République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITÉ de Mohammed Seddik Ben Yahia - Jijel

PROJET DE FIN D'ETUDE

En vue de l'Obtention du Diplôme d'Ingénieur d'Etat en Génie Civil

Option : Voie et Ouvrages D'arts

Thème

L'effet des ajouts cimentaires (la fumée de silice et le laitier granulé) Sur les propriétés des Bétons A Hautes Performances

Présenté par :
BOUSSAYOUD Loukman

Encadré par :
Dr : Ben Messaoud.S

ꕥ Promotion 2020 ꕥ

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier ***ALLAH*** *le tout puissant qui nous a donner le courage et volonté pour réaliser ce modeste travail au long de ce semestre.*

J'ai eu le grand privilège d'être encadrer ***Dr Ben Messaoud .S*** *je la remercie pour sa modestie, son sérieux, ses conseils et son sens du devoir.*

Mes remerciements les plus sincères aux membres du jury qui nous en fait l'honneur de présider et d'examiner ce modeste travail.

Mes remerciements toutes les enseignants du département de génie civil et hydraulique de l'université de Jijel sans exception qui ont contribué à notre formation avec beaucoup de compétence et de dévouement.

Ainsi que toutes les personnes qui m'ont aidé et soutenu de près ou de loin.

Merci.

Dédicace

Rien n'est aussi beau à offrir d'un labeur qu'on dédie du fond du cœur à ceux qu'on aime et qu'on remercie en exprimant la gratitude et la reconnaissance durant toute notre existence.

Je dédie ce modeste travail :

A celle qui a attendu avec patience les fruits de sa bonne éducation, son affection,…A ma mère, ma mère, ma mère.

A celui qui m'a indiqué la bonne voie en me rappelant que la volonté fait toujours les grands hommes …à mon Père.

A tous mes frères et à toutes mes sœurs.

A tous mes amis chacun à son nom.

A tous mes enseignants.

A toute la promotion 2020.

III

III

Résumé :

Le béton à hautes performances (BHP) est un béton innovant qui trouve sa place dans les constructions modernes. Les nouvelles techniques de formulation et de conception du béton à hautes performances ont permis d'améliorer la durabilité et d'acquérir des propriétés mécaniques remarquables par rapport aux bétons conventionnels, grâce à l'amélioration de ses qualités rhéologiques et à sa porosité très limitée. Ceci a permisd'élargir son domaine d'emploi en particulier dans les milieux agressifs.

L'objectif de ce travail est quel sont les propriétés rhéologique et mécanique du béton à haute performance? Quel l'effet des ajouts (la fumée de silice et le laitier granulé) sur le BHP? Pour répondre sur les questions suivantes il faut l'étude expérimentale.

La première partie de ce travail est présente à une étude bibliographique. Elle comporte des généralités et des définitions sur les bétons à hautes performances, les propriétés mécaniques et physiques, finalement une notion de comportement mécanique du béton à haute performance.

La deuxième partie décrit en détail la caractérisation minéralogique, physique et mécanique des tous les matériaux utilisés. Est présent les différentes méthodes des formulations et les protocoles expérimentaux pour fabriquer les BHP.

La troisième partie est une présentation des résultats d'essais expérimentaux de l'influence des ajouts cimentaire la fumée de silice et le laitier granulé avec des quantités différent (BR, BHP 2FS, BHP 5FS, BHP 8FS, BHP 2FS 25L, BHP 5FS 10L) sur les propriétés des BHP à l'état frais et a l'état durcis. On remarqué les mélanges des bétons (BHP 8FS, BHP 5FS 10L) avec un rapport E/C = 0.25 donne les meilleures résistances à la compression de 82.15 et 79.83 MPa à 28 jours.

Mots clés :

Béton à hautes performances, durabilité, résistance mécanique, la fumée de silice, le laitier granulé, formulation.

Abstract :

High performance concrete (HPC) is an innovative concrete which finds its place in modern constructions. New techniques for formulating and designing high-performance concrete have made it possible to improve durability and acquire remarkable mechanical properties compared to conventional concrete, thanks to the improvement in its rheological qualities and its very limited porosity. This made it possible to broaden its field of use, especially in aggressive environments.

The objective of this work is what are the rheological and mechanical properties of high performance concrete? What effect do additions (silica fume and granulated slag) have on BHP? To answer the following questions requires experimental study.

The first part of this work is present in a bibliographic study. It includes generalities and definitions on high performance concrete, mechanical and physical properties, and finally a notion of mechanical behavior of high performance concrete.

The second part describes in detail the mineralogical, physical and mechanical characterization of all the materials used. Present are the different methods of formulations and experimental protocols to manufacture BHP.

The third part is a presentation of the results of experimental tests of the influence of cement additions, silica fume and granulated slag with different quantities (BR, HPC 2 SF, HPC 5SF, HPC 8SF, HPC 2SF 25S, HPC 5SF 10S) on the properties of fresh and hardened BHP. We note the concrete mixtures (HPC 8SF, HPC 5SF 10S) with an E / C ratio = 0.25 gives the best compressive strengths of 82.15 and 79.83 MPa at 28 days.

Keywords:

High performance concrete, durability, mechanical resistance, silica fume, granulated slag, formulation.

ملخص:

الخرسانة عالية الأداء(HPB)هي عبارة عن خرسانة مبتكرة تجد مكانها في الإنشاءات الحديثة جعلت، التقنيات الجديدة لتشكيل و تصميم الخرسانة عالية الاداء من الممكن تحسين المتانة و اكتساب خصائص ميكانيكية رائعة مقارنة بالخرسانة التقليدية،وذلك بفضل تحسين صفاتها ومساميتها المحدودة للغاية هذا ما جعل من الممكن توسيع مجال استخدامها خاصة في البيئات العدوانية.

الهدف من هذا العمل هو معرفة ما هي الخصائص الريولوجية و الميكانيكية للخرسانة عالية الأداء؟ما هو تأثير الاضافات دخان السيليكا والخبث الحبيبي على (BHP) ؟للإجابة على الأسئلة التالية يتطلب القيام بدراسة تجريبية.

الجزء الاول من هذا العمل يشمل دراسة مكتبية وهي تضم عموميات و تعريفات خاصة بالخرسانة عالية الاداء مع ذكر الخصائصالميكانيكية والفيزيائية، وأخيرا معرفة السلوك الميكانيكي للخرسانة عالية الأداء.

أما الجزء الثاني فيصف بالتفصيل الخصائص المعدنية والفيزيائية والميكانيكية لجميع المواد المستخدمة يوجد في الوقت الحاضر الطرق المختلفة لتركيبات والبروتوكولات التجريبية لتصنيع.

وفي ما يخص الجزء الثالث فهو عبارة عن عرض لنتائج الاختبارات التجريبية لتأثير أضافات الاسمنت ودخان السيليكاوالخبث الحبيبي بكميات مختلفة(BR،BHP2SF،SF5BHP،HPSF8B،

HPB 5SF10L ،HPB2SF 25L)على الخصائص كل من ال الطازجة والمتصلبة، نلاحظ أن الخلائط الخرسانية(HPB5SF10L،BHP8SF)مع نسبة(E/C=0.25)تعطي أفضل قوة ضغط تبلغ 82.15و79.83 ميجا باسكال في 28 يوما.

الكلمات المفتاحية:

خرسانة عالية الأداء، متانة، مقاومة ميكانيكية، أبخرة السيليكا، خبث حبيبي، صياغة.

Sommaire

Remerciements……...I

Dédicace……... II

Résumé…… III

Abstract…….....IV

ملخص.....V

Sommaire……...…VI

Liste des figures…….…….XI

Liste des tableaux…….....….X III

Liste des abréviations…….XV

Introduction générale……1

Chapitre I

Synthèse bibliographique

I.1Introduction……...3

I.2. Historique sur les bétons à haute performance……3

I.3. Modes et formulation des bétons à haute performance……...3

I.3.1. Définition d'un béton à haute performance….....3

I.3.2. Les caractéristique des bétons à haute performance……4

I.3.3. Formulation, constituants des bétons à haute performance……..4

I.3.4. Les étapes de la formulation…….4

I.3.5. L'évolutions des bétons à haute performance……...5

I.4. Les constituants du béton……....6

I.4.1. Le ciment……...6

I.4.1.1. Définition de ciment……6

I.4.1.2.Principe de fabrication du ciment…….6

I.4.1.3. Les constituants du ciment……..7
I.4.1.3.1. Le clinker……..7
I.4.1.3.2. Le gypse……8
I.4.1.3.3. Les additions minérales……8
I.4.1.3.3.1. Le laitier granulé de haut fourneau……....9
I.4.1.3.3.2. Les cendres volantes……..9
I.4.1.3.3.3. Les pouzzolanes naturelles ou naturelles calcinées…….10
I.4.1.3.3.4. Les fillers……..10
I.4.1.3.3.5. Le rôle des additions minérales…….10
I.4.1.4. La classification de ciment……11
I.4.2. Les granulats……...12
I.4.2.1. Définition des granulats……12
I.4.2.2. Les classe des granulats……12
I.4.2.2.1. Le gravier……13
I.4.2.2.2. Le sable……...13
I.4.2.2.3. Les fillers……13
I.4.3. L'eau de gâchage……13
I.5. Les adjuvants……14
I.5.1. Définition des adjuvants……..14
I.5.2. Le dosage en adjuvants par rapport au poids du ciment…….14
I.5.3. La classification des adjuvants……...15
I.5.3.1. Les plastifiants ou réducteurs d'eau……15
I.5.3.2. Les supers plastifiants……..16
I.5.3.2.1. L'intérêt de leur utilisation……16
I.5.3.2.2. Les utilisations des super plastifiants……16
I.5.3.2.3. La mécanisme de dispersion……...18

I.5.3.2.4. Les différents types de super plastifiant……..19
I.5.3.3. L'accélérateur de la prise……..…20
I.5.3.4. L'accélérateur du durcissement……..…20
I.5.3.5. Les retardateurs de la prise……21
I.5.3.6. Les entraîneurs d'air…….….21
I.5.3.7. Les hydrofuge de masse……....22
I.5.3.8. Les rétenteurs d'eau……..22
I.5.4. Contrôle est stockage des adjuvants……22
I.6. Les caractéristiques des bétons à haute performance……23
I.6.1. Les caractéristiques physiques……23
I.6.1.1. L'ouvrabilité……..23
I.6.1.2. L'imperméabilité…….....23
I.6.1.3. La porosité…….24
I.6.2. Les caractéristiques mécaniques…….25
I.6.2.1. La résistance à la compression……..25
I.6.2.2. La résistance à la traction…….……25
I.6.2.3. Le retrait……26
I.6.2.3.1. Définition du retrait……..…26
I.6.2.3.2. Les différents types du retrait……..……26
I.6.2.4. Le fluage……27
I.6.2.5. Le module d'élasticité……27
I.6.2.6. La plasticité……...…27
I.6.2.7. La perméabilité……..28
I.6.2.8. L'étanchéité……...28
I.6.2.9. La durabilité……..28
I.6.2.9.1. La résistance aux agents agressifs……...28

I.6.2.9.2. La résistance aux cycles de gel /dégel……..…28

I.6.2.9.3. La résistance à l'abrasion…….……28

I.7. Les applications des bétons à haute performance…….……29

I.7.1. Les ouvrage d'art……29

I.7.1.1. Le pont de Mila…….……29

I.7.1.2. Le pont de l'île de Ré (Charente-Maritime, France 1988)……30

I.7.1.3. Le pont de Normandie (Le Havre, France.2007)……...…30

I.7.2. Le bâtiment……...…31

I.7.2.1. La Pacific Tower (France)…….31

I.7.2.2. La Grande Mosquée Hassan II (Casablanca, Maroc. 1986)…….32

I.8. Les avantage des bétons à haute performance……..33

I.9. La mise en œuvre du BHP……34

I.10. Conclusion……...34

Chapitre II

Les caractéristiques des matériaux et formulation des BHP

II.1.Introduction…….....35

II.2. Le choix et sélection des constituants du BHP……35

II.3. Les caractéristiques des matières premières utilisent……..35

II.3.1. Le ciment……...35

II.3.2. Le super plastifiant……36

II.3.2.1. Le domaine d'utilisation……..37

II.3.2.2. Les propriétés du MDAFLOW30 au niveau du bêton frais et du bêton durci

…….....37

II.3.3. Les granulats……...…….38

II.3.4. La fumée de silice……41

II.3.5. Le laitier granulé……...41

II.3.6. L'eau de gâchage……..42
II.4.La formulation du béton d'étude……..……42
II.4.1. La méthode de formulation……..…...42
II.4.2. La méthode de l'université de Sherbrooke……..…43
II.4.3. Les formule des calculs……...47
II.4.4. Formulation du béton……..49
II.4.5. Le programme expérimental.....…….52
II.4.6. Fabrication des bétons, mise en place et conservation……...54
II.5. Conclusion……...55

Chapitre III

Analyse des résultats du plan d'expérimental

III.1. Introduction……56
III.2. Méthodologie adaptée pour les manipulations……...56
III.3. Comportement du béton à l'état frais……56
III.3.1. L'ouvrabilité du béton……..56
III.4. Comportement du béton à l'état durcis……..58
III.4.1. Essai de compression……58
III.4.2. Résultats de l'essai……59
III.5. Conclusion……..63
Conclusion général……..64
Liste des références……66
Annexe……69

Liste des figures

Figure I.01 : Principe de fabrication du ciment……..…...7

Figure I.02 : Laitier de haut fourneau granulé broyé……...9

Figure I.03 : Cendres volantes : une poudre ressemblant au ciment…….…….10

Figure I.04 : Les différents types des granulats…….……12

Figure I.05 : Les utilisations des super plastifiants……17

Figure I.06 : Des charges opposées sur la surface des grains de ciment provoquent la Floculation…….……..18

Figure I.07 : Mécanisme de floculation avec et sans super plastifiants……..…18

Figure I.08: Effet du super plastifiant sur les grains de ciment par le phénomène de Dispersion……..……..19

Figure I.09 : L'état de hydratation après 3 heures à 20 º C……20

Figure I.10 : L'état de hydratation pendant 3 heure à 20 º C……..…...…21

Figure I.11 : Le pont de Mila…….29

Figure I.12 : Le pont de l'ile de Ré……30

Figure I.13 : Le pont de Normandie…….....…..31

Figure I.14 : La Pacific Tower…….....…32

Figure I.15 : La Grande Mosquée Hassan II……..…....32

Figure II.1 : Courbes d'analyse granulométrique des graviers utilisés……..…38

Figure II.2 : Courbes d'analyse granulométrique des sables utilisés……..…39

Figure II.3 : Organigramme de la méthode proposée pour formuler des BHP [17]…..……..... 44

Figure II.4 : Abaque de détermination le rapport E/L et la résistance à la compression [17]……..……....45

Figure II.5: Détermination de dosage en eau [17]…….46

Figure II.6 : Dosage en gros granulat [17]……..…46

Figure II.7: Représentation schématique d'un super plastifiant……....47

Figure II.8 : Exemple d'une courbe de mélange OAB par la méthode de DREUX-GORISSE……...….50

Figure III.1 : L'évaluation de la résistance à la compression en fonction des compositions des BHP avec différents rapport E/C après 1 jour……60

Figure III.2 : L'évaluation de la résistance à la compression en fonction des compositions des BHP avec différents rapport E/C après 7 jours……..……61

Figure III.3 : L'évaluation de la résistance à la compression en fonction des compositions des BHP avec différents rapport E/C après 7 jours……..…62

Liste des tableaux

Tableau I.01 : Exemple de Formulation d'un BHP (collection technique ciment……. Béton)……..……..5

Tableau I.02 : Composition chimique et minéralogique du clinker…….……8

Tableau I.03 : Exigences mécaniques définies en termes de valeur caractéristiques… ……..……11

Tableau I.04 : Dosage en adjuvants par rapport au poids du ciment…..……14

Tableau I.05 : Classification des bétons selon leur affaissement au cône d'Abrams…..……23

Tableau I.06 : Les classes du Béton à haute performance (BHP) et (BTHP)……25

Tableau I.07 : Eprouvettes utilisées en compression et en traction……..**....**……25

Tableau II.1 : Les compositions de ciment utilisé…….……36

Tableau II.2 : Les compositions minéralogiques du ciment utilisé…….…….…….36

Tableau II.3 : La résistance à la compression du CPA- CEM I…….…..…36

Tableau II.4 : Caractéristiques techniques du super plastifiant (MEDAFLOW30) …….37

Tableau II.5 : Analyse granulométrique par tamisage des graviers utilisés……..39

Tableau II.6 : Analyse granulométrique par tamisage des sables utilisés…..……40

Tableau II.7 : Caractéristiques des physiques et mécaniques des granulats utilisés ……40

Tableau II.8 : Caractéristiques techniques du la fumée de silice…….…..41

Tableau II.9 : Composition chimique du laitier D'El -Hadjar (Annaba)……**...**42

Tableau II.10 : Composition de l'eau de gâchage (ml/l)……**..**…….42

Tableau II.11 : Valeurs de K en fonction du dosage en ciment, de la puissance de la vibration et de l'angularité des granulats et permettant de calculer Y ordonnée du point de brisure de la courbe de référence (…)……51

Tableau II.12 : Pourcentage de chacun des granulats pour des différentes compositions du béton BHP……..52

Tableau II.13 : Composition des bétons (BHP) avec E/C = 0.25……..……53

Tableau II.14 : Composition des bétons (BHP) avec E/C = 0.30……..……53

Tableau II.15 : Composition des bétons (BHP) avec E/C = 0.35……..……54

Tableau III.1 : Résultats d'essai d'affaissement des BHP avec E/C = 0.25……..57

Tableau III.2 : Résultats d'essai d'affaissement des BHP avec E/C = 0.30……...….57

Tableau III.3 : Résultats d'essai d'affaissement des BHP avec E/C = 0.35……...…...57

Tableau III.4, Tableau III.5 : Les résistances à la compression des différents BHP étudié……...59

Liste des abréviations

BHP : Béton à haute performance

BFUP : Béton fibré à ultra haute performance

BTHP : Béton très performance

E/C : Rapport massique de l'eau sur ciment

CPA : Ciment portland

CPJ : Ciment portland composé

CHF : Ciment de haut fourneau

CPZ : Ciment pouzzolaniques

CLC : Ciment au laitier et aux cendres

FS : Fumée de silice

MF : Module de finesse

BR : Béton sans ajout cimentaire

BHP (2FS) : Des BHP avec 2% de fumée de silice

BHP (5FS) : Des BHP avec 5% de fumée de silice

BHP (8FS) : Des BHP avec 8% de fumée de silice

BHP (2FS, 25L) : Des BHP avec 2% de fumée de silice et 25% de laitier granulé

BHP (5FS, 10L) : Des BHP avec 5% de fumée de silice et 10% de laitier granulé

Rc : Résistance en compression

Fcj : La résistance à la compression à « j » jour

A. Question de recherche :

L'Algérie est un pays en voie de développement, qui adapte un programme de développement durable dans tous les domaines, surtout dans le domaine de génie civil. Dans ce contexte la fabrication des bétons durables est devenue une nécessité du premier ordre. Les BHP sont parmi ces bétons qui assurent conjointement une résistance mécanique très élevée et une durabilité accrue. Ces deux qualités sont obtenues grâce au développement récent en technologie de fabrication des ciments, des ajouts minéraux actifs (fumée de silice, laitier granulé, pouzzolane,….etc.) et de super plastifiants hautement réducteurs d'eau.

L'utilisation des bétons à haute performance « BHP » est actuellement en pleine expansion dans le domaine du génie civil, notamment dans la construction des ouvrages. Les principaux avantages des BHP sont liés à leur faible porosité, leur résistance mécanique très élevée (fc>60MPa) et leur durabilité accrue. La facilité de mise en place qui est l'emploi conjugué de super plastifiant est des additions minérales. Ceci permet d'augmenter la résistance à la compression tout en améliorant l'ouvrabilité et la durabilité.

