde de calcium $\text{Ca}(\text{OH})_2$ lors de l'hydratation du ciment et par conséquent la résistance mécanique du béton s'améliore,

- ❖ -L'effet de dosage en additions sur la demande en superplastifiants est de conduire de manière significative à une augmentation de la résistance à la compression particulièrement aux jeunes âges
- ❖ -L'exploitation des résultats expérimentaux obtenus dans ce modeste de travail nous permet de mettre en évidence deux avantages majeurs de notre contribution :
 - Il y a des avantages et des gains à utiliser le liant ternaire pour fabriquer un BHP.
 - Le domaine des BHP étant très vaste, fonctions de tous les paramètres existants dans les caractéristiques, des compositions, peut nous ouvrir d'autres axes de recherches, pour d'autres études

Perspectives et recommandations :

D'après les résultats obtenus de d'autres investigations expérimentales sont recommandés :

- L'utilisation d'un ciment de classe supérieur CEM I 52.5, afin d'avoir des résistances plus élevées.
- Travailler avec une finesse plus poussée supérieure 5000 cm^2/g avec utilisation d'agents de mouture afin d'augmenter la réactivité de l'addition et l'adhésion granulat -matrice.
- Augmenter le pourcentage de l'addition au-delà de 50 % pour augmenter la compacité du béton.

Références Bibliographiques

- [1]. **Fatma SAIDAT** Activation chimique du métakaolin dans une matrice cimentaire DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE Le 12-02-2013
- [2]. **Chapdelaine, F. (2004)** *Étude fondamentale et pratique sur le pompage du béton*, thèse de doctorat soutenue en mai 2004 et en attente de dépôt final, Université Laval, Québec, Canada.
- [3]. **Chapdelaine, F., Beaupré, D. (2002)**, *Le volume de pâte de liant : une condition nécessaire au pompage du béton*, Progrès dans le domaine du béton 2002, ACI Section du Québec et de l'est de l'Ontario, Ottawa, 3-4 décembre 2002.
- [4]. Laboratoire ciment **CETIM**. BOUMERDES, disponible sur site web « <http://www.cetim.dz.com/bull12.pdf> ». (Consulte le 10 /06 /2007)
- [5]. **DJOBO YANKWA Jean Noël**, effets de l'incorporation d'adjuvants minéraux sur les Propriétés de ciments géopolymerisés à base scories volcanique.
- [6]. **Amouri Ch. (2009)**. Contribution à l'étude de l'influence des différents ajouts sur les Propriétés des matrices cimentaires. Thèse de Doctorat en science : Génie civil. Constantine : Université Mentouri Constantine.158p.
- [7]. **Belhocine A, Nacoudi N. (2014)**. Etude expérimentale d'un mortier avec ajouts minéraux. Mémoire de Master : Génie civil. Ouargla : Université KASDI Merbah Ouargla.79p.
- [8]. **De Larrard F.**, « Formulation et propriétés des bétons à très hautes performances », Rapport de recherche LCPC, Paris, 1988, p. 335.
- [9]. **Sarkar S-L. and XU A.**, « Why use minéral ad mixture in high performance concrète », In : L'Industria Italiano Del cemento, Octobre 1996, p. 715-726.
- [10]. **R. DUPAIN, R. LANCHON ET J.C. SAINT ARROMAN**, « Granulat, Sols, Ciments et Bétons », caractérisation des matériaux de génie civil par les essais de Laboratoire, 2^{ème} édition conforme aux normes européennes, édition Educative, 1995, pp 235.
- [11]. **SEMCHA A.** « Valorisation des sédiments de dragage : Applications dans le BTP, Cas du barrage de Fergoug ». Thèse de doctorat à l'Université de Reims Champagne-Ardenne. Génie Civil. Décembre 2006.
- [12]. **SIAD HOCINE**, « La durabilité des bétons autoplacants à base des additions Pouzzolaniques et fillers calcaires », Thèse de doctorat, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, 2010.
- [13]. **LEA F-M.**, « Pouzzolanes and pozzolanic cements », In : The chemistry of cement and Concrète, par **FM. Léa, Great Britain** : Edward Arnold, 1970, p.414-453.

Références Bibliographiques

- [14]. **Dron R. et Voinovitch I-A.**, « Activation hydraulique des laitiers, pouzzolanes et cendres volantes », *Le béton hydraulique*, l'ENPC, Paris, 1982, p. 237-246.
- [15]. **Criaud A. et Cadoret G.**, « L'alcali-réaction et le double rôle des ajouts pouzzolaniques » *Les bétons à hautes performances : caractérisation, durabilité, application*, 2^e édition par **Y. Malier**, presse de l'ENPC, Paris, 1992, p. 347-355.
- [16]. **Taylor H-W.**, « chemistry of ciment hydratation », In : 8th International Congress on the Chemistry of Cément, Edited by Financiadora de Estudos e Projetos. Rio de Janeiro, Brasil, 1986, vol. 1, p. 82-110.
- [17]. **Kouame K.**, « Durabilité des mortiers avec méta kaolin placés dans un milieu marin tropical », *Thèse Doctorat. ING : INSA-Lyon*, décembre 1991, p.160.
- [18]. **Oriol M.**, « Étude de la réaction pouzzolanique ciment- méta kaolin par traitement microondes – application à l'élaboration de composites ciment-fibres », *Thèse Doctorat. ING : INSA-Lyon*, 1995, p.160.
- [19]. **Amouri Chahinez.** (2009). Contribution à l'étude de l'influence des différents ajouts sur les Propriétés des matrices cimentaires. Thèse de Doctorat en science : Génie civil. Constantine : Université Mentouri Constantine.158p.
- [20]. **Larrard F.**, Formulation et propriétés des bétons à très hautes performances, Rapport de recherche des laboratoires des Ponts et Chaussées, No 149, France, 1987.
- [21]. Enseignant : **Dr. SAKRI ADEL** support du cours niveau 3eme année licence en génie des procédés université de Biskra année universitaire 2015-2016
- [22]. **MARJORIE PETITPAIN** BÉTONS BAS CARBONE : ACCÉLÉRATION DU DURCISSEMENT DES LIANTS TERNAIRES 471.E - JUILLET 2019 CERIB étude et recherche.
- [23]. **Amouri Ch.** (2009). Contribution à l'étude de l'influence des différents ajouts sur les Propriétés des matrices cimentaires. Thèse de Doctorat en science : Génie civil. Constantine : Université Mentouri Constantine.
- [24]. **Neville A.M.**, Propriétés des bétons, traduction CRIB, p. 229-253, Edition Eyrolles, 2000.
- [25]. **Bagel L.**, Strength and pore structure of ternary blended ciment mortars containing blast Furnace slag and silice fume, *Cément and Concrète Research*, 28, P. 1011-1022, 1998.

Références Bibliographiques

- [26]. **Escalante J.I., Gómez L.Y., Johal K.K., Mendoza G., Mancha H., Mandez J.,** Reactivity of blast furnace slag in Portland cement blends hydrated Under different Conditions, *Cément and Concrète Research*, 31, P. 1403-1409, 2001.
- [27]. **Pane I., Hansen W.,** Investigation of blended cement hydrations by iso thermal Calorimetry and thermal analysis, *Cément and Concrète Research*, 35, P. 1155-1164, 2005.
- [28]. **Gollop R.S., Taylor H.F.W.,** Microstructural and micro analytical studies of sulfate Attack. V. Comparison of different slag blends, *Cément and Concrète Research*, 26, P. 1029-1044, 1996.
- [29]. **Taylor H.F.W.,** *Cément chemistry*. 2nd Ed. London : Thomas Telford, 1997.
- [30]. **Biernacki J.J., Richardson J.M., Stutzman P.E., Bentz D.P.,** Cinétiques of Slag Hydrations in the Présence of Calcium Hydroxyde, *Journal of the American Céramique Society*, 85, P. 2261-2267, 2002.
- [31]. **Luke K., Glasser F.P.,** Sélective dissolution of hydrated blast furnace slag cements, *Cément and Concrète Research*, P. 273-282, 1987.
- [32]. **LAKHAL RIDHA** ELABORATION DES BETONS A HAUTES PERFORMANCES A BASE DES SOUS PRODUIT LOCAUX FORMULATION ET CARACTERISATION PHYSICO-MECANIQUE ANNEE : 2011
- [33]. 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 »).
- [34]. **Thierry Leung Pah Hang** Les bétons bas pH : comportements initial et différé sous Contraintes externes Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2015. Français
- [35]. **Bache H.H.,** "Densified cement/ultra fine particule-based materials", 2e Conférence internationale sur les superplastifiants dans le béton, 11-12 juin, Ottawa, Canada, publié par Aalborg Cement, Aalborg, B.P 163, DK-9100 Aalborg, Danemark, 12p.
- [36]. **Sanchez de Rojas M.I., Rivera J., Frias M.,** 1999 "Influence of microsilica state on Pozzolanic reaction rate", *Cement and Concrète Research*, vol. 29, 1999, pp.945-949
- [37]. **Mitchell D.R.G., Hinczak I., Day R.A.,** 1988 "Interactions of silica fume with calcium hydroxide solutions and hydrated cement pastes", *Cement and Concrete Research*, vol. 28, pp.1571-1584.

