

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Mohammed Seddik Ben Yahia - Jijel
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Civil et Hydraulique

**Mémoire de fin d'Etudes pour l'obtention de Diplôme de
MASTER Académique en Génie Civil
Option : Voies et Ouvrages d'Art**

Thème :

*Formulation Et Caractérisation Des Bétons A
Hautes Performances*

Présenté par :

Mr. ALIOUA A.Hakim

Encadré par :

M^{elle} S. Ben Messaoud

Devant le jury composé de :

Mr T. CHIKER

Université de Jijel

M^{me}. F. SAIDAT

Université de Jijel

Promotion : Juin 2018.

Remerciements

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

J'ai eu le grand privilège d'être encadré par M^{elle} S. Ben Messaoud je la remercie pour sa modestie, son sérieux, ses conseils et son sens du devoir

Ce mémoire ne serait pas aussi riche et bien présenté sans son précieux aide.

Veillez retrouver ici l'expression de ma respectueuse et ma profonde admiration pour toutes vos qualités scientifiques et humaines.

Ce travail est pour moi l'occasion de lui témoigner ma profonde gratitude.

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 vont également à tous mes professeurs pour leur générosité et leur grande patience dont ils ont su faire preuve envers moi.

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

Dédicaces

Je dédie ce mémoire à :

*A mes très chers parent **Sadjia** et **Moussa***

Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours eu pour vous, rien n'au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon éducation et bien être, ce travail est le fruit de vos sacrifices que vous n'avez cessé de me donner depuis mon enfance, puisse dieu tout puissant vous préserve et vous accorde santé, longue vie et bonheur, je vous aime.

A mes chères sœurs Merieme, Ryma, Soumia et mon cher frère Mohammed, les mots ne suffisent pas pour exprimer l'amour et l'affection que je porte pour vous, mes fidèles compagnons dans les moments les plus délicats, merci pour votre soutien, vos encouragements, je vous dédie ce travail avec tous mes vœux de bonheur, de santé et de réussite

A mes chers amis (es) qui me sont cher, avec qui j'ai partagé des moments de bonheur qui resteront gravé a jamais je vous dit merci.

A toutes les personnes qui ont participé à l'élaboration de ce travail

A.Hakim

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.

L'objectif de ce travail est d'apporter une contribution à la compréhension de l'influence des facteurs tels que le rapport E/C et la classe granulaire sur les propriétés mécaniques et physiques des bétons à hautes performances. Dans les formulations des BHP les granulats par leur forte proportion massique et volumique, jouent un rôle important. Lors de la sélection des granulats il est nécessaire de bien connaître leurs propriétés intrinsèques. Ces propriétés influencent les performances du béton en particulier la qualité de l'adhérence granulat-matrice cimentaire.

A la fin de notre travail, l'examen des résultats obtenus a permis d'établir les corrélations entre les formulations étudiées et les caractéristiques physico-mécaniques des compositions de bétons (BHP25, BHP16, BHP8).

Les résultats de cette étude montrent que l'utilisation de trois classifications granulaires ($D_{\max 8}$, $D_{\max 16}$ et $D_{\max 25}$) et trois rapport E/C (0.25, 0.30, et 0.35) dans deux différents milieux de conservation (eau potable EP et eau de mer EM), nous prouve clairement que la composition du béton à haute performance est le béton BHP25 avec un rapport E/C = 0.25 a atteint la plus grande résistance mécanique de 80 MPa pour les différents milieux de conservation.

Mots clés :

Béton à haute performance, granulats, résistance, durabilité.

Abstract

High Performance Concrete (BHP) is an innovative concrete that finds its place in modern buildings. New techniques for the formulation and design of high-performance concrete have made it possible to improve durability and to acquire remarkable mechanical properties compared with conventional0

The aim of our work is to contribute to the understanding of the influence of factors such as the E/C ratio and the granular class on the mechanical and physical properties of high performance concretes. When selecting aggregates it is necessary to know their intrinsic properties. These properties influence the performance of concrete, particularly the quality of cementitious matrix-cement adhesion.

At the end of our work, the examination of the results obtained made it possible to establish the correlations between the studied formulations and the physico-mechanical characteristics of the concrete compositions (BHP25, BHP16, BHP8).

The results of this study show that the use of three granular classifications (D_{max8} , D_{max16} and D_{max25}) and three E/C ratios (0.25, 0.30, and 0.35) in two different conservation media (freshwater EP and seawater EM), we can clearly say that the composition of the high-performance concrete is concrete BHP25 with a ratio $E/C = 0.25$ has reached the highest strength of 80 MPa for the different conservation media.

Keywords :

High performance concrete, aggregates, strength, durability.

ملخص

الخرسانة عالية الأداء (BHP) هي خرسانة مبدعة تجد مكانها في المباني الحديثة. تقنيات جديدة لصياغة وتصميم الخرسانة عالية الأداء جعلت من الممكن لتحسين الديمومة والحصول على خصائص ميكانيكية رائعة مقارنة مع الخرسانة التقليدية. الهدف من هذا العمل هو المساهمة في فهم تأثير العوامل مثل نسبة E / C والفئة الحبيبية على الخواص الميكانيكية والفيزيائية للخرسانة عالية الأداء. في الصيغ من BHP المجاميع من خلال كتلتها المرتفعة وحجمها ، تلعب دورا هاما. يتم تحفيز استخدامها من خلال متانة أفضل واستقرار حجمي مقارنة بمزيج الأسمنت- الماء. عند تحديد المجاميع ، من الضروري معرفة خصائصها الجوهرية. هذه الخصائص تؤثر على أداء ملموسة ، لا سيما نوعية التصاق الاسمنت مصفوفة الاسمنتية..

في نهاية عملنا ، سمح فحص النتائج التي تم الحصول عليها بإقامة الارتباط بين التركيبات المدروسة والصفات الفيزيائية- الميكانيكية للتركيبات الخرسانية (BHP8 ، BHP16 ، BHP25).

تظهر نتائج هذه الدراسة أن استخدام ثلاثة تصنيفات حبيبية ($D_{max}8$ ، $D_{max}16$ و $D_{max}25$) وثلاثة نسب E / C (0.25 ، 0.30 ، و 0.35) في وسطين مختلفتين للحفاظ (EP مياه الشرب ومياه البحر EM) ، يبين لنا بوضوح أن تركيبة الخرسانة عالية الأداء هي BHP25 ملموسة مع نسبة $E / C = 0.25$ وصلت إلى أعلى قوة ميكانيكية من 80 ميغا باسكال للوسائط المحافظة المختلفة.

كلمات البحث:

خرسانة عالية الأداء ، الحصى ، المقاومة ، ديمومة .

Sommaire

| | |
|---|------|
| Remerciements..... | i |
| Dédicace..... | ii |
| Resumé..... | iii |
| Abstract..... | iv |
| ملخص..... | v |
| Sommaire..... | vi |
| Liste des figures et liste des tableaux | x |
| Liste des abréviations..... | xiii |
| Introduction générale..... | 1 |

Chapitre I Etude bibliographique

| | |
|--|----|
| I.1 Introduction..... | 3 |
| I.2 Généralités sur les bétons à hautes performances | 3 |
| I.3 Sélection de matériaux..... | 4 |
| I.3.1 Sélection du ciment | 5 |
| I.3.1.1 Type des ciments | 5 |
| I.3.2 Superplastifiants | 6 |
| I.3.2.1 Intérêt de leur utilisation | 6 |
| I.3.2.2 Mécanisme de dispersion | 8 |
| I.3.2.3 Différents types de superplastifiant | 9 |
| I.3.3 Granulats..... | 9 |
| I.3.3.1 Granulat fin..... | 9 |
| I.3.3.2 Gros granulat concassé ou gravier..... | 10 |
| I.3.3.2.1 Forme et état de surface..... | 10 |
| I.3.3.2.2 Porosité..... | 11 |
| I.3.3.2.3 Nature minéralogique..... | 11 |
| I.3.3.2.4 Granularité..... | 11 |
| I.3.4 Sélection de l'addition..... | 12 |
| I.3.4.1 Les Fillers..... | 12 |

| | |
|--|----|
| I.3.4.2 Les Cendres volantes..... | 13 |
| I.3.4.3 Laitiers de haut-fourneau..... | 13 |
| I.3.4.4 Les Fumées de silice..... | 14 |
| I.3.5 Sélection de l'eau de gâchage..... | 15 |
| I.4 Facteur influençant sur le comportement mécanique du BHP..... | 15 |
| I.4.1 Influence du rapport E/C | 15 |
| I.4.2 Propriété des gros granulats..... | 16 |
| I.5. Microstructure des BHP..... | 16 |
| I.5.1 Les C-S-H..... | 18 |
| I.5.2 L'interface pâte/granulat dans le cas des bétons à hautes performances | 19 |
| I.6. Caractéristiques des BHP..... | 19 |
| I.6.1 Caractéristiques physiques | 19 |
| I.6.1.1 Ouvrabilité..... | 19 |
| I.6.1.2 Porosité..... | 20 |
| I.6.1.3 Imperméabilité..... | 20 |
| I.6.2 Caractéristiques mécaniques..... | 21 |
| I.6.2.1 Résistance en compression..... | 21 |
| I.6.2.2 La résistance à la traction par flexion..... | 21 |
| I.6.2.3 Résistance en traction..... | 22 |
| I.6.2.4. Module d'élasticité..... | 22 |
| I.6.2.5 Retrait..... | 22 |
| I.6.2.6 Fluage..... | 22 |
| I.7 Avantage des BHP | 23 |
| I.7.1 Des Propriétés exceptionnelles à l'état frais..... | 23 |
| I.7.2 Des performances élevées aux jeunes âges..... | 23 |
| I.7.3 Des résistances mécaniques importantes à long terme..... | 23 |
| I.7.4 Autres avantages..... | 24 |
| I.8 Domain d'utilisation de BHP..... | 24 |
| I.9 Formulation des BHP..... | 25 |
| I.10. Mise en place du BHP..... | 26 |
| I.10.1 Pompage..... | 26 |
| I.10.2 Vibration..... | 26 |
| I.10.3 Finition des dalles en BHP..... | 27 |

| | |
|----------------------------------|----|
| I.11 Méthode de formulation..... | 27 |
| I.11 Conclusion..... | 27 |

Chapitre II

Matériaux et formulation des bétons d'étude

| | |
|--|----|
| II.1 Introduction..... | 29 |
| II.2 Caractéristiques des matériaux utilisés | 29 |
| II.2.1 Ciment..... | 29 |
| II.2.2 Granulats | 30 |
| II.2.3 Superplastifiant..... | 33 |
| II.2.4. Eau de gâchage..... | 34 |
| II.3 Formulation des bétons d'étude..... | 34 |
| II.3.1 Optimisation du squelette granulaire..... | 34 |
| II.3.2 Présentation de la méthode de formulation de l'université de Sherbrooke..... | 35 |
| II.3.3 Formules de calculs | 39 |
| II.3.4 Formulation du béton..... | 41 |
| II.3.5 Fabrication des bétons, mise en place et conservation..... | 44 |
| II.4 Conclusion..... | 47 |

Chapitre III

Analyse et discussion des résultats

| | |
|--|----|
| III.1 Introduction..... | 48 |
| III.2 Méthodologie adaptée pour les manipulations | 48 |
| III.3 Procédures de la détermination des propriétés du béton à l'état frais..... | 48 |
| III.3.1. L'ouvrabilité..... | 48 |
| III.4 Comportement du béton à l'état durcis..... | 49 |
| III.4.1 Résistance à la compression | 50 |
| III.4.2 Résultats et discussions..... | 54 |
| III.5. Conclusion..... | 56 |
| Conclusion générale | 57 |

| | |
|----------------------------|----|
| Liste des références | 59 |
| Annexe | 62 |

Liste des figures

| | | |
|-----------------------|--|----|
| Figure I.1 : | Les utilisations des superplastifiants..... | 7 |
| Figure I.2 : | Des charges opposées sur la surface des grains de ciment provoquent la floculation | 8 |
| Figure I.3 : | Mécanisme de floculation avec et sans superplastifiant..... | 8 |
| Figure I.4 : | Effet du super plastifiant sur les grains de ciment par le phénomène de dispersion. | 9 |
| Figure I.5 : | Cendres volantes : une poudre ressemblant au ciment..... | 13 |
| Figure I.6 : | Laitier de haut fourneau granulé broyé..... | 14 |
| Figure I.7 : | Poudre de fumée de silice..... | 14 |
| Figure I.8 : | Relation entre la résistance à la compression et le rapport E/C..... | 16 |
| Figure I.9 : | Cristaux de Portlandite..... | 17 |
| Figure I.10 : | Gel de CSH..... | 17 |
| Figure I.11 : | Microstructure de la zone de contact entre la pâte et le granulat..... | 19 |
| Figure I.12 : | Pacific Tower (Paris | 25 |
| Figure I.13 : | Arche de la défense (Paris)..... | 25 |
| Figure I.14 : | Pont de l'île de Ré | 25 |
| | | |
| Figure II.1 : | Courbe granulométrique des granulats utilisés..... | 32 |
| Figure II.2 : | Organigramme de la méthode proposée pour formuler des BHP..... | 35 |
| Figure II.3 : | Abaque Relation proposée entre le rapport eau/liant et la résistance à la compression..... | 36 |
| Figure II.4 : | Détermination du dosage en eau..... | 37 |
| Figure II.5 : | Temps d'écoulement en fonction du dosage en super plastifiant..... | 38 |
| Figure II.6 : | granulats Détermination du dosage en gros..... | 38 |
| Figure II.7 : | Représentation schématique d'un super plastifiant..... | 39 |
| Figure II.8 : | Exemple d'une courbe de mélange OAB par la méthode de DREUX-GORISSE..... | 41 |
| Figure II.9 : | Forme d'éprouvettes d'étude..... | 45 |
| Figure II.10 : | Préparation des moules avant le remplissage..... | 46 |
| Figure II.11 : | Conservation des éprouvettes..... | 47 |

| | | |
|-----------------------|--|----|
| Figure III.4 : | Résultats d'essai affaissement..... | 49 |
| Figure III.2 : | Essai de résistance à la compression (laboratoire de RIZZANI DE ECCHER)..... | 50 |
| Figure III.3: | Résistance en compression des BHP avec différents rapports E/C après 24heures..... | 51 |
| Figure III.4 : | Résistance en compression des BHP avec différents rapports E/C après 48 heures..... | 52 |
| Figure III.5 : | Résistance en compression des BHP avec différents rapports E/C après 7 jours..... | 52 |
| Figure III.6 : | Influence du milieu de conservation sur la résistance des BHP avec différents rapports E/C après 28 jours..... | 53 |

Liste des tableaux

| | | |
|----------------------|--|----|
| Tableau I.1 : | 5 types de ciments courants et leur composition..... | 6 |
| Tableau I.2 : | Différentes classes de BHP..... | 21 |
| TableauII.1 : | Composition minéralogique..... | 29 |
| TableauII.2 : | Propriétés physique du ciment utilisé..... | 30 |
| TableauII.3 : | Propriétés physique du ciment..... | 30 |
| TableauII.4 : | Résistance physique du ciment..... | 30 |

| | | |
|-----------------------|--|----|
| TableauII.5 : | Analyse granulométrique par tamisage des granulats utilisés..... | 32 |
| TableauII.6 : | Caractéristiques des physiques et mécaniques des granulats utilisés..... | 33 |
| TableauII.7 : | Caractéristique MEDAFLOW30..... | 34 |
| TableauII.8 : | Propriétés MEDAFLOW30..... | 42 |
| TableauII.9 : | Valeurs de K en fonction du dosage en ciment, de la puissance de la vibration et de l'angularité et permettant de calculer Y ordonnée du point de brisure de la courbe de référence..... | 43 |
| TableauII.10 : | Pourcentage de chacun des granulats pour des différentes compositions du béton BHP..... | 43 |
| TableauII.11 : | Composition des différentes BHP..... | 44 |
| TableauII.12 : | Séquence de malaxage des bétons..... | 45 |
| TableauII.13 : | Milieu de conservation des éprouvettes en fonction d'âge d'écrasement (compression)..... | 46 |
| TableauIII.1 : | L'affaissement des différents bétons étudiés..... | 48 |
| TableauIII.2 : | Résistance à la compression des différents BHP dans différents milieux..... | 51 |

Liste des abréviations

| | | |
|--------------|---|--|
| BHP | : | Béton à Hautes Performances |
| E/C | : | Rapport Eau / Ciment |
| C-S-H | : | silicates de calcium hydraté |
| Rc | : | Résistance en compression |
| Rt | : | Résistance en traction |
| BRN | : | Béton à Résistance Normale |
| LCPC | : | Laboratoire Central des Ponts et Chaussées |
| MF | : | Module de Finesse |
| Fcj | : | La résistance à la compression à « j » jours |

Introduction Générale

A. Question de recherche

La présente étude rentre dans le contexte de l'étude des propriétés rhéologique et mécaniques des bétons à hautes performances. Notre étude est consacré à formuler un béton de haute performance par la méthode de l'université de Sherbrooke.