L'emploi des super plastifiants permet une réduction de la teneur en eau du mélange consistance égale (entraînant la suppression d'un volume important d'eau non mobilisée par l'hydratation du ciment). Les super plastifiants s'opposent à la floculation des grains de ciment en suspension dans l'eau, ce qui augmente leur réactivité, facteur de résistance à court terme. Ils permettent une réduction sensible de l'eau de gâchage (une partie de l'eau n'est plus piégée dans Les flocs de ciment) tout en garantissant une ouvrabilité satisfaisante, une amélioration de la fluidité et une diminution très importante de la porosité du béton à l'état durci.

Les BHP offrent aussi des résistances exceptionnelles à l'état frais (rhéologie, pompabilité, etc…) et des performances aux jeunes âges, ce qui permet exemple d'accélérer les cadences. Ils confèrent une pérennité architecturale aux ouvrages et augmentent considérablement leur durabilité en réduisant corrélativement les frais de maintenance et d'entretien. Les clefs de ces performances sont :

- La réduction de la quantité d'eau opérée par l'ajout de super plastifiant ;
- l'optimisation de la répartition granulométrique des composants.

Donc les questions qui posés de ce mémoire est quel sont les propriétés rhéologiques et mécaniques du béton à haute performance? Quel l'effet des ajouts (la fumée de silice et le laitier granulé) sur le BHP?

Pour répondre sur les questions suivantes il faut l'étude expérimentale.

B. Objectifs :

Les objectifs du ce travaille c'est :

- L'optimisation de la méthode de la formulation des BHP ;
- Le rôle des ajouts cimentaires (la fumée de silice et le laitier granulé) sur les caractéristiques physiques et mécanique des BHP à l'état frais et durci.

C. Plan du mémoire :

L'ensemble de notre travail est scindé comme suit**:**

Le premier chapitre de ce document présente une synthèse bibliographique des travaux réalisés, sont présente généralité et des définitions sur les bétons à haute performance, en suit la formulation et les constituants des bétons à haute performance, les caractéristiques physico-mécaniques sur les BHP. Enfin donné des exemples application sur les BHP et les avantage de béton à haute performance dans le domaine de génie civil.

Le deuxième chapitre décrit les caractéristiques physiques et mécaniques de tous les matériaux utilisés (ciment et granulats et super plastifiant, l'eau de gâchage…etc.), et optimisé les différences étapes de la formulation des BHP et présente les protocoles expérimentaux.

Le dernier chapitre décrit les résultats expérimentaux, ensuite l'analyse des résultats avec des commentaires est des explications.

En fin une conclusion générale qui répond sur les principes questions évoquées dans cette recherche.

Chapitre I :

Synthèse bibliographique

I.1. Introduction :

Les bétons à hautes performances (BHP) sont des bétons qui développent des résistances mécaniques élevées (plus de 60 MPa) du fait de l0a diminution de la porosité rendue possible grâce à l'ajout de super plastifiants qui diminuent la teneur en eau nécessaire à l'obtention d'une maniabilité suffisante. De plus, le spectre du mélange granulaire utilisé est élargi par l'ajout d'éléments ultrafins qui confèrent à l'ensemble une haute compacité [1]. De ce fait, ces bétons présentent une durabilité accrue [2] grâce à une perméabilité réduite.

I.2. Historique sur les bétons à haute performance :

Les lois du béton liant la résistance à la composition sont énoncées dès la fin du XIX^{e} siècle avec surtout l'ingénieur français Féret, mais ne sont pas exploitées immédiatement. Jusqu'à la fin des années 1940, la formulation du béton était d'une grande simplicité : 800 litres de gravillons, 400 litres de sable, de 4 à 8 sacs de ciment et de l'eau en abondance, cette recette ne devait pas correspondre toujours précisément à un mètre cube, mais elle faisait prise et durcissait. Avec des coefficients de sécurité à la rupture de l'ordre de trois dans des ouvrages simples, les risques étaient minimes.

La recherche expérimentale n'est entreprise qu'après 1940, sur la base des lois de Féret. Un béton ordinaire se compose d'un liant, de sable et de gravier. Dès la théorisation de la composition des bétons dans les années 1940, on sait que pour obtenir un béton, il faut minimiser le pourcentage de vides. Duriez précise ainsi qu'il convient d'aboutir à une ossature dont la surface spécifique soit minimale tout en donnant un béton qui, mis en place avec le dosage en ciment prescrit et le minimum d'eau indispensable au mouillage de l'ensemble des grains, ciment compris, forme un ensemble homogène sans vide

Dans les années 1980, on découvre le moyen de diminuer ces vides avec l'ajout de microparticules et d'adjuvants de types plastifiants, ainsi naissent les bétons à hautes performances [3].

I.3. Modes et formulation des bétons à haute performance :

I.3.1. Définition d'un béton à haute performance :

Par convention on appelle béton à haute performance (BHP), un béton dont la résistance mécanique moyenne à la compression à l'âge de 28 jours est supérieure à 50MPa sur cylindre et un rapport (Eau efficace/liant équivalent) inférieur à 0,4. Le BHP contient les constituants Suivants : des granulats ordinaires, du ciment portland ordinaire, de la fumée de silice, parfois

d'autres ajouts minéraux comme des cendres volantes et des adjuvants (fluidifiants) [*4*]. Les Bétons à Hautes Performances (BHP), sont des matériaux à très haute compacité et haute résistance. Elle est de l'ordre plus de 100 MPa pour les bétons à très hautes performances, voire plus (150 à 200 MPa) pour des bétons fibrés à ultra hautes performances, BFUP. Hautes performances signifient aussi facilité de mise en œuvre et souplesse d'adaptation aux contraintes d'exécution des ouvrages. Les BHP ont une porosité extrêmement réduite, plus résistants aux agents agressifs et, de façon générale, présentent une durabilité accrue. Ils présentent une structure très dense, une faible porosité et une très bonne résistance à la pénétration d'agents agressifs.

I.3.2. Les caractéristique des bétons à haute performance :

Les 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.
- Ils présentent une micro texture très dense et une faible porosité et sont donc très résistants à la pénétration d'agents agressifs.

I.3.3. Formulation, constituants des bétons à haute performance :

La recherche des hautes performances passe par la réduction de la porosité du béton durci, c'est-à-dire de son pourcentage de vides.

En effet, les dimensions et les volumes des pores capillaires sont les principaux paramètres qui régissent les résistances mécaniques du béton et les propriétés de transfert déterminantes pour la durabilité. L'optimisation de la formulation d'un BHP consiste à diminuer la porosité de la matrice cimentaire et à optimiser le squelette granulaire.

I.3.4. Les étapes de la formulation :

La formulation d'un BHP suit les trois principales étapes suivantes :

A) Détermination d'une formule théorique prévisionnelle :

- Sélection des constituants en fonction de l'expérience locale ;
- Détermination des proportions des constituants ;
- Optimisation du squelette granulaire.

B) Optimisation du mélange en laboratoire:

- Validation de la compatibilité ciment / adjuvant ;
- Ajustement de la quantité de pâte et de l'adjuvant ;

- Vérification du comportement rhéologique du béton frais ;
- Analyse de la sensibilité de la formule aux variations des dosages des divers constituants ;
- Analyse de la sensibilité de la formule aux conditions climatiques possibles lors de la mise en œuvre (température).

C) Validation de la formule:

- Vérification du comportement rhéologique du béton frais ;
- Vérification des éventuelles spécifications complémentaires telle que la pompabilité ;
- Vérification des caractéristiques du béton.

BHP sans additions		BHP avec additions : à base de la fumée de silice	
Ciment CEM I 52.5 (kg/m³)	450	Ciment CEM I 52.5 (kg/m³)	420
Gravillon 6/20 (kg/m³)	1027	Fumée de silice (kg/m³)	35
Sable 1 (0/4) (kg/m³)	648	Gravillon (6/10) (kg/m³)	250
Sable 2 (0/1) (kg/m³)	105	Gravillon (10/14) (kg/m³)	730
Eau (L/m³)	160	Sable 1 (0/4) (kg/m³)	660
Super plastifiant (kg/m³)	11.25	Sable 2 (0/1) (kg/m³)	140
Adjuvant retardateur (kg/m³)	4.5	Eau (L/m³)	152
		Super plastifiant (%)	1.73

Tableau I.01 : Exemple de Formulation d'un BHP (collection technique ciment béton) [5].

I.3.5. L'évolutions des bétons à haute performance :

Les avancées technologiques seront dans les bétons autoplaçants et les Bétons Fibrés à ultra Hautes Performances (BFUHP). Pour les premiers, il ne s'agit plus de travailler la résistance ou la durabilité mais d'améliorer la mise en œuvre. Quant aux BFUHP, ils constituent un matériau qui permet de s'affranchir de tout ferraillage passif et d'obtenir des résistances de 150 à 200 MPa grâce à une granulométrie très fine. Concernant les BHP, il reste à travailler sur leur résistance au feu.

La question du BHP est très vaste ; elle recouvre tous les aspects le différenciant du béton traditionnel, c.-à-d. des changements relatifs tant aux composant, à la composition, à la mise en œuvre qu'aux propriétés.

Des années durant, la fabrication du béton n'a nécessité que des granulats, du ciment et de l'eau. Ce dernier composant remplit un double rôle : il permet l'hydratation du ciment et confère au béton frais sa nécessaire ouvrabilité. Cette ouvrabilité nécessite cependant une quantité d'eau supérieure à ce qui est strictement nécessaire pour l'hydratation. Une partie de cette eau pour un rapport eau-ciment de 0,5, elle équivaut à environ la moitié de l'eau de gâchage et reste dans le béton au terme du processus de prise et de durcissement. Elle se répand dans tout le béton et cause l'apparition d'un réseau de pores et de vides. L'augmentation de l'excédent en eau est proportionnelle au diamètre moyen des pores ainsi que de leur volume. Un nombre accru de pores de plus grandes dimensions affaiblit la structure du matériau et réduit dès lors la résistance du béton. Il y donc un lien direct entre la résistance à la compression et l'eau de gâchage ajoutée au béton ou – formulé de manière plus scientifique – entre la résistance à la compression et le rapport entre la quantité d'eau et de ciment, que l'on appelle le rapport eau-ciment, E/C. En fonction de l'augmentation ou de la diminution de ce rapport, la résistance du béton diminuera ou augmentera.

La durabilité du béton augmente donc avec la réduction du volume des pores (porosité réduite, compacité accrue) et du rétrécissement des pores (réduction de la perméabilité). Il s'ensuit que le rapport eau-ciment doit être le plus faible possible.

I.4. Les constituants du béton :

I.4.1. Le ciment :

I.4.1.1. Définition de ciment :

Le ciment est un liant hydraulique qui se représente sous forme de poudre minéral fine, son hydratation avec l'eau forme une pate faisant prise et dont le durcissement est progressif. Grâce à ses caractéristiques ; ce composant permet la transformation d'un mélange sans cohésion en un corps solide [6].

I.4.1.2.Principe de fabrication du ciment :

Le principe de la fabrication du ciment est :

Calcaire et argiles sont extraits des carrières, puis concassées, homogénéises, portés à haut température (1450°) dans un four.

Le produit obtenu après refroidissement rapide est : le clinker [7].

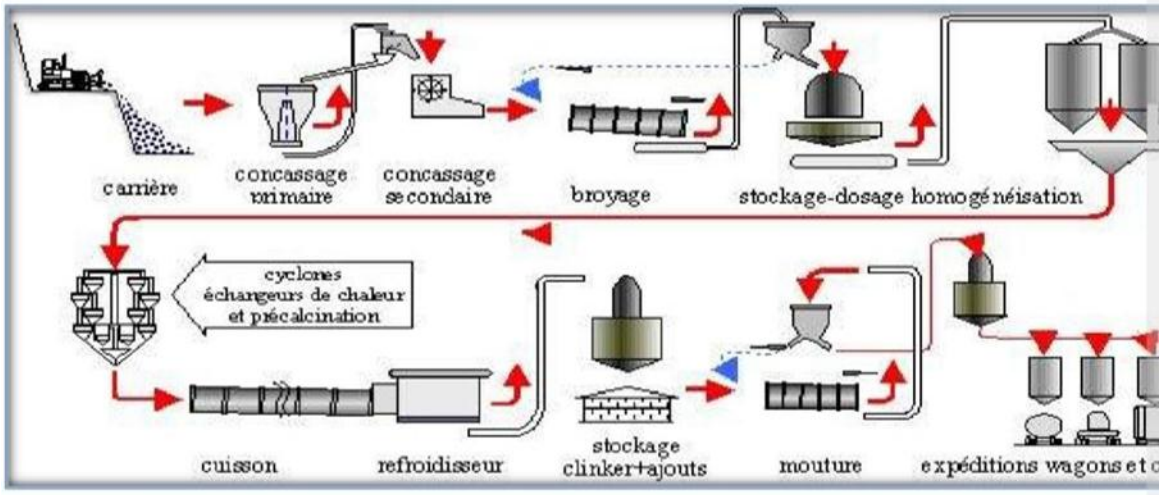


Figure I.01 : Principe de fabrication de ciment [7].

I.4.1.3. Les constituants du ciment :

I.4.1.3.1. Le clinker :

C'est un produit obtenu par cuisson jusqu'à fusion partielle (clinkerisation) du mélange calcaire + argile, dosé et homogénéisé et comprenant principalement de la chaux (CaO) de la silice (SiO2) et de l'alumine(AL2O3).

Le mélange est en général constitué à l'aide de produits naturels de carrière (calcaire ,argile, marne….).c'est le clinker qui ,par broyage ,en présence d'un peu de sulfate de chaux (gypse) jouant le rôle de régulateur ,donne des « portland » et confère aux ciments de ce groupe leur propriétés caractéristique [8].

Le clinker contient un certain nombre de constituants dont la teneur varie suivant la catégorie de ciment considérée et dont l'influence est plus ou moins grande sur les propriétés de ces ciments [9].

Les quatre principaux constituants du clinker sont:

- Le silicate tricalcique (C3S) ;
- Le silicate bicalcique (C2S) ;
- L'aluminate tricalcique (C3A) ;
- L'alumino-ferrite tétracalcique (C4AF) [9].

Les compositions chimiques et minéralogiques du clinker sont comprises dans les limites données par Le tableau (I.02) ci –dessous :

Composants	Teneur limite (%)	Teneur moyenne (%)
Minéralogiques		
C3S	40-70	60
C2S	00-30	15
C3A	02-15	08
C4AF	00-15	08
Oxydes	-	-
CaO	60-69	65
SiO2	18-24	21
Al2O3	04-08	06
Fe2O3	01-08	03
MgO	< 05	02
K2O, Na2O3	< 02	01
SO3	< 03	01

Tableau I.02 : Composition chimique et minéralogique du clinker [7].

I.4.1.3.2. Le gypse :

L'addition de gypse au clinker a pour but de régulariser la prise du ciment, notamment de ceux qui contiennent des proportions importantes d'aluminate tricalcique. Grâce à ce gypse, la prise du ciment, c'est-à-dire le début de son durcissement, s'effectue au plut tôt une demi-heure après le début de l'hydratation. Sans gypse, la prise serait irrégulière et pourrait intervenir trop rapidement [7].

I.4.1.3.3. Les additions minérales :

Les ajouts cimentaires sont des contribuent aux propriétés des coulis frais et durcis par action hydraulique ou pouzzolanique ou les deux à la fois. Les pouzzolanes naturelles, les cendres volantes, le laitier de haut fourneau granulé broyé et les fumés de silice en sont des exemples courants. Ces des ajouts sont incorporés de coulis ou de béton pour différentes raisons :

- Améliorer les caractéristiques rhéologiques des coulis (viscosité et stabilité) ;
- Améliorer la résistance du coulis durci et augmenter sa durabilité ;

- Réduire le coût de la matière liante: ces ajouts étant le plus souvent des sous-produits d'autres industries, leur incorporation dans le ciment avec des proportions pouvant atteindre les 30% permet de réduire le prix de revient de la matière liante ;
- Favoriser la pénétrabilité dans les fissures fines: certains de ces ajouts sont plus fins que le ciment (fumée de silice**)** [10].

I.4.1.3.3.1. Le laitier granulé de haut fourneau :

Le laitier granule de haut-fourneau est obtenu par refroidissement rapide de la scorie fondue provenant de la fusion du minerai de fer dans un haut fourneau. C'est donc un coproduit de la fabrication de la fonte. Il doit présenter des propriétés hydrauliques latentes (c'est-à-dire qui se manifestent lorsqu'il a subi une activation) pour convenir à son emploi comme constituant du ciment. Il est compose principalement d'oxydes de calcium, de silice et d'alumine [11].

Figure I.02 : Laitier de haut fourneau granulé broyé.

I.4.1.3.3.2. Les cendres volantes :

Ce sont des produits pulvérulents de grande finesse résultant de la combustion, en central thermique de combustibles minéraux solides (houille, lignite ...)

Elles rentrent dans la composition de la certains ciments en proportion variable (5 à 20%) ; on les ajoute au moment du broyage du clinker [8].

Figure I.03 : Cendres volantes : une poudre ressemblant au ciment.

I.4.1.3.3.3. Les pouzzolanes naturelles ou naturelles calcinées:

Les pouzzolanes naturelles sont des produits essentiellement composes de silice, d'alumine et d'oxyde de fer présentant, soit naturellement (lorsqu'elles sont d'origine volcanique), soit après activation thermique, des propriétés pouzzolanique. Les pouzzolanes doivent leur nom aux cendres volcaniques de la région de Pouzzoles, en Italie, qui étaient utilisées par les Romains pour la confection de leur liant hydraulique. Les pouzzolanes n'ont pas de propriétés hydrauliques intrinsèques mais, en présence de la chaux libérée par le clinker au cours de son hydratation, elles forment elles aussi des hydrates stables, semblables à ceux qui sont formes à la suite de l'hydratation du clinker [11].

I.4.1.3.3.4. Les fillers :

Sont des produit obtenus par broyage fin ou par pulvérisation de certaines roches (calcaire, basalte, laitier, cendres volantes…) naturelles ou non ,agissant principalement, grâce à une granularité appropriée, par leurs propriétés physiques sur certaines qualités du ciment (accroissement de maniabilité, diminution de perméabilité et de capillarité, réduction de la fissurabilité …) les fillers sont inertes s'ils n'ont aucune action chimique sur les ciments en présence d'eau ;ils sont actifs s'ils ont ,même partiellement , des propriétés hydrauliques ou pouzzolanique en présence de ciment et d'eau [8].

I.4.1.3.3.5. Le rôle des additions minérales :

Les super plastifiants permettent d'obtenir des bétons très fluides en réduisant les frottements entre grains de ciment et en libérant une certaine quantité d'eau. Leur utilisation n'est pas suffisante dans le cas des BHP. La fluidité de la pâte avait une certaine influence sur le comportement du matériau mais que la quantité de pâte jouait également un rôle vis-à-vis de la

fluidité du mélange. Les interactions entre les plus gros grains doivent aussi être réduites. Pour augmenter la quantité de pâte d'un BHP, on peut alors envisager d'augmenter la quantité de ciment. Or ceci conduirait à une augmentation significative du coût du matériau mais également à des problèmes de retrait dus à l'élévation de la température lors de l'hydratation du ciment. Il est donc nécessaire de remplacer une partie du ciment par des additions minérales. Différentes additions sont citées dans la littérature : cendres volantes, laitiers de hauts fourneaux, fumées de silice et filler calcaire. Ces matériaux peuvent avoir une influence chimique et/ou un rôle physique selon leur nature [10].

I.4.1.4. La classification de ciment :

Les ciments sont classés en fonction de leur composition en cinq types principaux défini par la norme NF P15-301 et ENV 197-1 :

- Ciment portland (CPA) ;
- Ciment portland composé(CPJ) ;
- Ciment de haut fourneau(CHF) ;
- Ciment pouzzolaniques (CPZ) ;
- Ciment au laitier et aux cendres (CLC).

A) **Classification des ciments suivant les résistances à la compression :**

Selon la norme européenne NF EN 197-1 [1] classes les ciments courant d'après leur résistance à la compression déterminée conformément selon la norme EN 196-1 [6], mesurée à 28 jours donne le tableau suivant :

Classe de résistance	Résistance à compression (MPa)			
	Résistance à court terme		Résistance courante	
	2 jours	7 jours	28 jours	
32.5 N	_	_	≥ 32.5	≤ 52.5
32.5 R	≥ 10.0	_	≥ 32.5	≤ 52.5
42.5N	≥ 10.0	_	≥ 42.5	≤ 62.5
42.5R	≥ 20.0	_	≥ 42.5	≤ 62.5
52.5N	≥ 20.0	_	≥ 52.5	_

52.5R	≥ 30.0	_	≥ 52.5	_

Tableau I.03 : Exigences mécaniques définies en termes de valeur caractéristiques [12].