Références Bibliographiques

- [38]. **Sellevoid E.J., Radjy F.F., 1983** "Condensed silica fume (microsilica) in concrete : water Demand and strength development " dans *The use of Fly ash, silica fume, slag and natural pouzzolane in concrete*, Ed. V.M. Malhotra, ACI SP-79, Detroit, Michigan, vol. 2, pp.677-694.
- [39]. **Durekovic A., 1995** "Cement pastes of low water to solid ratio : an investigation of the porosity characteristics Under the influence of a superplasticizer and silica fume ", *Cement and Concrete Research*, vol. 25, pp.365-375.
- [40]. **Hooton R.D., 1992** "Influence of silica fume replacement of cement on physical properties and resistance to sulphate attack, freezing and thawing, and alkali-silica reactivity", *ACI Materials Journal*, vol. 89, pp.337-344
- [41]. **Bentz D.P., Jensen O.M, Coats A.M., Glasser F.P.,2000** "*Influence of silica fume on diffusivity in cement-based materials - I - Experimental and computer modelling studies on cements pastes*", *Cement and Concrete Research*, vol. 2, pp.835-872.
- [42]. **Oh B.H., Cha S.W., Jang B.S., Jang S.Y., 2002** "*Development of high performance concrete having high resistance to chloride penetration*", *Nuclear Engineering and Design*, vol. 212, pp.221-231.
- [43]. **Andersson K., Allard B., Bengtsson M., Magnusson B.,** "*Chemical composition of cement pore solutions*", *Cement and Concrete Research*, vol.19, pp.327-332.
- [44]. **Khayat K.H., Aïtcin P.C.,** "*Silica fume in concrete : an overview*", *Proceeding CANMET/ACI 4th International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete*, Istanbul, ACI SP-132, Ed. V.M. Malhotra, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, vol. 2, pp.835-872.
- [45]. **De Larrard F., Acker P. (1992)**, « *Déformations libres des bétons hautes performances* », dans *Les bétons à hautes performances, caractérisation, durabilité, applications*, Ed. By. Yves Malier, Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, pp.157-163.
- [46]. **Kadri E.H., Duval R.,** "*Effect of Ultrafine Particles on Heat of Hydration of Cement Mortars*", *American Concrete Institute ACI, Materials Journal*, pp.1-5.
- [47]. **Fahima Rouis** EFFET DES CARACTÉRISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES DES AJOUTS MINÉRAUX SUR LES PROPRIÉTÉS RHÉOLOGIQUES DES MORTIERS DE BÉTONS FLUIDES ÉQUIVALENTS Thèse de doctorat PhD Sherbrooke (Québec), Canada Mai 2017
- [48]. **Aïtcin, P.-C. (2006)** "GCI710 – Les liants hydrauliques", Université de Sherbrooke, Canada.
- [49]. **Sanchez de Rojas, M. I., Rivera, J., Frias, M. (1999)** "Influence of microsilica state on pozzolanic reaction rate", *Cement and Concrete Research*, vol. 29, n° 6, p. 945-949.

Références Bibliographiques

- [50]. **Ma, W., Sample, D., Martin, R., Brown, P. W.** (1994) "Calorimetric study of cement blends containing Fly ash, silica fume, and slag at elevated temperatures", *Cement and Concrete Aggregates*, vol. 16, n° 2, p. 93-99.
- [51]. **Thi Thuy Ha BACH** Evolution physico-chimique des liants bas pH hydratés
Influence de la température et mécanisme de rétention des alcalins Le 16 novembre 2010
Pour obtenir le grade de Docteur de l'Université de Bourgogne
- [52]. **P.K. Mehta, O.E. Gjorv**, Properties of Portland Cement Concrete Containing Fly Ash and Condensed Silica Fume, *Cem. Concr. RES.*, (1982) 587-595
- [53]. **V. Lilkov, V. Stoitchkov**, Effect of the Pozzolit Active Minéral Ad mixture on the Properties of Cement Mortars and Concrètes – Part 2 – Pozzolan Activity, *Cem. Concr. RES.* **26-7** (1996) 1073-1081
- [54]. **B. Sioulas, J.G. Sanjayan**, Hydration temperatures in large high-strength concrete columns incorporating slag, *Cem. Concr. RES.*, **30** (2000) 1791-1799
- [55]. **Y. Xi, D.D. Siemer, B.E. Scheetz**, Strength development, hydrations reaction and pore structure of autoclaved slag cement with added silica fume, *Cem. Concr. RES.* **27** (1997) 75-82
- [56]. **Alexandre J. et Sebileau J-L.**, 1988. Le laitier de haut fourneau. Centre Technique et de Promotion des Laitiers (C.T.P.L), Paris. 340p.
- [57]. **Venuat M.**, 1971. Adjuvant et traitement des mortiers et bétons. Venuat, 1ere édition Paris, 40- 45.
- [58]. **Baron J. et Olivier J-P.**, 1997. Les bétons – bases et données pour leur formulation. Association technique de l'industrie des liants hydrauliques, Editions Eyrolles, Paris.
- [59]. **Jiang S-P. et Grandet J.**, 1989. Évolution comparée des porosités des mortiers de ciments au laitier et mortiers des ciments portland. *Cément and concrète research*, Vol. 19, 487- 496.
- [60]. **Sarkar S-L. and XU A.**, 1996. Why use minéral ad mixture in high performance concrète. In : *L'Industria Italiano Del cement* : Vol. 66, N°714, 715-726.
- [61]. **Pera J. Rols S., Chabannet and Ambroise J.**, 1998. Influence of cement the type on the résistance on concrète to an agricultural environment. In : *Sidney Diamond Symposium on Materials science concrète*, Edited by Menashi Cohen, Sidney Mindess and Jan Skalny, 419-431.
- [62]. **WAINWRIGHT, P. & REY, N.** 2000. The influence of ground granulated blastfurnace slag(GGBS) additions and time delay on the bleeding of concrete. *Cement and Concrete Composites*, 22, 253-257.

Références Bibliographiques

- [63]. DOUGLAS, M. R. & SHENKER, S. H. 1990. Strings in less than one dimension. *Nuclear Physics B*, 335, 635-654.
- [64]. JAU, W.-C. & TSAY, D.-S. 1998. A study of the basic engineering properties of slag cement concrete and its resistance to sea water corrosion. *Cement and Concrete Research*, 28, 1363-1371.
- [65]. JAVELLE, P. & PONTEVILLE, P. 1968. Laitier de haut fourneau. Propriétés et emplois. *M*, 1, 850.
- [66]. CHERN, J.-C. & CHAN, Y.-W. 1989. Déformations of concrètes made with blast-furnace slag cement and ordinary portland cement. *Materials Journal*, 86, 372-382.
- [67]. BESSA, A., BIGAS, J. & GALLIAS, J. 2003. Influence des additions minérales naturelles et industrielles sur les principaux paramètres de formulation de mortiers. *XXIème Rencontres Universitaires de Génie Civil, La Rochelle, France*.
- [68]. NOUI Ammar Contribution à l'étude des caractéristiques physiques et mécaniques et de la durabilité des ciments ternaires Doctorat Soutenue publiquement le : 09/05/2018 UNIVERSITÉ DE M'SILA
- [69]. Xing Y, et al. (2011) Prédiction of nucléosome occupancy in *Saccharomyces cerevisiae* using position-corrélation scoring fonction. *Genomics* 98(5) :359-66
- [70]. LAMMERTIJN, S. & DE BELIE, N. 2008. Porosity, gas permeability, carbonation and their interaction in high-volume Fly ash concrete. *Magazine of Concrete Research*, 60, 535-545.
- [71]. SAILLIO, M. 2012. *Interactions physiques et chimiques ions-matrice dans les bétons sains et carbonatés. Influence sur le transport ionique*. Université Paris Est Marne la Vallée.
- [72]. REGOURD, M. 1982. L'hydratation du ciment Portland. *Le béton hydraulique*, 193 221.
- [73]. MEHTA, P. K. 1986. Concrete. Structure, properties and materials.
- [74]. MALIER, Y. « les bétons à hautes performances -caractérisation, durabilité, applications ». Presse de l'école nationale des ponts et chaussées, France, 1992.
- [75]. Les bétons à haute performance, Chapitre-3. 14p. Disponible sur :
<http://www.infociment.fr/telecharger/CT-G11.94-107.pdf>. Les Bétons à Hautes Performances-BHP-Info ciment
- [76]. Brahim Safi, « les bétons à haute performance », Chapitre-iv. 30p. Disponible sur :
http://brahim-safi.e-monsite.com/medias/files/chap-iv-les-betons-a-hautes-performances_bhp.pdf

Références Bibliographiques

[77]. Les bétons hauts et très hautes performances, 2p. Disponible sur :

<http://www.infociments.fr/betons/types/betons-hautes-performances/beton-hautes-Performances-bhp>

[78]. **CHAFI Nardjes**. « Matrice cimentaire Renforcée des Fibres ; Valorisation des sous-produits (Polystyrène, copeaux d'acier et copeaux de bois) » ; Université Mentouri- Constantine
Thèse de magister, Mars 2005.

[79]. **P-CLAUDE. AITCIN**. « Bétons haute performance ». Edition Eyrolles, Janvier 2001, INSB2-212-01323-X. Université de Sherbrooke, Québec, Canada.

[80]. **P. PIMIANTA, M.C. ALONSO, R. J. MC-NAMEE, J.C. MINDEGUIA**. « Behaviour of high performance concrete at high temperatures ».

[81]. **X. J. Li, Z. J. Li, M. Onofrei, G. Ballivy and K. H. Khayat**. « Microstructural characteristics of HPC Under different thermo-mechanical and thermo-hydraulic conditions »
Matériels and Structures/Matériaux et Constructions, Vol. 32, Décembre 1999.

[82]. **GAWĘSKA HAGER Izabela** « Comportement à haute température des bétons à haute performance - évolution des principales propriétés mécaniques » Thèse de doctorat à l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées et l'Ecole Polytechnique de Cracovie 2004.

[83]. **Toufik Boubekeur¹, Bensaid Boulekbache¹, Ali Makhelouf** « INFLUENCE DU LAITIER SUR LES PROPRIETES DESCIMENTS A BASE DE CALCAIRE ».

[84]. **MEHTA P.K.**, « Concrète : Structure, Properties and Materials ». Prentice-Hall, Englewood Cliff, N.J., 1986, 450 p.

[85]. **S. GUETTALA, B. MEZGHICHE** « contribution à l'étude Influence de l'addition du sable de dune en poudre au ciment sur les performances physico-mécaniques, la déformabilité et la et la durabilité du béton ».

[86]. **F. GHOMARI, M.A. BOUKLI HACENE, HANINI Walid** « ETUDE DE L'INCIDENCE DE LA GRANULARITE SUR LA COMPACTE DES MELANGES GRANULAIRES.

[87]. **SLIWINSKI J., LEONARD R., TRACZ T.** « Influence of High Temperature on the Résiduel Permeability of High Performance Concrète ».