Ces dernières années ont vu une révolution dans le domaine du béton, avec l'application de bétons hautes performances et ultra-hautes performances, plus ductiles, plus durables, plus résistants. Ces innovations n'auraient pu voir le jour sans un important travail de recherche, qui a permis de développer une connaissance à l'échelle microscopique des mécanismes de comportement du béton. Deux voix de recherche sont à l'origine du développement spectaculaire des BHP :

- L'apparition d'une nouvelle génération de superplastifiant hautement réducteur d'eau, double action dispersion et défloculation. Cela est obtenu grâce à l'utilisation de polymères modernes (polysulfonate et polycarboxylates), qui offrent la possibilité d'une réduction sensible du dosage en eau ce qui permet de formuler des bétons avec un rapport eau/ciment inférieur à 0.3.
- L'amélioration de l'entendu granulaire par l'ajout d'additions minérales sous forme de fillers qui un double rôle l'augmentation de la compacité par remplissage d'une partie de volume des vides et micro vides, d'une part, et d'autre part, et grâce à leur réactivité chimique, participe la formation d'hydrate secondaire et par conséquence améliore la résistance et la durabilité.

Parmi les bétons innovants on trouve les BHP (bétons à hautes performances), dont l'utilisation d'une double finalité : améliorer la résistance mécanique et la durabilité d'une part et économiser la consommation des matériaux de construction en réduisant les sections des éléments constructifs et en limitant le taux de ferrailage. Malgré que ces nouveaux bétons sont largement utilisés à travers le monde depuis plus de deux décennies. Leurs utilisations en Algérie resteras limités ou inexistantes.

Ainsi, la question de recherche de ce mémoire est de tester les propriétés rhéologique et mécanique du BHP par voie d'étude expérimentale.

B. Objectifs

Deux objectifs sont visés par ce travail. Le premier concerne la formulation d'un BHP et les facteurs influençant sur le comportement mécanique du BHP. Le deuxième objectif s'intéresse à distinguer les variables les plus dominants (mécaniques et physiques)

C. Plan du mémoire

Notre travail de recherche réalisé au cours de ce mémoire est présenté en trois chapitres :

Le premier chapitre de ce travail est consacré à une étude bibliographique. Elle comporte des généralités et des définitions sur les bétons à hautes performances, les propriétés mécaniques et physiques et les facteurs influençant sur le comportement mécanique du béton à haute performance, et finalement une notion de durabilité des bétons à hautes performances dans le milieu marin.

La première partie du deuxième chapitre décrit la caractérisation physique et mécanique de tous les matériaux utilisés, ainsi dans la deuxième partie, une description des différentes étapes de formulation et les protocoles expérimentaux pour fabriquer le BHP.

Le dernier chapitre de ce mémoire présente les résultats expérimentaux sous forme de graphes et de tableaux. Ensuite une analyse des résultats avec des discussions et commentaires, et à la fin des conclusions tirées.

Enfin une conclusion générale est dressée à partir des principaux résultats obtenus dans les différents chapitres.

Chapitre I

Etude bibliographique

I.1. Introduction

Dans ce chapitre on effectue une recherche bibliographique sur les bétons à hautes performances. On va présenter quelques généralités sur les BHP, leur constituant et notamment le rôle des superplastifiants dans leur l'obtention. Les caractéristiques des BHP ont été abordées pour confirmer le large domaine d'utilisation de ce béton. Comme on va le voir dans ce chapitre les BHP sont utilisés dans plusieurs techniques de construction tel que les barrages et les ouvrages d'art grâce à ces multiples avantages. Nous nous pencherons ainsi sur les recherches concernant la durabilité des BHP dans l'eau de mer et les attaques par les sels.

I.2. Généralités sur les bétons à hautes performances

Les bétons à hautes performances (BHP) ont été utilisés depuis les années 1980 afin d'améliorer la capacité portantes et la durabilité des structures en construction. Ces bétons se développent actuellement dans tout le monde et semblent être amenés à remplacer les bétons classiques dans de nombreuses applications.

Le béton de haute performance BHP est d'abord un béton de haute résistance, car ses caractéristiques mécaniques peuvent atteindre des valeurs spectaculaires. Elles sont passées de 50 à 100 MPa il y a quelques années à plus de 100 à 150 MPa, voire plus de 200 MPa pour des bétons de laboratoire. Les gains de résistance ne sont pas les seuls avantages de ces bétons qui tirent leurs propriétés d'une forte réduction de leur porosité [1]. Ils sont également plus résistants aux agents agressifs et présentent une durabilité accrue.

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.

Hautes performances signifient aussi facilité de mise en œuvre et souplesse d'adaptation aux contraintes d'exécution des ouvrages. En effet, les BHP offrent aussi des résistances exceptionnelles à l'état frais (rhéologie, pompabilité, etc.) et des performances aux jeunes âges, ce qui permet par exemple d'accélérer les cadences de fabrication en usine ou sur chantier ou de pomper le matériau sur de longues distances. Ils confèrent une pérennité architecturale aux ouvrages et augmentent considérablement leur durabilité en réduisant corrélativement les frais de maintenance et d'entretien. Les clefs de ces performances sont:

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

Cette optimisation de leurs performances est due, en particulier, aux récentes évolutions technologiques des adjuvants qui permettent des formulations avec une forte réduction du dosage en eau tout en conservant une maniabilité adéquate et à l'utilisation complémentaire éventuelle d'ultrafines qui complètent les vides du squelette granulaire entre les grains de ciment et améliorent la compacité.

Les bétons (BHP), sont des bétons durables dont la diminution de la porosité rendue possible par le choix d'un spectre de mélange granulaire; par l'ajout d'éléments ultrafins et éventuellement par l'ajout de super plastifiant qui diminuent la teneur en eau nécessaire pour l'obtention d'une maniabilité suffisante. Ils permettent d'optimiser les structures, de réaliser des ouvrages soumis à des contraintes élevées ou subissant un environnement sévère (climat, agressions marines, effets du gel, attaques acides, etc.

Aujourd'hui, la durabilité des structures en béton, est un des facteurs importants dans le domaine du génie civil et du génie industriel. Elle est influencée non seulement par les chargements mécaniques mais aussi par l'environnement. Ces influences deviennent plus importantes quand on doit garantir une durée de service pendant une grande période. Par exemple, les ponts, les tunnels, les réseaux d'assainissement. Dans le cas des milieux agressifs les ouvrages en béton accueillant ces produits doivent avoir une durée de vie très longue dépendant du niveau d'agressivité de ces produits. La longue période d'exposition impose une durabilité des ouvrages sur des périodes très longues. Ces échelles de temps rendent nécessaire une connaissance des mécanismes physicochimiques qui sont à l'origine de la dégradation des propriétés chimiques hydrodynamiques et mécaniques du béton. Les altérations du béton sont variées. Elles atteignent soit la matrice cimentaire soit les armatures, par fois les deux. Leurs origines sont très nombreuses : chaque étape depuis la formulation, jusqu'à la mise en œuvre, mais aussi l'agressivité de l'environnement peuvent être source de dégradation.

I.3. Sélection des matériaux

Lorsque l'on choisit les matériaux pour fabriquer un BHP certains choix sont plus critiques que d'autres. Ainsi, on commencera par considérer la sélection du ciment Portland même dans le cas où d'autres ajouts cimentaires sont utilisés en conjonction avec le ciment Portland. La sélection se poursuit par celle du superplastifiant puisque l'expérience démontre que l'on doit d'abord optimiser la combinaison ciment/superplastifiant. Quand ces choix cruciaux sont faits, On évalue l'utilisation d'un ou de plusieurs ajouts cimentaires. La sélection des granulats viendra par la suite puisque leur qualité devient de plus en plus critique au fur et à mesure qu'augmente la résistance à la compression du BHP [1].

I.3.1. Sélection du ciment

Le premier choix sur lequel il faut s'attarder lorsque l'on veut fabriquer un BHP est celui du ciment, même lorsque l'on utilisera d'autres ajouts cimentaires parce que la performance du ciment en termes de rhéologie et de résistance devient critique au fur et à mesure qu'augmente la résistance à la compression visée [1].

Pour fabriquer des BHP, les différentes marques commerciales de ciment n'offrent pas toutes les mêmes performances. Certains ciments présentent de bonnes performances en termes de résistance finale, mais très mauvaises performances en termes de comportement rhéologique, car il est difficile de maintenir la maniabilité des BHP suffisamment longtemps pour pouvoir les placer de façon économique et satisfaisante. D'autres ont d'excellentes performances rhéologiques, leur perte d'affaissement durant la première ou la deuxième heure est minimale et ils peuvent être refluidifiés facilement par un second dosage en superplastifiant, mais ils ne sont pas performants en termes de résistance à la compression [2].

La compatibilité entre le superplastifiant et le ciment est un facteur très important pour le choix du ciment. La finesse du ciment et sa composition chimique peuvent affecter le comportement du super plastifiant. Il est nécessaire de faire des essais sur coulis ou sur mortier pour le choix du super plastifiant. Les ciments à temps de prise très long sont à éviter, des dosages élevés en super plastifiant ne permettent pas le démoulage même après 24 heures [2].

I.3.1.1. Type des ciments

Les ciments constitués de clinker et de constituants secondaires sont classés en fonction de leur composition, en cinq types principaux. Ils sont notés CEM et numérotés de 1 à 5 en chiffres romains dans leur notation française est indiquée entre parenthèse) :

- CEM I : Ciment Portland (CPA-dans la notation française) ;
- CEM II : Ciment Portland composé (CPJ) ;
- CEM III : Ciment de haut fourneau (CHF) ;
- CEM IV : Ciment pouzzolanique (CPZ) ;
- CEM V : Ciment au laitier et aux cendres (CLC).

La proportion (en masse) des différents constituants est indiquée dans le Tableau I.1

| | Notation | Clinker | Autres constituants | Constituants Secondaires |
|--|-----------------|----------------|--------------------------------|-------------------------------------|
| Ciment Portland | CEM I | 95 - 100 | -- | 0 - 5 |
| Ciment Portland composé | CEM II A | 80 - 94 | 6 - 20 | -- |
| | CEM II B | 65 - 79 | 21 - 35 | -- |
| Ciment de haut fourneau | CEM III A | 35 - 64 | 36 - 65 | 0 - 5 |
| | CEM III B | 20 - 34 | 66 - 80 | 0 - 5 |
| | CEM III C | 5 - 19 | 81 - 95 | 0 - 5 |
| Ciment pouzzolanique | CEM IV A | 65 - 90 | 10 - 35 | 0 - 5 |
| | CEM IV B | 45 - 64 | 36 - 55 | 0 - 5 |
| Ciment composé | CEM V A | 40 - 64 | 18 - 30 | 0 - 5 |
| | CEM V B | 20 - 39 | 31 - 50 | 0 - 5 |

Tableau I.1 : 5 types de ciments courants et leur composition [3].

I.3.2. Superplastifiants

La sélection d'un superplastifiant efficace est aussi cruciale que celle d'un ciment quand on veut fabriquer des BHP parce que tous les types et toutes les marques de superplastifiant ne réagissent pas de la même façon avec tous les ciments [1].

L'expérience démontre que tous les superplastifiants commerciaux n'ont pas la même efficacité pour disperser les particules de ciment à l'intérieur d'un béton en réduisant la quantité d'eau de gâchage et on contrôlant la rhéologie des bétons de très faible rapport E/C durant la première heure qui suit le contact entre le ciment et l'eau [1].

I.3.2.1. 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 [4].

L'utilisation de superplastifiant dont l'action est schématisée sur la Figure I.1, permet de concilier la diminution de la teneur en eau et la fluidité du béton tout en conservant de bonnes performances mécaniques du matériau [5].

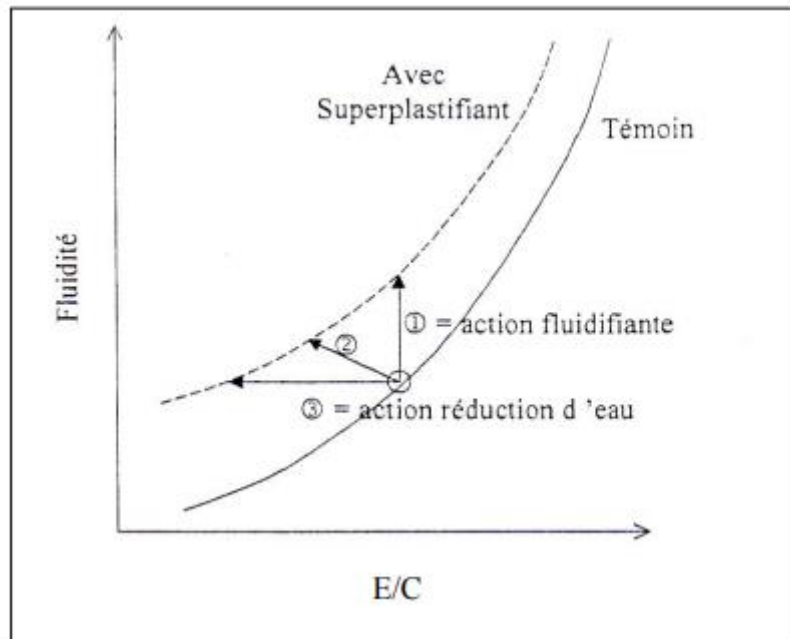


Figure I.1 : Les utilisations des superplastifiants.

Avec :

- 1 – augmentation de la fluidité (teneur en eau égale).
- 2 – diminution de la teneur en eau et augmentation de la fluidité.
- 3 – diminution de la teneur en eau (à fluidité égale).

Les BHP sont définis par trois critères : résistance, durabilité et ouvrabilité. Tanaka et al. [1999] [6], 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 superplastifiants 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 [6].

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.2). 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.

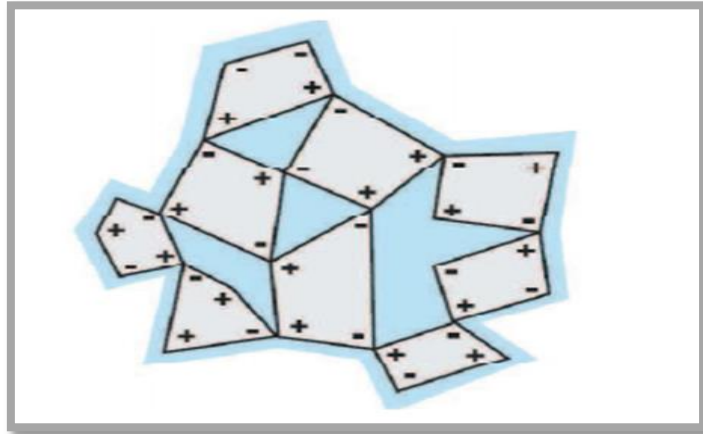


Figure I.2 : Des charges opposées sur la surface des grains de ciment provoquent la floculation.

I.3.2.2. Mécanisme de dispersion

La Figure I.3 montre l'influence d'un superplastifiant 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 superplastifiants améliorent la dispersion à long terme, une excellente ouvrabilité et une résistance à la ségrégation [4]. Leur action dispersive est essentiellement due à la répulsion électrique [6]

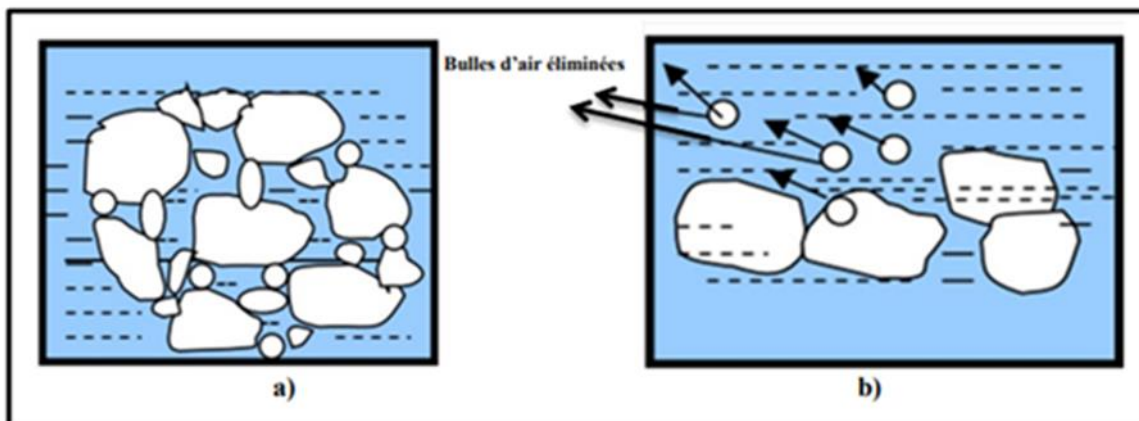


Figure I.3 : Mécanisme de floculation avec et sans superplastifiants.

a) Sans superplastifiant

Colonies de grains de ciment non défloculés, cohésion capillaire par rétention de bulles d'air.

b) Avec superplastifiant

Les molécules, sont adsorbées par les grains de ciment basique, l'air s'élimine, d'où la défloculation capillaire, facilitée par abaissement de la tension aux interfaces.