I.4.2. Les granulats :

I.4.2.1. Définition des granulats :

On appelle "granulats" les matériaux qui entrent dans la composition des bétons. C'est l'ensemble des grains compris entre 0 et 50mm dont l'origine peut être naturelle ou artificielle. Ils sont dits naturels lorsqu'ils sont extraits de leurs sites géologiques d'origine en ayant subi que des traitements mécaniques (granulats alluvionnaire ou de carrière). Les granulats artificiels sont obtenus de la transformation à la fois thermique et mécanique de roches ou de minerais [13].

Figure I.04 : Les différents types des granulats.

I.4.2.2. Les classe des granulats :

Les granulats sont classés selon les normes en fonction de leur grosseur. On désigne par d/D la classe de granulat dont la dimension des grains s'étale de d pour les plus petites à D pour les plus gros.

Les définitions des classes de granulaire avec leur caractéristique, donnée par la norme françaises XP P 18-540 [13] sont :

- Fines 0/D pour D < 2 mm avec au moins 70% de passant à 0.063 mm ;
- sablon0/D D < 1 mm avec au moins 70% de passant à 0.063 mm ;
- Sable0/D 1< D ≤6.3 mm ;
- Graves 0/D D > 6.3 mm ;

- Gravillons d/D d ≥ 1 mm et D ≤ 125 mm ;
- Ballast 20 ≥ mm et D ≤ 50 mm.

D'après la norme les caractéristiques essentielles des granulats destinés aux bétons hydrauliques sont les suivantes [13,14] pour :

I.4.2.2.1. Le gravier :

Grains de dimensions allant de 1 à 25mm, d'après la norme P18-591, l'essai de propreté des graviers consiste à déterminer le pourcentage d'éléments

<0,5mm, le pourcentage de vase et argiles, éliminées lors de l'essai doit être ≤1,5% pour gravillons n'ayant pas subi de concassage, et ≤3% pour ce qui ont subi le concassage. La granularité du gravier est fixée par D prescrit ou admissible pour le béton à préparer, l'absorption d'eau selon la norme NF P18-541fixe à 5% la valeur maximale pour les bétons hydrauliques.

I.4.2.2.2. Le sable :

Ces grains de sable, de même origine que les granulats, ont un diamètre inférieur à 5 mm, Le sable doit être propre et sans poussières argileuses. Il existe un béton contenant uniquement du sable, du ciment et de l'eau.

Le mortier sert principalement en maçonnerie pour lier les briques ou les parpaings, et pour dresser les enduits sur les murs.

I.4.2.2.3. Les fillers :

Grains de dimensions allant de 0 à D ou D <2mm avec au moins 70% de passant à 0.063 mm d'après la norme XP P 18-540.

I.4.3. L'eau de gâchage :

L'eau est un ingrédient essentiel du béton. Il joue fonctions principales : confère au béton sa maniabilité à l'état frais et assure l'hydratation des grains de ciment pour une prise et un durcissement.

La quantité d'eau utilisée ou plus précisément le rapport eau/ciment a une forte influence sur la porosité du béton, sa perméabilité, les résistances mécaniques, la durabilité, la microstructure, la cinétique d'hydratation, etc.

L'eau de gâchage peut avoir plusieurs origines, mais seule l'eau potable est présumée conforme aux normes en vigueur.

I.5. Les adjuvants :

I.5.1. Définition des adjuvants :

Les adjuvants sont des produite chimique qui, incorporés dans les bétons de lors de leur malaxage ou avant la mise en œuvre à des doses inférieures à 5 % du poids de ciment, provoquent des modifications des propriétés ou du comportement de ceux-ci.

Généralement le béton définitif d'un ouvrage n'est pas forcément satisfaisant, même si sa composition a été déterminée suivant les règles connues fixant les proportions respectives de liant, de sable, de granulat et d'eau. Bien des facteurs interviennent au stade de sa fabrication, de son transport, de sa mise en place dans les coffrages, de sa prise et de sa montée en résistance.
Diverses solutions existent pour augmenter la possibilité d'arriver à un résultat concret, parmi lesquelles celles apportées par les adjuvants.

Quel que soit l'adjuvant, les spécifications normatives visent d'abord à définir et à quantifier sa fonction, c'est-à-dire la façon dont il modifier, dans le sens recherché, les propriétés du béton, ensuite, à limiter les effets non recherché sur les autres propriétés du béton [15].

I.5.2. Le dosage en adjuvants par rapport au poids du ciment :

Adjuvants	Dosage en (%)
plastifiants	0.15 à 1.2
Super plastifiants	0.6 à 2.5
Accélérateur de prise	1 à 3
Accélérateur de durcissement	0.8 à 2
Retardateur de prise	0.2 à 0.8
Hydrofuges	0.5 à 2
Entraineurs d'air	0.05 à 3
Rétenteur d'eau	0.1 à 2

Tableau I.04 : Dosage en adjuvants par rapport au poids du ciment [16].

I.5.3. La classification des adjuvants :

Les adjuvants sont utilisés depuis très longtemps mais leur développement réel et la multiplication de leur utilisation n'ont commencé que depuis 1960. Leur qualité et leur constante s'améliorent sans cesse.

Selon des recherches statistiques. La majorité des bétons utilisés Amérique du nord contiennent au moins un adjuvant. Au Japon comme Australie, 80% des bétons confectionnés contiennent des adjuvants, tandis qu'en Allemagne cette valeur est de 60%.

Les adjuvants peuvent être organiques ou inorganiques selon leur composition chimique, mais leur caractère chimique, distinct de celui des autres minéraux utilisés dans la fabrication du béton, est essentiel. Ainsi dans la nomenclature américaine on les appelle adjuvants chimiques, mais ici cette qualification est superflue, car les produit minéraux incorporés dans le béton, dont a teneur est souvent supérieure à 5% de la masse du ciment, sont appelés liants ou ajouts [15].

Les adjuvants peuvent être classes selon leur fonction, on distingue :

A) Les adjuvants qui modifient l'ouvrabilité du béton :

- Plastifiant / Réducteur d'eau ;
- Super plastifiant / Haut réducteur d'eau.

B) Les adjuvants qui modifient la prise et le durcissement :

- Accélérateur de prise ;
- Accélérateur de durcissement ;
- Retardateur de pris.

C) Les adjuvants qui modifient certaines propriétés du béton :

- Entraîneur d'air ;
- Hydrofuges de masse ;
- Rétenteur d'eau.

I.5.3.1. Les plastifiants ou réducteurs d'eau :

Ces adjuvants ont pour fonction principale de conduire, à même ouvrabilité, à une augmentation des résistances mécaniques par une réduction de la teneur en eau d'un béton. Ils permettent aussi d'augmenter la plasticité du béton à teneur en eau constante et donc de faciliter sa mise en œuvre.

Ils provoquent une défloculation des grains de ciment. En effet, il existe à la surface des grains de ciment des forces d'attraction qui ont tendance à les faire s'agglomérer entre eux sous forme de flocons ou flocs et piéger une partie de l'eau du mélange. Ils dispersent les grains de ciment et libèrent l'eau piégée, ce qui génère un gain de fluidité. Ils augmentent la compacité du béton par réduction de l'eau de gâchage. Ils permettent aussi de réduire le risque de ségrégation des bétons [16].

I.5.3.2. Les supers plastifiants :

La sélection d'un super plastifiant efficace est aussi cruciale que celle d'un cimente quand on veut fabriquer des BHP parce que tous les types et toutes les marques de super plastifiant ne réagissent pas de la même façon avec tous les ciments [17].

L'expérience démontre que tous les super plastifiant commerciaux n'ont pas la même efficacité pour disperser les particules de ciment à l'intérieure d'un béton en réduisant la quantité d'eau de gâchage et on contrôlant la rhéologie des bétons de très faible rapport E/C Durante la première heure qui suit le contacte entre le ciment et l'eau [17].

I.5.3.2.1. L'intérêt de leur utilisation :

La maniabilité des bétons classiques dépend essentiellement du dosage en eau. Malheureusement, l'augmentation de la teneur en eau conduit à la modification des propriétés du béton, à long terme : chute des résistances mécaniques, porosité accrue et donc durabilité réduite et à courte terme : ségrégation accrue et perte d'homogénéité du matériau [18].

I.5.3.2.2. Les utilisations des super plastifiants :

L'utilisation du super plastifiant dont l'action est schématisée sur la Figure I.05, permet de concilier la diminution de la teneur en eau et la fluidité du béton tout en conservant de bonnes Performances mécaniques du matériau [19].

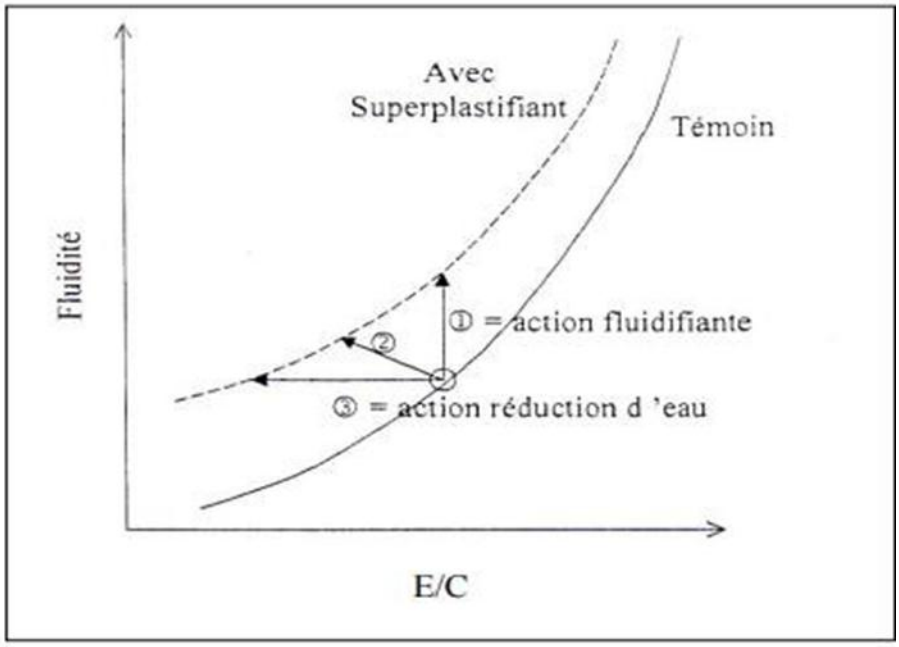


Figure I.05 : Les utilisations des super plastifiants [19].

Avec :

- augmentation de la fluidité (teneur en eau égale) ;
- diminution de la teneur en eau et augmentation de la fluidité ;
- diminution de la teneur en eau (à fluidité égale).

Les BHP sont définis par trois critères : résistance, durabilité et ouvrabilité. Tanaka [1999] [20], ont pensé que les aspects les plus importants à développer sont la fluidité et la capacité de mise en œuvre. Ces suggestions nécessitent l'utilisation des super plastifiants qui peuvent procurer au béton d'excellentes fluidité et résistance à la ségrégation grâce à leur propriété dispersante. Ils permettent de défloculer les grains de ciment ayant tendance à se regrouper en grappes une fois introduits dans l'eau. Leur rôle est donc essentiellement de modifier l'équilibre des forces existant entre les particules de ciment [20]. L'effet de ces adjuvants est de rendre le béton nettement plus maniable, sans ajouter d'eau.

La surface de chaque grain de ciment contient des charges électriques libres. Les charges opposées s'attirent mutuellement. Au contact de l'eau, les grains s'agglomèrent alors en floculats. L'eau de gâchage qui se trouve entre ces floculats sera toutefois emprisonnée (Figure I.06). A partir de ce moment, elle ne contribuera plus à la fluidité de la pâte de ciment. L'ajout d'une quantité supplémentaire d'eau de gâchage sera nécessaire pour obtenir l'ouvrabilité souhaitée.

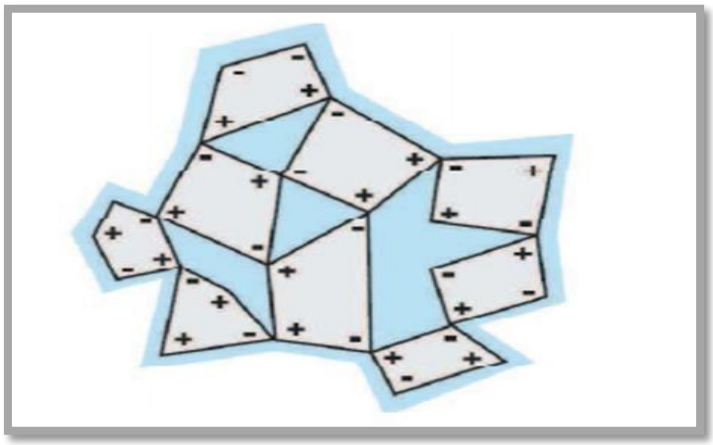
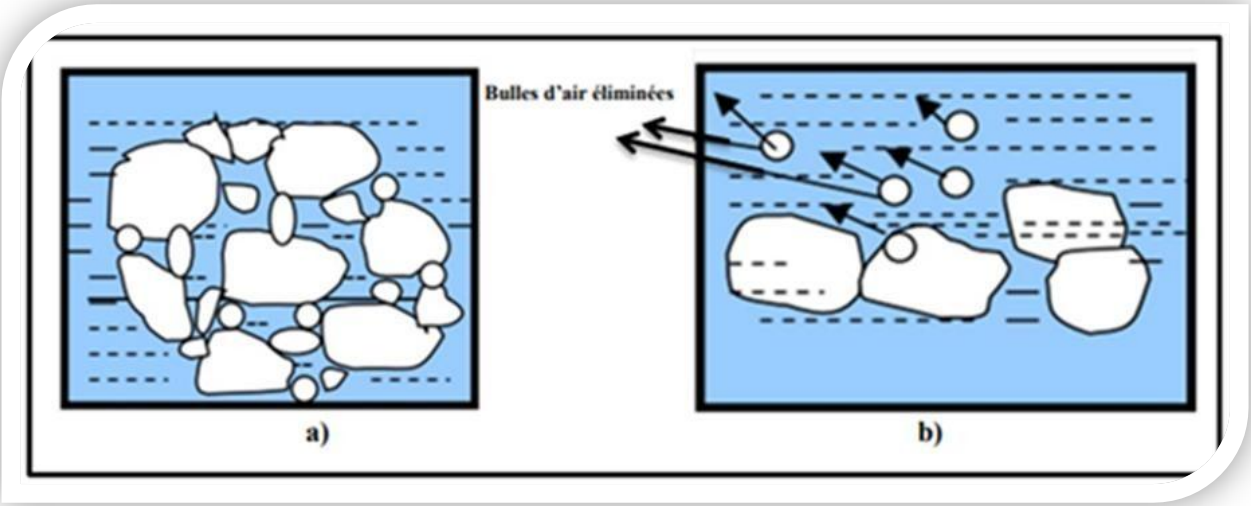


Figure I.06 : Des charges opposées sur la surface des grains de ciment provoquent la floculation [20].

I.5.3.2.3. La mécanisme de dispersion :

La Figure I.07 montre l'influence d'un super plastifiant sur les amas de ciment. Suite à la défloculation, une dispersion des bulles d'air et en parallèle une lubrification par adsorption sur les parois des grains sont observées. Les super plastifiants améliorent la dispersion à long terme, une excellente ouvrabilité et une résistance à la ségrégation [18]. Leur action dispersive est



essentiellement due à la répulsion électrique [20].

Figure I.07 : Mécanisme de floculation avec et sans super plastifiants [18].

A) Sans super plastifiant : colonies de grains de ciment non défloculés, cohésion capillaire par Rétention de bulles d'air.

B) Avec super plastifiant : les molécules, sont adsorbées par les grains de ciment basique l'air s'élimine, d'où la défloculation capillaire, facilitée par le abaissement de la tension aux interfaces.

Les super plastifiants sont des réducteurs d'eau à haute efficacité. Leur mode d'action principale est d'augmenter la maniabilité des bétons par le phénomène de dispersion (Figure I.08) en brisant la dynamique des forces électrostatiques qui existe entre les particules de ciment présentant des charges électriques différentes [21].

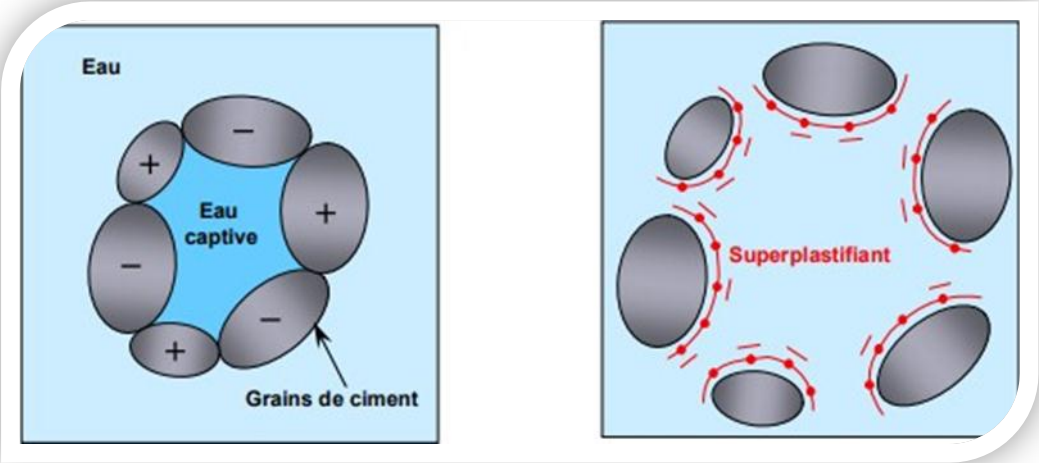


Figure I.08: Effet du super plastifiant sur les grains de ciment par le phénomène de dispersion [21].

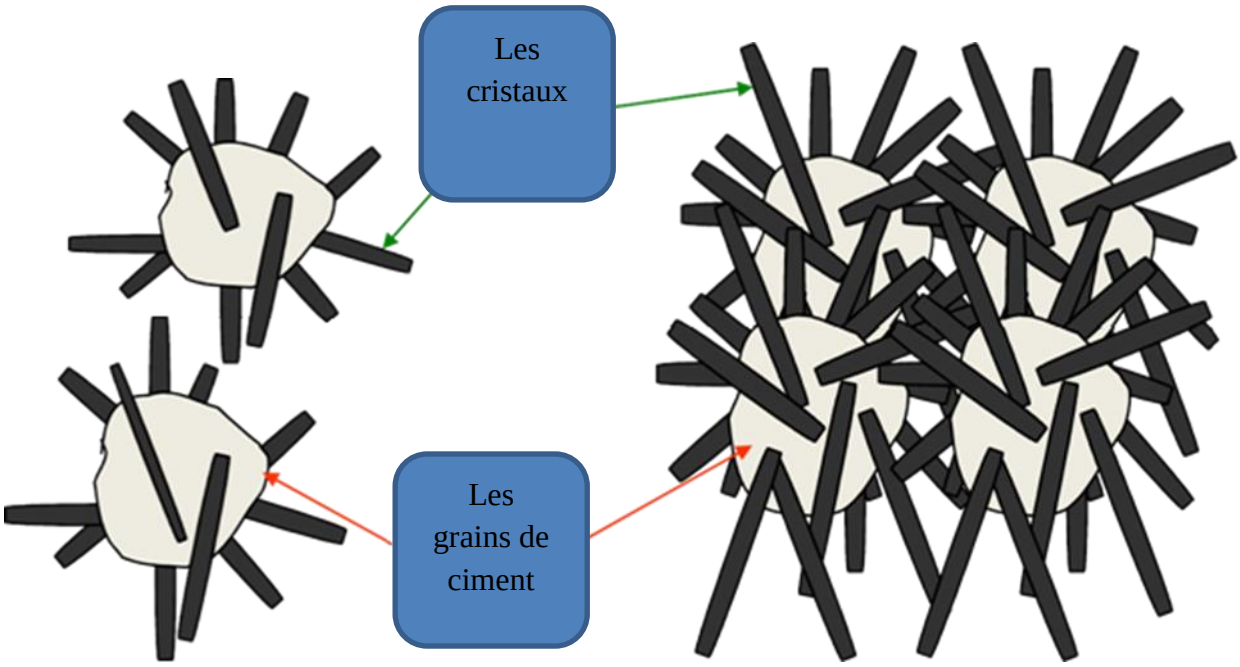
I.5.3.2.4. Les différents types de super plastifiant :

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

- 1ere génération : poly-naphtalène-sulfonate (PNS) ;
- 2eme génération : polymélamine-sulfonates (PMS) ;
- 3eme génération : polycarboxylates (PC), et hybrides avec chaines sulfonates ;
- 4eme génération : poly-carboxylates-polyox (PCP) et poly-phosphonates-polyox.