[88]. **AITCIN P C.** „Développements in the application of high-performance concretes“, Construction and building matériels, Vol. 9, No. 1, 1995

[89]. **Le Roy R.**, « déformations instantanées et différées des bétons à hautes performances », Le béton hydraulique, LCPC, Paris, 1982, p. 343.

Références Bibliographiques

- [90]. **De Larrard F. et Malier Y.**, « Propriétés constructives des bétons à très hautes performances : de la microstructure à la macrostructure », les bétons à très hautes performances : caractérisation, durabilité, application, 2e édition par **Y. Malier**, presse de l'ENPC, Paris, 1992, p. 129-156.
- [91]. **De Larrard F.**, « Prévion des résistances en compression des bétons à hautes performances aux fumées de silice ou une nouvelle jeunesse pour la loi de Féret », Annales I.T.B.T.P, n° 483, mai-1990.
- [92]. **Pedeches J-M.**, « Béton à hautes et très hautes performances : Propriétés mécaniques et retrait. Aide à la formulation », Annales I.T.B.T.P, n° 525, Série bétons 311, p. 1-41, 1994.
- [93]. BAEI 91, « Règles techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions en béton armé suivant les états limites », Bulletin officiel, fascicule n° 62, Titre 1, section I du CCTG.
- [94]. BPEL 91, « Règles techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions en béton précontraint suivant les états limites », Bulletin officiel, fascicule n° 62, Titre 1, section II du CCTG.
- [95]. **Regourd M.**, « Hydratation du ciment Portland, dans le béton hydraulique », édité par baron J. et Saute Rey R., 1982, Presses de l'école nationale des ponts chaussées, ISBN 2-85978-033-5, p. 193-221
- [96]. **FICHES TECHNIQUES TOME 2 Les bétons formulation, Fabrication et mise en œuvre CIM BETON G11**
- [97]. **Chaid R.** « Formulation, Caractérisation et Durabilité des BHP au ajouts cimentaires locaux » Thèse doctorat ENP, PP 154, Alger 2006.
- [98]. **Dalila BENAMARA** FORMULATION ET ÉTUDE D'UN BÉTON À _ HAUTE PERFORMANCE (BHP) Université Mohamed Khider – Biskra Thèse de doctorat
- [99]. **GUETTECHE M.N., H. HOUARI** « CARACTERISATION ET ACTIVATION DES LAITIERS DE HAUT FOURNEAU D'EL HADJAR PAR LE CLINKER ».
- [100]. **TEBBAL Nadia** Effet de la nature des granulats sur les propriétés physicomécaniques et durabilité d'un béton à haute performance THESE Doctorat Université Mohamed Boudiaf - M'SILA
- [101]. **George Dreux, Jean FESTA**, « NOUVEAU GUIDE DU BETON » 8ème Édition ;

Références Bibliographiques

- [102]. **XP P 18-540** « module de finesse d'un sable ».
- [103]. **P 18-597** « Mesure de la propreté (l'essai d'équivalent de sable) ».
- [104]. **NF EN 1097-3** « La masse volumique apparente est la masse par unité de volume de la matière qui constitue le granulat ».
- [105]. De **Larrard** 2000. Structures granulaires et formulation des bétons, traduit de l'anglais par LECOMTE A, études et recherches des laboratoires des ponts et chaussées, Paris, 414 p
- [106].
[:https://fr.wikipedia.org/wiki/Essai_d%E2%80%99%C3%A9talement_au_c%C3%B4t%C3%A9_d%E2%80%99Abrams](https://fr.wikipedia.org/wiki/Essai_d%E2%80%99%C3%A9talement_au_c%C3%B4t%C3%A9_d%E2%80%99Abrams)
- [107]. **LARBI CHAHT FOUZIA** Caractérisation des propriétés thermiques des liants hydrauliques au jeune âge : ciment et pouzzolane. MEMOIRE DE MAGISTER UNIVERSITE ABDELHAMID IBN BADIS MOSTAGANEM janvier 2012
- [108]. **Nabila BOUALLA** Etude de l'influence de l'ajout de la pouzzolane sur les caractéristiques physico- chimiques des ciments Université d'Oran - Licence 2011
- [109]. **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.
- [110]. **Vincent Picandet** influence d'un endommagement mécanique sur la perméabilité et sur la diffusivité hydrique des bétons THÈSE DE DOCTORAT UNIVERSITÉ DE NANTES 2001
- [111]. **Dhir, R.K., Hewlett, P.C, Chan, Y.N.**, “ Near surface characteristics of concrète : intrinsic permeability ”, *Magazine of Concrète Research*, vol. 41, n°147, pp. 87-97, 1989
- [112]. **El-Dieb, A. S., Hooton, R.D.**, “ Water-permeability measurement of high performance concrète using a high-pressure triaxial cell ”, *Cément and Concrète Research*, vol. 25, n°6, pp. 1199-1208, 1995.
- [113]. **Jacobs, F.**, “ Permeability to gas of partially saturated concrète ”, *Magazine of Concrète Research*, vol. 50, n°2, pp. 115-121, 1998.
- [114]. **Perraton, D.**, “ La perméabilité au gaz des bétons hydrauliques ”, Thèse de Doctorat, INSA de Toulouse, 1992.

Références Bibliographiques

- [115]. **Quénard, D., Sallée, H.**, “ Le transfert isotherme de la vapeur d’eau condensable dans les matériaux microporeux du bâtiment ”, *Cahiers de CSTB*, n°2525, 1991.
- [116]. **Sanjuán, M.A., Muñoz-Martialay, R.**, “ Oven-drying as a preconditioning method for air permeability test on concrète ”, *Materials Letters*, vol. 27, pp. 263-268
- [117]. **Buil, M., Ollivier, J.P.**, “ Conception des bétons : la structure poreuse ”, « La durabilité des bétons », Presses de l’ENPC, chapitre 3, pp. 57-99, 1992.
- [118]. **Lydon, F.D.**, “ Affect of coarse aggregate and water/cement ratio on intrinsic permeability of concrète subject to drying ”, *Cement and Concrete Research*, vol. 25, n°8, pp. 1737-1746, 1995.
- [119]. **Picandet, V., Khelidj, A.**, “ Optimisation du temps de malaxage des bétons autoplaçants : Mesures de perméabilité au gaz ”, *Projet national BAP, Rapport de contrat intermédiaire*, Juin 2001.
- [120]. **Abbas, A., Carcassès, M., Ollivier, J.P.**, “ The importance of gas permeability in addition to the compressive strength of concrète ”, *Magazine of Concrete Research.*, vol. 52, n°1, pp. 1-6, 2000.
- [121]. NBN B15-215 : essai des bétons absorption d’eau par immersion 1989.
- [122] NF EN 480-5 adjuvants pour béton. Mortier et coulis. Méthodes d’essai partie 5 détermination de l’absorption capillaire 2006.

ANNEXES

Méthode de formulation :

L'objectif de toutes les méthodes de formulation des bétons est de déterminer la combinaison de matériaux à utiliser pour produire le béton qui aura les propriétés désirées et qui sera le plus économique possible, En règle générale, une méthode de formulation permet aussi de calculer un mélange de départ que l'on pourra plus ou moins modifier pour obtenir les propriétés désirées à partir de quelques gâchées d'essai. Bien que les méthodes de formulation des BHP relèvent encore plus d'un art que d'une science, il est certain qu'elles reposent aussi sur des principes scientifiques qui sont à la base de toutes les formulations de béton. A ce titre il y a lieu de présenter quelques méthodes de formulation.

- La méthode de L'Université de Sherbrooke.
- Méthode suggérée par le comité ACI 363 (1993).
- Méthode proposée par de Larrard (dite des coulis du LCPC en 1990).
- Méthode présentée par Mehta et Aitcin (1990).

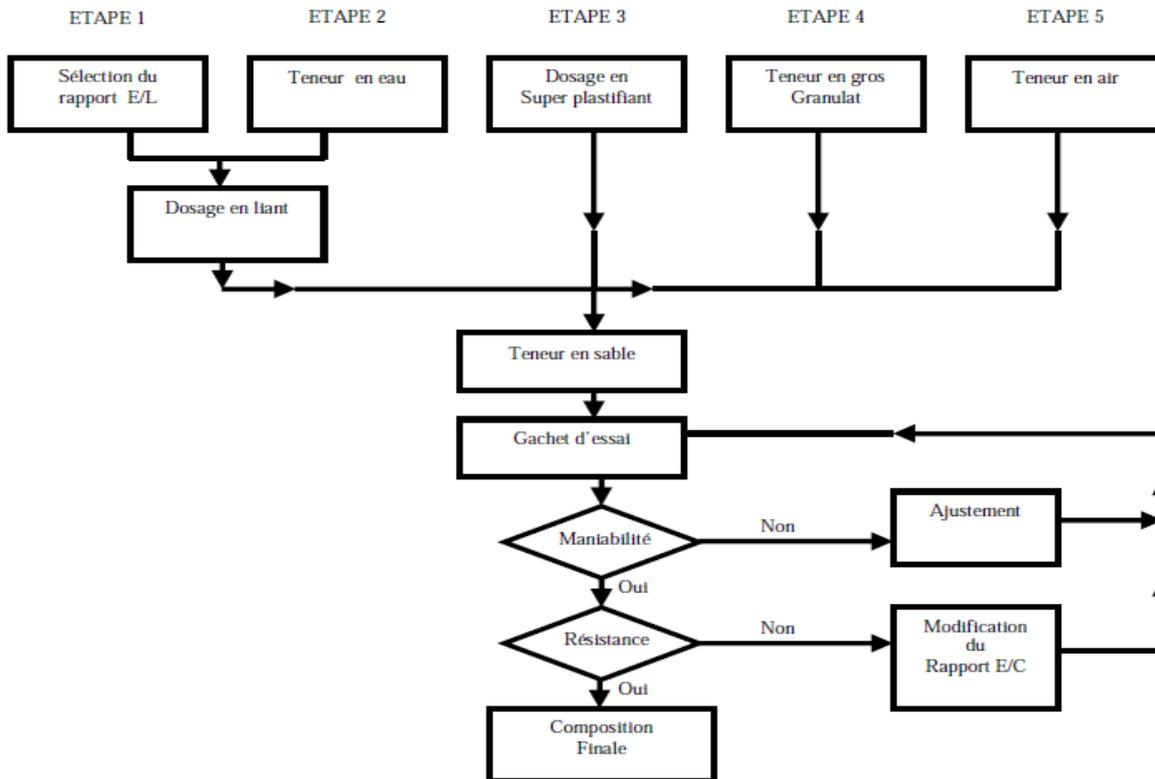
1. La méthode de L'Université de Sherbrooke :

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

Cette méthode très simple suit la même approche que la norme ACI 211-1. IL S'agit d'une Combinaison de résultats empiriques et de calculs basée sur la méthode des volumes absolus. La quantité d'eau contenue dans le super plastifiant est considérée comme faisant partie de la quantité d'eau de gâchage. L'organigramme de cette méthode est présenté dans la figure ci-dessous

Figure 1. Organigramme de la méthode proposée pour formuler des BHP

Annexes



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

- le rapport eau / liant ;
- le dosage en eau ;
- le dosage en super plastifiant ;
- le dosage en gros granulat ;
- la teneur en air.