Les superplastifiants 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.4) en brisant la dynamique des forces électrostatiques qui existe entre les particules de ciment présentant des charges électriques différentes [7].

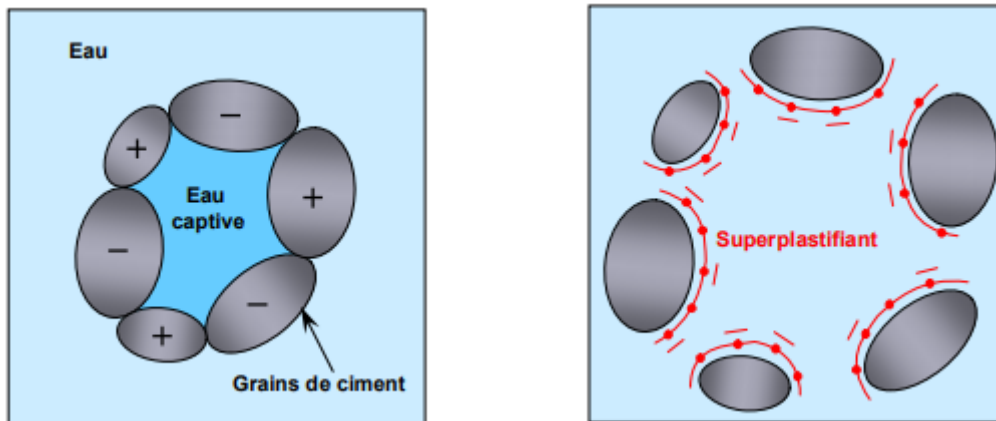


Figure I.4: Effet du superplastifiant sur les grains de ciment par le phénomène de dispersion [7].

I.3.2.3. Différents types de superplastifiant

La découverte des plastifiants et plus particulièrement des superplastifiants 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 : polyméline-sulfonates (PMS) ;
- 3eme génération : polycarboxylates (PC), et hybrides avec chaines sulfonates ;
- 4eme génération : poly-carboxylates-polyox (PCP) et poly-phosphonates-polyox.

I.3.3. Granulats

La sélection des granulats doit être faite avec beaucoup de soin au fur et à mesure qu'augmente la résistance visée puisque les granulats peuvent devenir le chaînon le plus faible où va s'initier la rupture du béton lorsqu'il sera soumis à des contraintes élevées. Il est donc très important d'exercer un contrôle serré de la qualité des granulats surtout en ce qui a trait à leur granulométrie, à leur forme et à leur propreté des particules [1].

I.3.3.1. Granulat fin

Peu de recherche ont été faites pour optimiser les caractéristiques du granulat fin que l'on doit utiliser dans les BHP même si la nature et les caractéristiques d'un sable peuvent beaucoup varier d'un endroit à l'autre. En général, les granulats fins que l'on utilise pour fabriquer des BHP ont une distribution granulométrique comprise dans les limites recommandées par la norme ACI (American Concrete Institute) pour les bétons usuels. Cependant, chaque fois que cela est possible, on peut choisir un granulat fin qui se situe sur la partie grossière de ces limites, c'est-à-dire un granulat fin qui a un module de finesse compris entre 2.7 et 3.0 [1].

L'utilisation de tels sables grossiers est recommandée puisque, dans tout BHP, il y a suffisamment d'éléments fins à cause de la forte teneur en ciment et en ajouts cimentaires, de telle sorte qu'il n'est pas nécessaire d'avoir un sable fin pour améliorer la maniabilité du béton et sa résistance à la ségrégation. En outre, l'utilisation d'un sable plutôt grossier peut amener une certaine diminution de la quantité d'eau de gâchage nécessaire pour obtenir une maniabilité donnée, ce qui est un avantage du point de vue de la résistance et du vue économique. L'utilisation d'un sable grossier permet aussi d'obtenir un meilleur cisaillement de la pâte de ciment durant son malaxage.

Généralement, il n'y a pas d'avantage particulier à utiliser un type de sable plutôt qu'un autre en autant que ces sables soient propres et ne contiennent pas de particules d'argile ou de silt.

I.3.3.2. Gros granulat concassé ou gravier

Au fur et à mesure qu'augmente la résistance à la compression ciblée, la sélection des gros granulats devient de plus en plus importante. On utilise la plupart du temps des roches dures et denses comme gros granulat lorsque l'on fabrique des BHP. La forme des particules du gros granulat est aussi importante du point de vue rhéologique. Durant le concassage, il faut essayer de générer autant que possible des particules équidimensionnelles (aussi appelées cubiques) plutôt que des particules plates et allongées. Ce dernier type de particules n'est pas recommandé car ces particules sont faibles, elles peuvent même quelque fois faciliter casser entre les doigts et produire des bétons qui auront une moins bonne maniabilité qu'il faudra compenser en augmentant le dosage en super plastifiant pour obtenir un affaissement donné.

Du point de vue de leur forme et de leur résistance, les meilleurs granulats pour fabriquer des BHP sont probablement les graviers glaciaires ou même les graviers fluvio-glaciaires parce qu'ils sont généralement constitués de particules qui correspondent aux parties les plus dures des roches qui ont été écrasées par les glaciers et qu'ils ont été bien nettoyés par les eaux qui les ont traversés lors de la fonte des glaciers [1].

La sélection du gros granulat peut être faite en examinant de façon à s'assurer que toutes les particules sont résistantes et permettent de retarder le plus possible la rupture prématurée du BHP.

I.3.3.2.1. Forme et état de surface

Les granulats concassés à coefficient de forme élevé sont préférés aux granulats roulés lisses (adhérence plus élevée). Le coefficient de forme est le rapport du volume effectif du granulat sur le volume de la sphère circonscrite. Plus il sera élevé, meilleure sera la compacité. En outre, les formes très anguleuses sont très néfastes quant à l'obtention des bonnes résistances, elles poinçonnent la matrice lors d'une sollicitation. En effet, lorsque le béton est soumis à une sollicitation de compression, on peut assimiler les granulats à des plateaux de compression d'une presse et, la matrice se trouve donc poinçonnée [8].

I.3.3.2.2. Porosité

Les granulats poreux (avec une porosité communicante) modifient la consistance du matériau par absorption d'eau dans le malaxeur. Il est recommandé d'utiliser des granulats de coefficient d'absorption inférieur à 1 % [2].

I.3.3.2.3 Nature minéralogique

Elle est caractérisée par la résistance mécanique des grains, la texture (la rugosité de surface) et la possibilité des réactions à l'interface granulat-pâte de ciment. Les granulats présentant des risques de réactions alcali-granulat sont à proscrire car ces réactions détruisent l'étanchéité des enceintes et la stabilité à long terme des ouvrages [9]. La présence des poussières ou d'argile sur les granulats réduit l'adhérence et exige une augmentation de la teneur en eau entraînant une chute des résistances [10].

I.3.3.2.4 Granularité

C'est elle qui régit la compacité du mélange et sa maniabilité. Les dosages en ciment dans les BHP étant élevés, il n'y a pas intérêt à utiliser des sables fins, Alaejos Gutierrez et al recommandent le sable de rivière qui réduirait la demande en eau [2].

Dutrueil recommande de limiter la dimension maximale du gros granulat à 12 mm pour avoir des résistances élevées. Metha et al recommandent les granulats de dimension maximale comprise entre 20 et 25 mm ; Addis et al avaient trouvé que la résistance du béton augmentait avec la dimension du gros granulat entre 13,5 et 26,5 mm, Alaejos Gutierrez et al ont affirmé qu'on obtient les meilleurs résultats avec des granulats de dimension maximale comprise entre 13 et 14 mm et un coefficient de Los Angeles inférieur à 15 [11] [1] [12] [2].

De Larrard a recommandé un rapport gravier/sable (G/S) compris entre 1,5 et 2 [10].

I.3.4. Sélection de l'addition

Jusqu'à aujourd'hui, sont rare les cas où l'on décide d'utiliser des ajouts cimentaires pour des questions rhéologiques, mais ce type d'utilisation va sûrement se développer dans le future. Même si l'on se réfère toujours à des considérations économiques pour justifier

l'incorporation d'ajouts cimentaires, on souligne rarement les économies qu'elle entraîne au niveau de la réduction du dosage de superplastifiant pour obtenir une maniabilité désirée. L'action des additions concerne aussi bien l'état frais que l'état durci du béton. En premier lieu, à l'état frais, la présence des additions modifie la structure du squelette granulaire du matériau et les frictions entre les composants de la suspension solide dans la phase liquide. En second lieu, au cours de la prise et du durcissement, les particules des additions interagissent dans le processus d'hydratation du ciment et peuvent modifier la structuration des produits hydratés. En troisième lieu, certaines additions ont la capacité de réagir chimiquement en milieu cimentaire pour former de nouveaux produits hydratés qui présentent un caractère liant additionnel à celui résultant de l'hydratation du ciment et que les anglo-saxons précisent sous le terme de «supplementary cementitious matériels». De plus, ces différents aspects de l'action des additions peuvent intervenir de manière simultanée, rendant particulièrement difficile l'évaluation de la contribution des additions minérales aux performances des matériaux cimentaires. Toutefois, pour une première analyse de l'action des additions minérales, nous pourrions distinguer trois principaux effets :

- un effet granulaire engendré par la capacité d'empilement des particules de l'addition et par l'intensité des frictions entre les particules de l'addition avec les autres grains solides du mélange. Cet effet agit essentiellement sur les propriétés rhéologiques et la compacité des matériaux cimentaires à l'état frais et peut influencer sur le développement et l'intensité des deux autres effets des additions ;
- un effet physico-chimique et microstructural engendré par les interactions entre les particules de l'addition et l'évolution du processus d'hydratation du ciment ainsi que par les modifications de la structuration de la matrice cimentaire. Il agit sur l'évolution du processus d'hydratation du ciment et sur les propriétés physiques et microstructurales des matériaux cimentaires ;
- un effet chimique engendré par la capacité de certaines additions caractérisées par des propriétés pouzzolaniques et/ou hydrauliques à réagir en milieu cimentaire. Il agit sur le volume et la nature des produits hydratés formés. Cet effet est complémentaire à l'effet physico-chimique et microstructural. Ils peuvent donc être associés dans une notion unique plus large qui est celle de la contribution des additions à l'activité liante du ciment.

I.3.4.1. Les Fillers

Les fillers calcaires sont des ajouts cimentaires non hydrauliques (inertes), mais qui peuvent se révéler d'une grande efficacité dans l'utilisation pour les bétons de masse. Par effet filler, ils peuvent en effet améliorer la compacité du squelette granulaire dans les bétons, et par leur relative inertie chimique ils peuvent contribuer à diminuer sensiblement la température dans

les bétons de masse. Ainsi il permet de substituer jusqu'à 35 % de filler calcaire au ciment portland.

Aitcin et al estiment qu'en plus de son rôle principal, qui est de densifier la matrice de mortier, le filler calcaire aurait une certaine réactivité chimique qui contribuerait à augmenter les résistances en compression par la formation de carboaluminates [1].

De larrard F a observé que l'ajout de (CaCO_3) au (C_3S) accélère l'hydratation du ciment. De larrard et al estiment aussi que les fillers fins comme le calcaire, accélèrent les premières réactions d'hydratation. Ces dernières études confirment l'effet non négligeable des fillers calcaires sur l'hydratation du ciment au jeune âge [13] [14].

I.3.4.2. Les Cendres volantes

Elles sont récupérées dans les filtres des centrales thermiques à charbon qui produisent de l'électricité, leur taille varie de la micrométrie à quelque dizaines de micromètres. Selon le type de charbon et de chaudière ont des propriétés pouzzolanique. L'emploi de cendres volantes en quantité limitée, permet d'obtenir des bétons résistant aux ambiances agressives (Figure I.5).



Figure I.5 : Cendres volantes : une poudre ressemblant au ciment.

I.3.4.3. Laitiers de haut-fourneau

Le laitier de haut-fourneau broyé (Figure I.6), aussi appelé ciment de laitier, est fabriqué à partir du laitier de fonte, c'est un liant hydraulique non métallique qui est composé essentiellement de silicates et d'aluminosilicates de calcium qui se sont développés dans les conditions de fusion de l'acier dans un haut-fourneau.

Le laitier en fusion, à une température d'environ $1500\text{ }^{\circ}\text{C}$, est refroidi rapidement en le trempant dans l'eau pour former un matériau granuleux ressemblant à un sable vitreux. Le matériau granulé, broyé à une taille de moins de 45 microns, possède une finesse Blaine

d'environ 400 à 600 m²/kg. La densité d'un laitier de haut fourneau granulé broyé est comprise entre 2.85 à 2.95. La masse volumique des laitiers varie de 1050 à 1375 kg/m³ [15].



Figure I.6 : Laitier de haut fourneau granulé broyé.

I.3.4.4. Les Fumées de silice

Également appelées « fumées de silice » ou « poussières de silice » ou encore « microsilice », les fumées de silice sont un sous-produit de l'électrometallurgie du silicium et de ses alliages. On charge un four avec du quartz, de la houille et parfois des copeaux de métal. L'ensemble est porté à une très haute température (1500-2000°C) par des arcs électriques. On obtient d'une part le silicium liquide et d'autre part des gaz chargés de poussières dont certains s'oxydent à l'air libre pour donner des fumées de silice. En tant que sous-produits industriels, leur nature ne fait l'objet d'aucun contrôle lors de sa fabrication. Leurs caractéristiques physico-chimiques peuvent être assez dispersées, non seulement d'une usine à l'autre mais encore à l'intérieur même d'une unité de fabrication : la fumée de silice est un matériau très variable (Figure I.7) [1].



Figure I.7: Poudre de fumée de silice.

I.3.5. Sélection de l'eau de gâchage

Le « gâchage » est l'opération irréversible de l'eau au ciment. Cette opération se poursuit par le malaxage. L'eau de gâchage est la quantité totale d'eau que l'on utilise pour faire le béton. La résistance finale d'un béton dépend du rapport E/C du mélange. Toutes les eaux ne peuvent pas être utilisées pour gâcher du béton parce qu'elles contiennent, dans certains cas, un excès d'impuretés qui détériore les propriétés du béton, notamment les propriétés physiques et mécaniques (prise et résistance), les propriétés esthétiques (taches, efflorescences), la durabilité (corrosion des armatures, stabilité du béton).

I.4. Facteur influençant sur le comportement mécanique du BHP

I.4.1. Influence du rapport E/C

Durant des années, la fabrication du béton n'a nécessité que des granulats, du ciment et de l'eau. Ce dernier composant remplit un double rôle :

- l'une physique qui confère au béton ses propriétés rhéologiques,
- et l'autre chimique qui contribue au développement des réactions dites d'hydratation.

En effet, pour un mélange granulaire sec, l'ajout d'eau agit tout d'abord comme un lubrifiant entre les particules qui ont le plus de facilité à glisser les unes sur les autres et à se placer de façon optimale [16]. Mais, les ciments ne le permettent pas d'une part, parce que les particules de ciment présentent de très nombreuses charges électriques superficielles non saturées et ont alors tendance à flocculer lorsqu'elles sont mises en contact avec un liquide aussi polaire que l'eau. D'autre part, la réaction d'hydratation se développe aussitôt que le ciment est mis en contact avec l'eau. Jouant une fonction rhéologique qui permet d'assurer la maniabilité du béton frais, l'idéal serait tout de même que la quantité d'eau nécessaire à la rhéologie du béton soit strictement celle nécessaire à l'hydratation du ciment. En effet, si la quantité d'eau nécessaire pour une hydratation complète est de 25 à 30 % de la masse de ciment, près du double de cette quantité est nécessaire pour obtenir une maniabilité suffisante sans adjuvantation (47% en pratique) [17]. De multiples recherches ont montré l'effet bénéfique d'une diminution du rapport E/C sur le développement des résistances mécaniques du béton.

La résistance du béton diminuera ou augmentera. Ce constat n'est pas neuf. Dès 1894, le Français René Féret avait postulé cette conclusion de manière empirique (Figure I.8). L'augmentation de la résistance est cependant limitée. À partir d'un rapport eau/ciment trop faible, le béton ne peut plus être mis en œuvre. Les vides et les pores qui en résultent réduisent à nouveau la résistance, comme précisé dans l'illustration [18].