I.5.3.3. L'accélérateur de la prise :

L'accélérateur de la prise a pour fonction principale de diminuer les temps de début et de fin de prise du ciment. Il agit sur la prise en diminuant les potentiels électriques à la surface des grains, ce qui favorise la diffusion des ions et donc accélère le processus d'hydratation. Il permet d'augmenter la densité d'hydrates à un temps donné donc de diminuer le temps de début de transition du mélange pour passer de l'état plastique à l'état rigide [16].



Béton témoin. **Béton accéléré.**

Figure I.09 : L'état de hydratation après 3 heures à 20 ° C [22].

En remarqué la figure I.09 après 3 heure à la température de 20° C le béton témoin est transformé un béton accéléré donc accélération de la cristallisation des grains de ciment.

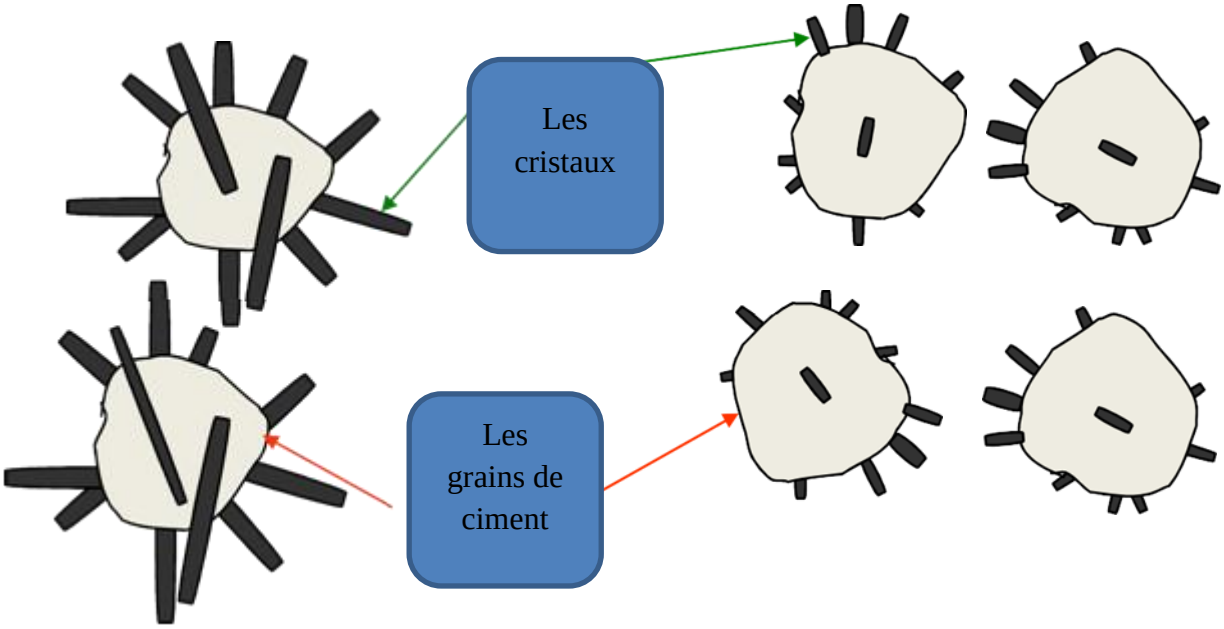
I.5.3.4. L'accélérateur du durcissement :

L'accélérateur du durcissement a pour fonction principale d'accélérer le développement des résistances initiales des bétons, avec ou sans modification du temps de prise. Il permet de mettre les bétons rapidement hors gel.

I.5.3.5. Les retardateurs de la prise :

Les retardateurs de la prise ont pour fonction principale d'augmenter le temps de début de prise du ciment. Ils augmentent le temps de début de transition du mélange pour passer de l'état plastique à l'état rigide. Ils permettent aussi de réguler le dégagement de chaleur dû à l'hydratation du ciment.

En général, les retardateurs ralentissent la dissolution du ciment et la précipitation des hydrates et retardent ainsi la prise. Les retardateurs diminuent les résistances initiales mais ils augmentent souvent les résistances finales au-delà de 28 jours.



Béton témoin. **Béton retardé.**

Figure I.10 : L'état de hydratation pendant 3 heure à 20 ° C [22].

En remarqué la figure I.10 après 3 heure à la température de 20° C le béton témoin est transformé un béton retardé donc ralentissement de la cristallisation des grains de ciment.

I.5.3.6. Les entraîneurs d'air :

Les entraîneurs d'air ont pour fonction d'entraîner la formation dans le béton, pendant le malaxage, de microbulles d'air (de diamètre inférieur à 100 microns) uniformément réparties dans la masse.

Le béton durci contient naturellement une certaine quantité d'air provenant, soit d'un entraînement lors du malaxage, soit de l'évaporation de l'eau de gâchage non fixée. Cet air est réparti de manière aléatoire. En revanche, l'entraîneur d'air permet d'en entraîner un volume

supérieur et de le répartir uniformément. La résistance au gel du béton durci ainsi que sa résistance aux sels de déverglace sont considérablement améliorées. Les microbulles qui coupent les réseaux capillaires limitent le développement des contraintes dues au gel de l'eau interstitielle (en créant de petits vases d'expansion pour l'eau interstitielle).

I.5.3.7. Les hydrofuges de masse :

Les hydrofuges de masse ont pour fonction principale de diminuer l'absorption capillaire des bétons durcis. Il en résulte une faible porosité et donc une faible perméabilité du béton.

Ils se combinent à la chaux du ciment pour former des cristallisations complémentaires qui obstruent les capillaires du béton ou du mortier. Cependant, il convient de se rappeler qu'ils ne peuvent pas rendre étanche un mauvais béton, mal composé, présentant des vides importants ou des hétérogénéités.

I.5.3.8. Les rétenteurs d'eau :

Les rétenteurs d'eau ont pour fonction de réguler l'évaporation de l'eau, de réduire la perte en eau et d'augmenter ainsi l'homogénéité et la stabilité du mélange. Ils diminuent la tendance au ressuage et les phénomènes de retrait. Ce sont des agents colloïdaux ou des dérivés de la cellulose [16].

I.5.4. Contrôle est stockage des adjuvants :

La réception d'un produit à utiliser comme adjuvant doit comporter un contrôle au laboratoire relatif à sa nature chimique, à son comportement vis-à-vis du liant, des granulats, etc. mais contrôle ne donnera aucun renseignement sur la durabilité du produit.

Le technicien devra exiger que les adjuvants soient accompagnés d'un certificat d'origine indiquant la date de fabrication et la date limite d'emploi au cas où le produit n'a pas une stabilité durable. Pour ces raisons multiples, une étiquette parfaitement lisible est exigé quel que soit le mode d'emballage la plupart des adjuvants se présentent en futs hermétiques stockable sur le chantier à pied d'œuvre.

La présentation en sachet dose ou en sac de poudre plus ou moins hygroscopiques peut nécessiter l'entrepôt à l'abri des intempéries. Il faut dans tous les cas suivre les instructions des fabricants qui en général, sont en mesure d'assister le technicien-utilisateur dans la mise en œuvre du produit [23].

I.6. Les caractéristiques des bétons à haute performance :

I.6.1. Les caractéristiques physiques :

I.6.1.1. L'ouvrabilité :

Le béton est mis en place dans le coffrage. Cette opération doit pouvoir se faire avec le maximum de facilité. D'abord, pour raccourcir le temps de travail nécessaire à la mise en place, ensuite, pour éviter de découvrir au moment du décoffrage, des désordres difficilement réparables voir irréparables, conséquence de la faible maniabilité du matériau. On dira qu'un béton est d'autant plus maniable ou ouvrable, qu'il est d'autant plus aisé à mettre en place dans les coffrages.

Le problème est de quantifier cette ouvrabilité qui est une qualité, évolutive dans le temps. Donc le béton avant prise, se classe suivant une échelle de fluidité croissante: très ferme, ferme, plastique, mou et très mou. Par des essais de consistance très divers .Nous ne décrirons ici que ceux qui sont le plus utilisé (Essai d'affaissement au cône d'Abrams) [24].

Béton	Affaissement (cm)
Très ferme	0 à 2
Ferme	3 à 5
Plastique	6 à 9
Mou	10 à 13
Très mou	> 13

Tableau I.05 : Classification des bétons selon leur affaissement au cône d'Abrams [24].

I.6.1.2. L'imperméabilité : leur faible porosité capillaire confère aux BHP une très faible perméabilité.

A) Résistance aux agents agressifs : La faible perméabilité des BHP leur confère une bonne résistance à la pénétration et au transfert dans la masse du béton des agents agressifs en phase gazeuse ou liquide (eaux de mer, eaux sulfatées, solutions acides, dioxyde de carbone, etc.).

B) Migration des ions chlorure : la résistance des BHP à la migration des ions chlorures est supérieure à celle des bétons courants, grâce à sa microstructure plus dense.

C) Tenue aux attaques gel/dégel : Les BHP, correctement formulés, résistent aux cycles gel/dégel grâce à leur forte compacité et à leur résistance mécanique élevée.

D) Carbonatation : De nombreuses études ont démontré que la durabilité des BHP vis-à-vis de la carbonatation est très nettement supérieure à celle d'un béton traditionnel.

I.6.1.3. La porosité :

Est un paramètre de premier ordre qui influence directement la résistance mécanique et la durabilité des bétons. Elle est définie comme le rapport du volume total des vides et pores ouverts au volume apparent d'un matériau.

Cette méthode consiste à effectuer une pesée du matériau dans l'air puis dans un liquide de masse volumique connue. L'essai est conduit dans une ambiance contrôlée (20°C) Pour chaque type du béton trois échantillons cylindriques de dimensions (Ø11x h5) cm ont été testées suivant les recommandations de l'AFPC-AFREM [25]. Il s'agit en réalité de peser les échantillons sous différents états. Dans un premier temps il faut s'assurer que les échantillons sont saturés en eau. Pour cela, ont les places dans un dessiccateur à vide, sous une dépression de 25 mbar pendant 4 heures. Puis on les immerge dans l'eau, toujours sous vide, pendant 20 heures ± 1heure Après quoi on pèse les éprouvettes avec une balance hydrostatique Grâce à cette pesée on obtient la masse du corps d'épreuve immergée Meau. Toujours saturée, les éprouvettes sont ensuite pesées à l'air libre, on obtient alors Mair, la masse du corps d'épreuve imbibée pesé à l'air libre.

La troisième pesée nécessite un passage dans une étuve de séchage à 105°C ± 5°C, jusqu'à stabilisation de la masse de l'échantillon qui sera alors supposé sèche qu'on désignera par Msec. La dernière pesée nous fournit Msec, la masse sèche du corps d'épreuve. On détermine finalement grâce à ces trois masses la porosité accessible à l'eau Ɛ en % (Voir l'équation I.1).

$$Ɛ = (Mair - Msec) / (Mair - Meau) \times 100 \quad \text{(\%)} \quad \text{(I.1)}$$

Avec :

Meau : la masse en gramme du corps d'épreuve immergé dans l'eau ;

Mair : la masse en gramme du corps d'épreuve immergé imbibé pesé dans l'air ;

Msec : la masse en gramme du corps d'épreuve sec.

I.6.2. Les caractéristiques mécaniques :

I.6.2.1. La résistance à la compression:

Les augmentations de la résistance à la compression se manifestent dès le jeune âge; on atteint aisément les 15MPa au bout de 24heurs; 40MPa après une semaine et plus de 60 MPa après 28 jours.

A l'heure actuelle, l'expression "béton à haute performance" couvre des bétons ayant une grande gamme de résistances. On peut diviser les BHP en cinq classes différentes définies chacune par des résistances à la compression qui peuvent être considérées comme des barrières technologiques dans l'état actuel de la technologie des BHP. (Voir le tableau II-4) [26].

Type de béton	Béton à haute performance (BHP)			Béton très performance (BTHP)	
Classe de BHP	Classe I	Classe II	Classe III	Classe IV	Classe V
Résistance à la compression (MPa)	50	75	100	125	150

Tableau I.06 : Les classes du Béton à haute performance (BHP) et (BTHP) [26].

I.6.2.2. La résistance à la traction:

Le gain est aussi important en termes de résistance en tractions.

Le contrôle des propriétés mécaniques des bétons à hautes performances, sur des échantillons de forme cylindrique en acier [27].

Cylindres (diamètre × hauteur) cm^2
(7.5 × 15)
(10 × 20)
(15 × 30)
(16 × 32)

Tableau I.07 : Eprouvettes utilisées en compression et en traction [27].

L'éprouvette (16 x 32) cm² est la forme la plus courante.

Les principaux avantages des bétons à haute performance sont apportés par leur haute résistance en compression d'où la nécessité d'accorder une importance primordiale à cette propriété.

En conclusion, une bonne résistance à la compression est la qualité bien souvent recherchée pour le béton durci. Cette bonne résistance est généralement liée à une bonne compacité, ce qui est favorable à la durabilité du béton.

La résistance d'un béton dépend d'un certain nombre de paramètres, en particulier la classe et le dosage du ciment, la porosité du béton et le rapport du dosage en eau au dosage en ciment.

I.6.2.3. Le retrait :

I.6.2.3.1. Définition du retrait :

Les déformations libres du béton (retraits ou gonflements) sont des propriétés de première importance pour le constructeur. Le contrôle géométrique de l'ouvrage exige leur prise en compte. De plus, des déformations libres non homogènes dans des parties monolithes provo la conception d'ouvrages durables passe donc par une maîtrise des déformations libres.

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'autodessication), quant souvent des fissurations, chemins privilégiés de pénétration des agents agressifs.

Compte tenu de la finesse de la microstructure et de la forte réduction du rapport E/C, est d'un coefficient plus élevé (150 à 250 x 10-6) pour un BHP que pour un béton traditionnel (60 x 10-6). Le retrait d'autodessication est d'autant plus précoce et élevé que le rapport E/C est faible.

I.6.2.3.2. Les différents types du retrait: Il existe les retraits suivants:

A) Le retrait avant prise (retrait plastique) :

Après mise en œuvre, le béton frais est susceptible de perdre une partie de son eau par évaporation [27].

B) Le retrait Pendant la prise et le durcissement :

Diminution de volume de la pâte liante provoquée par son assèchement interne du fait De la consommation de l'eau pour l'hydratation ; on dit aussi retrait d'autodessication ou retrait d'hydratation. (La quantité totale de chaleur dégagée pendant la prise augmente avec le dosage en ciment) [27].

C) Le retrait à long terme:

Diminution de volume de la pâte liante provoquée par l'évaporation de l'eau libre ; on dit aussi retrait de dessiccation ou retrait de séchage.

A partir du décoffrage, et lorsque l'humidité ambiante est inférieure à celle qui règne dans la porosité du béton, des migrations d'eau se produisent de l'intérieur vers l'extérieur de La structure [27].

I.6.2.4. Le fluage:

Le fluage reste proportionnel à la contrainte appliquée (donc à la déformation initiale) Pour des chargements au même âge du béton.

Pour un béton avec fumées de silice, le fluage augmente rapidement immédiatement après le chargement; il peut atteindre dans la première journée de 25 à 30 % du fluage totale, tout en restant inférieur à celui d'un béton classique.

Le fluage total est par contre inférieur d'environ 40 à 50 % de celui des bétons usuels, ceci en fonction du pourcentage de fumée de silice incorporé, des pourcentages élevés donnant de moins bons résultats que des pourcentage limités à 6 % pour lesquels on observe les fluages les plus faible [28].

I.6.2.5. Le module d'élasticité :

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

I.6.2.6. La plasticité :

La plasticité est la propriété d'un matériau de changer sa forme sans se fissurer et de garder cette forme après l'enlèvement de la charge [29]

I.6.2.7. La perméabilité :

La perméabilité des bétons caractérise leur aptitude à se laisser traverser par un fluide sous l'effet d'un gradient de pression. Elle s'exprime au moyen de la relation de DARCY, valable en régime d'écoulement laminaire et s'exprime en m² dans le système internationale : [27].

I.6.2.8. L'étanchéité:

Le rôle de l'étanchéité est d'assurer la protection contre la pénétration de l'eau de toutes les parties d'un ouvrage qui, sinon, seraient exposées à des détériorations graves: terrasses de bâtiments, fondations en souterrains dans le cas où la nappe phréatique est haute et l'eau est agressive.

Pour qu'un béton soit étanche, il faut que les cheminements possibles dans la masse des infiltrations des eaux extérieures soient aussi réduits que possible. Par conséquent, il faut Réaliser un béton très compact pour éviter ces cheminements. Des essais très nombreux ont été faits sur la perméabilité des bétons pendant plusieurs années. Leurs conclusions sont les suivantes [30].

Le facteur essentiel est la surface spécifique des grains de ciment :

- Au-dessous de 1500 cm²/g tous les ciments donnent des bétons perméables.

- Au-dessus de 1800 cm²/g, les filtrations sont pratiquement nulles.

I.6.2.9. La durabilité:

I.6.2.9.1. La résistance aux agents agressifs:

La faible perméabilité des BHP leur confère une bonne résistance à la pénétration et au transfert dans la masse du béton des agents agressifs en phase gazeuse ou liquide (eau de mer, eaux sulfatées, solutions acides, dioxyde de carbone, etc.…) [31].

I.6.2.9.2. La résistance aux cycles de gel /dégel:

Les BHP, correctement formulés, résistent aux cycles gel/dégel par leur forte compacité et à leurs résistances mécaniques élevées [31].

I.6.2.9.3. La résistance à l'abrasion:

La résistance à l'abrasion se détermine pour les matériaux destinés aux planchers, aux revêtements routiers, aux marches d'escaliers, etc. certains matériaux sont également essayés à

l'usure. On appelle usure la destruction d'un matériau soumise à l'action commune de l'usure par abrasion et du choc [29].

L'abrasion pour les matériaux solides est causée par le frottement des pièces mécaniques (ou de tout composant mécanique) entre elles. Ce frottement a généralement lieu pendant le transport, le chargement et le déchargement. L'abrasion conduit à la formation de fines poussières et donc à la perte de matières premières précieuses ou caractéristiques de valeur.

Par conséquent la résistance à l'abrasion est une propriété extrêmement importante pour la circulation intense.

I.7. Les applications des bétons à haute performance:

Les bétons à hautes performances sont des bétons durables qui donnent une résistance à la compression supérieure à 50 MPa.

Le béton est le matériau de construction le plus utilisé, il permet de réaliser des prouesses technologiques telles que les barrages, les ponts, les immeubles, les tunnels et les centrales nucléaires. Son intérêt vient de sa grande facilité de mise en œuvre, sa résistance à la compression, sa durabilité, son faible coût et d'autres qualités.

I.7.1. Les ouvrage d'art :

I.7.1.1. Le pont de Mila :

Figure I.11 : Le pont de Mila.

I.7.1.2. Le pont de l'île de Ré (Charente-Maritime, France 1988) :

Les délais imposés à l'entreprise pour cet ouvrage de près de 3000 m de long (construit en moins de 16 mois) ont été déterminants dans le choix du béton HP.