I.2.1 Définitions et formules (Université de Sherbrooke)

I.2.1.1 Granulats à l'état saturé superficiellement sec

Lorsque l'on fabrique un béton en laboratoire ou en centrale, la principale difficulté est de conserver un contrôle serré de la quantité d'eau libre que l'on utilise réellement. Il est très facile de peser une certaine quantité de ciment ou de granulat ou de lire le nombre de litres d'eau qui passe à travers un compteur. De même, comme on le verra plus tard, quand on utilise un super-plastifiant, il n'est pas tellement difficile de calculer la quantité d'eau que le super-plastifiant apporte au béton. Le contrôle constant de la quantité précise d'eau libre qui est contenue dans les granulats est beaucoup plus difficile parce que la teneur en eau des granulats, spécialement celle

du sable, peut varier considérablement. La teneur en eau totale d'un granulat, E_{tot} , est définie comme étant la quantité d'eau évaporable divisée par la masse sèche du granulat et elle s'exprime en pourcentage (%). Pour mesurer cette valeur, il suffit de placer une certaine quantité de sable humide ou de granulat humide dans une étuve à 105°C et de peser le granulat lorsqu'il a atteint une masse constante. L'utilisation d'un four à micro-ondes peut réduire le temps nécessaire au séchage.

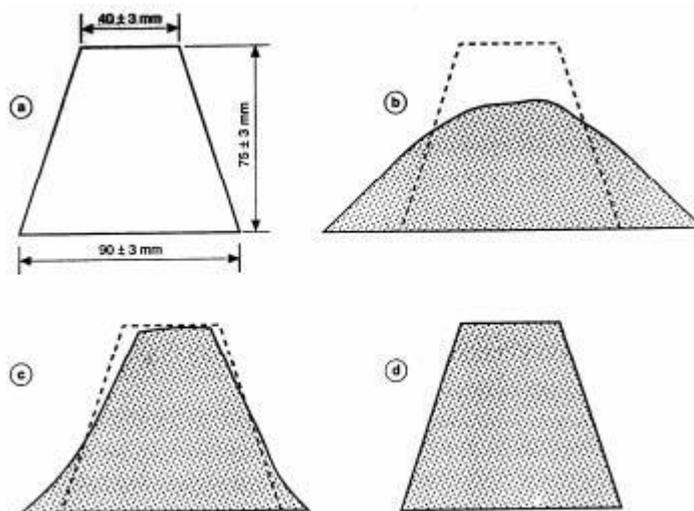
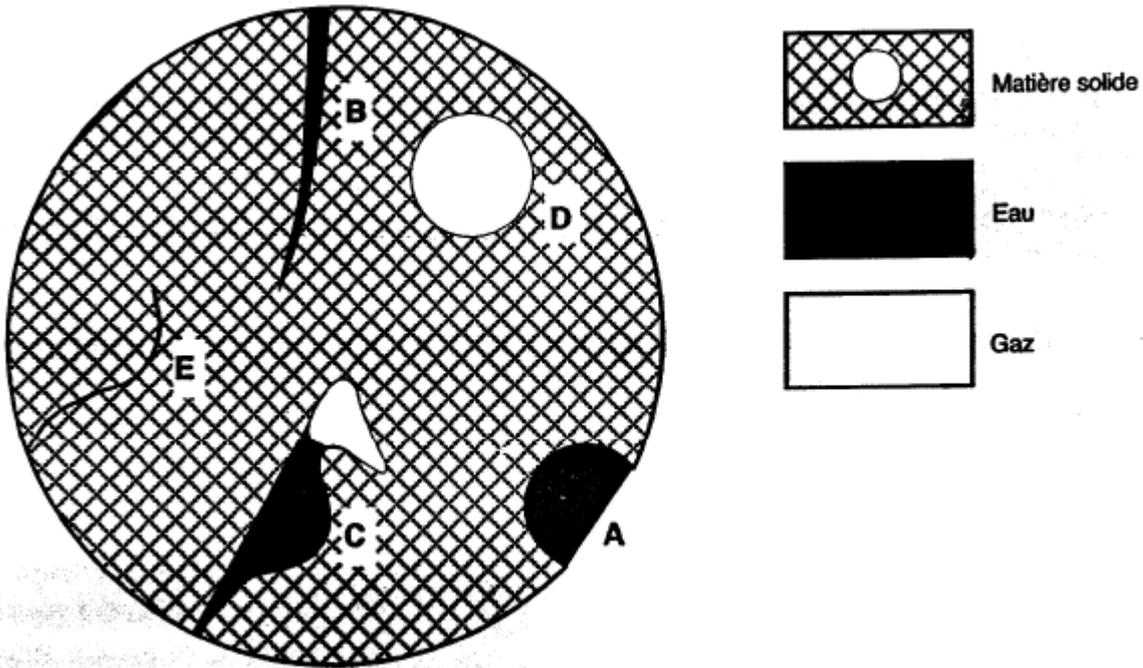
Selon le degré de contrôle que l'on exerce sur la quantité d'eau contenue dans les granulats, et plus particulièrement sur celle du granulat fin, on contrôle plus ou moins la qualité du béton. Une variation de 1 % de la teneur en eau du sable, qui représente environ une masse de 800 kg dans 1 m³ de béton, correspond à une variation de 8 litres d'eau par m³ de béton. Par exemple, si une telle variation de la quantité d'eau de gâchage se produit dans un BHP qui contient 150 litres d'eau et 455 kg de ciment par mètre cube, ce qui correspond à un rapport E/C de 0,33, le rapport E/C réellement obtenu variera entre 0,31 et 0,35 selon que le sable apporte ou n'apporte plus de 0,5 % d'eau. Il s'agit donc d'une différence non négligeable en termes d'affaissement, de résistance à la compression et de perméabilité. Il est par conséquent très important de pouvoir contrôler de façon précise la quantité d'eau libre contenue dans les granulats en définissant un état de référence pour les granulats.

Par convention, en Amérique du Nord, l'état de référence des granulats est appelé l'état saturé superficiellement sec (état SSS). Cet état est défini dans la norme ASTM C127 pour le gros granulat et dans la norme ASTM C128 pour le granulat fin. Ces deux normes décrivent de façon détaillée comment obtenir et mesurer l'état SSS. Très brièvement, l'état SSS du gros granulat est obtenu en laissant les gros granulats immergés dans de l'eau pendant 24 heures, en les essuyant et en les séchant ensuite jusqu'à masse constante dans une étuve (**Figure I.1**). L'état SSS du granulat fin est atteint lorsqu'un petit tronc de cône de sable s'affaisse par suite des forces de capillarité entre les grains de sable humide qui ne sont plus suffisamment fortes pour assurer la cohésion du cône. La (**Figure I.2**) illustre la détermination de l'état SSS pour un sable et la (**figure I.3**) la détermination de l'état SSS pour un gros granulat.

Dans les deux cas, la quantité d'eau absorbée quand le granulat est à l'état SSS, E_{abs} , correspond à l'absorption du granulat. Cette absorption est exprimée sous forme de pourcentage de la masse du granulat sec.

En Amérique du Nord, la formulation des bétons est toujours donnée avec des granulats à l'état SSS.

Figure I.1 représentation schématique d'un granulat à l'état SSS



- a) Utilisation du mini cône normalisé.
- b) Sable ayant une teneur en eau inférieure à l'état SSS.
- c) Sable à l'état SSS.
- d) Sable ayant une teneur en eau supérieure à l'état SSS

Figure I.2 Détermination de l'état SSS pour un sable.

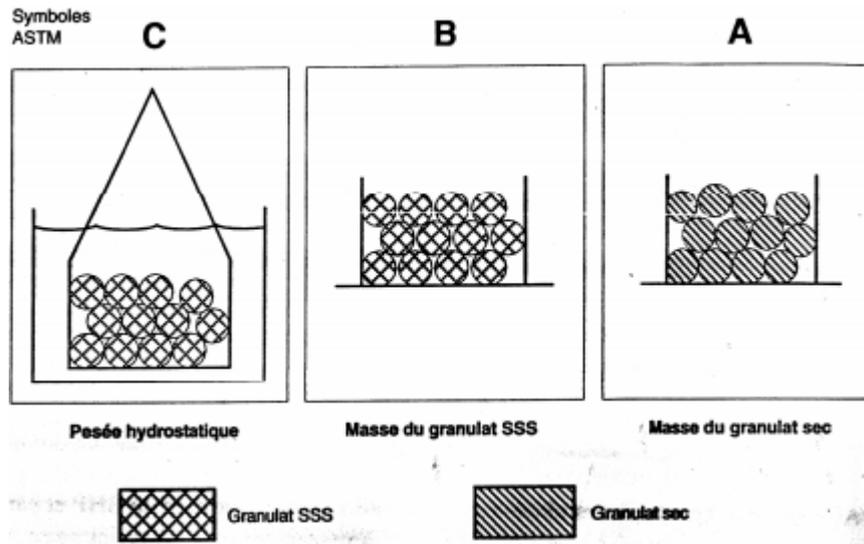


Figure I.3 Représentation schématique de la mesure de l'absorption et de la densité d'un gros granulat à l'état SSS.