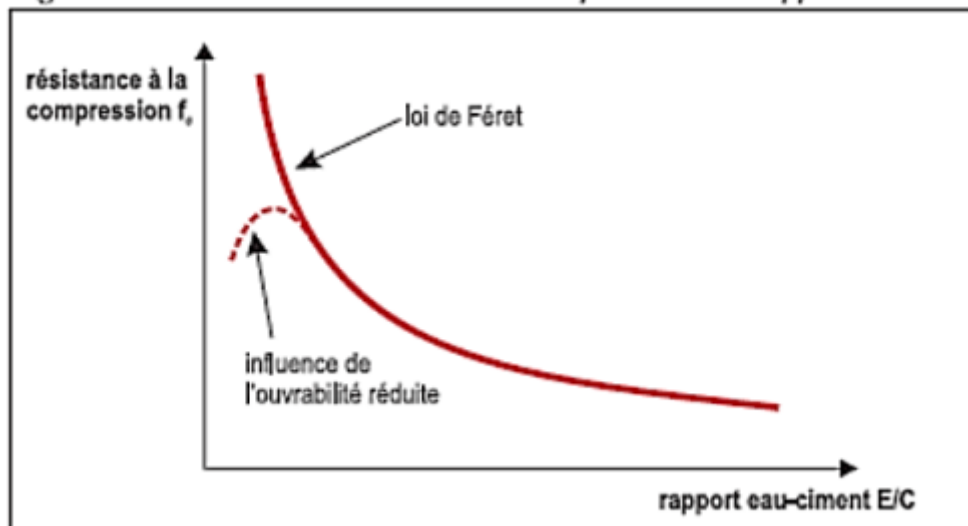


Figure I.8 : Relation entre la résistance à la compression et le rapport E/C [18].

I.4.2. Propriété des gros granulats

Comme les trois quarts du volume d'un béton sont occupés par les granulats, il n'est pas étonnant que la qualité de ces derniers revête une grande importance. Non seulement les granulats peuvent limiter la résistance du béton, mais selon leurs propriétés, ils affectent la durabilité et les performances structurelles du béton.

La sélection des granulats doit être faite avec beaucoup de soin au fur et à mesure qu'augmente la résistance visée ; puisque les granulats peuvent devenir le chaînon le plus faible où va s'initier la rupture du béton lorsqu'il sera soumis à des contraintes élevées. La contrainte à partir de laquelle se développent les fissures dépend en grande partie des propriétés des gros granulats telles que : leur forme, leur nature, leur propreté, leur porosité, leur état de surface, leur courbes granulométriques.

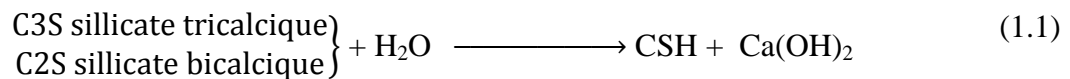
I.5. Microstructure des BHP

La complexité de la microstructure du béton est une des causes de son comportement mécanique particulier lorsqu'il est soumis à diverses sollicitations (thermiques, hydriques, mécaniques, chimiques.....). Si on cherche à comprendre en particulier les mécanismes de durabilité, il faut dans premier temps, connaître les propriétés des éléments le constituant et sa structure aux différentes échelles. On distingue trois phases dans le béton en incluant la porosité de chacun des phases :

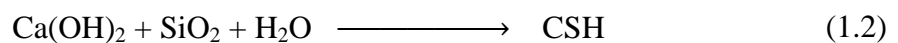
- ✓ La pâte de ciment durcie (matrice cimentaire),
- ✓ Les granulats (gravillons et sable),
- ✓ L'interface pâte/granat.

La pâte de ciment durcie représente habituellement 25 à 40 % du volume total du béton et forme ce que l'on appelle la matrice cimentaire du matériau. Celle-ci joue un rôle de colle et confère au matériau béton ses propriétés de rigidité et de résistance. Cette matrice est

constituée principalement d'hydrates qui sont les silicates de calcium (C-S-H) et de particules anhydres. Plus la présence de l'eau interstitielle et les vides remplis d'air et/ou de vapeur d'eau. Les constituants du ciment en présence d'eau transforment en hydrates qui précipitent et donnent une structure mécaniquement résistante. Les principaux hydrates formés sont les suivants : silicate de calcium hydraté (C-S-H), Portlandite Ca(OH)_2 , aluminates de calcium hydraté et l'ettringite ($3\text{CaO} \cdot \text{A}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$) etc. la réaction principale de l'hydratation du ciment est présenté par l'équation suivante :



Dans le béton ordinaire la pâte de ciment durcie contient 50-70% de C-S-H (Figure I.10) et 25-27% de Ca(OH)_2 (Figure I.9) par contre dans le cas des bétons à hautes performances, la qualité des C-S-H est encore plus importante, ce qui induit une augmentation de la résistance [19]. Par contre, la portlandite Ca(OH)_2 n'a que peu d'importance du point de vue de la résistance mécanique parce que ses cristaux de taille importante sont susceptibles de limiter la résistance en compression su béton. De plus, la portlandite est facilement soluble dans l'eau, ce qui diminue la durabilité du béton [26]. Donc, afin de diminuer la quantité de portlandite, on peut ajouter de la fumée de silice au ciment. La fumée de silice réagit avec la portlandite selon une réaction puzzolanique qui est présentée par l'équation suivante :



Elle consomme donc de la portlandite et forme des CSH supplémentaires [21]. La fumée de silice, du fait de la taille de ses grains, inférieur à celle de grains de ciment augmente également la compacité de la matrice. Ceci conduit à une amélioration des performances mécaniques du béton.

Il est intéressant de décrire de manière plus fine la constitution du CSH, ainsi que la répartition et les formes prises par l'eau dans la porosité et la microstructure de la pâte de ciment parce que cette eau représente un élément essentiel dans le comportement de la matrice cimentaire.

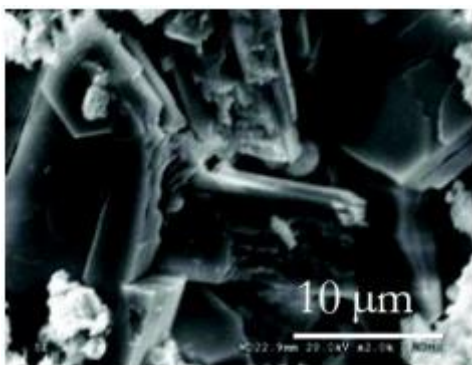


Figure I.9: Cristaux de Portlandite.

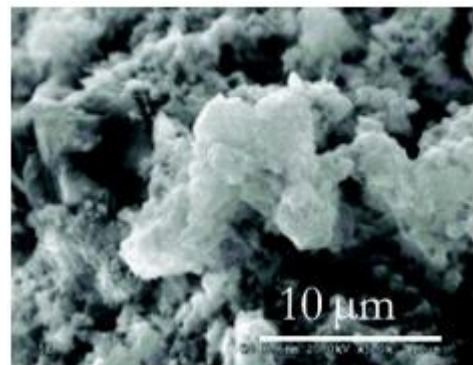


Figure I.10: Gel de CSH.

I.5.1. Les C-S-H

Les silicates de calcium hydratés, appelés communément CSH, de composition $(\text{CaO})_x(\text{SiO}_2)_y(\text{H}_2\text{O})_z$ où les valeurs x , y , z dépendent de la teneur en calcium et en silicates dans la phase aqueuse [22]. Le paramètre le plus courant pour caractériser la stœchiométrie de μm^3 matériaux est le rapport entre le nombre d'atomes de calcium et le nombre d'atomes de silicium dans la structure : le rapport G/S. Ce rapport varie entre 0.7 et 2.0 dans les CSH [23].

- Les granulats (sables, gravillons) occupent 60 à 75% du volume du béton. Ils jouent les rôles de remplissage atténuateurs de variations volumiques, ils sont les sources de résistance mécanique puisqu'ils se caractérisent généralement par des performances notamment en compression supérieures à celle de la pâte.
- La liaison qui s'établit au cours de l'hydratation entre la pâte de ciment et les granulats se traduit par une zone de pâte particulière appelée « auréole de transition » ou interface pâte/granulats [24]. Elle constitue une zone de moindre résistance des bétons soumis à des sollicitations mécaniques. Les propriétés de ces phases ont un rôle dans les comportements à long terme des bétons. La zone d'interface pâte-granulat est généralement moins dense et plus poreuse que le reste de la matrice formée par la pâte de ciment hydraté. Cette zone offre donc un chemin préférentiel pour le passage de l'eau, des gaz ou des ions. L'épaisseur de cette zone augmente avec la grosseur du granulat et avec le rapport E/C, mais reste, dans tous les cas inférieure à 50 μm , cette particularité des matériaux cimentaires est attribuée à un excès local d'eau : un film liquide se forme sur la surface du granulat au moment de gâchage, modifiant la liaison (nature et orientation des hydrates formés) qui s'établit au cours de l'hydratation entre la pâte de ciment et le granulat.

La qualité de la zone de transition dépend fortement de la nature des granulats. Nous distinguons les granulats réactifs et neutres en contact avec la pâte de ciment. Les granulats calcaires (réactifs) présentent les plus fortes liaisons avec la pâte de ciment du fait des réactions chimiques qui se produisent au cours du temps et augmentent les forces d'adhésion [20]. La zone de transition entre les granulats calcaires et la pâte de ciment est ainsi résistante et de perméabilité plus faible. L'augmentation de la résistance du béton réalisé avec les granulats de cette nature a été observée par Maso [25] contrairement à celle du béton de granulats de type quartz. Ces derniers granulats sont neutres par rapport à la pâte de ciment. Les liaisons entre la pâte et les granulats concassés sont plus fortes qu'avec des granulats roulés [25].

La résistance de la liaison augmente aussi avec l'âge du béton puisqu'elle dépend autant de la résistance de la pâte de ce ciment hydraté que des propriétés de surface de granulat. La résistance de la liaison et la résistance de la pâte de ciment hydraté peuvent augmenter

avec l'âge, de sorte que la fissuration ne s'initie plus à l'interface pâte/granulat. Ce n'est plus alors la résistance de la liaison qui contrôle la résistance du béton.

I.5.2. L'interface pâte/granulat dans le cas des bétons à hautes performances

L'épaisseur de l'auréole de transition pour les BHP est limitée à 12 μm [26]. Grâce à l'utilisation de la fumée de silice qui permet de la consommation de la portlandite ; les BHP présente une structure dense ce qui élimine la présence de la zone de contact [27] (Figure I.11). La qualité de la zone de transition dépend aussi du rapport E/C, lorsque ce rapport augmente, cette zone devient plus épaisse, plus poreuse et par conséquent moins résistante [28]

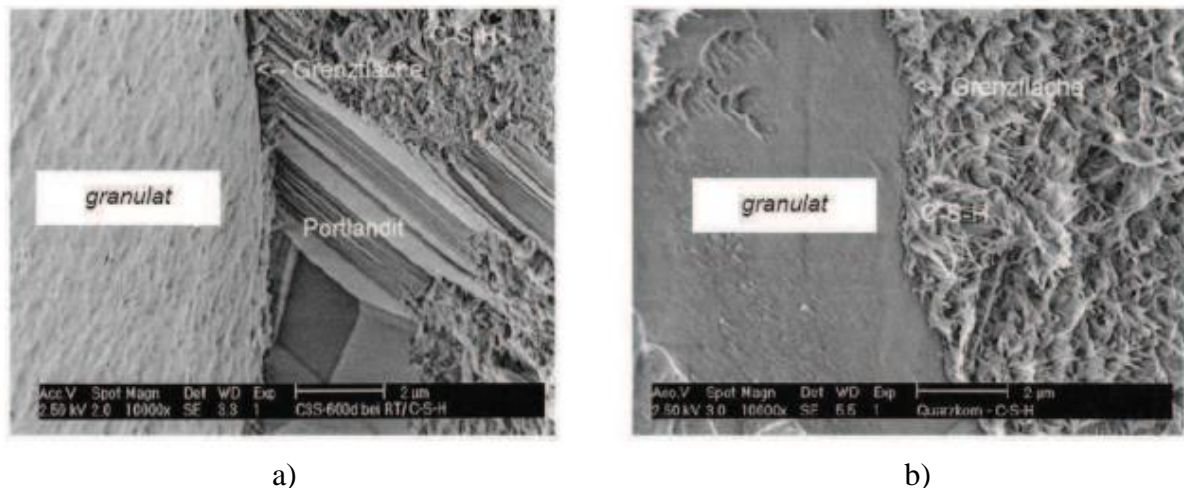


Figure I.11: Microstructure de la zone de contact entre la pâte et le granulat [26].

Avec :

- Béton sans fumée de silice : les cristaux de portlandite dans la zone de transition sont orientés perpendiculairement aux granulats.
- Béton avec fumée de silice : absence de la zone de transition, homogénéité du gel CSH.

I.6. Caractéristiques des BHP

I.6.1. Caractéristiques physiques

I.6.1.1. Ouvrabilité

Elle peut se définir par la facilité offerte à la mise en œuvre du béton pour le remplissage parfait du coffrage et l'enrobage du ferrailage.

Ce facteur primordial peut varier comme pour les bétons classiques et l'on obtient facilement des affaissements au cône d'Abrams appelés slumps de 17 à 24 cm, mais il faut impérativement étudier :

- ✓ les granulats (module de finesse du sable) ;
- ✓ le choix du ciment et du superplastifiant ;

- ✓ les dosages de ces différents matériaux, de la fumée de silice et de l'eau pour la plasticité désirée, en fonction des plus ou moins grandes difficultés de mise en œuvre dans les coffrages et l'embaras des armatures ;
- ✓ la plasticité désirée qui doit être garantie au moins une heure après le malaxage pour tenir compte des délais inévitables de transport et de mise en œuvre.

L'ouvrabilité du béton dépend de plusieurs facteurs :

- ✓ type et quantité de ciment.
- ✓ type et quantité de sable.
- ✓ teneur en eau.
- ✓ aspect et grosseur des agrégats.

I.6.1.2. Porosité

Quand les silicates anhydres des grains de ciment entrent en contact avec l'eau, leur hydratation commence toujours par une mise en solution. En d'autres termes, la phase liquide se sature avec différents ions qui se combinent ensuite pour former les différents produits d'hydratation qui occupent progressivement une partie de l'espace initialement rempli d'eau.

Au fur et à mesure que l'hydratation se développe et que la taille des pores capillaires diminue, les mouvements de l'eau dans le système deviennent de plus en plus difficiles, si bien que l'hydratation des grosses particules de ciment se fait plutôt par diffusion. Quel que soit l'instant durant la réaction d'hydratation, les espaces non remplis par des produits solides (hydrates et particules de ciment anhydre) pourront être considérés comme des vides ou des pores capillaires. Les dimensions et le volume des pores capillaires sont les principaux paramètres qui régissent les propriétés physiques et mécaniques du béton.

La porosité est essentiellement fonction du rapport E/C du béton. Il a été démontré que pour un béton donné, la seule réduction du rapport E/C de 0,5 à 0,22, réduit d'un facteur 3 le volume total des pores capillaires [1].

L'ajout de laitier ou de cendres volantes ne modifie pas la porosité totale mais conduit à une diminution générale de la dimension des pores. L'adjonction d'ultrafins et en particulier de fumée de silice se traduit par une réduction de la porosité et par une diminution caractéristique des pores [29].

I.6.1.3. Imperméabilité

Leur faible porosité capillaire confère aux BHP une très faible perméabilité.

➤ 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.).

➤ **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.

➤ **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 [30].

➤ **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. En effet, le réseau poreux, peu connecté limite la diffusion du gaz carbonique au sein de la matrice cimentaire. La faible porosité initiale favorise le colmatage des pores lié à la formation des cristaux de calcite. La progression de la carbonatation en profondeur est réduite, ce qui assure une meilleure protection des armatures [30].

I.6.2. Caractéristiques mécaniques

I.6.2.1. Résistance en compression

Les augmentations de la résistance à la compression se manifestent dès leur jeune âge; on atteint aisément les 20 MPa au bout de 24heures; 60 MPa après une semaine et plus de 60MPa après 28 jours. A l'heure actuelle, l'expression "béton à haute performance" couvre des bétons ayant une grande gamme de résistances.

Les BHP sont divisés en cinq grandes catégories correspondant chacune à une plage de résistance de 25 MPa :

- ✓ La classe I représente les BHP qui ont une résistance à la compression comprise entre 50 et 75 MPa,
- ✓ La classe II représente une résistance comprise entre 75 et 100 MPa.
- ✓ La classe III représente une résistance comprise entre 100 et 125 MPa,
- ✓ La classe IV une résistance comprise entre 125 et 150 MPa
- ✓ Enfin la classe V une résistance supérieure à 150 MPa. Quant aux deux dernières classes correspondent aux bétons à très haute performances (BTHP) (Tableau I.2) [1].

| | | | | | |
|--|----|----|-----|-----|-----|
| Résistance à la compression MPa | 50 | 75 | 100 | 125 | 150 |
| Classe des BHP | I | II | III | IV | V |

Tableau I.2 : Différentes classes de BHP [1].