Alors que le cahier des charges ne prévoyait qu'un béton B 40 pour les voussoirs, les cadences d'exécution de ces 798 pièces imposaient un démoulage à 15 heures, donc une résistance minimale de 12 MPa. Le béton réalisé qui présentait une résistance à 15 heures de plus de 20 MPa, atteint à 28 jours plus de 60 MPa. L'emploi des fumées de silice en association avec un super plastifiant a également nettement amélioré la maniabilité du béton.

Figure I.12 : Le pont de l'ile de Ré.

I.7.1.3. Le pont de Normandie (Le Havre, France.2007) :

Avec sa travée centrale de 856 m (nouveau record pour les ponts à haubans) et ses pylônes de 214 m de hauteur en BHP, le pont de Normandie est un ouvrage d'art exceptionnel.

Le béton de hautes performances (BHP 60 MPa), utilisé pour les voussoirs des rampes d'accès, permet le décoffrage rapide, la mise en tension accélérée des câbles de précontrainte et le poussage de la travée au rythme d'une longueur de voussoir tous les deux jours. Ceci grâce à la conjugaison du super plastifiant et d'un fort dosage en ciment.

Le béton de hautes performances est encore mis en œuvre pour réaliser les deux pylônes. Il s'agit du même béton que celui décrit précédemment.

Figure I.13 : Le pont de Normandie.

I.7.2. Le bâtiment :

I.7.2.1. La Pacific Tower (France) :

La Pacific Tower à La Défense a été l'occasion d'une nouvelle avancée des BHP dans le domaine du bâtiment.

Pour la première fois en France, la structure verticale d'une tour a été réalisée avec un béton hautes performances de classe B 60, mis en œuvre industriellement sur le chantier.

Grâce à ce choix technologique, les sections des éléments porteurs ont pu être substantiellement diminuées et permettre à la fois un gain de surface utile, ainsi que des économies d'acier et du temps de décoffrage. Par ailleurs, le choix du BHP a été fait dans le but de réaliser un ouvrage qui résiste mieux aux agressions climatiques et atmosphériques polluées. Un plan qualité imposait une sélection rigoureuse des granulats en une seule trémie, ainsi qu'une vérification régulière, tous les 150 m^3, de la résistance fixée à 72 MPa à 28 jours, du BHP prélevé à la sortie de la centrale.

Figure I.14 : La Pacific Tower.

I.7.2.2. La Grande Mosquée Hassan II (Casablanca, Maroc. 1986) :

Ce bâtiment de 175 000 m² édifié à Casablanca, en bordure de l'Océan Atlantique, est en contact direct avec les flots. Le bâtiment Mosquée, de 200 m x 100 m, d'une hauteur de 60 m, couronné par une toiture ouvrante de 2 400 m² (charpente de 800t), est constitué par une nef de prière pouvant recevoir 25 000 fidèles. Le minaret est une tour de 200 m de hauteur.

Les bétons de hautes performances ont fait l'objet d'études spécifiques pour résister (100 MPa) aux contraintes dues aux efforts sismiques, ainsi qu'à celles de la houle et aux effets de corrosion sur les armatures en milieu marin.

Figure I.15 : La Grande Mosquée Hassan II.

Enfin les travaux en BHP ne s'arrêtent pas à ces types de projets cités, ils sont utilisés dans plusieurs autres domaines tel que les travaux souterrains (tunnels, …), les plates forme de forage de pétrole, les passerelles telle que les aéroports… Les architectes ont ajouté une nouvelle technique de conception tel que les façades en BHP qui sont lisses, durables et donnent une bonne esthétique.

I.8. Les avantage des bétons à haute performance :

Le BHP présente des avantages technologiques intéressants par rapport au béton traditionnel :

- La durabilité améliorée face aux agressions physico-chimiques (perméabilité réduite meilleure protection de l'armature contre la corrosion, réduction de la pénétration des ions chlore, diminution du risque de réaction alcali-silice, meilleure résistance au gel,…). Cette durabilité améliorée présente de grands avantages en termes d'entretien à long terme ;
- En règle générale, une fluidité très élevée à l'état frais. Cette caractéristique facilite la mise en œuvre du béton, même dans les zones à densité d'armature élevée ;
- La résistance accrue au jeune âge. Cette propriété permet de réduire le temps de coffrage et d'accélérer la mise en précontrainte. Des délais d'exécution raccourcis sont donc envisageables ;
- La résistance finale accrue après durcissement, ce qui permet de réduire les sections du béton et, dès lors, la diminution du poids de la construction.
- Le module d'élasticité supérieur, susceptible d'améliorer la stabilité aérodynamique de ponts élancés ;
- Le retrait réduit, qui s'avère avantageux pour la maîtrise des déformations d'une construction, ainsi qu'en ce qui concerne les pertes de précontrainte ;
- Un autre avantage du BHP par rapport au béton conventionnel est l'aspect visuel des surfaces de béton, tant coulées sur place que pré- fabriquées. L'apparition de petites bulles d'air à la surface est souvent très limitée. La surface présente généralement une bonne texture, notamment grâce à la haute teneur en fines du béton.

I.9. La mise en œuvre du BHP :

La composition et les propriétés des différents composants ne sont pas constantes, mais varient généralement dans une fourchette de tolérance. De petites divergences ou irrégularités lors du pesage, du mélange, du transport, du coulage et du compactage sont également inévitables. En fonction de l'ampleur de toutes ces différences et de leurs interactions, les propriétés du béton frais et durci varient plus ou moins autour d'une valeur moyenne.

Les principales variables sont la teneur en eau et la quantité de ciment. Le rapport eau ciment réel différera de la valeur présupposée et fluctuera dans une fourchette donnée, appelée intervalle de variation ΔE/C.

Il existe également un lien entre le rapport eau - ciment et la résistance à la compression. Cette illustration montre également que, pour un ΔE/C. donné, l'intervalle de variation correspondant à la résistance à la compression augmentera en fonction de la réduction du rapport eau ciment. En d'autres termes, les différences dans la teneur en eau et le dosage du ciment induisent une variation supérieure de la résistance en cas de rapport eau-ciment faible. Le BHP est dès lors nettement plus sensible que le béton doté d'une résistance normale. Le pesage, le mélange, la mise en œuvre, etc. doivent dès lors s'effectuer de manière extrêmement méticuleuse, dans des marges de tolérance les plus faibles possibles.

I.10. Conclusion :

Dans ce premier chapitre nous avons présent une synthèse bibliographique sur les BHP, donne définition sur le béton à haute performance et généralité, la formulation et les étapes principaux sur les BHP, est expliqué les caractéristiques des physiques et mécanique bétons à hautes performances, en suite décrire les applications plus importante des BHP dans le Domain de Gini civil et les avantage du béton à haute performance par rapport un béton ordinaire.

Chapitre II :

Les caractéristique des matériaux et formulation des BHP

II.1. Introduction :

La normalisation des modes d'essais et de la confection du béton dans un laboratoire de recherche est une condition nécessaire pour l'obtention d'un béton de « bon qualité » qui peut satisfaire aux normes internationales afin qu'on puisse comparer ses qualités et ses caractéristiques avec des résultats obtenus ailleurs.

Cependant, dans un essai de recherche. On peut dire, que tout est normalisé, la première étape c'est faire un bon choix des matériaux, ce choix restera la dernière étape, c'est-à-dire jusqu' à l'écrasement de l'éprouvette.

Selon les normes (AFNOR) et (NF P18-102) il existe cinq types d'essais :

- l'essai de recherche ;
- l'essai d'étude de convenance et de contrôle ;
- l'essai d'information ;
- l'essai de contrôle non destructif ;
- l'essai de détection.

L'essai de recherche se base sur exécute entièrement en laboratoire destiné à étudier l'influence ce certains paramètres sur les caractéristiques physique et mécanique du béton à haute performance.

II.2. Le choix et sélection des constituants du BHP :

Ce n'est pas n'importe quel ciment, n'importe quel granulat te n'importe quel adjuvant qu'on peut fabriquer un BHP économique. Cependant, et à travers la littérature existantes, un cheminement est tracé dans ce qui suit afin d'aider à l'élaboration de ce matériaux.

Ce cheminement consiste à :

- un choix plus rigoureux des constituants (l'aspect qualitatif) ;
- le dosage de ces constituants (l'aspect quantitatif).

II.3. Les caractéristiques de matières premières utilisées:

II.3.1. Le ciment :

Le ciment utilisé dans cette formulation est un ciment portland de type CPA- CEM I 42.5. Les différences caractéristiques que soit chimique, physique ou mécanique du ciment utilisé sont

établies sur les fiches techniques élaborées au niveau des laboratoires de l'usine même, sont présentées dans les tableaux suivante :

Composition chimique du ciment									
CaO	**SiO_2**	**Al_2O_3**	**Fe_2O_3**	**SO_3**	**Na_2O**	**K_2O**	**MgO**	**Cl^-**	**MnO**
63.7	21.6	4.09	4.54	1.9	0.03	-	1.6	0.02	-

Tableau II.1 : Les compositions de ciment utilisé.

Composition minéralogique du ciment		
éléments	**abréviation**	**Teneur (%)**
Silicates tri calciques	**C_3S**	55
Silicates bi calciques	**C_2S**	17
Aluminates tri calciques	**C_3A**	2.8
Alumino-ferrites tetracalciques	**C_4AF**	13

Tableau II.2 : Les compositions minéralogiques du ciment utilisé.

Résistance		**CPA- CEM I**
2j	**compression**	18
7j	**compression**	29
28j	**compression**	>42.5
Début de prise		2h 47min
Fin de prise		3h 50min

Tableau II.3 : La résistance à la compression du CPA- CEM I.

II.3.2. Le super plastifiant :

Dans le cadre de notre étude, on a utilisé un super plastifiant haut réducteur d'eau à base depolcarboxylates d'éther et de dénomination commercial Granitex MEDAFLOW 30. Les données techniques de super plastifiant sont présentées dans le Tableau II.4

Caractéristiques techniques du super plastifiant						
dénomination	**Densité**	**pH**	**Extrait sec**	**Teneur en chlore**	**Aspect**	**Couleur**
MEDAFLOW 30	**1.07**	**6 – 6.5**	**30 %**	**< 0.10 g/l**	**Liquide**	**Brun clair**

Tableau II.4 : Caractéristiques techniques du super plastifiant (MEDAFLOW 30).

II.3.2.1. Le domaine d'utilisation :

Le MEDAFLOW 30 peut être utilisé dans divers domaines:

- Les bétons à hautes performances ;
- Le béton auto-plaçant ;
- Le béton pompé ;
- Les bétons précontraints.

II.3.2.2. Les propriétés du MDAFLOW30 au niveau du bêton frais et du bêton durci :

A) Béton frais :

- Obtention d'un rapport E/C très faible ;
- Amélioration considérable de la fluidité ;
- une très bonne maniabilité ;
- Eviter la ségrégation ;
- Faciliter la mise en œuvre du béton.

B) Béton durci :

- Augmenter les résistances mécaniques ;
- diminuer la porosité ;
- augmenter la durabilité ;
- diminuer le retrait et le risque de fissuration.

II.3.3. Les granulats :

❖ **Gravier :**

Tous les bétons ont été fabriqués avec du gravier concassé de calcaire dont le diamètre maximal (D_{max}) est de 25 mm. Trois (03) fractions granulaires ont été employées : un gravier (G1) de classe granulaire (3/8), un gravier (G2) de classe granulaire (8/15), et un gravier (G3) de classe granulaire (15/25), de la carrière de Chelghoum-laid wilaya de Mila.

❖ **Analyse granulométrique :**

L'essai de l'analyse granulométrique est effectué selon les normes XP P18-545, NF EN 933-1.

Il permet de déterminer les proportions massiques des passants cumulés, à travers les tamis de différents diamètres de maille, d'un échantillon de sable ou de gravillon. Les pourcentages de passant cumulé sont représentés sous la forme de courbe granulométriques dans la figure II.1 et Tableau II.5 si dessous.

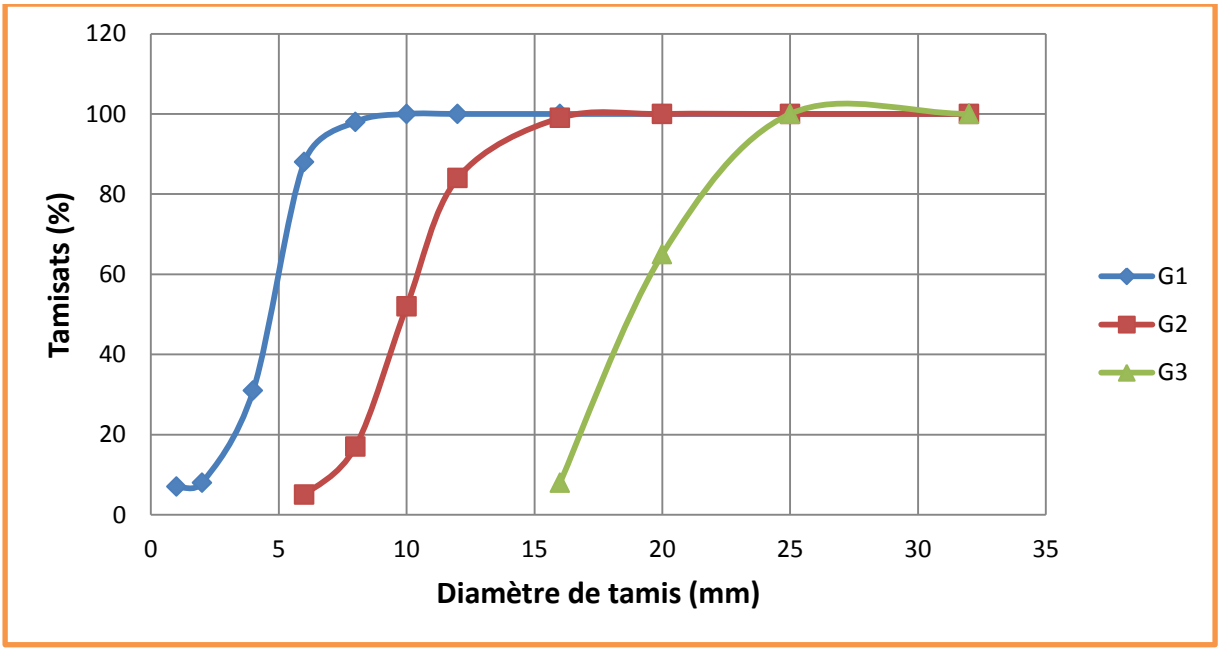


Figure II.1 : Courbes d'analyse granulométrique des graviers utilisés.

Tamis (cm)	G1	G2	G3
31.5	-	-	100
25	-	-	100
20	-	-	65
16	-	99	8
12.5	-	84	0
10	100	52	0
8	98	17	0
6.3	88	5	0
4	31	0	0
2	8	0	0
1	7	0	0

Tableau II.5 : Analyse granulométrique par tamisage des graviers utilisés.

❖ **Sable :**

Dans cette étude, on a utilisé 2 séries du sable, un sable siliceux naturel (S1) de classe granulaire (0/1) avec un module de finesse MF1=1.86, un sable de carrière (S2) de classe granulaire (0/3) avec un module de finesse MF2=3.22, et un sable corrigée (S3) qui a été employé afin d'améliorer le module de finesse obtenue par le mélange de 50% du sable S1 et 50% du sable S2, avec un module de finesse MF3=2.54. Les courbes granulométriques des sables utilisés pour tous les mélanges sont présentées dans la Figure II.2 et Tableau II.6 si dessous.

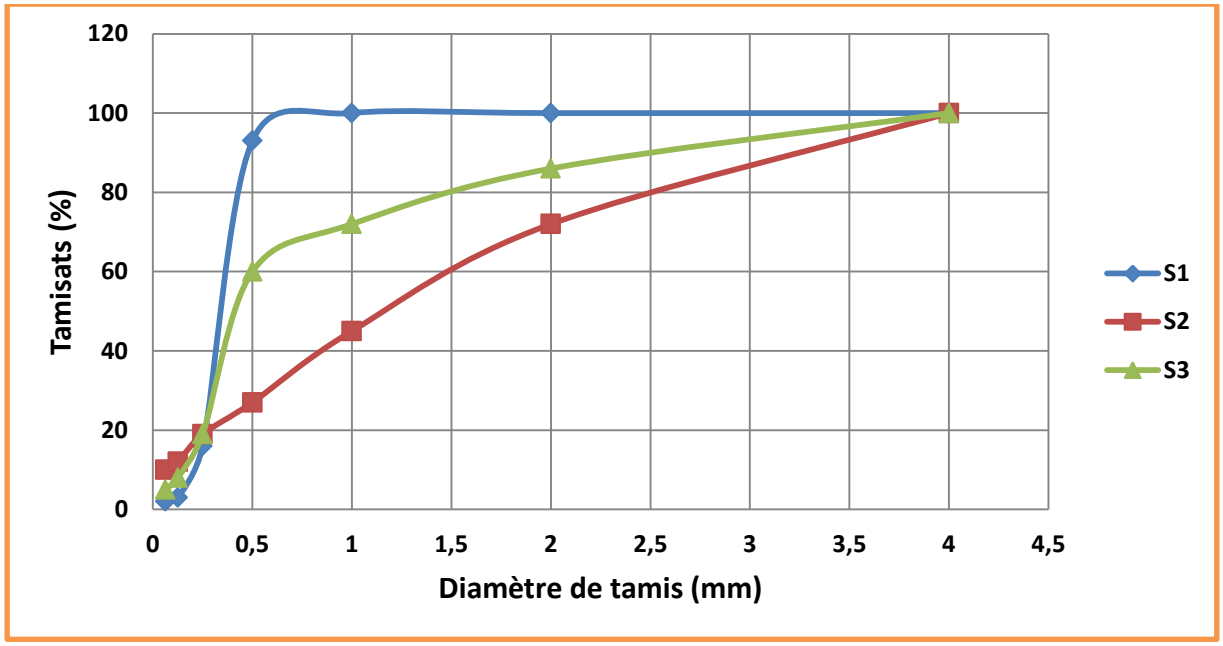


Figure II.2 : Courbes d'analyse granulométrique des sables utilisés.

Tamis (cm)	S1	S2	S3
4	-	100	100
2	-	72	100
1	100	45	72
0.5	96	27	60
0.25	16	19	19
0.125	3	12	8
0.063	92	10	5

Tableau II.6 : Analyse granulométrique par tamisage des sables utilisés.

❖ **Caractéristiques physiques et mécanique :**

Les caractéristiques physiques et mécaniques des matériaux utilisés sont présentées dans le Tableau II.7 :

caractéristiques	Matériaux						Spécification
	S1	**S2**	**S1+S2**	**G1**	**G2**	**G3**	
Masse volumique absolue	2.651	0.735	-	2.70	2.705	2.724	-
Coefficient D'absorption	0.388	0.456	-	0.456	0.347	0.333	≤ 2.5
Coefficient D'aplatissement	-			17.56	12.23	6.33	≤ 25
Los Angeles	-			23.36			≤ 30
Micro Deval	-			9.31			≤ 25
Module finesse	1.87	3.24	2.56	-			
Valeur BM	0.87	0.62	0.76	-			≤ 1.5

Tableau II.7 : Caractéristiques physiques et mécaniques des granulats utilisés.

II.3.4. La fumée de silice :

La fumée de silice est essentiellement composée de silice vitreuse, les particules de fumée de silice se présentent sous forme de sphères ayant des diamètres compris entre 0.1µm et 1ou 2 µm, de telle sorte que la dimension moyen des sphères de fumée de silice est 100 fois plus faible que celle d'une particule de ciment moyen. Il faut donc utilisée un microscope électronique à balayage au par transmission des particules de fumée de silice.

Elle est à base de micro silice provenant de la société « GRANITEX », sous forme de poudre, cette fumée de silice est désignée par le nom « MEDAPLAST HP », il permet :

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

Les caractéristiques physiques sont présentées au tableau suivant :

Les caractéristiques techniques de la fumée de silice							
Aspect	Densité	Composition			Surface spécifique	Humidité par étuves à 105°C	Taille des particules
Poudre	0.5	SiO2	CO3	Cl-	>15 (m^2/gr)	< 1 (1%)	< 0.1 (microns)
		> 85(%)	< 2.5(%)	< 0.2(%)			

Tableau II.8 : Caractéristiques techniques du la fumée de silice.