I.2.1.2 Humidité et teneur en eau

L'état SSS d'un granulat représente donc un état de référence quand on formule un béton parce que cet état établit une différence très claire entre deux types d'eau que l'on rencontre dans un granulat. Le premier type est l'eau absorbée par le granulat qui ne contribue pas à l'affaissement du béton ou à sa résistance puisqu'elle ne participe pas la réaction d'hydratation. Quand la teneur en eau d'un granulat est inférieure à la quantité d'eau absorbée à l'état SSS, le granulat absorbe une certaine quantité d'eau de gâchage. Cette quantité d'eau absorbée par les granulats contribue alors la diminution de l'affaissement du béton, Le deuxième type d'eau se rencontre lorsque la teneur en eau d'un granulat est plus élevée que la quantité qu'il absorbe à l'état SSS : le granulat apporte alors une certaine quantité d'eau dans le bêtton (**Figure I.4**). Dans un tel cas, si l'on ne corrige pas la quantité d'eau de gâchage, on augmentera à la fois le rapport E/L et l'affaissement. Par conséquent, il faut modifier la quantité d'eau de gâchage de façon à pouvoir maintenir la valeur du rapport E/L et conserver l'affaissement.

La différence entre la quantité d'eau totale contenue dans un granulat, E_{tot} , et la quantité d'eau qu'il contient à l'état SSS, E_{abs} , correspond à l'humidité du granulat et elle est noté par fois sous la forme E_h '. L'humidité d'un granulat peut être négative si la quantité d'eau totale contenue dans le granulat est inférieure à la quantité d'eau absorbée à l'état SSS, ce qui se produit fréquemment dans le cas des gros granulats en période estivale.

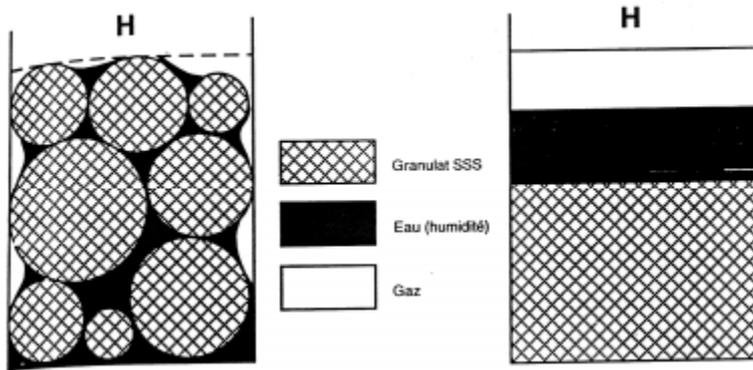


Figure I.4 Représentation schématique d'un granulat mouillé

Par exemple, si 1000 kg de gros granulats qui ont une absorption E_{abs} égale à 0,8 % sont absolument secs, $E_{tot} = 0$, par conséquent $E_h = - 0,8 \%$ et 8 litres d'eau seront absorbés (au maximum) par le gros granulat lors du malaxage du béton. Cette quantité d'eau va influencer de façon significative la perte d'affaissement de ce béton durant son transport si l'on n'ajuste pas la teneur en eau de gâchage parce que l'absorption de ces 8 litres d'eau n'est pas instantanée.

Si le même gros granulat est exposé à un orage et qu'il a cette fois-ci une teneur en eau de 1,8 %, $E_h = 1,0 \%$, le gros granulat apporte ainsi 10 litres d'eau au béton. Si l'on ne fait pas de correction dans les proportions du béton, cette eau supplémentaire aura un effet désastreux sur l'affaissement, la résistance à la compression et la perméabilité.

La teneur en eau totale, E_{tot} est définie comme suit :

$$E_{tot} = \frac{H-A}{A} * 100$$

H : Masse des granulats humides.

A : Masse des granulats secs.

I.2.1.3 Teneur en eau absorbée d'un granulat (E_{abs}) :

L'absorption d'un granulat, est égale à :

$$E_{abs} = \frac{B - A}{A} * 100$$

B : Masse des granulats à l'état SSS.

A : Masse des granulats secs

I.2.1.4 Humidité d'un granulat (Eh) :

L'humidité d'un granulat Eh est égale à :

$$E h = E \text{ tot} - E \text{ abs}$$

Etot : La teneur en eau totale.

Eabs: L'absorption d'un granulat

I.2.1.5 Densité d'un granulat (SSS) :

La densité SSS d'un granulat correspond à la densité du granulat lorsqu'il est à l'état SSS. La (Figure II.3) montre comment déterminer la densité SSS d'un granulat :

$$D_{SSS} = \frac{B}{B-C}$$

B : Masse des granulats à l'état SSS.

C : Pesée hydrostatique des granulats

La densité exprime combien de fois un granulat est plus dense que l'eau. L'application stricte du principe d'Archimède démontre que c'est bien la densité SSS qui doit être calculée pour connaître le volume réellement occupé par un granulat dans 1 m³ de béton (Aitcin, 1971).

La densité, d_c , du ciment Portland ou de tout autre ajout cimentaire peut être calculée selon la méthode ASTM C188 en utilisant l'expression :

$$D_c = \frac{A}{A - C}$$

A : Masse de ciment sec.

C : Pesée hydrostatique du ciment

I.2.1.6 Rapport eau/liant :

On peut trouver le rapport E/L en utilisant la figure I.5 pour des bétons ayant une résistance à la compression donnée à 28 jours. Par suite des variations de résistance dues aux différences des liants Le fuseau de la figure I.5 donne une gamme relativement étendue de rapport eau/ciment 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

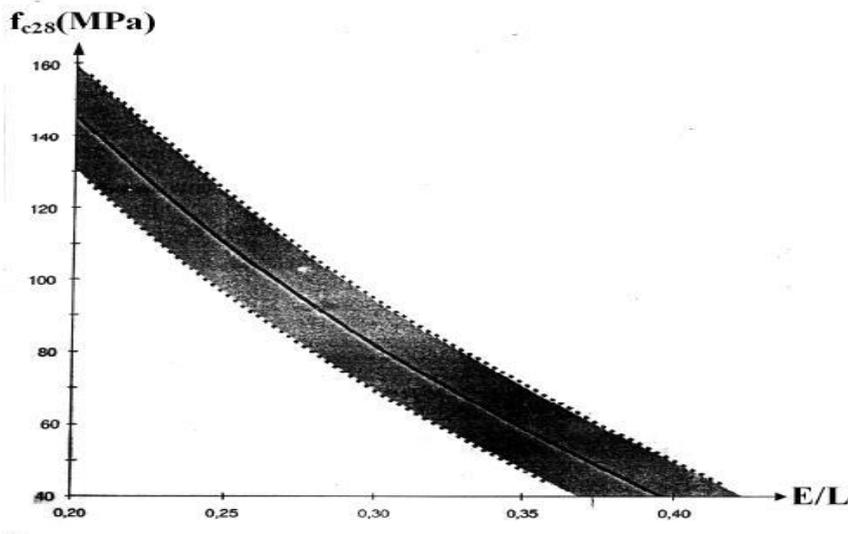


Figure I.5 Relation proposée entre le rapport E/L et la résistance à la compression

I.2.1.7 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 super plastifiant 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 super plastifiant ou, inversement, un dosage en eau plus élevé et un dosage en super plastifiant plus faible. Du 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 super plastifiant. 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 super plastifiant pour obtenir un affaissement élevé, mais il ne faudra pas s'étonner alors de 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 la quantité de super plastifiant est d'utiliser un plan d'expérience (Rougeron et Aïtcin, 1994). La Figure I.6 présente une approche simplifiée, basée sur le concept de point de saturation. Pour calculer une formulation robuste, on peut ajouter 5L/m³ à toutes les valeurs présentées à la

Figure I.6. Lorsque le point de saturation du super plastifiant n'est pas connu, on suggère de commencer avec une quantité d'eau de malaxage égale à 145 L /m³

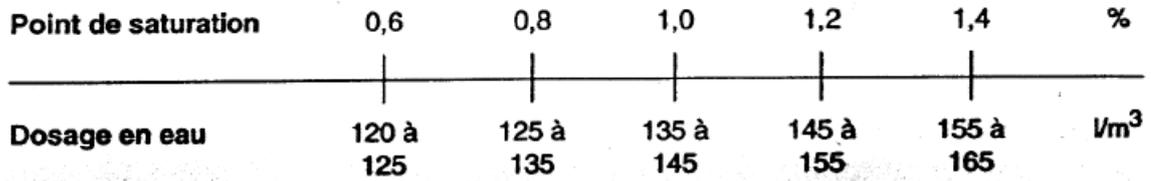


Figure I.6 Détermination du dosage en eau

I.2.1.8 Dosage en super plastifiant :

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

I.2.1.9 Dosage en gros granulat :

Le dosage en gros granulat peut être déduit de la figure I.7 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/m³.

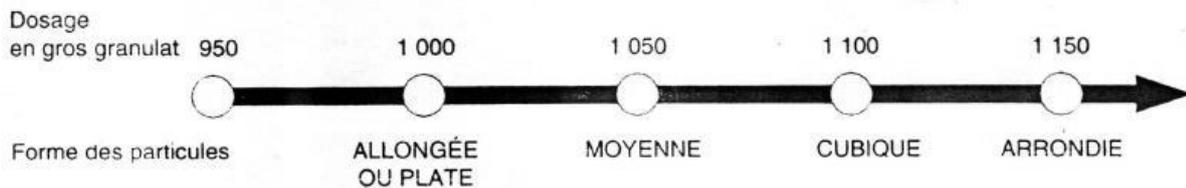


Figure I.7 Dosage en gros granulat

I.2.1.10 Teneur en air :

Les BHP qui sont utilisés dans des environnements où il n'y a pas de cycle de gel dégel n'ont évidemment pas besoin de contenir de l'air entraîné, 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

Quand on fabrique des BHP qui ont très faibles rapports eau/liant, on a souvent observé que les combinaisons ciment-super plastifiant n'entraînent pas toujours la même quantité d'air et que certains bétons ont tendance à entraîner beaucoup plus d'air que d'autres

L'expérience a démontré qu'il était assez difficile de fabriquer des BHP qui contiennent moins de 1% d'air piégé et que, dans les pires des cas, la teneur en air piégé peut être aussi élevée que de

3%. Par conséquent, certains auteurs suggèrent d'utiliser une valeur de 1.5% comme valeur initiale de la quantité d'air piégé

Tous les calculs nécessaires à la formulation d'un BHP sont présents sur une seule feuille de calcul (Figure I.8).