I.6.2.2. La résistance à la traction par flexion

La résistance à la flexion croit sensiblement par rapport à la résistance en compression ; la relation entre la résistance à la compression et celle à la traction est de l'ordre de 1/10 à 1/13, soit 0.10 à 0.077 ; mais lorsque la résistance à la compression est de l'ordre de 100 MPa, la valeur du rapport (R_t/R_c) est beaucoup plus petite, de l'ordre de 1/20.

I.6.2.3. Résistance en traction

Comme dans le cas de la résistance à la compression, il a été établi et vérifié que la résistance en traction des BHP progressait linéairement en fonction de la compacité de la pâte de ciment durcie [31].

PE dèches [32] a montré que la résistance en traction par flexion à 28 jours avec un BHP à la fumée de silice varie entre 5 et 9 MPa. Il a montré dans la même étude que l'ensemble des points (R_c et R_t) se situait au-dessus de la courbe représentant la relation adoptée par les règlements de béton armé [33] et de béton précontraint [34] :

$$R_t = 0,6 + 0,06 R_c \quad (1.3)$$

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

$$R_t = 5,5 + 0,027 R_c \quad (1.4)$$

Ahmad et al [35] avaient déjà proposé une relation pour des résistances en compression supérieures à 84 MPa :

$$R_t = 0,44 R_c^{2/3} \quad (1.5)$$

I.6.2.4. Module d'élasticité

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

I.6.2.5. Retrait

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

I.6.2.6. Fluage

Les BHP présentent un fluage (déformation différée sous chargement permanent) plus faible que les bétons traditionnels (surtout avec des formulations à base de fumées de silice). La cinétique de fluage propre est très rapide (le fluage est accéléré et se manifeste dès les jeunes

âges du béton) et se stabilise plus vite. Le fluage de dessiccation est très faible. Le fluage est d'autant plus faible que la résistance en compression est plus élevée.

Dans les structures précontraintes, l'utilisation de BHP permet de réduire les pertes de précontrainte associées aux déformations différées du béton. Ce faible fluage permet d'augmenter l'efficacité de la précontrainte et de faciliter le contrôle géométrique des ouvrages. L'utilisation de BHP avec fumée de silice conduit donc à des réductions de déformations différées et des redistributions d'efforts plus faibles [36].

I.7. Avantage des BHP

I.7.1. Des propriétés exceptionnelles à l'état frais

Les BHP présentent une fluidité, une ouvrabilité, une aptitude au pompage et un maintien de la plasticité dans le temps à l'état frais qui apportent de nombreux avantages lors de la mise en œuvre:

- sa fluidité facilitant la mise en œuvre, aussi bien sur chantier qu'en usine de préfabrication ;
- sa bonne stabilité, garantissant l'absence de ségrégation ;
- sa faible viscosité autorisant le pompage sur de longues distances ;
- permet des bétonnages complexes dans des conditions d'accès difficiles ;
- facilite la mise en œuvre, en particulier dans les zones très ferrillées.

I.7.2. Des performances élevées aux jeunes âges

Les caractéristiques physico-chimiques et la cinétique spécifique de durcissement des BHP. Leur confèrent des résistances mécaniques importantes aux jeunes âges (par exemple, 15 MPa à 12 heures ou 30 MPa à 24 heures, ce qui autorise:

- ✓ Des décintrements et des décoffrages rapides ;
- ✓ L'optimisation des cycles de coffrage/décoffrages et des séquences de production ;
- ✓ Des délais avant mise en tension des armatures de précontraints raccourcis ;
- ✓ La fabrication d'éléments préfabriqués, dans certains cas, sans utilisation de traitement thermiques. Il est en résulte une simplification et une approche différente de l'organisation des chantiers, une augmentation de la productivité et des gains significatifs sur les délais de construction des ouvrages.

I.7.3. Des résistances mécaniques importantes à long terme

- ✓ sa résistance importante en compression permettant, à conception identique, de diminuer l'encombrement des éléments de structure ou, à sections identiques, d'en accroître les capacités portantes (charges, portées) ;

- ✓ son module d'élasticité plus élevé réduisant la déformabilité des structures (augmentation de la raideur), en particulier les flèches, et améliorant la stabilité aérodynamique des ouvrages ;
- ✓ son fluage à la fois plus faible et plus bref, simplifiant l'élaboration des interfaces avec le second œuvre et permettant la diminution des valeurs de tension initiale de la précontrainte éventuelle ;
- ✓ sa faible porosité, d'où sa résistance accrue aux actions dues à l'environnement (pluie, eau de mer, eaux sulfatées, chlorures, gel, etc.) et donc sa durabilité.

I.7.4. Autres avantages

- ✓ Amélioration de la durabilité aux environnements agressifs (grande résistance à la pénétration d'agents Agressifs et aux cycles gel/dégel, diminution de la réaction alcali-silice).
- ✓ Diminution des délais de mise en charge des structures (précontrainte accélérée).
- ✓ Diminution des sections et des densités de ferrailage et augmentation des portées (Résistance finale élevée).
- ✓ Mise en œuvre facilitée grâce à la fluidité (zones fortement ferrillées, pompage sur grande distance, Amélioration des parements). Cette caractéristique facilite la mise en œuvre du béton, même dans les zones à densité d'armature élevée.
- ✓ Élévation du module d'élasticité avec diminution du fluage.
- ✓ Diminution du retrait pour une limitation des fissures.
- ✓ Élévation de la résistance à l'abrasion.
- ✓ Renforcement de l'adhérence acier/béton.
- ✓ Haute résistance en compression, permettant de réduire les sections des éléments de béton [30].
- ✓ Une quantité de ciment élevée supérieure à 350 kg/m³.
- ✓ Un E/C plus faible par l'utilisation de super plastifiants hauts réducteurs d'eau.

I.8. Domaine d'application de BHP

Les BHP sont utilisés dans les constructions de toutes tailles quand on cherche à obtenir des résistances mécaniques très élevées, des structures compactes ou des diminutions de section.

Ils permettent aussi de répondre à des exigences d'intégration dans l'environnement, de prendre en compte des contraintes extrêmes sur un plan climatique ou d'apporter une protection à des agressions chimiques. Les BHP sont utilisés notamment pour la réalisation de :

- ✓ Bâtiments de bureaux ;
- ✓ Parkings, tunnels et travaux souterrains ;
- ✓ Ouvrages d'art et de génie civil, ponts routiers ;
- ✓ Plates-formes d'exploitation et de stockage ;
- ✓ Ouvrage en site maritime ;

- ✓ Ouvrages de l'industrie chimique ou du nucléaire, bâtiments agricoles.

➤ **Exemples d'application du BHP**

Le béton haute résistance (BHP), qui a une grande durabilité, assure un niveau élevé de performance structurale, par rapport au béton à résistance normale (BRN) utilisé traditionnellement. Auparavant employé pour les ponts, les constructions en mer et les infrastructures, il est de plus en plus utilisé dans les immeubles de grande hauteur, en particulier pour les poteaux. Sa plus grande résistance à la compression permet de réaliser des poteaux de diamètre réduit, ce qui diminue l'encombrement [1].



Figure I.12 : Pacific Tower (Paris)



Figure I.13 : Arche de la défense (Paris).



Figure I.14 : Pont de l'île de Ré.

I.9. Formulation des BHP

La recherche des hautes performances passe par la réduction de la porosité du béton durci, c'est-à-dire de son pourcentage de vide. On cherchera donc, pour formuler un BHP, à diminuer la porosité de la matrice cimentaire et à optimiser le squelette granulaire. La formulation d'un BHP suit les trois principales étapes suivantes :

a. Détermination d'une formule théorique prévisionnelle

- ✓ Prélèvement suffisant des matériaux pour la formulation ;
- ✓ Sélection des constituants en fonction de l'expérience locale ;
- ✓ Détermination des proportions des constituants ;
- ✓ Optimisation de squelette granulaire.

b. Optimisation du mélange en laboratoire

- ✓ validation de la compatibilité ciment/superplastifiant ;
- ✓ vérification du comportement rhéologique du béton frais ;
- ✓ analyse de la sensibilité de la formule aux variations des dosages de 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 sur chantier

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

I.10. Mise en place du BHP

Les BHP sont habituellement mis en place par pompage en utilisant des grues, des godets ou des convoyeurs. Chaque méthode de mise en place a ses avantages et ses inconvénients et ce sont finalement les conditions de chantier qui dictent le choix final de mise en place. Les matériaux utilisés et l'accessibilité du chantier peuvent requérir des capacités de production et des vitesses de mise en place qui imposeront une méthode tout en tenant compte des conditions climatiques.

I.10.1. Pompage

La mise en place des bétons usuels se fait de plus en plus par pompage et cela s'applique aussi au BHP. Les règles développées pour les bétons usuels s'appliquent en général aux BHP : la granulométrie des granulats est un paramètre très important, particulièrement celle du sable, de façon à obtenir un béton cohésif qui résiste bien aux fortes pressions de pompage. L'addition d'une faible quantité de fumée de silice, 1 à 3% de la masse du ciment, permet d'améliorer la pompabilité du BHP.

I.10.2. Vibration

En général, on pose qu'un BHP qui a un affaissement très élevé n'a pas besoin d'être vibré lorsqu'on le met en place dans les coffrages, ce qui est complètement faux. A cause de la nature très cohésive des BHP. Ceux-ci ont tendance à entrainer de grosses bulles d'air qu'il

faut éliminer par vibration interne ou externe. Les règles habituelles de consolidation utilisées pour les bétons usuels s'appliquent encore pour les BHP.

I.10.3. Finition des dalles en BHP

En règle générale, les finisseurs n'aiment pas leur première expérience avec le BHP parce qu'ils n'ont pas été prévenus que leur finition est très différente de celle d'un béton usuel. Habituellement, ils n'aiment pas du tout la cohésion du béton et ils le trouvent trop collant. Ils attendent beaucoup trop longtemps avant de commencer la finition du BHP. Car ils espèrent toujours voir apparaître de l'eau de ressuage à la surface du béton. De plus, ils s'aperçoivent que cette surface se fissure très rapidement par suite du développement du retrait plastique et qu'il est toujours très difficile de renfermer les petites fissures qui sont apparues à la surface du béton parce qu'elle est toujours difficile à travailler. Cependant, si la mise en place du BHP a été bien planifiée et bien expliquée à l'équipe de mise en place, elle peut se dérouler de façon tout à fait normale. Sur les surfaces planes, le cisaillement du BHP sans air entraîné avec un madrier, une planche ou une règle est un processus assez pénible et donne rarement de bons résultats. Par conséquent, il est absolument essentiel d'utiliser une règle vibrante, les quelques défauts qui demeurent à la surface d'un BHP peuvent être éliminés avec une truelle de magnésium ou une truelle à long manche de façon à profiter des avantages de l'amélioration de la maniabilité du béton de la couche supérieure grâce à l'action de la règle vibrante. Récemment, on s'est aussi aperçu qu'un fini à la truelle, juste après l'utilisation d'une règle vibrante, améliore la position des gros granulats dans la couche supérieure du béton de la dalle.

I.11. 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 [1]

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

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

I.12. Conclusion

Comme on peut le voir dans ce premier chapitre, une recherche bibliographique a été effectuée pour comprendre les caractéristiques physico-mécaniques du béton à haute performance. Le BHP possède plusieurs caractéristiques avantageuses telles que sa résistance et sa compacité. On a commencé par une généralité qui nous a permis de comprendre mieux cette nouvelle technologie, ensuite on a pu voir les différents constituants, leurs caractéristiques et les facteurs qui influent sur les performances des BHP, ainsi que les avantages et les domaines d'utilisations des BHP. Enfin une notion de durabilité des BHP, un aspect qui a une grande importance, notamment pour les ouvrages situés dans un milieu agressif contenant des sulfates et des chlorures tel que le milieu marin. Dans ce cas, il a fallu mettre en place un béton convenablement formulé et mûri pour qu'il soit le plus imperméable et le plus compact possible afin d'acquérir une très bonne résistance à l'eau de mer et par suite assurer une vie plus longue pour les ouvrages en question.

Chapitre II

Matériaux et formulation des bétons d'étude

II.1 Introduction

Cette étude expérimentale a pour objet d'étudier le béton à haut performance, avec une présentation des matériaux utilisés pour la confection des différents mélanges étudiés et la méthodologie adoptée lors de ce travail.

Avant de mener l'étude expérimentale, il est indispensable de caractériser et d'identifier avec rigueur tous les constituants entrant dans la formulation des BHP d'études. Dans la première partie de ce chapitre on a présenté les caractéristiques des matériaux leurs propriétés physiques et mécaniques. Et dans la deuxième partie, nous présenterons les méthodes de formulation utilisés ainsi la procédure expérimentale de préparation et de conservation des différentes éprouvettes.

La plus part des essais d'identification sont réalisés au niveau du laboratoire de génie civil de RIZZANI DE ECCHER à Jijel.

II.2. Caractéristiques des matériaux utilisés

Les BHP sont préparés en sélectionnant de façon très soigneusement chacun des ingrédients qui les constituent. La performance et la qualité de chacun des ingrédients que l'on utilise pour fabriquer un BHP deviennent critiques à un moment donné au fur et à mesure qu'on augmente la résistance visée.

II.2.1. Ciment

Le ciment utilisé dans cette formulation est un ciment Portland composé de type CPJ-CEM/II-A 42.5N. De provenance de la Société Des Ciments D'El-HAMMA BOUZIANE

Les différentes caractéristiques que soit chimiques, physiques ou mécaniques du ciment utilisé sont établies sur les fiches techniques élaborées au niveau des laboratoires de l'usine même. Les différentes caractéristiques sont présentées dans les tableaux suivants :

| Composition minéralogique du ciment | | |
|-------------------------------------|-------------------|------------|
| Eléments | Abréviation | Teneur (%) |
| Silicates tri calciques | C ₃ S | 56.60 |
| Silicates bi calciques | C ₂ S | 22.98 |
| Aluminates tri calciques | C ₃ A | 9.87 |
| Alumino-ferrites tetracalciques | C ₄ AF | 8.25 |

Tableau II.1: Composition minéralogique.

| Composition chimique du ciment | | | | | | | | | |
|--------------------------------|-------|------------------|--------------------------------|------------------|------|------------------|-----------------|-----------------|-------|
| Na ₂ O | CaO | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | FeO ₃ | MgO | K ₂ O | SO ₃ | Cl ⁻ | P.A.F |
| 0.27 | 60.24 | 23.25 | 5.69 | 3.36 | 0.74 | 0.45 | 1.94 | 0.006 | 1.67 |

Tableau II.2 : Propriétés physiques du ciment utilisé.

| Propriétés physiques du ciment | | | | |
|--------------------------------|--------------|---------------------|---------------------------------------|--|
| Temps de prise | | Consistance normale | Masse volumiques (g/cm ³) | Surface spécifiques (BLAINE)(cm ² /g) |
| Début de prise | Fin de prise | 26.91 | 3.1 | 3891 |
| 2h50min | 4h06min | | | |

Tableau II.3: Propriétés physiques du ciment.

| Résistance mécaniques du ciment (MPa) | | | |
|---------------------------------------|---------|---------|----------|
| Essais | Age | | |
| | 2 jours | 7 jours | 28 jours |
| Compression | 13.6 | 24.6 | 42.6 |
| Flexion | 2.59 | 4.81 | 6.60 |

Tableau II.4: Résistance mécaniques du ciment.

II.2.2. Granulats

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.

Tandis que les granulats fins employés étaient de deux (02) provenances, un sable siliceux naturel (S1) de classe granulaire (0/1) avec un module de finesse MF1=1.86, (sable de dune de la Wilaya de Jijel), un sable de carrière (S2) de classe granulaire (0/3) avec un module de finesse MF2=3.22 de la carrière de Chelghoum-laid wilaya de Mila, 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.