II.3.5. Le laitier granulé:

Le laitier granulée 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.9, c'est un silico-aluminate de calcium et de magnésium, il est constitué essentiellement de quatre oxydes qui sont : (SiO2- Al2O3-CaO-MgO).

Eléments	SiO2	Al2O3	Fe2O3	CaO	MgO	SO3	K2O	Na2O	Cl-	MnO
Oxydes (%)	41.69	7.05	1.41	39.77	5.49	0.15	0.44	0.10	-	-
Surface spécifique	5000 cm^2/g									

Tableau II.9 : Composition chimique du laitier D'El -Hadjar (Annaba).

II.3.6. L'eau de gâchage :

L'eau utilisée pour l'ensemble des essais est celle au laboratoire de génie civil qui répond aux critères d'acceptabilité des normes en vigueur, les résultats de l'analyse au laboratoire de géni civile de cette eau sont dans le tableau II.10.

Ca	Mg	Na	K	Cl	SO4	CO3	NO3	PH	T (ºC)
74.4	49	40	5	95	170	300	42.3	7.5	17.1

Tableau II.10 : Composition de l'eau de gâchage (ml/l).

II.4. La formulation du béton d'étude :

II.4.1. La 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 [17].

- 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).

Dans cette étude en utilisé la méthode de université de Sherbrooke pour décrire l'effet des ajouts cimentaire sur les propriétés des BHP à l'état frais.

II.4.2. 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 [17].

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.

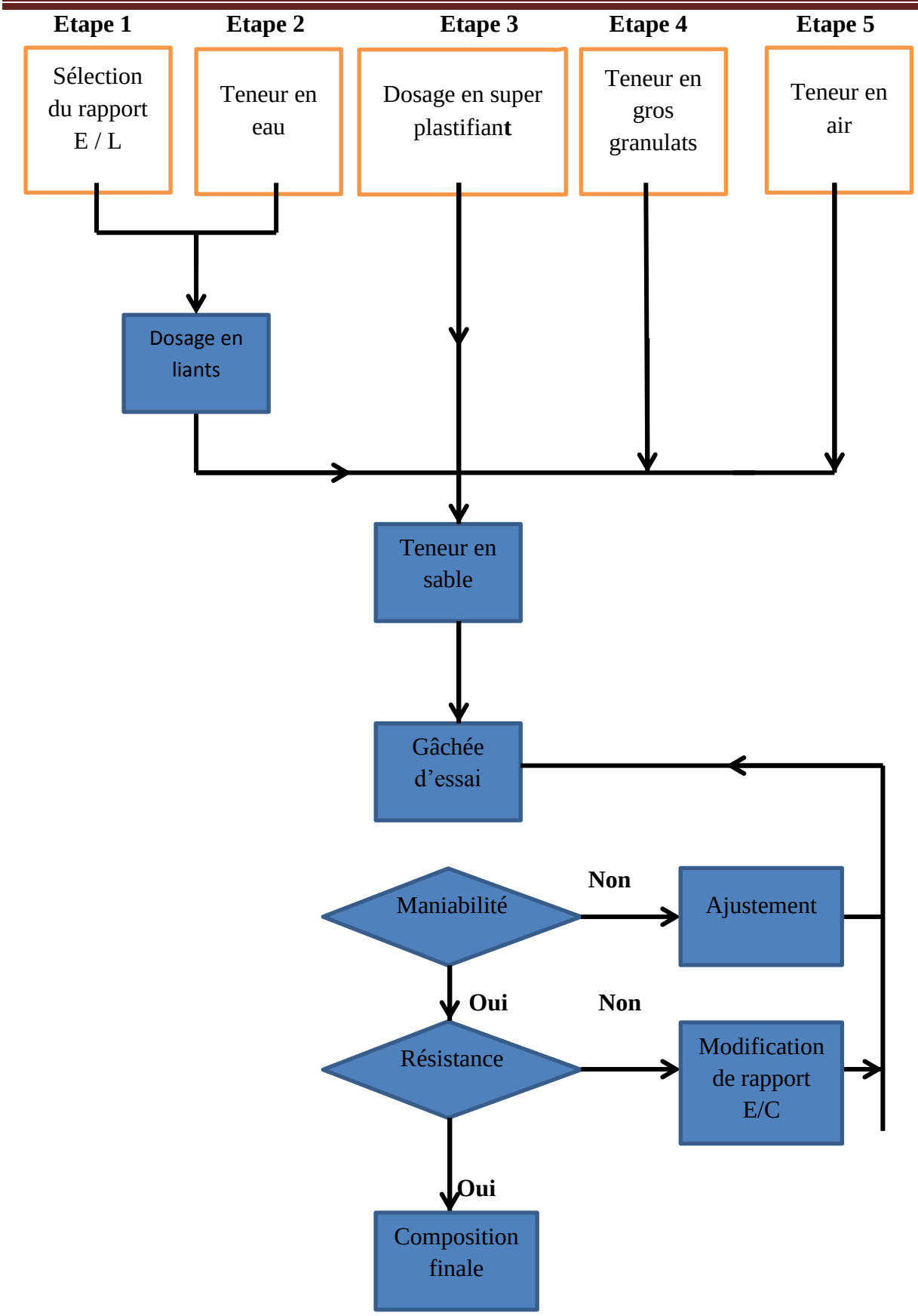


Figure II.3 : Organigramme de la méthode proposée pour formuler des BHP [17].

A) Rapport eau/liant :

On peut trouver le rapport eau /liant en utilisant la figure II.4 pour des bétons ayant une résistance à la compression donnée à 28 jours. Le fuseau de la figure I.6 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.

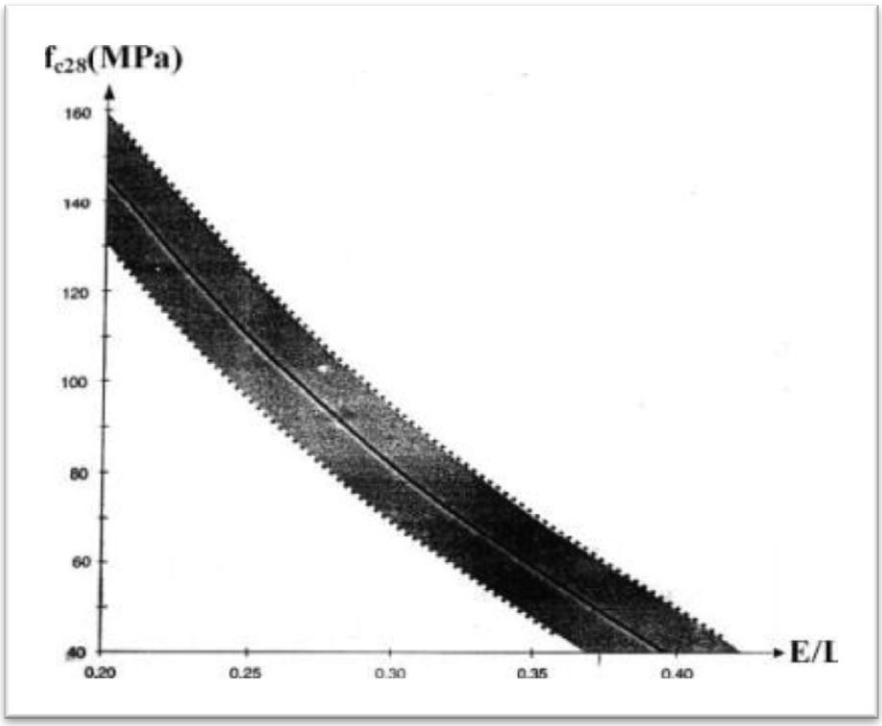


Figure II.4 : Abaque de détermination du rapport E/L en fonction de la résistance [17].

B) Dosage en eau:

Une des plus grandes difficultés rencontrées lorsque l'on calcule la composition d'un BHP est de déterminer la quantité d'eau qu'il va falloir utiliser pour fabriquer un béton qui aura un affaissement de 200 mm plus d'une heure après son malaxage. En effet, la maniabilité d'un BHP est contrôlée par plusieurs facteurs: la quantité initiale d'eau, la réactivité du ciment, la quantité de super plastifiant et son degré de compatibilité avec ce ciment particulier.

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.

La figure II.5 présente une approche simplifiée, basée sur le concept de point de saturation. 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 /m^3 [17].

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

Figure II.5: Détermination du dosage en eau [17].

C) 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%.

D) Dosage en gros granulat:

Le dosage en gros granulat peut être déduit de la figure II.6 en fonction de la forme des granulats. S'il y a quelque doute sur la forme des granulats ou si on ne la connaît pas, on peut toujours commencer avec une quantité de gros granulats de 1000 kg/m^3.

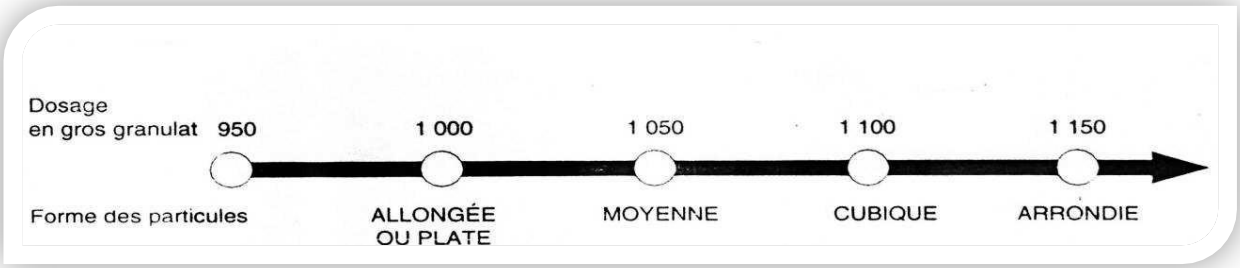


Figure II.6 : Dosage en gros granulat [17].

E) Teneur en air:

Les BHP qui sont utilisés dans des environnements ou 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. 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.

II.4.3. Les formule du calcul :

Les calculs nécessaires à la formulation de notre BHP d'étude sont :

1. Le rapport E/C : Reporter la valeur du rapport eau/liant telle que choisie dans la Figure II.4.

2. Le dosage en super plastifiant : On prend la valeur de 1.5% du poids de ciment.

3. La quantité d'eau nécessaire : Déduire la quantité d'eau nécessaire, selon le point de saturation montré dans la Figure II.5.

4. Le dosage en liant : D'après le rapport E/C et la quantité d'eau nécessaire on peut calculer la masse du liant, pour notre cas c'est le ciment CPA 42.5.

5. Le dosage en gros granulats : Reporter la masse en gros granulat trouvé dans la Figure II.6.

6. Les valeurs relatives au super plastifiant (Figure II.7) :

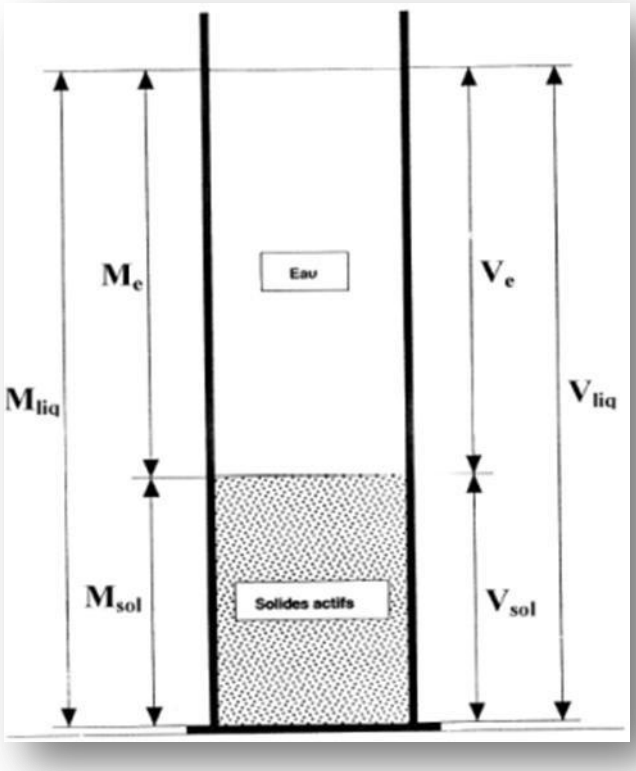


Figure II.7: Représentation schématique d'un super plastifiant.

a) Calculer la masse du solide dans le super plastifiant **Msol (kg)** :

$$\mathbf{Msol} = \frac{\boldsymbol{C \times D}}{\mathbf{100}} \quad (2.3)$$

Ou :

C : La masse de liant.

D : Le dosage en super plastifiant (la masse du solide).

b) Calculer le volume du super plastifiant liquide **Vliq (l/m³)** :

$$\mathbf{Vliq} = \frac{\boldsymbol{Msol \times dsup}}{\mathbf{100}} \quad (2.4)$$

Msol : La masse des particules solides de super plastifiant.

dsup : La densité du super plastifiant.

S : La teneur en solides de super plastifiant.

c) Calculer le volume d'eau dans le super plastifiant **Ve (l/m³)** :

$$\mathbf{Ve} = \frac{\boldsymbol{Vliq \times dsup}}{\mathbf{100}} \quad (2.5)$$

dsup : La densité du super plastifiant.

Vliq : Le volume de super plastifiant.

S : La teneur en solide de super plastifiant.

d) Calculer le volume des solides contenus dans le super plastifiant **Vsol (l/m³)** :

$$\mathbf{Vsol = Vliq - Ve} \quad (2.6)$$

7. Le volume de ciment : On divisant la masse du ciment sur densité absolue (l/m³).

8. Le volume en gros granulats : Pour calculer le volume de gros granulats en divisant la masse du gros granulat (Figure) par sa densité absolue (l/m³).

9. La quantité d'air piégé : Multiplier la quantité d'air par 10 pour obtenir le volume d'air piégée en (l/m³), pour notre cas on a suggéré d'utiliser une valeur de 1.5%.

10. La somme de tous les volumes : C'est le taux des volumes calculés précédemment;

volume d'eau + volume du ciment + volume d'air + volume du solide dans le super plastifiant + volume de gros granulats.

11. Le volume de granulat fin : Calculer le volume de granulat (en l/m³) en soustrayant de 1000 litres, le volume précédent.

12. La masse de granulat sec : Maintenant que l'on connait le volume de granulat fin, on peut calculer la masse de granulat fin en multipliant son volume par sa densité absolue (kg).

13. La masse volumique du béton : On doit additionner tous les masses telles que, la masse d'eau, masse du ciment, masse de solide en SP, masse de gros granulat, masse de granulat fin (kg/m³).

II.4.4. Formulation du béton :

L'étude des pourcentages des fractions granulaire se fait par la méthode de DREUX-GORISSE :

- **Tracé de la droite de référence de Dreux :**

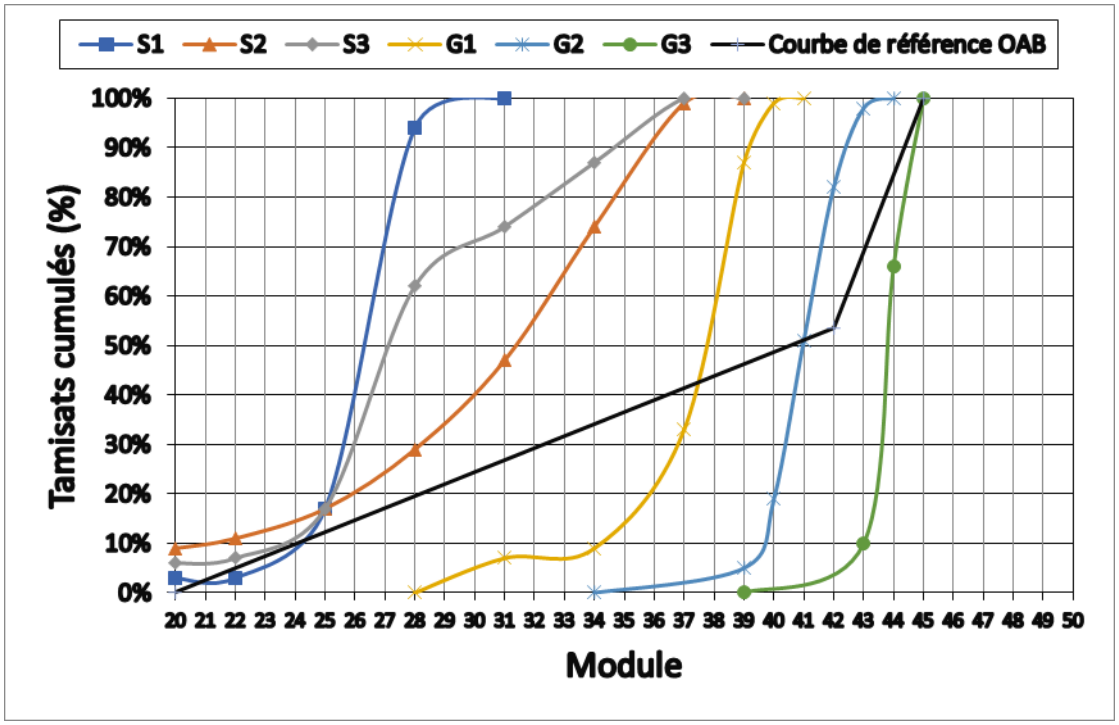


Figure II.8 : Exemple d'une courbe de mélange OAB par la méthode de DREUX-GORISSE.

Après le tamisage des granulats, on trace les courbes granulométriques des différents granulats. Ensuite on trace la courbe granulaire de référence OAB : le point O étant l'origine (0.0), le point B (à l'ordonnée 100 % tamisât) correspond à la dimension Dmax du plus gros granulat et le point A (X, Y) dit le point de brisure a les coordonnées ainsi définies en abscisse à partir de Dmax.

La droite de référence de Dreux représente la courbe idéale d'un matériau à minimum de vides. C'est une droite brisée dont le point de brisure est défini par son abscisse X et son ordonnée Y :

Avec :

X : c'est le module (ouverture des tamis).

Y : est donné en pourcentage de passants cumulés.

En abscisse :

Si Dmax $\leq$ 20 mm, XA = Dmax / 2.

Si Dmax > 20, XA est située au milieu du "segment gravier" limité par le module.

Correspondant à Dmax.

En ordonnée :

- A est donné par la formule :

$YA = 50-\sqrt{((Dmax))} + K'$ Où $K' = K + Ks + Kp$.

Avec K (voir tableau II.11 ci-dessous) un terme correcteur qui dépend du dosage en ciment, de l'efficacité du serrage, de la forme des granulats roulés ou concassés. (En particulier la forme du sable).

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

Tableau II.11 : Valeurs de K en fonction du dosage en ciment, de la puissance de la vibration et de l'angularité des granulats et permettant de calculer Y ordonnée du point de brisure de la courbe de référence (…).

- **Correction supplémentaire Ks :**

La correction supplémentaire (sur Kp) peut être effectuée en ajoutant la valeur Ks = 6 Mf - 15 (Mf étant le module de finesse du sable qui peut varier de 2 à 3 avec une valeur optimale de l'ordre de 2,5 pour laquelle la correction préconisée est alors nulle).

- **Correction supplémentaire Kp :**

Si la qualité du béton est précisée « pompable », il conviendra de conférer au béton le maximum de plasticité et de l'enrichir en sable par rapport à un béton de qualité « courant ». On pourra pour cela majorer le terme correcteur Kp de la valeur Kp = + 5 à 10 environ, selon le degré de plasticité désiré.

- **Dosage des granulats :**

La courbe granulaire de référence OAB doit être tracée sur le même graphe (Graphe) que les courbes granulométriques des granulats composants. On trace alors les lignes de partage entre chacun en joignant le point à 95% de la courbe granulaire du premier, au point à 5% de la courbe du granulat suivant, et ainsi de suite.

On lira alors sur la courbe de référence au point de croisement avec là où les droites de partage, le pourcentage de chacun des granulats **S3, G1, G2, G3**. Les résultats obtenus sont :

Granulats	Pourcentage (%)
	BHP25
S3	30
G1	18
G2	22
G3	30

Tableau II.12 : Pourcentage de chacun des granulats pour des différentes compositions du béton BHP.