II.3.2.6 Feuille de calcul :

Tous les calculs nécessaires à la formulation d'un BHP sont présents sur une seule feuille de calcul (Figure I.8). 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 ces 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 les meilleures informations disponibles. Dans la partie médiane de la feuille, on trouve les calculs relatifs au dosage en super plastifiant.

La feuille de calcul utilise les symboles suivants :

dc: densité du ciment ou des ajouts cimentaires

dsss: densité des granulats à l'état saturé superficiellement sec

Eabs : quantité d'eau absorbée dans les granulats (en pour cent)

Etot: teneur en eau totale des granulats (en pour cent)

Eh: humidité des granulats (en pour cent) : $Eh = Etot - Eabs$

dsup: densité du super plastifiant liquide

S : teneur en solides du super plastifiant (en pour cent)

Msol: masse de solides dans super plastifiant

d : dosage du super plastifiant exprimée sous forme de pourcentage de la masse de solide par rapport à la masse de matériaux cimentaires.

Vliq: volume de super plastifiant liquide

VE: volume d'eau dans le super plastifiant

Vsol: volume de solides dans le super plastifiant

E: masse d'eau en kg/m³ dans le béton

L: masse de liant par mètre cube de béton

Annexes

Composition d'un béton à haute performance

La méthode de formulation de l'université de Sherbrooke

GACHEE :

F_{c28} MPa

COMPOSITION D'UN BHP

	G_c	%
ciment		
cendre		

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

$$E_h = E_{tot} - E_{abs} \quad M = M_{SSS}(1 + E_h)$$

SUPERPLASTIFIANT					
Densité (G_{sup})	Teneur en solides (s) (%)	$M_{sol} = c * d / 100$	$V_{liq} = M_{sol} * 100 / s * G_{sup}$	$V_E = V_{liq} * G_{sup} * (100 - s) / 100$	$V_{sol} = V_{liq} - V_E$
		[15]	[E] [24]	[F] [21]	[G] [11] [H]

Matériaux	1		2	3	4	5	6	
	Teneur Kg/m3		Volume L/m3	Dosage état SSS kg/m3	Correction D'humidité L/m3	Composition		
	1 m3	Gâchée d'essais						
Eau	[1]	[2]	[2]	[2]		[23]	[25]	
Ciment	E/L = 0.	[3]	[4-1]	[8-1]	[4-1]	[4-1]	[26-1]	
			[4-2]	[8-2]	[4-2]	[4-2]	[26-2]	
			[4-3]	[8-3]	[4-3]	[4-3]	[26-3]	
Gros granulat	[5]		[9]	[5]	[18]	[17]	[27]	
Granulat fin			[13]	[14]	[20]	[19]	[28]	
Air	[6]	POURCENTAGE	[10]	0				
		%						
Super plastifiant	[7]	%	[11]	[15]	[21]	-	[24] V_{sup}	[29]
Total			[12]	[16]	[22]		[50]	

Figure I.8 Feuille de composition d'un BHP

Annexes

Pour faciliter les corrections à apporter à la teneur en eau tenir compte de la quantité d'eau contenue dans le super plastifiant, on utilise les différentes équations que l'on retrouve dans la section médiane de la feuille de calcul.

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

Les paragraphes ci-dessous expliquent les calculs détaillés qu'il faut effectuer pour remplir chacune des cases de la figure I.8.

Case1: Reporter la valeur du rapport E/L telle que choisie à la figure I.5

Case2: Ecrire la quantité d'eau nécessaire, et recopier cette valeur dans les colonnes 1,2 et 3 où l'on retrouve la case 2.

Case3: calculer la masse de liant.

Case 4-1,4-2,4-3: calculer la masse de chaque ajout cimentaire nécessaire.

Case5: Reporter la masse un gros granulat trouvé à la figure.

Case6: Ecrire la quantité d'aire piégée que l'on prévoit obtenir dans le BHP.

Case7: Ecrire la quantité de super plastifiant 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 granulat fin 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 déjà sélectionnés de façon à trouver le volume restant pour le granulat fin, ce qui se fait dans la colonne 2.

Case 8-1, 8-2 et 8-3: calculer les volumes des différents ajouts cimentaires.

Case9: calculer le volume de gros granulat.

Case10: Multiplier la quantité d'air par 10 pour obtenir le volume d'air piégée en $1/\text{m}^3$.

Case11: calculer le volume V_{sol} .

Case12: inscrire la somme de tous les volumes déjà calculés.

Case13: calculer le volume de granulat fin en $1/\text{m}^3$.

On peut alors calculer dans la colonne 3 la masse de granulat fin et la masse volumique du béton

Case14: calculer la masse de granulat fin.

Case15: calculer la masse de solides dans le super plastifiant Msol.

Case16: calculer le totale de toutes les masses, pour obtenir la masse volumique du béton.

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.

Case17: Multiplier la masse SSS du gros granulat par $(1+Eh/100)$.

Case18: Soustraire la valeur trouvée à la case 17 de la valeur de la case 5.

Case19: Calculer la masse SSS du granulat fin

Case20: Soustraire la valeur apparaissant dans la case 19 de celle apparaissant dans la case 14. (Écrire la valeur en signe négatif)

Case21: Ecrire la quantité d'eau contenue dans le super plastifiant (le signe négatif apparaît déjà dans cette case).

Case22: Ajouter algébriquement toutes les corrections d'eau.

La composition finale de 1m³ de béton avec des granulats humides est maintenant calculée dans la colonne 5.

Case23: Ajouter la correction de l'eau.

Case24: Ecrire le dosage en super plastifiant Vliq.

Gâchée d'essais : (Colonne 6) Il nécessaire de fabrique de (x) kg de béton, ce qui reprisant $(x)/\text{case16} = (f)$ m³ donc toutes les valeurs de la colonne (5) doivent être multipliées par (f).

Case25 à 29 : Multiplier les valeurs de la colonne 5 par le facteur f.

Case30: Calculer la masse de la gâchée d'essai en additionnant les masses des différents ingrédients du béton que l'on retrouve dans les cases 25 à 29. Vérifier les calculs en multipliant le résultat de la case16 par f : le résultat devrait être le même que celui qui est inscrit dans la case30.

II. Autres méthodes de formulation

Il y a plusieurs autres méthodes de formulation des BHP et même, dans certains cas, des logiciels sont disponibles (WeIch, 1962 ; Hughes, 1964 ; Blick et coil, 1974; Peterman et CalTasquillo, 1986; Haug et Sandvik, 1988; Addis et Alexander, 1990; de Lauard, 1990; Mehta et Aitcin, 1990; Domone et Soutsos, 1994 ; GutielTez et Canovas, 1996 ; de Larrard, 1999). Pour montrer la diversité de ces approches, l'auteur commente brièvement trois de ces méthodes, ce qui ne signifie pas que lei ; autres ne sont pas aussi valables que celles présentées ici.

Ces trois méthodes sont celles proposées par le comité ACI 363 (1993) sur les bétons à haute résistance, la méthode proposée par de Lauard en 1990, qui est maintenant disponible dans sa

version informatique BETONLAB (de Lauard et coil., 1996 ; Sedran et de Lauard, 1996) et la méthode simplifiée présentée par Mehta et Aikin (1990) [3].

- La méthode de L'Université de Sherbrooke.
- Méthode suggérée par le comité ACI 363 (1993).
- Méthode proposée par de Larrard (dite des coulis du LCPC en 1990).
- Méthode présentée par Mehta et Aitcin(1990).

On présente brièvement les méthodes de formulation

II.1.1 Méthode suggérée par le comité ACI363 sur les bétons a haute résistance

La méthode de formulation d'un BHP proposée par le comité ACI 363 (1993) comporte neuf étapes.

Etape 1 - Affaissement et choix de la résistance nécessaire

Un tableau suggère la valeur de l'affaissement pour des bétons contenant ou non un super-plastifiant. La première valeur de l'affaissement est de 25 à 50 mm avant que l'on ne rajoute le super-plastifiant de façon à assurer une quantité suffisante d'eau dans le béton.

Etape 2 - Sélection de la taille maximale du gros granulat

La méthode suggère d'utiliser des gros granulats de 19 ou 25 mm de diamètre pour des bétons qui ont une résistance supérieure à 65 MPa et de 10 à 13 mm pour des bétons qui ont une résistance supérieure à 85 MPa. Pour une résistance à la compression comprise entre 65 et 85 MPa, la méthode suggère d'utiliser des granulats ayant un diamètre maximal de 25 mm quand les granulats sont de très bonne qualité.

Comme dans le cas des bétons usuels, la taille maximale du gros granulat ne doit pas dépasser un cinquième de la plus petite distance entre les coffrages, un tiers de l'épaisseur d'une dalle et les trois quarts de la distance libre entre deux armatures au câbles de précontrainte.

Etape 3 - Sélection de la quantité de gros granulat

Cette méthode suggère que la quantité optimale de gros granulats, exprimée sous forme de pourcentage de la masse volumique pilonnée à sec, soit de 0,65, 0,68, 0,72 et 0,75

pour des gros granulats ayant des tailles maximales de 10, 13, 20 et 25 mm respectivement. La masse volumique pilonnée SSS est mesurée selon la norme ASTM C29. Ces valeurs sont données pour des bétons qui contiennent un sable qui a un module de finesse qui varie entre 2,5 et 3,2.

Etape 4 - Estimation de la quantité d'eau libre et de la teneur en air

Un tableau donne une valeur approximative des quantités d'eau et d'air entraîné nécessaires pour confectionner des BHP avec des granulats qui ont différentes tailles nominales. Les quantités

approximatives d'eau sont données pour un granulats fin qui a un rapport de vide de 35 %. Si cette valeur est différente de 35 %, il faut alors ajuster la teneur en eau à partir d'un tableau en additionnant ou en soustrayant 4,8 kg/m' pour chaque augmentation de 1 % de la teneur en vide du sable.