➤ La correction éventuelle du module de finesse du sable :

On pourra utiliser la règle d'Abrams, dans notre cas on a utilisé un sable S2 de module de finesse trop fort MF2 et que l'on désire y ajouter un sable fin S1 de module de finesse MF1

afin d'obtenir un mélange dont le module de finesse serait MF3 ; les proportions des deux sables composant devront être les suivantes :

Soit : MF2 = 3,54 (sable grossier S2), MF1 = 1.86 (sable fin S1), MF3 = 2.54 (sable corrigé S3)

$$\text{Proportion } S1 = \frac{MF3 - MF1}{MF2 - MF1} = \frac{2.54 - 1.86}{3.22 - 1.86} = 50 \% . \quad (2.1)$$

$$\text{Proportion } S2 = \frac{MF2 - MF3}{MF2 - MF1} = \frac{3.22 - 2.54}{3.22 - 1.86} = 50 \% . \quad (2.2)$$

➤ Analyse granulométrique

L'obtention d'un béton résistant, étanche et durable est l'objectif principal de tous les utilisateurs de béton. Afin d'atteindre cette objectif, les courbes d'analyse granulométrique sont utilisées pour nous permettre d'acquérir la meilleur compacité dans un mélange de granulats. Sa connaissance permet d'établir avec précision le dosage en granulats de manière à optimiser le squelette granulaire et ainsi augmenter sa compacité selon les méthodes usuelles de formulation. L'analyse granulométrique permet également d'évaluer la teneur en éléments fins à travers la valeur du module de finesse, la continuité et la régularité, ainsi 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 courbes granulométriques dans la figure

Les résultats de l'analyse granulométriques apportent des renseignements qui disent que les fractions granulaires utilisées dans cette étude donnent un squelette granulaire continu avec un maximum de compacité.

Les courbes granulométriques des granulats utilisés pour tous les mélanges sont présentées dans la Figure II.1 et Tableau II.5 si dessous.

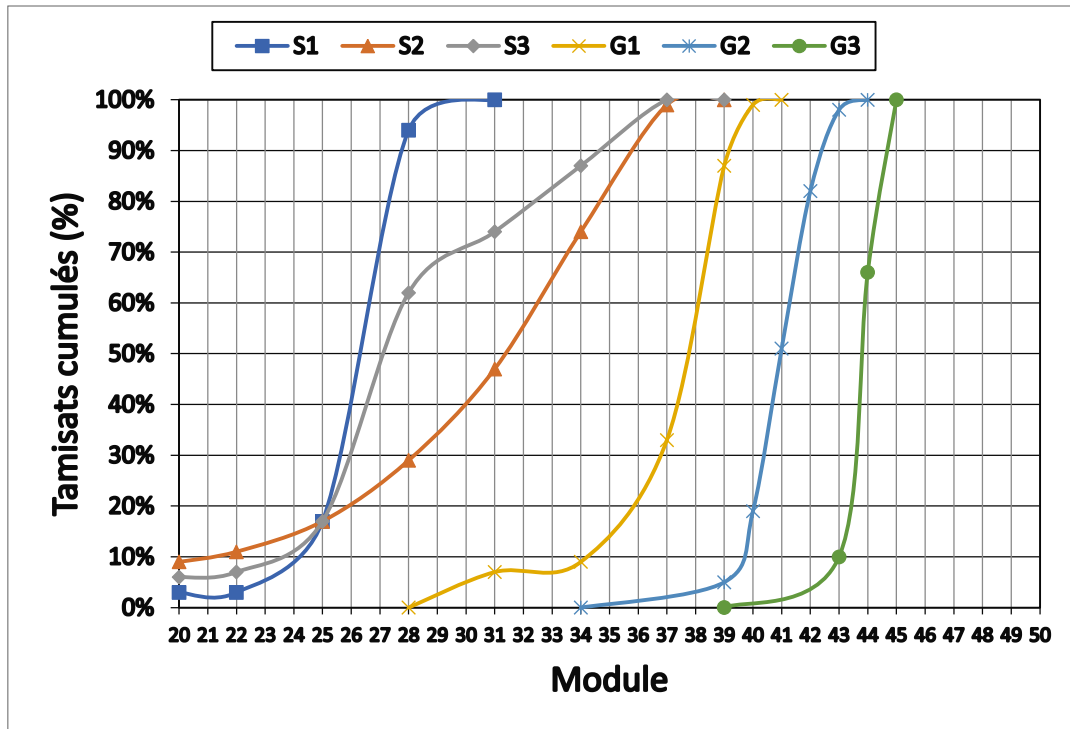


Figure II.1 : Courbe granulométriques des granulats utilisés.

| Tamis | Matériaux | | | | | |
|--------|-----------|----|----|-----|----|-----|
| | S1 | S2 | S3 | G1 | G2 | G3 |
| 31.5 | - | - | - | - | - | 100 |
| 25 | - | - | - | - | - | 100 |
| 20 | - | - | - | - | - | 66 |
| 16 | - | - | - | - | 98 | 9 |
| 12.5 | - | - | - | - | 82 | 0 |
| 10 | - | - | - | 100 | 51 | 0 |
| 8 | - | - | - | 99 | 19 | 0 |
| 6.3 | - | - | - | 87 | 5 | 0 |
| 4 | - | 99 | 10 | 33 | 0 | 0 |
| 2 | - | 74 | 87 | 9 | 0 | 0 |
| 1 | 100 | 47 | 74 | 7 | 0 | 0 |
| 0.5 | 94 | 29 | 62 | 0 | 0 | 0 |
| 0.25 | 17 | 17 | 17 | 0 | 0 | 0 |
| 0.0125 | 3 | 11 | 7 | 0 | 0 | 0 |
| 0.063 | 3 | 9 | 6 | 0 | 0 | 0 |

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

➤ **Caractéristiques physiques et mécanique**

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

| Caractéristiques | Matériaux | | | | | | spécification |
|-----------------------------|-----------|-------|------------------|-------|-------|-------|---------------|
| | S1 | S2 | Mélange S1+S2 | G1 | G2 | G3 | |
| Masse volumique absolue | 2.66 | 2.726 | - | 2.702 | 2.708 | 2.726 | - |
| Coefficient d'absorption | 0.381 | 0.457 | - | 0.452 | 0.349 | 0.332 | ≤ 2.5 |
| Coefficient d'aplatissement | - | | | 17.59 | 12.21 | 6.34 | ≤ 25 |
| Los Angeles | - | | | 23.38 | | | ≤ 30 |
| Micro Deval | - | | | 9.35 | | | ≤ 25 |
| Module finesse | 1.86 | 3.22 | 2.54 | - | | | |
| Valeur BM | 0.89 | 0.64 | 0.74 | - | | | ≤ 1.5 |

Tableau II.6: Caractéristiques des physiques et mécaniques des granulats utilisés.

II.2.3. Superplastifiant

Dans le cadre de notre étude, on a utilisé un super plastifiant haut réducteur d'eau à base de polycarboylates d'éther et de dénomination commercial Granitex MEDAFLOW 30. Les données techniques de super plastifiant sont présentées dans le Tableau II.7 :

| Caractéristiques techniques du super plastifiant | | | | | | |
|--|---------|-------|-------------|-------------------|---------|-------------|
| Dénomination | Densité | pH | Extrait sec | Teneur on ion Cl- | Aspect | Couleur |
| MEDAFLOW 30 | 1.07 | 6-6.5 | 30% | <0.1g/l | Liquide | Brun claire |

Tableau II.7: Caractéristique MEDAFLOW30.

➤ **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.

➤ **Propriétés**

Dans le Tableau II.8 on va présenter les propriétés du MDAFLOW30 au niveau du béton frais et du béton durci.

| | |
|--------------------|--------------------|
| Béton frais | Béton durci |
|--------------------|--------------------|

| | |
|--|---|
| Obtention d'un rapport E/C très faible | Augmenter les résistances mécaniques |
| Amélioration considérable de la fluidité | Diminuer la porosité |
| Une très bonne maniabilité | Augmenter la durabilité |
| Eviter la ségrégation | Diminuer le retrait et le risque de fissuration |
| Faciliter la mise en œuvre du béton | |

Tableau II.8: Propriétés MEDAFLOW30.

➤ Dosage

Plage de dosage recommandée est de 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.

II.2.4. Eau de gâchage

L'eau utilisée pour l'ensemble des essais est celle de lieu Laboratoire Rizzani De Eccher qui répond aux critères d'acceptabilité des normes en vigueur.

II.3. Formulation des bétons d'étude

L'optimisation de la formulation d'un BHP consiste à optimiser le squelette granulaire afin d'améliorer la compacité et de réduire au maximum la porosité. Plusieurs méthodes de formulation des bétons sont proposées dans la bibliographie. Nous utiliserons la méthode de l'université Sherbrooke ajustée pour la formulation des BHP d'étude. Les compositions optimisées s'appuient sur une même formulation de base afin de limiter les divergences en fixant le maximum de paramètres.

Deux approches de formulation sont utilisées pour optimiser la composition des BHP, la méthode de Dreux-Gorisse est utilisée pour déterminer les pourcentages des fractions granulaires et la méthode de l'université de Sherbrooke est utilisée pour déterminer le dosage de différents constituants.

II.3.1. Optimisation du squelette granulaire

On recherche par cette méthode l'optimum du squelette granulaire pour minimiser au maximum la porosité inter-granulaire. Cette méthode est basée sur l'obtention d'une courbe granulométrique continue permettant d'obtenir un squelette granulaire plus compact.

II.3.2. Présentation de la méthode de formulation de l'université de Sherbrooke

La méthode de formulation développée à l'université de Sherbrooke permet de formuler un BHP sans air 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 (American Concrete Institute). Il s'agit d'une combinaison de résultats empiriques et de calculs basés sur la méthode des volumes absolus. La quantité d'eau contenue dans le superplastifiant est considérée comme faisant partie de la quantité d'eau de gâchage. L'organigramme de cette méthode est présenté dans la Figure II.2.

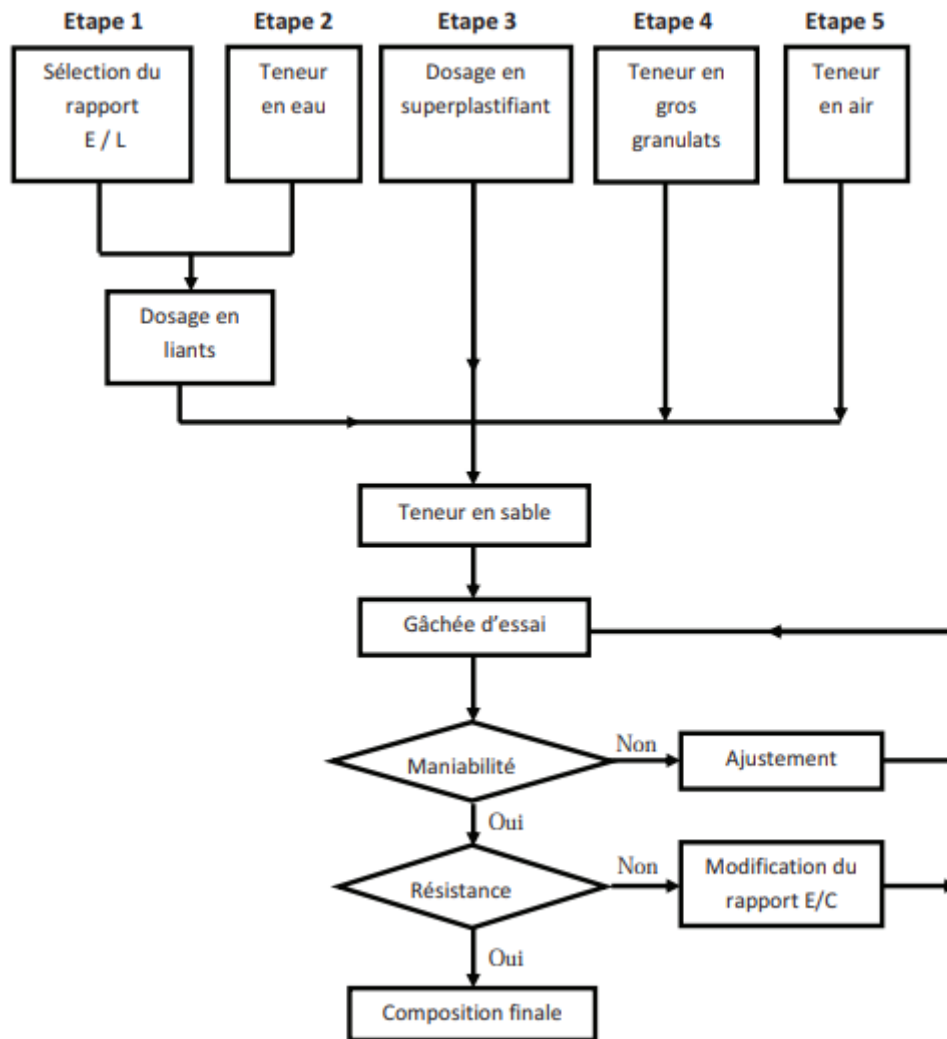


Figure II.2 : Organigramme de la méthode proposée pour formuler des BHP [1].

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;
- ✓ Le teneur en air.

➤ **Rapport eau/liant**

On peut trouver le rapport eau / liant en utilisant la Figure II.3 pour des bétons ayant une résistance à la compression donnée à 28 jours. Le fuseau de la Figure II.3 donne une gamme relativement étendue de rapport eau / liant pour une résistance donnée. Si l'on ne connaît pas l'efficacité du liant que l'on utilise, on peut commencer par prendre la valeur moyenne donnée par ce fuseau [1].

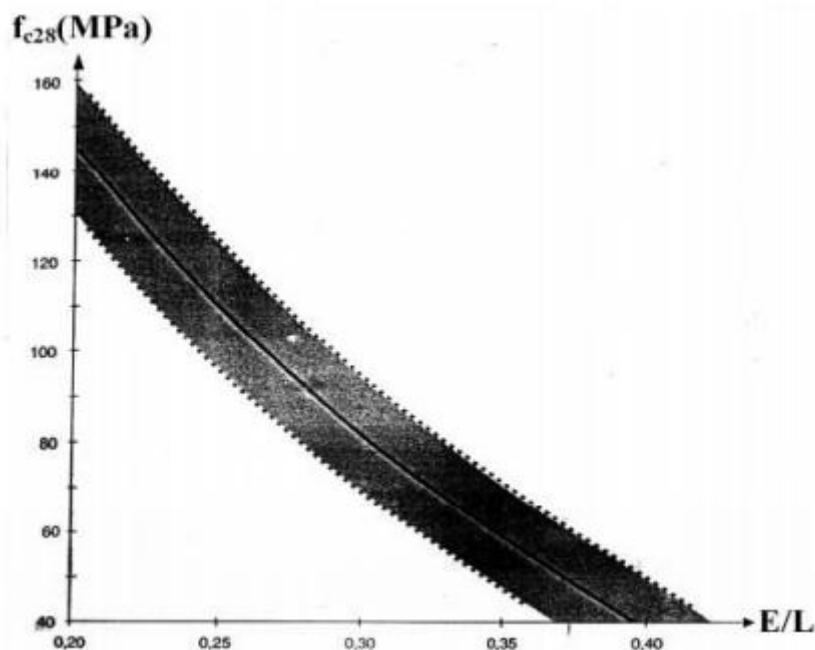


Figure II.3 : Abaque Relation proposée entre le rapport eau/liant et la résistance à la compression [1].

➤ **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 [1].

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) [1].

La Figure II.4 présente une approche simplifiée, basée sur le concept de point de saturation. Pour calculer une formulation robuste, et lorsque le point de saturation du super plastifiant n'est pas connu, on suggère de commencer avec une quantité d'eau de malaxage égale à 145 L /m³ [1].

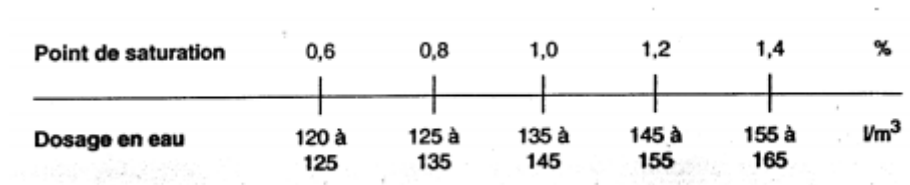


Figure II.4 : Détermination du dosage en eau [1].

➤ 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%.

❖ Point de saturation

Quand on mesure le temps d'écoulement pour différents dosages en super plastifiant à différents instants et que l'on exprime ce dosage sous forme de pourcentage de solides contenus dans le super plastifiant par rapport à la masse de ciment, on obtient une courbe qui ressemble en général à celle présentée à la Figure II.5 cette courbe est composée de deux parties linéaires ayant des pentes différentes.

L'intersection de ces deux parties linéaire est ce que l'on appelle le "point de saturation", c'est-à-dire le point à partir duquel, dans les conditions expérimentales de mesure, toute augmentation du dosage en super plastifiant n'a plus de répercussion sensible sur la rhéologie du coulis. Le dosage en super plastifiant qui correspond à ce point est appelé le point de saturation.