II.4.5. Le programme expérimental :

Les compositions des bétons avec et sans laitier ou fumée de silice retenues pour le programme expérimental sont reportées dans les 3 tableaux suivants II.11**,** II.12, II.13, à noter que les teneurs en ajouts de fumée de silice plus le laitier granulé et de super plastifiant après optimisation sont respectivement : de 5%, 10% et 1.5% du poids de ciment.

Pour E/C = 0.25 :

Matériaux	BR	BHP (2FS)	BHP (5FS)	BHP (8FS)	BHP (2FS, 25L)	BHP (5FS 10L)
Ciment CEM I CPA 42.5	540	529.2	513	496.8	394.2	459
Eau	135	135	135	135	135	135
Super plastifiant	18	18	18	18	18	18
G1 [kg/m³]	458	458	458	458	458	458
G2 [kg/m³]	335.9	335.9	335.9	335.9	335.9	335.9
G3 [kg/m³]	275	275	275	275	275	275
S1 [kg/m³]	369	369	369	369	369	369
S2 [kg/m³]	369	369	369	369	369	369
Fumée de silice	-	10.8	27	43.2	10.8	27
Laitier granulé	-	-	-	-	135	54

Tableau II.13 : Composition des bétons (BHP) avec E/C = 0.25.

Pour E/C = 0.30 :

Matériaux	BR	BHP (2FS)	BHP (5FS)	BHP (8FS)	BHP (2FS, 25L)	BHP (5FS 10L)
Ciment CEM I CPA 42.5	450	441	427.5	414	328.5	382.5
Eau	135	135	135	135	135	135
Super plastifiant	18	18	18	18	18	18
G1 [kg/m³]	458	458	458	458	458	458
G2 [kg/m³]	335.9	335.9	335.9	335.9	335.9	335.9
G3 [kg/m³]	275	275	275	275	275	275
S1 [kg/m³]	369	369	369	369	369	369
S2 [kg/m³]	369	369	369	369	369	369
Fumée de silice	-	9	22.5	36	9	22.5
Laitier granulé	-	-	-	-	112.5	45

Tableau II.14 : Composition des bétons (BHP) avec E/C = 0.30.

Pour E/C = 0.35 :

Matériaux	BR	BHP (2FS)	BHP (5FS)	BHP (8FS)	BHP (2FS, 25L)	BHP (5FS 10L)
Ciment CEM I CPA 42.5	385.7	377.98	366.41	354.84	281.56	327.84
Eau	135	135	135	135	135	135
Super plastifiant	18	18	18	18	18	18
G1 [kg/m³]	458	458	458	458	458	458
G2 [kg/m³]	335.9	335.9	335.9	335.9	335.9	335.9
G3 [kg/m³]	275	275	275	275	275	275
S1 [kg/m³]	369	369	369	369	369	369
S2 [kg/m³]	369	369	369	369	369	369
Fumée de silice	-	7.71	19.28	30.85	7.71	19.28
Laitier granulé	-	-	-	-	96.42	38.57

Tableau II.15 : Composition des bétons (BHP) avec E/C = 0.35.

- **Désignation des bétons utilisés :**

BR : Béton sans ajout cimentaire.

BHP (2FS) : Des BHP avec 2% de fumée de silice.

BHP (5FS) : Des BHP avec 5% de fumée de silice.

BHP (8FS) : Des BHP avec 8% de fumée de silice.

BHP (2FS, 25L) : Des BHP avec 2% de fumée de silice et 25% de laitier granulé.

BHP (5FS, 10L) : Des BHP avec 5% de fumée de silice et 10% de laitier granulé.

II.4.6. Fabrication des bétons, mise en place et conservation :

- **Malaxage du béton :**

Le gâchage consiste que tous les composants nécessaires sont préparés et que les granulats sont bien secs. Le malaxage des bétons a été effectué à l'aide d'une bétonnière d'une capacité de 50 litres.

0 min : Ajout des matériaux secs et démarrage du malaxeur.

1 min: Ajout d'une quantité d'eau avec superplastifiant.

3 min: Arrêt du malaxeur.

4 min : Ajout du reste de la quantité d'eau avec superplastifiant + démarrage du malaxeur.

6 min: Arrêt du malaxeur et début des tests sur béton frais.

- **Forme des éprouvettes :**

Dans les essais réalisés pour l'étude des bétons, un seul type d'éprouvette a été utilisé (cubes 15*15*15 cm).

- **Remplissage et vibration :**

Après le malaxage qui dure environ 6 minutes, le béton est prêt à l'emploi. Le béton est introduit dans des moules déjà graissés par une huile pour faciliter le démoulage après 24 heures de leur coulage. Le coulage est exécuté en deux couches vibrées jusqu'à la stabilisation de niveau du béton. Le but de la vibration est le remplissage parfait du moule. A la fin du coulage, il faut araser les éprouvettes à l'aide d'une règle.

La face supérieure de l'éprouvette doit être lisse est bien finie pour chaque gâchée et juste après le malaxage, on procède à la mesure de la maniabilité, caractérisée par l'affaissement au cône d'Abrams.

- **Conservation des éprouvettes :**

Les éprouvettes sont démoulées après 24 heures et conservées dans l'eau. Avant le démoulage les éprouvettes sont conservées dans un locale pendant 24h±1h. Pour cette étude on a adopté les conditions du chantier, c'est-à-dire que le mûrissement des bétons d'étude a eu lieu dans l'eau potable et l'eau de mer.

Après le démoulage, les éprouvettes sont conservées dans l'eau potable jusqu'à l'échéance déterminé (1 jours, 7 jours et 28jours).

II.5.Conclusion :

Dans ce chapitre on a pu voir les caractéristiques physiques, chimiques et mécaniques des matières premières utilisent : ciment, granulat, super plastifiant, fumée de silice, laitier granulé et l'eau de gâchage, dans cette étude en a utilisé la méthode d'université de Sherbrooke pour décrire l'effet des ajouts cimentaire sur les propriétés des BHP à l'état frais. 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.

En suite les courbes granulométriques de toutes les classes granulaires sont présentées, Il était important de définir la partie normative à laquelle doivent répondre les différents mélanges. La méthode de formulation a été développée et le calcul des proportions des constituants de notre programme expérimental étant fait.

Chapitre III :

Analyse des résultats du plan expérimental

III.1. Introduction :

Ce travail expérimental répond à deux objectifs principaux : est d'analyser l'effet des ajouts minéraux sur les BHP, et la deuxième objectif de cette étude est comparé les performances physico-mécaniques et la durabilité des bétons à haute performance à base d'addition de la fumée de silice et de laitier granulé.

En fin, nous présenterons les résultats des essais expérimentaux obtenus sur les différentes séries bétons testés (affaissement au con d'abrams, la résistance mécanique à la compression).

III.2. Méthodologie adaptée pour les manipulations :

Rappelons que le but de notre travail est la formulation et la caractérisation d'un béton haute performance. Pour atteindre les objectifs on a adopté la méthodologie suivante :

- Il fallait préparer des gâchés pour confectionner 45 séries d'éprouvettes cubiques (15×15×15) cm^3 ;
- La composition a été déterminée par la méthode de formulation de l'université de Sherbrooke ;
- L'étude a porté sur l'influence du milieu de conservation ;
- Les essais étant exécuté à : 1j, 7 j, et 28 jours ;
- Les propriétés étudiées : l'affaissement, et la résistance à la compression.

III.3. Comportement du béton à l'état frais :

La caractérisation des bétons à l'état frais est obtenue en exploitant la mesure de la maniabilité, caractérisée par l'affaissement au cône d'abrams, la masse volumique et l'air occlus.

III.3.1. L'ouvrabilité du béton :

L'essai d'affaissement au cône d'abrams est l'essai le plus utilisé pour mesurer la maniabilité du béton. Cet essai est réalisé selon les prescriptions de la norme NF EN 12350-2 [32].

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

Le cône utilisé est de dimensions (D= 20cm, d= 10 cm et h= 30 cm). 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. L'affaissement h est mesuré après stabilisation de l'affaissement par l'intermédiaire d'une règle.

Les valeurs d'affaissement mesurées des bétons étudiés sont présentées dans les tableaux III.1,

III.2, III.3 :

Pour E/C = 0.25 :

Type du béton	**BR**	**BHP (2FS)**	**BHP (5FS)**	**BHP (8FS)**	**BHP (2F 25L)**	**BHP (5FS10L)**
Affaissement (cm)	22	18	19	20	19	20

Tableau III.1 : Résultats d'essai d'affaissement des BHP avec E/C = 0.25.

Pour E/C = 0.30 :

Type du béton	**BR**	**BHP (2FS)**	**BHP (5FS)**	**BHP (8FS)**	**BHP (2F 25L)**	**BHP (5FS10L)**
Affaissement (cm)	22	20	21	22	21	22

Tableau III.2 : Résultats d'essai d'affaissement des BHP avec E/C = 0.30.

Pour E/C = 0.35 :

Type du béton	**BR**	**BHP (2FS)**	**BHP (5FS)**	**BHP (8FS)**	**BHP (2F 25L)**	**BHP (5FS10L)**
Affaissement (cm)	23	21	22	23	22	23

Tableau III.3 : Résultats d'essai d'affaissement des BHP avec E/C = 0.35.

- **Les commentaires :**
  - L'effet de dosage des ajouts sur l'ouvrabilité du béton a été évalué par le cône d'Abrams immédiatement après le malaxage.
  - La fumée de silice et laitier granulé améliorent la maniabilité du béton est donne un comportement rhéologique très fluides. il est important d'influence de la finesse de laitier lorsqu'on cherche à fabriquer des bétons plus fluides.
  - Pour un béton sans ajout cimentaire l'affaissement entre 22 et 23 cm.

- ❖ Pour E/C = 0.25 avec un ajout cimentaire la fumée de silice avec un dosage de (2%) l'affaissement égal à 18 cm, si on augmente le dosage du la fumée de silice (5% et 8%) en remarqué l'affaissement du béton augmenté (20 cm).
- ❖ Pour E/C = 0.30 avec un ajout cimentaire la fumée de silice avec un dosage de (2%) l'affaissement égal à 20 cm, si on augmente le dosage du la fumée de silice (5% et 8%) en remarqué l'affaissement du béton augmenté (22 cm).
- ❖ Pour E/C = 0.30 avec un ajout cimentaire la fumée de silice avec un dosage de (2%) l'affaissement égal à 21 cm, si on augmente le dosage du la fumée de silice (5% et 8%) en remarqué l'affaissement du béton augmenté (23 cm).
- ❖ Donc on peut observer que tous les formulations de BHP avec ajouts ont donné une meilleure maniabilité par rapport au béton sans ajouts
- ❖ Tous les mélanges des bétons à haute performance présentent des bétons fluides.
- ❖ Les bétons **(BHP (8FS), BHP (5FS, 10L))** avec un rapport **E/C = 0.35** donne les meilleures valeurs d'affaissement (22, 23cm).

III.4. Comportement du béton à l'état durcis :

III.4.1. Essai de compression :

L'essai de la résistance mécanique en compression a été réalisé sur des éprouvettes de la forme cubique de dimensions (15 × 15 × 15) cm³ pour chaque âge (1, 7, 28 jours). Pour chaque type de béton et à chaque échéance d'essai, la résistance en compression obtenue est la moyenne issue de trois éprouvettes.

L'écrasement des éprouvettes a été réalisé à l'aide d'une presse mécanique de capacité maximale de 2000 kN avec une vitesse de chargement de 2.4 kN/Sec.

La charge de rupture correspond à la charge maximale enregistrée au cours de l'essai. La résistance à la compression à '' j'' jours fcj est le rapport entre la charge de rupture et la section transversale de l'éprouvette (Equation III.1).

$$\mathbf{fcj} = \frac{\boldsymbol{P}}{\boldsymbol{S}} \text{..... III.1}$$

Ou :

P : Charge de rupture en N.

S : Section transversale de l'éprouvette en mm².

Les tableaux suivant présente l'évolution mécanique des six séries de bétons en fonction du temps aux échéances 2, 7, 28 jours.

III.4.2. Résultats de l'essai :

Jours	Résistance à la compression (MPa)								
	BR			BHP 2FS			BHP 5FS		
	E/C			E/C			E/C		
	0.25	0.30	0.35	0.25	0.30	0.35	0.25	0.30	0.35
1	19.53	17.21	15.36	24.72	22.05	20.17	27.09	24.90	22.10
7	45.81	42.23	40.19	62.43	60.53	57.93	64.18	62.01	60.14
28	56.44	53.19	49.29	72.31	70.33	66.41	76.65	73.90	69.08

Jours	Résistance à la compression (MPa)								
	BHP 8FS			BHP 2FS 25L			BHP 5FS 10L		
	E/C			E/C			E/C		
	0.25	0.30	0.35	0.25	0.30	0.35	0.25	0.30	0.35
1	29.51	27.88	25.63	26.91	23.84	21.06	28.85	26.40	24.02
7	67.55	65.30	63.02	65.02	63.10	60.89	66.22	64.18	62.05
28	82.15	80.01	74.65	77.4	75.21	68.33	79.83	76.18	71.48

Tableau III.4, Tableau III.5 : Les résistances à la compression des différents BHP étudié.

- **Les commentaires :**

Les tableaux suivant expliqués l'augmentation de la résistance à la compression des différentes compositions des BHP en fonction de l'âge du béton.

Pour le rapport E/C = 0.25 :

- 19.53 MPa à 1 jours jusqu'à 56.44 MPa à 28jours pour le béton sans ajout cimentaire.
- 24.72 MPa à 1 jours jusqu'à 72.31 MPa à 28jours pour le béton avec un dosage 2% de fumé de silice.
- 27.09 MPa à 1 jours jusqu'à 76.65 MPa à 28jours pour le béton avec un dosage 5% de fumé de silice.

- 29.51 MPa à 1 jours jusqu'à 82.15 MPa à 28jours pour le béton avec un dosage 8% de fumé de silice.
- 26.91 MPa à 1 jours jusqu'à 77.4 MPa à 28jours pour le béton avec un dosage 2% de fumé de siliceet du 25% de laitier granulé.
- 28.85 MPa à 1 jours jusqu'à 79.83 MPa à 28jours pour le béton avec un dosage 2% de fumé de silice et du 25% de laitier granulé.

Les résultats de ces essais pour les différents types de bétons sont représentés graphiquement ci-après :

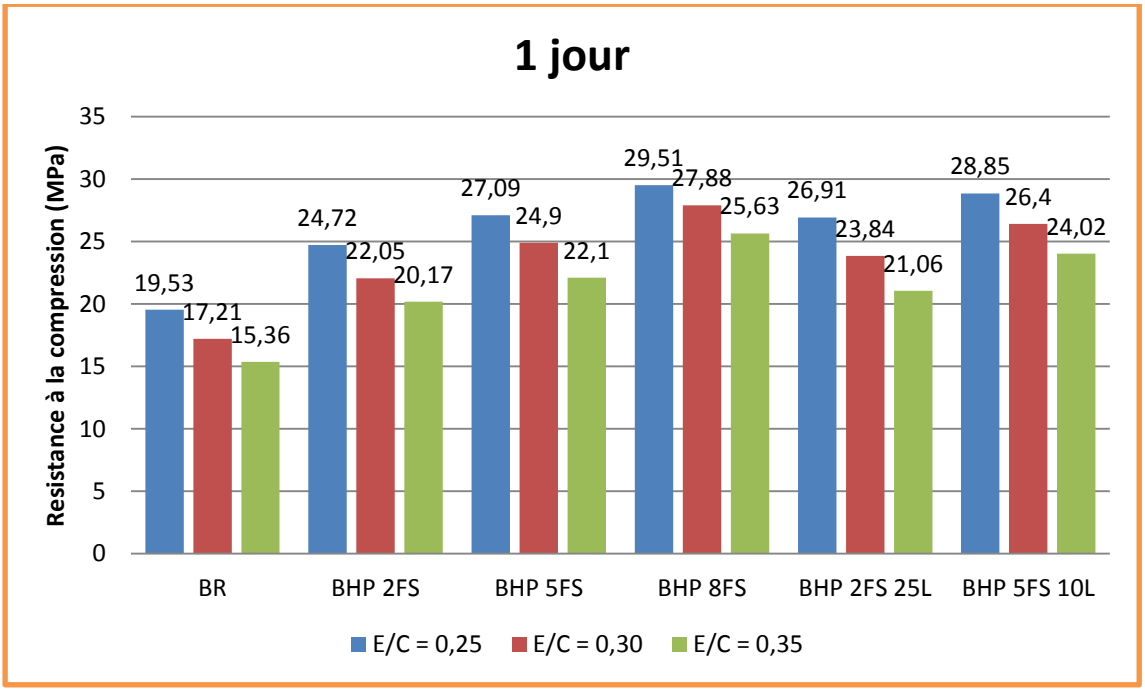


Figure III.1 : L'évaluation de la résistance à la compression en fonction des compositions des BHP avec différents rapport E/C après 1 jour.

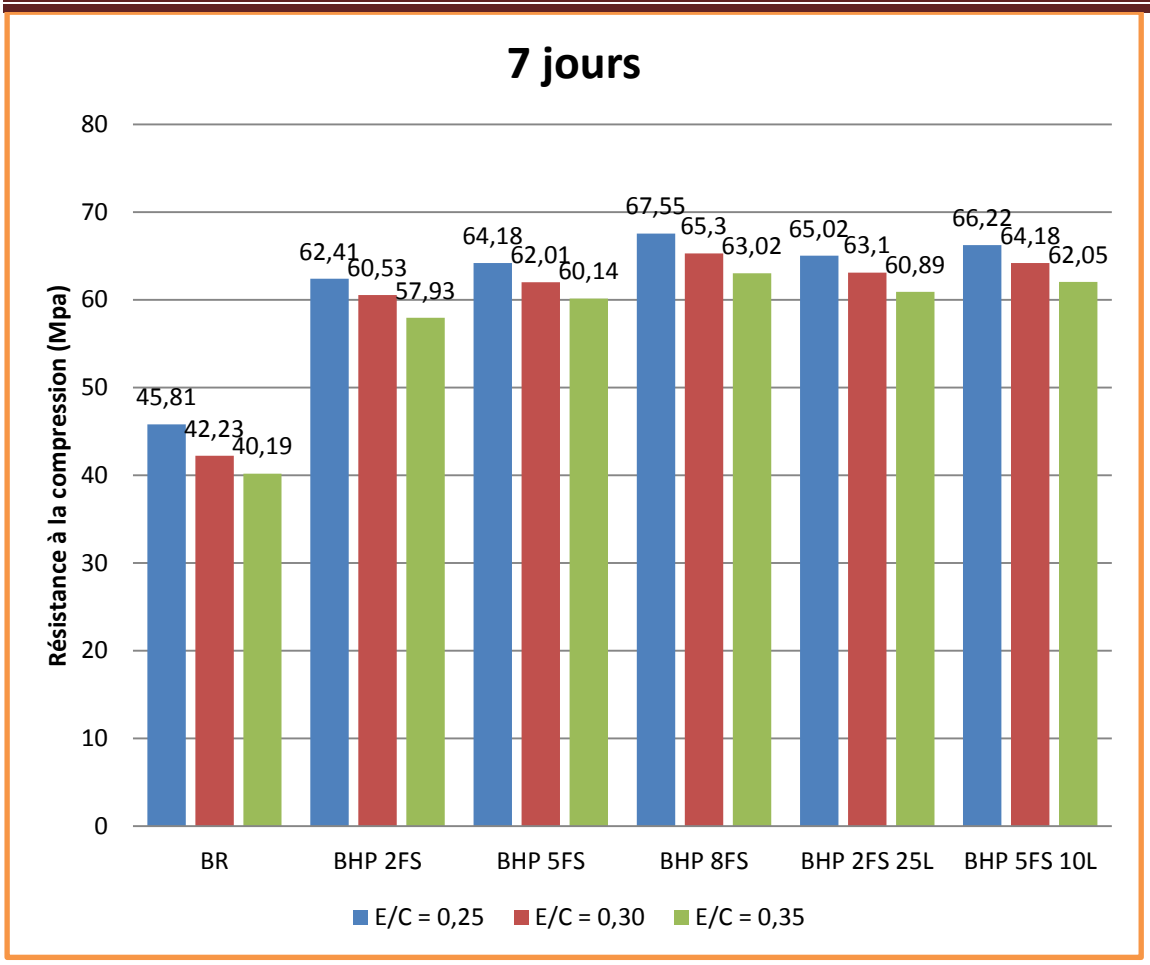


Figure III.2 : L'évaluation de la résistance à la compression en fonction des compositions des BHP avec différents rapport E/C après 7 jours.