Etape 5 - Sélection du rapport eau/liant

Deux tableaux suggèrent les valeurs du rapport eau/liant pour des bétons super-plastifiés qui ont des résistances spécifiées à 28 et à 56 jours. Ces valeurs sont basées sur les valeurs de la taille maximale du gros granulats et sur la résistance à la compression du béton.

Etape 6 - Teneur en ciment

La masse de ciment est calculée en divisant la masse d'eau libre par le rapport eau/liant.

Etape 7 - Premier essai avec le ciment

A cette étape, on évalue la qualité du béton fabriqué en utilisant seulement du ciment sans aucun ajout cimentaire. La quantité de sable nécessaire est calculée en utilisant la méthode des volumes absolus décrite précédemment.

Etape 8 - Autres gâchées d'essai avec des variations du volume de ciment

Deux dosages en ajout cimentaire sont suggérés lorsque l'on veut remplacer une certaine quantité de ciment. La quantité maximale de ciment qui peut être remplacée est fixée pour les cendres volantes et les laitiers. Par contre, aucune limite n'est fixée pour la fumée de silice puisque cette méthode est valable pour une résistance maximale de 85 MPa. Ces limites sont de 15 à 25 % de la masse de ciment pour une cendre volante de classe F, 20 à 35 % pour une cendre volante de classe C et 30 à 50 % pour un laitier. Ici encore, la quantité de sable est calculée selon la méthode des volumes absolus.

Etape 9- Gâchées d'essai

La masse des granulats et la quantité d'eau de gâchage sont ajustées pour tenir compte de l'humidité du granulats. On fait une première gâchée d'essai avec le ciment seulement. D'autres gâchées d'essai peuvent être faites dans lesquelles on remplace une certaine quantité de ciment par des cendres volantes et du laitier. La formulation du béton est ensuite ajustée pour atteindre les exigences physiques et mécaniques désirées.

II.1.2 Méthode des coulis du LCPC

Cette méthode est basée sur deux outils 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 Féret (Féret, 1892) dans laquelle on utilise un certain nombre de paramètres :

$$f'c = \frac{Kg * Rc}{\left[1 + \frac{3,1 * \frac{e}{c}}{1,4 - 0,4 \left(-\frac{11s}{c} \right)} \right]}$$

Où

: Résistance à la compression du béton mesurée sur cylindre a 28 jours ' c f

e, c, s : Masses 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).

Rc : résistance à la compression du béton a 28jours (c'est-à-dire la résistance d'un cube normalise fabrique 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 mono-disperses de dimension telle que $d_j > d_{j+1}$, la viscosité de la suspension est égale a :

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

Φ_i : Volume occupé par l'énème 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 mono disperse comme une fonction de sa concentration solide

A partir de ces deux équations, on fait alors les hypothèses suivantes :

- La résistance du béton fabrique avec un ensemble d'ingrédients est essentiellement contrôlée par la nature de la pâte liante ;

- La maniabilité du béton, quand on a fixé sa résistance, est une combinaison de deux termes, le premier dépend de la concentration de la pâte liante et le second de la fluidité de cette pâte.

L'idée principale de cette méthode est d'effectuer plusieurs essais sur des coulis afin d'étudier leur rhéologie et sur des mortiers pour étudier leurs propriétés mécaniques.

La première étape consiste donc à proportionner un béton contenant une grande quantité de super-plastifiant avec la quantité de ciment correspondante et la plus faible teneur en eau possible : Cette teneur en eau est ajustée pour obtenir la bonne maniabilité que l'on mesure avec un appareil dynamique.

La deuxième étape consiste à mesurer le temps d'écoulement de la pâte de ce béton, lorsqu'il présente des caractéristiques satisfaisantes, en utilisant un cône Marsh.

La troisième et la quatrième étape consistent à ajuster la quantité de liant et la quantité de super-plastifiant jusqu'à ce que le temps d'écoulement ne décroisse plus. La quantité de super-plastifiant à ce moment correspond au point de saturation.

La cinquième étape permet d'ajuster la teneur en eau pour obtenir la même maniabilité que celle du béton de référence.

La sixième étape consiste à suivre la variation du temps d'écoulement dans le temps. Si le temps d'écoulement augmente beaucoup trop, on peut ajouter un agent retardateur.

La septième étape correspond à la prédiction de la résistance du BHP en utilisant la formule de Féret pour évaluer la résistance à la compression de différents mortiers.

A la huitième étape, un BHP est fabriqué et sa composition est légèrement modifiée si nécessaire de façon à obtenir la maniabilité et la résistance voulues. Un exemple de calcul est proposé par de Larrard (1990). **BETONLAB** est un logiciel de simulation de formules de béton, développé à des fins pédagogiques, qui permet de « dégrossir » une formule ou d'évaluer les propriétés d'une formule existante, mais pas vraiment de formuler, car il ne prend pratiquement pas en compte les caractéristiques des matériaux de l'utilisateur (à part quelques paramètres de base comme la classe du ciment ou la taille maximale du gravillon). Par contre, il permet à l'utilisateur d'acquérir très vite une compréhension intuitive du système béton et de son fonctionnement

Par contre, **BETONLABPRO** est un véritable outil d'aide à la formulation (Sedran et de Larrard, 2000). Il est basé sur un ensemble de modèles mathématiques - dont le modèle d'empilement compressible (**MEC**) déjà cité - modèles dont la fonction est de prédire les propriétés d'un béton à partir de certaines caractéristiques des constituants, et des proportions de ces constituants dans

la formule (de Larrard, 1999 ; de Larrard, 2000). Ces modèles sont liés les uns aux autres, et, à l'aide d'un module d'optimisation (*solveur*), on peut optimiser la formule de béton sur la base d'un cahier des charges pratiquement quelconque. En termes d'adéquation à un cas réel, on a donc fait un grand progrès, puisqu'on prend en compte les matériaux envisagés, ainsi que les contraintes particulières du projet considéré. La formule suggérée par l'ordinateur doit cependant faire l'objet d'essais en laboratoire, et d'éventuels ajustements. Il a été montré que cette méthode novatrice est compatible avec la plupart des méthodes empiriques actuelles, mais qu'elle les dépasse, notamment par la variété des bétons auxquelles elle s'applique (depuis les bétons de bâtiments jusqu'aux BHP, en passant par les bétons autoplaçants, les bétons compacts au rouleau ou encore les bétons de sable).

II.1.3 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 à 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 compris 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

Un tableau présente cinq catégories de béton ayant des résistances à la compression comprise entre 60 et 120 MPa.

Etape 2 - Teneur en eau

La taille maximale du gros granulat et l'affaissement ne peuvent plus être considérés pour sélectionner la quantité d'eau de gâchage puisque l'on utilise un granulat de 10 à 15 mm de taille maximale et parce que l'affaissement désiré (200 à 250 mm) peut être obtenu en contrôlant le dosage en super-plastifiant. La quantité d'eau est spécifiée pour les différentes catégories de résistance.

Etape 3 - Sélection du liant

Le volume de la pâte liante est égal à 35 % du volume total du béton. Les volumes d'air piégés ou entrainés et de l'eau de gâchage sont soustraits du volume total de la pâte de ciment pour calculer le volume restant de liant. Le liant peut être constitué de l'une des

Trois combinaisons suivantes :

100 % de ciment Portland ;

75 % de ciment Portland et 25 % de cendres volantes ou de laitier par volume ;

75 % de ciment Portland, 15 % de cendres volantes et 10 % de fumée de silice par volume.

Un tableau donne les fractions de chacun des liants pour chacune des catégories de résistance.

Etape 4 - Sélection du gros granulat

La quantité totale de granulat doit être égale à 65 % du volume du béton. Pour les catégories de résistance A, B, C, D et E, les volumes respectifs de granulat fin et de gros granulat suggérés sont 2,00 : 3,00 ; 1,95 : 3,05 ; 1,90 : 3,10 ; 1,85 : 3,15 et 1,80 : 3,20 respectivement.

Etape 5 - Calcul des masses

La masse volumique du béton peut être calculée en utilisant les fractions de volume du béton et la densité de chacun des constituants du béton. En règle générale, les densités du ciment Portland, d'une cendre volante de classe C, du laitier de haut fourneau et de la fumée de silice sont respectivement de 3,14, 2,50, 2,90 et 2,10. La densité d'un sable naturel de silice, d'un gravier de masse volumique normale ou d'une roche concassée est comprise dans une plage de 2,65 à 2,70 respectivement. Un tableau présente les proportions calculées pour chaque catégorie de béton et de résistance suggérée par cette méthode.

Etape 6 - Dosage en super-plastifiant

Pour la première gâchée, l'utilisation d'un dosage en super-plastifiant de 1 % par rapport à la masse de liant peut convenir. La masse et le volume de solution de super-plastifiant sont alors calculés en tenant compte du pourcentage de solides dans la solution et de la densité du super-plastifiant (pour un poly-naphtalène, on peut prendre une densité type de 1,20).

Etape 7 - Ajustement de la teneur en eau

Le volume d'eau inclus dans le super-plastifiant peut être calculé et doit être soustrait de la quantité d'eau de gâchage initiale. De la même façon, la masse d'eau contenue dans les granulats doit être calculée de façon à pouvoir modifier en conséquence le quantile d'eau de gâchage.

Etape 8 - Ajustement pour une gâchée d'essai

Par suite de toutes les suppositions que l'on fait pour sélectionner les proportions des matériaux, en général, on trouve qu'il faut modifier quelque peu les proportions de la première gâchée d'essai pour satisfaire les exigences de maniabilité et de résistance. Le type de granulat, la proportion de sable par rapport au granulat, le type de super-plastifiant et son dosage, le type et la combinaison d'ajouts cimentaires et la teneur en air du béton sont ajustés lors de la réalisation d'une série de gâchées d'essai.