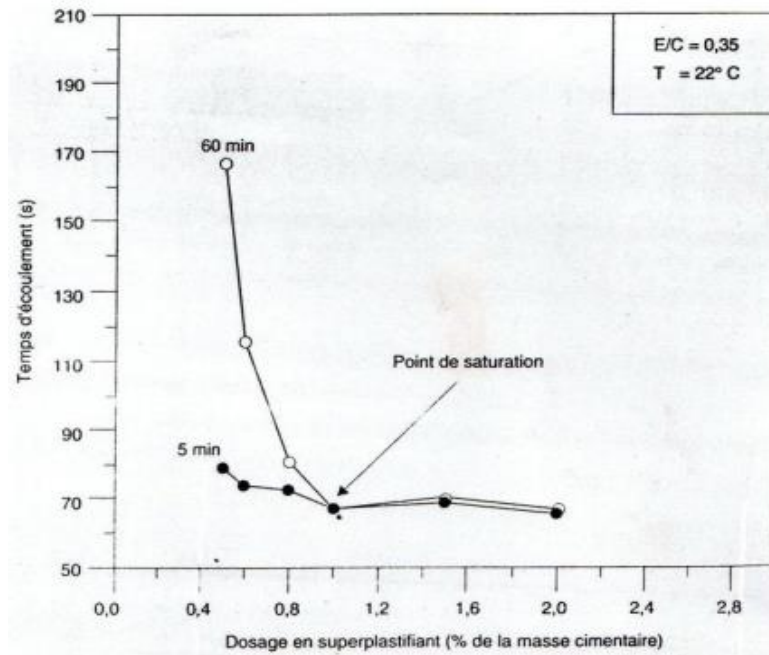


Figure II.5 : Temps d'écoulement en fonction du dosage en super plastifiant [1].

➤ **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/m³.

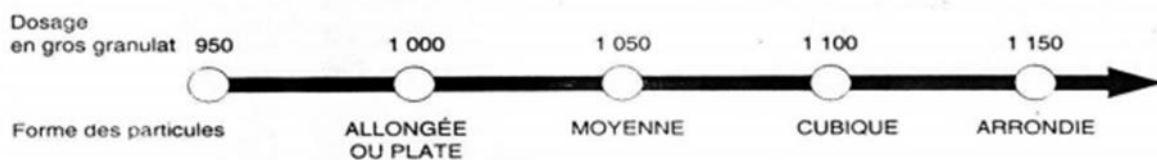


Figure II.6 : Détermination du dosage en gros granulats [1].

➤ **Teneur en air :**

Les BHP qui sont utilisés dans des environnements où il n'y a pas de cycle de gel dégel n'ont évidemment pas besoin de contenir de l'air entraîné, de telle sorte que la seule quantité d'air que l'on retrouvera dans les BHP est le volume d'air piégé. Cependant, de façon à améliorer la manipulation et la mise en place des BHP [1].

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 [1].

II.3.3. Formules de calculs

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

1. **Rapport E/C** : Reporter la valeur du rapport eau/liant telle que choisie dans la Figure II.3.
2. **Dosage en super plastifiant** : déterminer la quantité de super-plastifiant qu'il sera nécessaire d'utiliser on se basant sur la valeur du point de saturation dans la Figure II.5.
3. **Quantité d'eau nécessaire** : déduire la quantité d'eau nécessaire, selon le point de saturation montré dans la Figure II.4.
4. **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 CPJ 42.5.
5. **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) :**

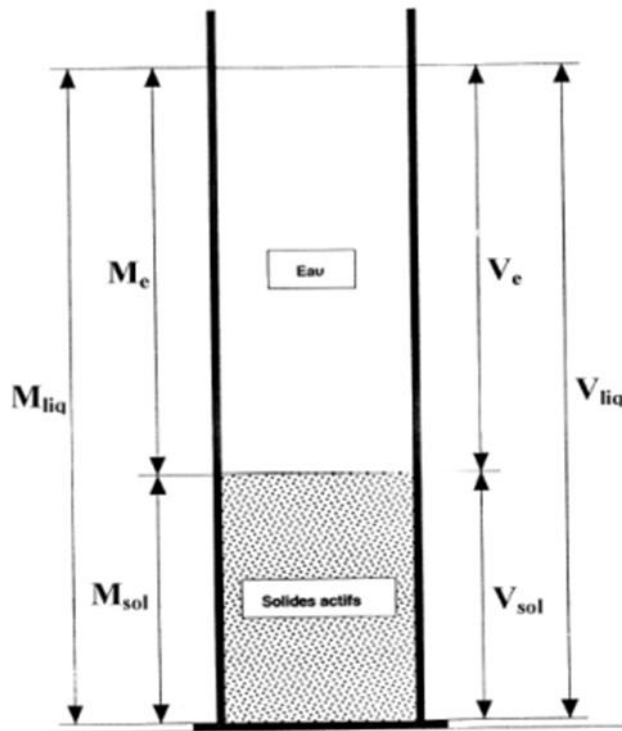


Figure II.7 : Représentation schématique d'un super plastifiant [1].

- a) calculer la masse de solides dans le super-plastifiant M_{sol} (kg):

$$M_{sol} = \frac{C \times D}{100} \quad (1.3)$$

Où

C : La masse de liant.

D : Le dosage en super plastifiant (la masse de solides).

b) Calculer le volume du super plastifiant liquide V_{liq} (l/m^3)

Le volume de super plastifiant liquide qui contient M_{sol} se calcule de la façon suivant :

$$V_{liq} = \frac{M_{sol}}{S \times d_{sup}} \times 100 \quad (2.4)$$

M_{sol} : Masse des particules solides de super plastifiant.

d_{sup} : Densité du super plastifiant.

S : Teneur en solides de super plastifiant.

c) Calculer le volume d'eau dans le super plastifiant V_e (l/m^3):

$$V_e = \frac{V_{liq} \times d_{sup}}{100} \quad (2.5)$$

d_{sup} : Densité du super plastifiant.

V_{liq} : Volume de super plastifiant liquide.

S : Teneur en solides de super-plastifiant.

d) calculer le volume des solides contenus dans le super-plastifiant V_{sol} (l/m^3) :

$$V_{sol} = V_{liq} - V_e \quad (2.6)$$

7. Volume de ciment : On divise la masse du ciment sur sa densité absolue (l/m^3).

8. Volume en gros granulats : Pour calculer le volume de gros granulats en divisant la masse du gros granulat (figure) par sa densité absolue (l/m^3).

9. Quantité d'air piégé : Multiplier la quantité d'air par 10 pour obtenir le volume d'air piégé en l/m^3 , pour notre cas on a suggéré d'utiliser une valeur de 1.5%.

10. La somme de tous les volumes : c'est le total des volumes calculés précédemment ; volume d'eau + volume du ciment + volume d'air + volume des solides dans le super plastifiant + volume de gros granulats.

11. Volume de granulats fin : calculer le volume de granulat fin (en l/m^3) en soustrayant de 1000 litres, le volume précédent.

12. La masse de granulat sec : Maintenant que l'on connaît 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 toutes les masses telles que, la masse d'eau, masse du ciment, masse de solides en SP, masse de gros granulats, masse de granulats fin (kg/m³).

II.3.4. 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

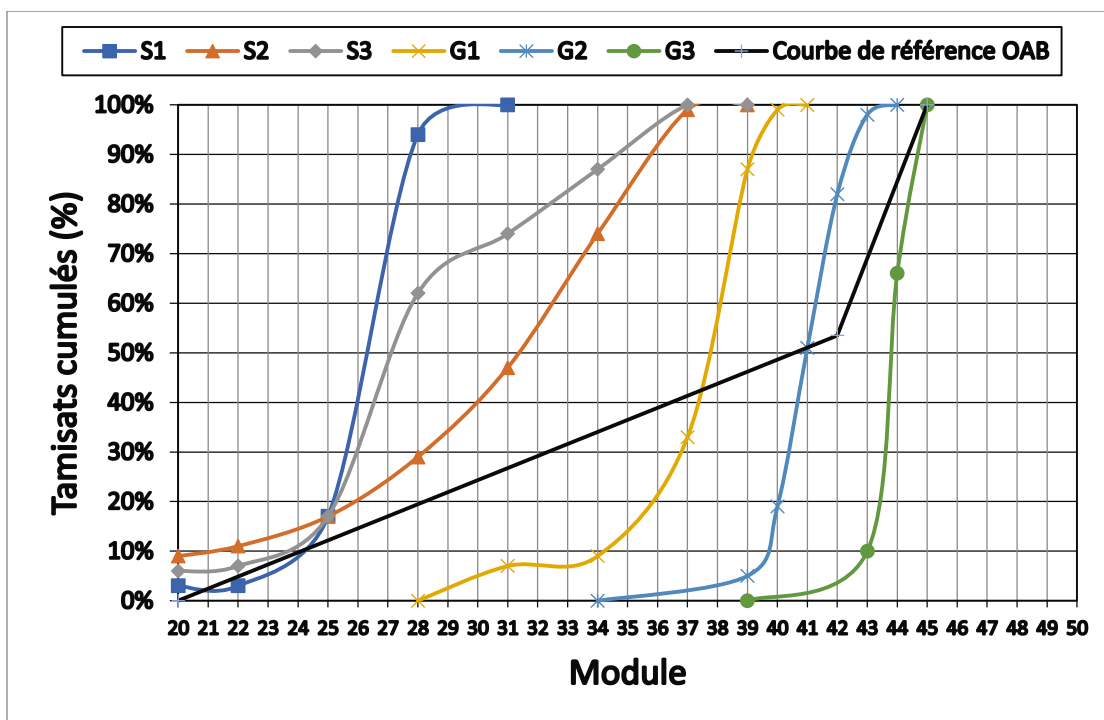


Figure II.8 : Exemple d'une courbe de mélange OAB par la méthode de DREUX-GORISSE.

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 D_{max} 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 D_{max} .

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 $D_{\max} \leq 20$ mm, $X_A = D_{\max} / 2$.

Si $D_{\max} > 20$, X_A est située au milieu du "segment gravier" limité par le module correspondant à D_{\max} .

En ordonnée :

Y_A est donnée par la formule :

$$Y_A = 50 - \sqrt{((D_{\max}))} + K' \quad \text{Où } K' = K + K_s + K_p. \quad (2.7)$$

Avec K (voir Tableau II.9 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.9 : 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 K_s

La correction supplémentaire (sur K_p) peut être effectuée en ajoutant la valeur $K_s = 6 - M_f - 15$ (M_f 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 K_p

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 K_p de la valeur $K_p = + 5$ 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 (Figure II.8) 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 5% de la courbe du granulats suivant, et ainsi de suite.

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

| Granulats | Pourcentage (%) | | |
|-----------|-----------------|-------|-------|
| | BHP8 | BHP16 | BHP25 |
| S3 | 39 | 32 | 30 |
| G1 | 61 | 19 | 18 |
| G2 | - | 49 | 22 |
| G3 | - | - | 30 |

Tableau II.10 : Pourcentage de chacun des granulats pour des différentes compositions du béton BHP.

➤ **Composition du BHP**

L'étude a été menée sur 09 types des compositions des bétons. La démarche adoptée dans ce travail consiste à faire 27 séries d'éprouvettes immergées dans l'eau potable et 09 séries d'éprouvettes immergées dans l'eau de mer, le Tableau II.11 montre la composition des différents bétons étudiés :

| Matériaux | Dosage en kg/m ³ | | | | | | | | |
|---------------|-----------------------------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|
| | BHP8 | | | BHP16 | | | BHP25 | | |
| | E/C | | | E/C | | | E/C | | |
| | 0.25 | 0.30 | 0.35 | 0.25 | 0.30 | 0.35 | 0.25 | 0.30 | 0.35 |
| Ciment | 540 | 450 | 385.7 | 540 | 450 | 385.7 | 540 | 450 | 385.7 |
| Eau | 143 | 143.5 | 143.7 | 142.5 | 143 | 143.2 | 142.3 | 142.8 | 143 |

| Superplastifiant | 18 | 15 | 12.86 | 18 | 15 | 12.86 | 18 | 15 | 12.86 |
|-------------------------|-------|-------|--------|-------|-------|--------|-------|-------|--------|
| G1 | 1070 | 1070 | 1070 | 767.5 | 767.5 | 767.5 | 455.9 | 455.9 | 455.9 |
| G2 | - | - | - | 299 | 299 | 299 | 334.7 | 334.7 | 334.7 |
| G3 | - | - | - | - | - | - | 274 | 274 | 274 |
| S1 | 367.5 | 407.5 | 436.15 | 367.5 | 407.5 | 436.15 | 367.5 | 407.5 | 436.15 |
| S2 | 367.5 | 407.5 | 436.15 | 367.5 | 407.5 | 436.15 | 367.5 | 407.5 | 436.15 |

Tableau II.11: Composition des différentes BHP.

➤ **Désignation des bétons utilisés**

BHP8 : Béton à haute performance à base de granulats $D_{\max} = 8\text{mm}$.

BHP16 : Béton à haute performance à base de granulats $D_{\max} = 16\text{mm}$.

BHP25 : Béton à haute performance à base de granulats $D_{\max} = 25\text{mm}$.

II.3.5. 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.

On a préféré alors pratiquer ce que l'on appelle une double introduction, c'est-à-dire que, dans un premier temps, on incorpore immédiatement dans le béton 2 /3 de la quantité de l'eau que l'on peut malaxer convenablement et l'on retarde l'introduction du super-plastifiant et le reste de la quantité de l'eau en un deuxième temps, vers la fin de la période de malaxage. Une telle façon de procéder a pour effet de réduire sensiblement la quantité de super-plastifiant nécessaire pour obtenir un affaissement donné sur le chantier.

Le but de cette opération est d'homogénéiser le béton et lui donner une bonne cohésion, pour cela on commence à malaxer selon les étapes suivantes (Tableau II.12) :

| Temps (minutes) | Opérations |
|------------------------|--|
| 0 | Mouillage de la paroi interne du malaxeur. |
| 1 | Verser les constituants dans la cuve : d'abord les gravillons, puis les sables et les fines. |
| 1.5 | Malaxer à sec pendant 30s. |

| | |
|----------|--|
| 3 | Ajouter l'eau pendant 1 min 30s, le malaxeur en marche |
| 4 | le super-plastifiant est mélangé dans un tiers d'eau après l'introduction des premiers tiers d'eau au cours du malaxage, ensuite on à introduire la quantité d'eau restante. |
| 6 | Malaxer pendant 2 min. |

Tableau II.12 : Séquence de malaxage des bétons.

➤ **Forme des éprouvettes**

Dans les essais réalisés pour l'étude des bétons, un seul type d'éprouvette (Figure II.9) a été utilisé (cubes 15*15*15 cm) :



Figure II.9: Forme d'éprouvettes d'étude.

➤ **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 et bien finie pour chaque gâchée et juste après le malaxage (Figure II.10), on procède à la mesure de la maniabilité, caractérisée par l'affaissement au cône d'Abrams.



Figure II.10: Préparation des moules avant le remplissage.

➤ **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 $24h \pm 1h$. 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 (Figure II.11) dans l'eau potable jusqu'à l'échéance déterminé (48 heures, 7 jours et 28jours) et dans l'eau de mer à la même température jusqu'à le jour de l'essai dans un bac rempli d'eau de mer jusqu'à l'échéance déterminé (28jours) (Tableau II.13)

| Bétons et milieu de conservation | Age (jours) |
|----------------------------------|-------------|
| BHP conservé dans l'eau potable | 2, 7, 28 |
| BHP conservé dans l'eau de mer | 28 |

Tableau II.13: Milieu de conservation des éprouvettes en fonction d'âge d'écrasement (compression).



Figure II.11 : Conservation des éprouvettes.

II.4. Conclusion

Dans ce chapitre, les différentes caractéristiques physiques, chimiques et mécaniques des composants ont été établies. 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.

Après l'étude des caractéristiques physico-mécanique des différents matériaux qui rentrent dans la composition des bétons à haute performance, nous pouvons étudier notre formulation du BHP. La méthode de formulation choisie est une combinaison de deux approches de formulation.

Chapitre III

Résultats et discussions

III.1. Introduction

Dans ce chapitre on présente les différents résultats des essais expérimentaux effectués sur le béton frais et durcis suivie par des discussions et des interprétations.

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) cm³.
- ✓ 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 (eau douce et eau de mer)
- ✓ Les essais étant exécuté à : 1j. 2j. 7 j, et 28 jours.
- ✓ Les propriétés étudiées : l'affaissement, et la résistance à la compression.