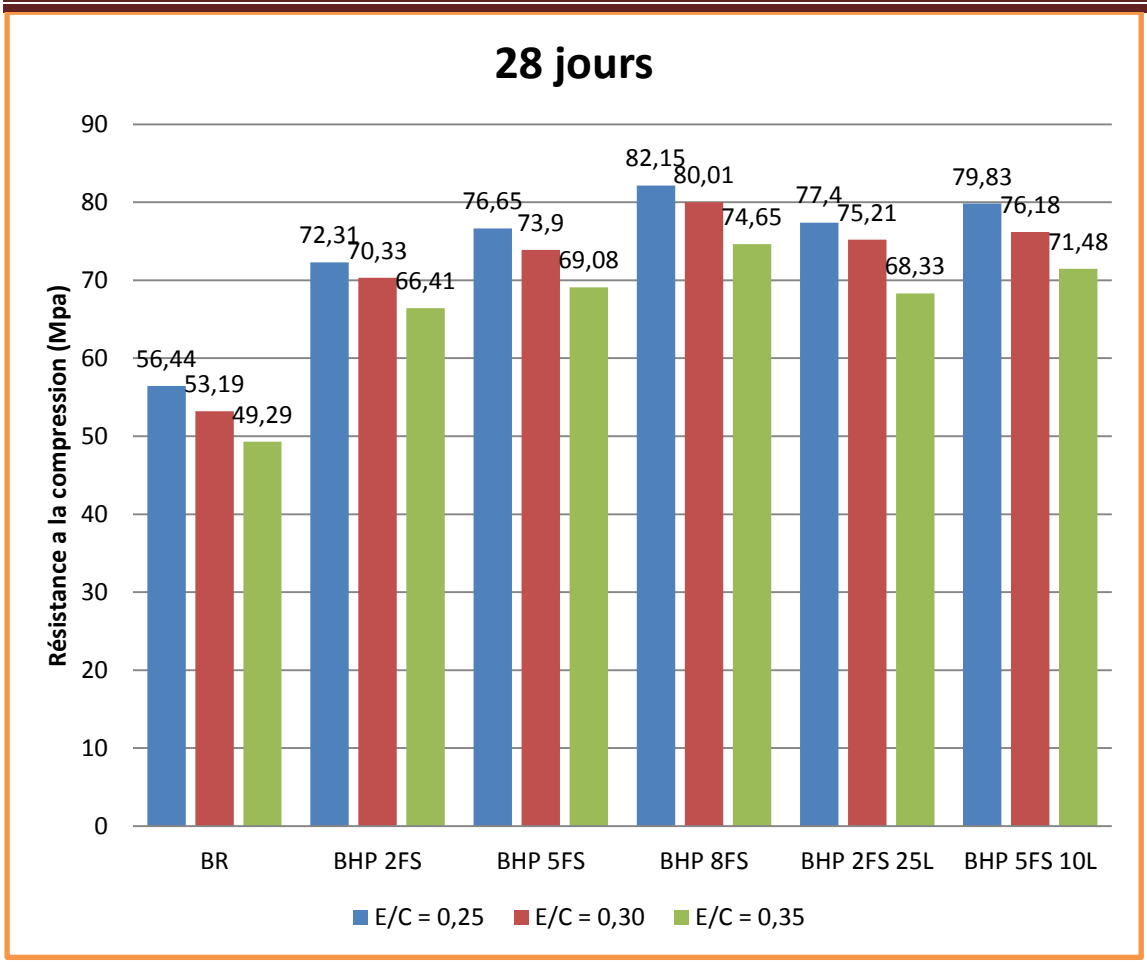


Figure III.3 : L'évaluation de la résistance à la compression en fonction des compositions des BHP avec différents rapport E/C après 7 jours.

- **Les commentaires :**

D'après les figures illustrées ci-dessus, on remarque que :

- Les histogrammes d'évolution de la résistance mécanique en fonction du temps (1, 7, 28 jours) présente la même allure quel que soit le type de béton.
- On peut observer globalement qu'au bout de quelques jours la résistance en compression des bétons à 2, 5, 8% de fumée de silice est supérieure à celle du béton de référence sans fumée de silice par exemple 19.53 MPa à 1 jours jusqu'à 56.44 MPa à 28jours pour le béton sans ajout cimentaire. Et 29.51 MPa à 1 jours jusqu'à 82.15 MPa à 28jours pour le béton avec un dosage 8% de fumé de silice. Cependant, lorsqu'on examine de plus près les valeurs obtenues aux différentes échéances, on peut noter des écarts significatifs selon la durée de cure humide du béton. Or l'ajout de fumée de silice produit dans les premières heures une accélération des réactions d'hydratation. il est nettement plus élevé pour le béton avec ajout de 10% de laitier et 5% de fumée de silice.

- Après 28 jours de conservation, la résistance à la compression atteint d'environ 82.15 MPa, cependant, pour le béton sans ajout (BR) elle n'est que 56.44 MPa donc le broyage plus fin du laitier a contribué à l'augmentation de la compacité du BHP (5FS, 10L), ce qui explique l'augmentation de sa densité par rapport BR. Sur le plan physico-mécanique, le laitier réagit par sa finesse et son activité pouzzalonique, engendrant ainsi un squelette plus cohérent et par conséquent un béton plus résistant et plus durable dans l'environnement agressif.
- Des études récentes ont confirmé que les bétons à haute performance qui ont un rapport E/C compris entre 0.25 et 0.35 sont habituellement plus durable que le béton ordinaire, non seulement parce qu'elles sont moins poreuses, mais aussi parce que leur capillaires et réseaux de pores sont peu déconnectés en raison de développement de l'auto-dessiccation. En béton à haute performance (BHP), la pénétration des ions chimiques agressifs est un peu superficielle. Donc le mode de durcissement peut être très nuisible s'il n'est pas contrôlé au jeune âge du développement de la phase des réactions d'hydratation.
- Les BHP sont des bétons fluides avec un rapport E/C très faible avec des valeurs d'affaissement aux alentours de 18 à 23 cm.
- Les meilleurs résultats en compression sont obtenus dans les milieux de conservation eau potable, ainsi nous constatons que les résistances à 28 jours restent toujours supérieure à 55 MPa quel que soit le milieu de conservation. Encore plus, les résistances augmentent avec l'âge.

III.5. Conclusion :

Dans ce troisième chapitre nous avons présent des résultats de travaille expérimentale pour les différente type des bétons utilisé en remarqué toutes les formulations des BHP avec des ajouts (la fumée de silice et laitier granulé) ont donné une meilleure maniabilité par rapport au béton sans ajouts. La fumée de silice et laitier granulé améliorent la maniabilité du béton est donne un comportement rhéologique très plastique. Il est important d'influence de la finesse de laitier lorsqu'on cherche à fabriquer des bétons plus plastiques.

Conclusion générale

Le travail expérimental présenté dans cette recherche est une contribution à l'élaboration et à l'amélioration des performances des bétons à hautes performance à base de matériaux et sous-produits présente des intérêts technico-économique et environnementaux.

La substitution totale de la fumée de silice traditionnellement utilisée dans les bétons à hautes performances par laitier granulé doit non seulement des avantages pour la durabilité.

Le programme expérimental réalisé dans le cadre de cette étude a permis et d'apporter des éléments de réponse aux questions posées qui ont constitués les objectifs suivante :

A) L'influence de la nature des ajouts cimentaire sur les caractéristiques des BHP à l'état frais :

- La fumée de silice et laitier granulé améliorent la maniabilité du béton est donne un comportement rhéologique très plastique. il est important d'influence de la finesse de laitier lorsqu'on cherche à fabriquer des bétons plus plastiques.
- Les super plastifiants sont des réducteurs d'eau à haute efficacité. permet de concilier la diminution de la teneur en eau et l'augmentation de la fluidité du béton tout en conservant de bonne performance mécanique du béton.
- Les BHP sont des bétons fluides avec un rapport E/C très faible avec des valeurs d'affaissement aux alentours de 18 à 23 cm.
- Toutes les formulations des BHP avec des ajouts (la fumée de silice et laitier granulé) ont donné une meilleure maniabilité par rapport au béton sans ajouts.

B) L'influence de la nature des ajouts cimentaire sur les caractéristiques des BHP à l'état durcis :

- Les mélanges des bétons (**BHP 8FS, BHP 5FS 10L**) avec un rapport **E/C = 0.25** donne les meilleures résistances à la compression de 82.15 et 79.83 MPa à 28 jours.
- L'incorporation d'ajouts tels que le laitier combiné avec la fumée de silice pourrait être bénéfique pour des liants alternatifs pour formuler un béton de haute performance (BHP).
- La mouture poussée du laitier granulé ou de fumée de silice ou les deux combinés a favorisé l'accroissement de la compacité des bétons. Ceci explique l'augmentation de leurs résistances à la compression par rapport au béton de référence.

- Les BHP présentent des résistances en compression importantes aux jeunes âges, ils atteintes un optimum de 30 MPa au bout de 24 heures et 55 MPa après 48 heures

compte tenu de la rapidité de la cinétique de montée en résistance, et très élevées à long terme, avec une montée en résistance se poursuivant au-delà de 28 jours.

- Le mode de durcissement peut être très nuisible s'il n'est pas contrôlé au jeune âge du développement de la phase des réactions d'hydratation. Par conséquent, le BHP doit être durci différemment au béton ordinaire.

- Les BHP à base de la fumée de silice présentent une porosité accécible à l'eau légèrement inférieure que celle des BHP avec filler de laitier granulé. Cette faible porosité des BHP à base des deux types d'additions minérales est obtenue grâce à l'effet

  de remplissage et l'effet pouzzolanique qui réduit la porosité totale et améliore la compacité de la matrice cimentaire.

- La réaction pouzzolanique de la fumée de silice et laitier granulé réagit avec la chaux durant l'hydratation du ciment et favorise la formation des silicates de calcium hydratés (gel C-S-H). Cette phase C-S-H lie les différents composants entre eux pour créer une matrice cimentaire dense et compacte.

- L'ouvrabilité du béton de haute performance est influencée positivement par les additions de laitier granulé et de fumée de silice.

Enfin, les principaux avantages des BHP sont liés à leur faible porosité, leur résistance mécanique très élevée (fc>60MPa) et leur durabilité accrue. La facilité de mise en place qui est l'emploi conjugué de super plastifiant est des additions minérales. Ceci permet d'augmenter la résistance à la compression tout en améliorant l'ouvrabilité et la durabilité.

Liste des références bibliographiques

[1] BARON J. et **OLLIVIER J.P** « Les Bétons – Bases et données pour leur formulation » Editions Eyrolles, 1996.

[2] Y.MALIER 1991 Les bétons à hautes performances «Caractérisation, durabilité, application».

[3] http://www.ciment.wikibis.com/beton_hautes_performances.php.

[4] http://fr.slideshare.net/Saamysaami/bton-a-haute-performance.pdf.

[5] COLLECTION TECHNIQUE CIM-BÉTON, « Les bétons : formulation, fabrication et mise en œuvre » chapitre 3 ; Tome II., Ecole Française du Béton, pp : 96-109Le site web du centre d'information : http://www.infociments.fr/betons/composition.

[6] Haifi Mohamed Redha. Formulation des bétons autoplaçant, Mémoire de magister en génie civil, Université de Mentouri, Constantine .2011.

[7] Belhocin aida, Nagoudi nadja. Etude expérimentale d'un mortier avec les ajouts minéraux, Mémoire de master en génie civil, Université Kasdi Merbah, Ouargla 2014

[8] George Dreux. Nouveau guide du béton, 3 éme édition, Edition Eyrolles, paris, 1981.

[9] Véronique Baroghel-Bouny. Caractérisation microstructurale et hydrique des pâtes de ciment et des bétons ordinaires et à très hautes Performances, 2010.

[10] Yasmina Biskri. Comportement physico mécanique et durabilité des bétons à haute performance à base de deux fillers « influence de la nature des granulats », Thèse de doctorat, Université de Badji Mokhtar, Annaba, 2017.

[11] Cimbéton. Guide de prescription du ciment pour des constructions durables. Paris. Octobre 2009.

[12] Boutiba Aldjia. Accélération du durcissement par énergies renouvelables du béton frais et caractérisation du béton durci, Memoir de magistère, Université de M'hamed Bougarra, Boumerdes.

[13] 4eme séminaire sur les technologies du béton: « le béton : durabilité, solutions et innovation », Édition Lavoisier 2007.

[14] Construction Chemicals France:« Technologie de béton », BASF, 2001.

[15] Amouri Chahinez, Contribution à l'étude de l'influence des différents ajouts sur les propriétés des matrices cimentaires (caractérisation, performances, durabilité), Thèse de doctorat, Université de Mentouri, Constantine, 2009.

[16] https://www.infociments.fr/betons/adjuvants.pdf.

[17] P.C Aitcin, Béton à haute performance, Édition Eyrolles ISBN 2-212- 01323-X, Paris, France, 660p, janvier 2001.

[18] Y. Tanaka, **A. Ohta and T. Sugiyama**, "Polycarboxylate-based advanced superplasticizers for high performance concrete, " in International Symposium on the role of admixture in high performance concrete, Edited by J-G. Cabrera and R. RiveraVillareal, Rilem, Monterrey, Mexico, pp. 135-140, March 21-26 1999.

[19] X. Brunetaud et L. Jausserand "Travaux pratiques ; Ciment et bétons," Ecole Polytechnique de l'Université d'Orléans, 2005.

[20] L. Houst, R. Flatt J.P. Bowen et al. "New superplasticizers : from research to application," In : Proceedings of International Conference of modern concrete materials : Binders, Additions and admixtures, Edited by K. Ravindra, Dhir and Tomas D. Dyer, Dundee, Scotland, UK, pp. 446-456, 1999.

[21] V.M. Malhorta, "Innovative applications of superplasticizers in concrete-a review, " in : International Symposium on the role of admixture in high performance concrete, Edited by J.G. Cabrera and R. R.Villareal, Rilem, Monterrey, Mexico, pp. 421-460. March 21-26 1999.

[22] http://geniecivil08.e-monsite.com/medias/files/adjuvant.pdf.

[23] https://ft.univ-tlemcen.dz/assets/uploads/pdf/departement/gc/Adjuvants.pdf.

[24] A. BRAHMA "Le béton " UNIVERSITE DE BLIDA INSTITUT DE GENIE CIVIL .Edition OPU, 1996.

[25] AFPC-AFREM., « Méthodes recommandées pour la mesure des grandeurs associées à la durabilité, Compte-rendu des journées techniques AFPC-AFREM; Durabilité des bétons », Toulouse, France, 1997.

[26] PIERRE-CLAUDE AITCIN est Professeur à l'Université de Sherbrooke "Bétons haute performance" Editions Eyrolles 2001.

[27] "Les bétons à hautes performances/caractéristique, durabilité, applications".

[28] Matériaux de construction (Fiche Technique).

[29] A.KOMAR "Matériaux et éléments de construction" Edition MIR 1978.

[30] Réunion d'Ingénieurs "Matériaux de construction "Troisième édition.

[31] CIMbéton, Centre d'information sur le ciment et ses application, Fiche technique Tome2 "Les bétons: formulation, fabrication et mise en œuvre "1997.

[32] NF EN 12350-2 1999 « Essai pour béton frais. Partie 2: Essai d'affaissement », AFNOR, 1999.

NOTICE TECHNIQUE

2 1 1 9

MEDAFLOW 30

Conforme à la norme EN 934-2:TAB 1, TAB 3.1 ET TAB 3.2 NA 774.

Super plastifiant
Haut réducteur d'eau

DESCRIPTION

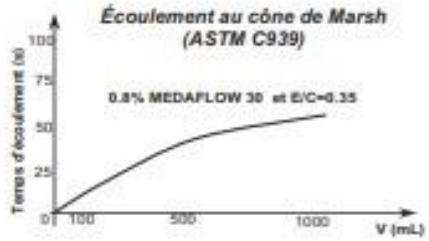
Le **MEDAFLOW 30** est un super plastifiant haut réducteur d'eau de la troisième génération. Il est conçu à base de polycarboxylates d'Ether qui améliorent considérablement les propriétés des bétons.
Le **MEDAFLOW 30** permet d'obtenir des bétons et mortiers de très haute qualité.
En plus de sa fonction principale de superplastifiant, il permet de diminuer la teneur en eau du béton d'une façon remarquable.
Le **MEDAFLOW 30** ne présente pas d'effet retardateur.

DOMAINES D'APPLICATION

- Bétons à hautes performances
- Bétons auto - plaçant
- Bétons pompés
- Bétons précontraints
- Bétons architecturaux.

PROPRIÉTÉS

Grâce à ses propriétés le **MEDAFLOW 30** permet :
Sur béton frais :
- Obtention d'un rapport E/C très faible
- Amélioration considérable de la fluidité
- Une très bonne maniabilité
- Éviter la ségrégation
- Faciliter la mise en œuvre du béton



Sur béton durci :
- Augmenter les résistances mécaniques à jeune âge et à long terme (voir tableau).
- Diminuer la porosité
- Augmenter la durabilité
- Diminuer le retrait et le risque de fissuration

Désignation	Rc (MPa)		
	3J	7J	28J
MEDAFLOW 30 (1.4%)	39.2	54.7	62.2

CARACTÉRISTIQUES

- Aspect ..... Liquide
- Couleur ..... Brun clair
- pH ..... 6 – 6,5
- Densité ..... 1,07 ± 0,01
- Teneur en chlore ..... < 0,1 g/l
- Extrait sec 30%

MODE D'EMPLOI

Le **MEDAFLOW 30** est introduit dans l'eau de gâchage.
Il est recommandé d'ajouter l'adjuvant dans le béton après que 50 à 70% de l'eau de gâchage ait déjà été introduite.

DOSAGE

Plage de dosage recommandée :
0,5 à 2,0 % du poids de ciment soit 0.46 à 1.85 litre pour 100 Kg de ciment.

Le dosage optimal doit être déterminé sur chantier en fonction du type de béton et des effets recherchés.

CONDITIONNEMENT ET STOCKAGE

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 la fourchette d'utilisation tenant compte des conditions réelles de chantier.

58

Granitex
Granitex

Zone industrielle Oued Smar – BP85 Oued Smar – 16270 Alger
Tél : (213) 021 51 66 81 & 82
Fax : (213) 021 51 64 22 & 021 51 65 23
www.granitex-dz.com - E-mail: granitex@granitex-dz.com

NOTICE TECHNIQUE 2119

MEDAFLOW 30

Le **MEDAFLOW 30** est conditionné en bidons de 10Kg, fûts de 210 Kg et 240 Kg, cubiténaire 1100kg.

Délai de conservation :
Une année dans son emballage d'origine, à l'abri du gel et de la chaleur (5°C < t < 35°C).
Lors d'une exposition du produit au soleil, sa couleur est sujette à changer de ton.

PRÉCAUTIONS D'EMPLOI

Manipulation non dangereuse.
Se référer à la Fiche de Données de Sécurité disponible sur : **www.granitex-dz.com**

PV d'essais conforme aux normes, établi par le **CNERIB** en Avril 2005.

NB : Les produits à base de polycarboxylates d'Ether (PCE), exposé aux UV, changent dans la couleur mais sans aucun incident sur les propriétés et les effets de l'adjuvant.

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 la fourchette d'utilisation tenant compte des conditions réelles de chantier.

Granitex
Granitex
Zone industrielle Oued Smar – BP85 Oued Smar – 16270 Alger
Tél : (213) 021 51 66 81 & 82
Fax : (213) 021 51 64 22 & 021 51 65 23
www.granitex-dz.com - E-mail: granitex@granitex-dz.com

59