FICHE TECHNIQUE CONFORME À LA NORME EN934-2

01-16



SUPERIOR 126

SUPERPLASTIFIANT POUR BÉTON - HAUT RÉDUCTEUR D'EAU - MAINTIEN RHÉOLOGIQUE - AVEC EFFET RETARD



DESCRIPTION

SUPERIOR 126 est un adjuvant super plastifiant à base de poly-carboxylates de nouvelle génération, qui permettent de réaliser des bétons très fluides avec des rapports E/C très réduits.

Il est compatible avec tous les types de ciment.

Par son action dispersante et la bonne synergie de ses composants, il confère au béton un maintien prolongé de l'ouvrabilité avec des bonnes caractéristiques de compacité et de résistances mécaniques.

PROPRIETES CHIMIQUES ET PHYSIQUES

Etat physique :.....Liquide
 Couleur :.....Brun
 Densité (g/cm³, à 20 °C) :.....1,13 (± 0,03)
 PH (20 °C) :.....5,5 (± 1)
 Extrait sec :.....38 % (± 2 %)
 Teneur en chlorures :.....≤ 0,1 %

CARACTERISTIQUES

Le **SUPERIOR 126** est particulièrement recommandé pour la fabrication de béton à faible rapport E/C, à très long maintien d'ouvrabilité. Il présente une excellente imperméabilité aux bétons.

Le **SUPERIOR 126** a été formulé pour un long maintien de l'ouvrabilité avec des résistances élevées à la compression et flexion à 28 jours. Il diminue le retrait hygrométrique, avec des parements parfaits et une meilleure durabilité.

DOMAINES D'APPLICATION

- Bétons transportés sur de longues distances.
- Bétons de fondations (parois moulés, pieux...).
- Bétons pompés.
- Bétons de Génie- Civil (ouvrages d'art, tunnels).
- Béton prêt à l'emploi.

DOSAGE

- Le dosage de **SUPERIOR 126** varie entre 0,6 à 2 % du poids du ciment soit de 0.6 à 1.8 litre pour 100 Kg de ciment.
- Le dosage optimal est déterminé en fonction des caractéristiques désirées, selon la composition du béton. Des essais d'optimisation sur site sont conseillés.
- **SUPERIOR 126** présente un léger effet retardateur, quand le dosage est supérieur à 1,2 %.

MODE D'EMPLOI

- L'addition du **SUPERIOR 126** ne doit jamais se faire sur un béton sec avant l'ajout de l'eau (Il serait adsorbé par les agrégats et le sable d'où une inefficacité avec le ciment).
- Il est conseillé d'ajouter le **SUPERIOR 126** après l'ajout des composants du béton et environ 90 % de l'eau de gâchage nécessaire.
- Terminer le mélange en ajoutant graduellement l'eau restante (10 %) jusqu'à l'obtention de la consistance désirée. Les dosages sont évalués au poids du ciment.

CONDITIONNEMENT

- Bidon de 20 Litres.
- Fût de 216 Litres.
- Cubitainer de 1000 Litres.

VALIDITE

12 mois dans son emballage hermétiquement fermé, stocké entre 5°C et 35°C et à l'abri du soleil.

PRECAUTION D'EMPLOI

Se référer à la fiche de données de sécurité.

DOCUMENT DE REFERENCES

PV d'essais établi par le CNERIB.



Siège & Usine :
 B.P. 203 Zone Industrielle de Sidi-Bel-Abbès
 Tél. : + 213 (0) 48 70 34 63
 Fax : + 213 (0) 48 70 34 62
 E-mail : info@teknachem.com
 WWW.TEKNA-CHEM.COM

Antenne d'Alger :
 Rue de la Soummam lot N° 06 Z.I. Oued Smar Alger
 Tél./Fax : + 213 (0) 23 92 05 62

Antenne de Sétif :
 Zone d'Activité Artisanale 6^{ème} Tranche - Sétif
 Tél. : + 213 (0) 36 93 90 10 - Fax : + 213 (0) 36 93 90 60

Les informations contenues dans la présente fiche technique, bien que représentant le stade le plus avancé de la connaissance, ne dispensent pas l'utilisateur de procéder à des tests préliminaires dans ses propres conditions d'emploi ou à faire appel à l'assistance technique de la société. Par conséquent **TEKNACHEM ALGERIE SARL** décline toutes responsabilités pour l'emploi inapproprié du produit.



pour une fleur en béton



المجمع الصناعي لإسمنت الجزائر
GROUPE INDUSTRIEL DES CIMENTS D'ALGERIE
SOCIETE DES CIMENTS D'AIN EL KEBIRA
« S.C.A.E.K »

S.P.A au Capital Social de : 2 200 000 000,00 DA ش.ذ.أ. - رأسمالها الإجمالي:

N° identification fiscale : 0998 19008236319 / N° Article d'imposition : 1902.20.10.011 / N° Registre de commerce : 98 B 0082363

N/ Réf.646 /SCE.C.Q/DP/SCAEK/19

Ain El Kebira le: 02/04/2019

Reçu 7/4/2019

FICHE TECHNIQUE CIMENT « ligne 2 »

MOIS : Février 2019

CEM I 42.5 N-LH/SR5

Conformément à la norme NA 442 édition 2013 « NF EN 197-1 :2012 »

COMPOSITIONS CHIMIQUES Norme (EN 196-2)			Essais physiques Norme (NF EN « 196-3 :2017 et 196-6 :2012 »)		Garantie NA 442 : 2013	Mesures
ELEMENTS		Mesures	P.S	(g / Cm ³)	/	3.18
SiO ₂ -T	%	21.46	SSB	cm ² /g	/	3517
Al ₂ O ₃	%	4.16	Début De Prise	minute	≥ 60	204
Fe ₂ O ₃	%	4.95	Fin De Prise		/	327
CaO-T	%	63.4	Expansion A. Chaud	m. mètre	≤ 10	0
MgO	%	1.43				
SO ₃	≤ 3%	1.66	Refus 45 µ	%	/	6.28
K ₂ O	%	0.33	Consistance Normale	%	/	26.49
Na ₂ O	%	0.06	Chaleur hydratation Norme (EN 196-8)	J/g	≤ 270	218.5
Cl	≤ 0,1%	0.00				
P.A.F.	≤ 5 %	1.94				
CaO Libre (PT207 CERILH 1970)	%	1.23				
R.Insoluble	≤ 5 %	1.46				
COMPOSITION POTENTIELLE DU CLINKER (BOGUE)			CARACTERISTIQUES MECANIQUE Norme (NF EN 196-1 : 2016)			
C ₃ S	%	65.59	R. Flexion MPa	02 JOURS	/	4.5
C ₂ S	%	11.97		28 JOURS	/	9.0
C ₃ A	≤ 5%	1.86	R. Compression MPa	02 JOURS	Li ≥ 10	21.1
C ₄ AF	%	15.90		28 JOURS	Li ≥ 42.5	59.2

Le chef de service contrôle de qualité

K. BELARBI
 Chef de Service
 Contrôle Qualité

CB

MEDAPLAST HP

Conforme à la norme NFP 18-502

Ajout à base de micro silice

DESCRIPTION

Le MEDAPLAST HP est un ajout en poudre pour confection de bétons à hautes performances (BHP). Il permet :

- d'obtenir des bétons durables à résistances mécaniques élevées
- d'obtenir des bétons résistants aux agressions chimiques et atmosphériques

DOMAINES D'APPLICATION

- Bétons à hautes performances
- Autoroutes, pistes d'aéroport
- Ouvrages d'art, ouvrages hydrauliques
- Bétons très sollicités
- Bétons soumis aux impacts et aux chocs
- Bétons soumis à des milieux agressifs
- Bats industriels
- Sites

PROPRIÉTÉS

Grâce à ses propriétés le MEDAPLAST HP permet :

Sur béton frais :

- Améliorer la cohésion
- Éviter le ressuage et la ségrégation

Sur béton durci :

- Augmenter les résistances mécaniques
- Obtenir des bétons possédant une excellente imperméabilité
- Augmenter la résistance à l'érosion et à l'abrasion
- Obtenir des bétons résistants aux agressions chimiques
- Augmenter la durabilité du béton

L'ajout d'un super plastifiant est recommandé (MEDAPLAST SP, SP40) afin d'améliorer la fluidité du béton et de diminuer le rapport E/C. Le béton obtenu, une fois appliqué, ne présente aucun ressuage.

CARACTÉRISTIQUES

- Aspect Poudre
- Densité 0,5
- Composants :
 - SiO₂ > 85 (%)
 - SO₃ < 2,5 (%)
 - Cl⁻ < 0,2 (%)
- surface spécifique > 15 (m²/gr)
- Humidité perdue à 105°C < 1 (%)
- Taille des particules < 0,1 (microns)

MODE D'EMPLOI

Le MEDAPLAST HP est mélangé à sec avec les composants du béton, avant l'ajout de l'eau de gâchage, pendant 1 minute au moins. Après ajout de l'eau de gâchage mélanger encore pendant 2 minutes au minimum.

Mélanger ensuite jusqu'à homogénéisation du béton.

Il est nécessaire de procéder à une cure de plusieurs jours du béton obtenu (arrosage ou MEDACURE) surtout par temps chaud ou en présence de vents.

DOSE

Le dosage du MEDAPLAST HP varie de 5 à 10% du poids du ciment. Ce dosage dépend des performances recherchées.

CONDITIONNEMENT ET STOCKAGE

Le MEDAPLAST HP est conditionné en sacs de 2kg et 25 kg . Disponible aussi en Bigbag.

Délai de conservation :

Une année dans son emballage d'origine, à l'abri du gel et de la chaleur.

PRÉCAUTION D'EMPLOI

Manipulation non dangereuse.

Se référer à la Fiche de Données de Sécurité disponible sur : www.granitex-dz.com

Les renseignements donnés dans cette notice sont basés sur notre connaissance et notre expérience à ce jour. Il est recommandé de procéder à des essais de convenance pour déterminer le fourchette d'utilisation tenant compte des conditions réelles de chantier.



Zone Industrielle Oued Smar - BP85 Oued Smar - 16370 Alger
 Tél: (213) 021 51 65 81 & 82
 Fax: (213) 021 51 64 22 & 021 51 65 23
www.granitex-dz.com - E-mail: granitex@granitex-dz.com