III.3. Procédures de la détermination des propriétés du béton à l'état frais :

III.3.1. L'ouvrabilité

Pour chaque gâchée et juste après le malaxage, on caractérise ensuite l'ouvrabilité du béton fraîchement réalisé. En effet, c'est cette ouvrabilité qui conditionne la facilité du béton à être mis en œuvre sur chantier. Elle englobe sa pompabilité, sa fluidité, sa résistance à la ségrégation et résistance au ressuage. On mesure donc la consistance du béton à l'aide d'un essai de chantier simple (affaissement au cône d'Abrams) (Figure III.1). On a effectué deux mesures d'affaissement, le premier juste après le malaxage et le deuxième après une demi-heure, dont les résultats sont consignés dans le Tableau III.1, ci-après :

| Dénomination | BHP8 | | | BHP16 | | | BHP25 | | |
|----------------------|------|------|------|-------|------|------|-------|------|------|
| | E/C | | | E/C | | | E/C | | |
| | 0.25 | 0.30 | 0.35 | 0.25 | 0.30 | 0.35 | 0.25 | 0.30 | 0.35 |
| Affaissement (10min) | 23 | 23 | 21 | 23 | 24 | 22 | 23 | 22 | 20 |
| Affaissement (30min) | 19 | 21 | 20 | 19 | 22 | 20 | 17 | 20 | 20 |

Tableau III.1: L'affaissement des différents bétons étudiés.



Figure III.1 : Résultats d'essai d'affaissement.

➤ **Commentaire**

Selon les résultats obtenus on peut constater que :

- Les superplastifiants 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. On a utilisé le superplastifiant Sika Tempo12, notre béton a eu une ségrégation donc on a changé le superplastifiant Sika Tempo12 par le superplastifiant Medaflow30 (Granitex), celui-la est compatible avec le ciment CPJ-CEM/II-A 42.5N.
- L'ensemble des mélanges BHP présentent des bétons fluides avec des valeurs d'affaissement aux alentours de 170 mm à 240 mm.
- Diminution d'affaissement après 30 minutes du malaxage, ce qui est tout à fait logique, on a fait un contrôle d'ouvrabilité du béton prêt à l'emploi, la durée de 30 minutes correspond à la durée de transport par les malaxeurs jusqu'à la mise en place du béton.
- Les BHP à un rapport E/C diminue sont légèrement maniable aux premiers mesures d'affaissement par contre on voit la diminution d'ouvrabilité après 30 min du malaxage à cause du fort dosage en superplastifiant et une faible quantité de l'eau de gâchage. Plus le rapport E/C est réduit plus le béton est visqueux et nécessite la vibration.

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

Les éprouvettes confectionnées, après démoulage elles sont conservées dans les différents milieux de cure (eau de robinet, eau de mer). Notons que la température du milieu

environnement extérieur était stabilisé à 20 °C, les essais mécaniques sont effectués aux échéances 1, 2, 7 et 28 jours.

III.4.1. Résistance à la compression

La résistance mécanique en compression est le repère principal pour toute caractérisation de la résistance mécanique et de la qualité des bétons. Ce paragraphe présente une description détaillée de la procédure de détermination de la résistance mécanique en compression.

Les éprouvettes utilisées sont de forme cubique de dimensions (150*150*150) mm³. Pour chaque type de béton et à chaque échéance d'essai, la résistance en compression obtenue est la moyenne issue de trois éprouvettes.

Le test de compression a été réalisé à l'aide d'une presse mécanique de capacité maximale de 2000 kN asservie en force avec une vitesse de chargement de 2.4 kN/Sec (Figure III.2).

La charge de rupture correspond à la charge maximale enregistrée au cours de l'essai. La résistance à la compression à « j » jours, f_{cj} est le rapport entre la charge de rupture et la section transversale de l'éprouvette (voir l'équation).

$$f_{cj} = P/S \text{ (MPa)} \quad (3.1)$$

Où :

P : charge de rupture en N.

S : section transversale de l'éprouvette en mm².



Figure III.2: Essai de résistance à la compression (laboratoire de RIZZANI DE ECCHER).

Pour voir l'influence du paramètre E/C et de la variation de la classe granulaire sur les différents mélanges du béton étudiés à l'état durci, les résultats des séries d'essais sur ces compositions sont donnés dans le Tableau III.2 ci-après :

| Jours | Résistance à la compression (MPa) | | | | | | | | |
|--|-----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | BHP8 | | | BHP16 | | | BHP25 | | |
| | E/C | | | E/C | | | E/C | | |
| | 0.25 | 0.30 | 0.35 | 0.25 | 0.30 | 0.35 | 0.25 | 0.30 | 0.35 |
| Conservation dans l'eau potable | | | | | | | | | |
| 1 | 26.53 | 25.78 | 23.53 | 27.02 | 26.88 | 24.07 | 30.03 | 28.68 | 27.18 |
| 2 | 48.90 | 44.06 | 39.60 | 51.08 | 47.64 | 43.25 | 55.24 | 50.33 | 45.16 |
| 7 | 62.80 | 60.74 | 58.39 | 66.25 | 62.66 | 60.22 | 68.72 | 66.06 | 62.35 |
| 28 | 74.83 | 73.85 | 70.35 | 78.82 | 74.94 | 72.32 | 82.93 | 79.60 | 75.77 |
| Conservation dans l'eau de mer | | | | | | | | | |
| 28 | 74.14 | 71.07 | 68.88 | 78.30 | 74.66 | 71.84 | 80.26 | 79.02 | 71.40 |

Tableau III.2 : Résistance à la compression des différents BHP dans différents milieux.

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

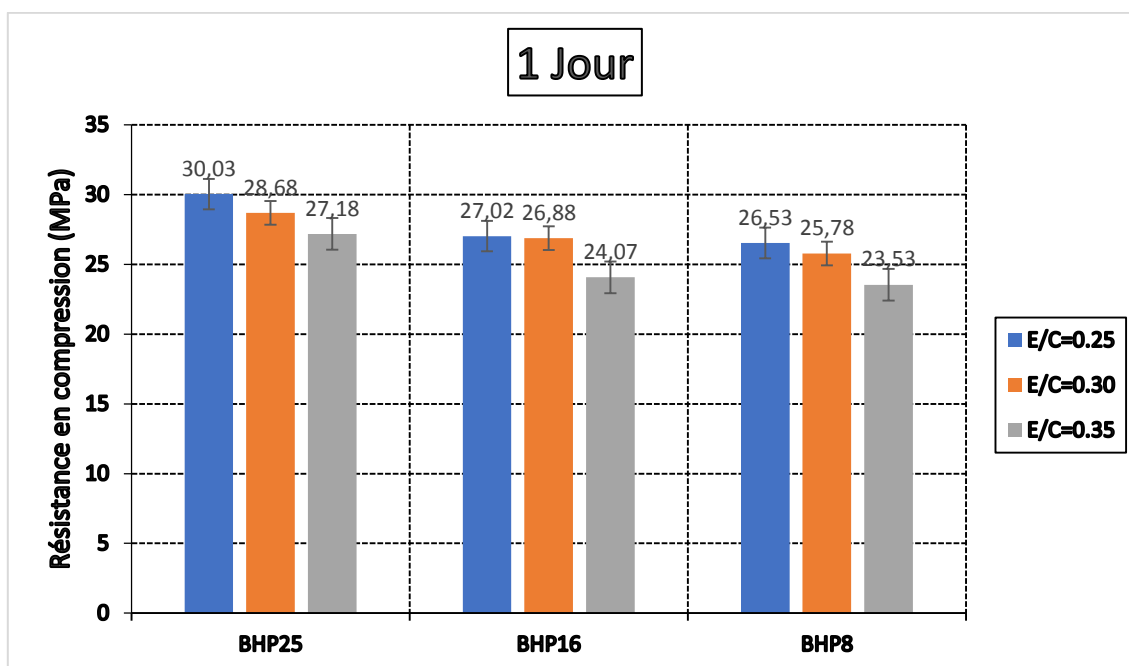


Figure III.3 : Résistance en compression des BHP avec différents rapports E/C après 24heures.

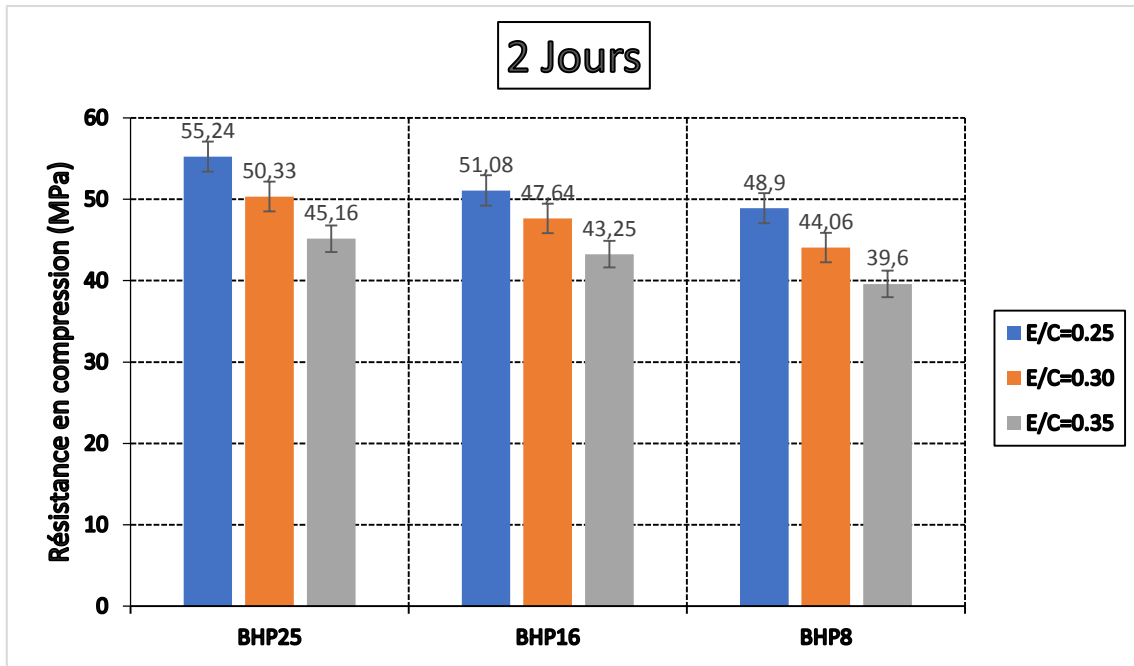


Figure III.4 : Résistance en compression des BHP avec différents rapports E/C après 48 heures.

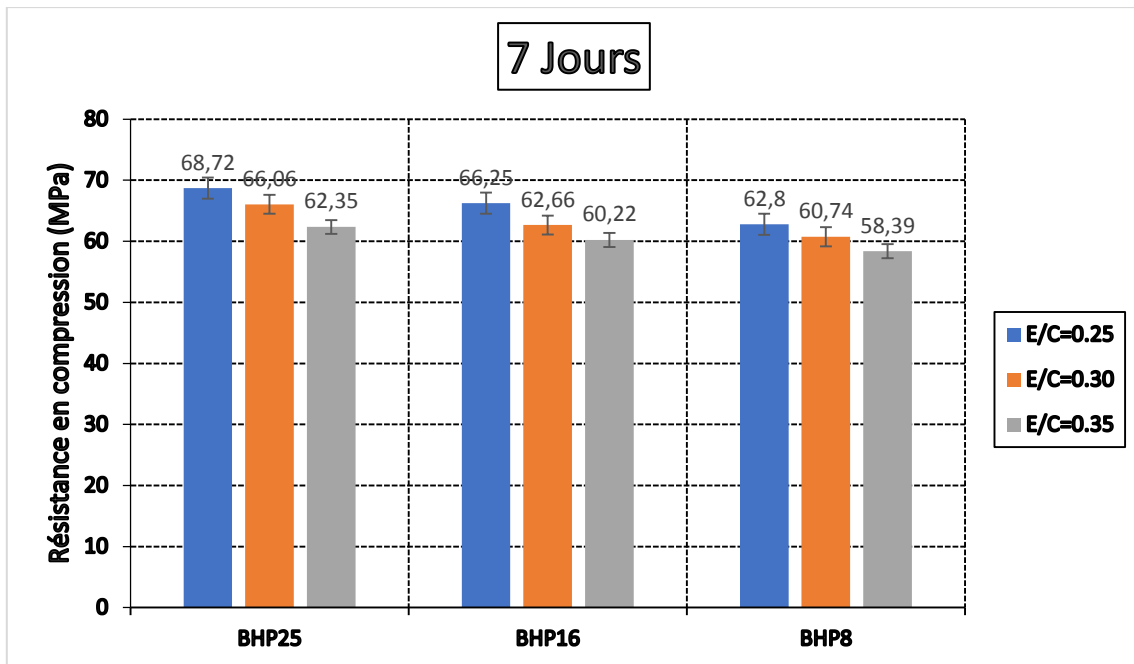


Figure III.5 : Résistance en compression des BHP avec différents rapports E/C après 7 jours.

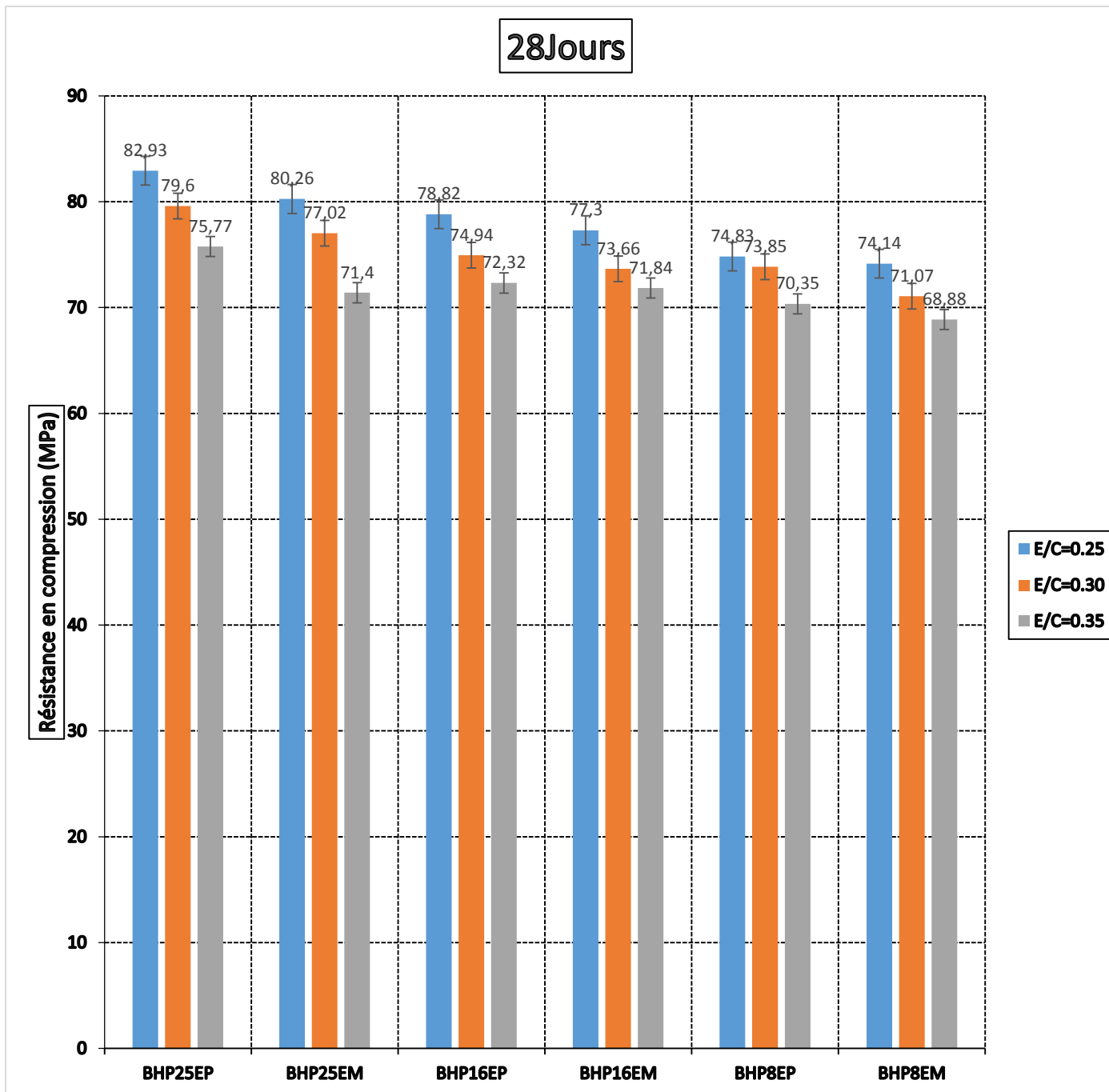


Figure III.6: Influence du milieu de conservation sur la résistance des BHP avec différents rapports E/C après 28 jours.

Avec :

BHP (EP) : béton à haute performance conservé dans l'eau potable.

BHP (EM) : béton à haute performance conservé dans l'eau de mer.

III.4.2. Résultats et discussions

A partir des histogrammes représentés dans les figures précédents on remarque une augmentation sensible de la résistance mécanique des bétons étudiés.

L'utilisation de superplastifiant (réducteurs d'eau) permet la réduction du rapport E/C en s'opposant à la floculation des grains de ciment, donc nos bétons présentent un squelette granulaire conventionnel noyé dans une matrice de compacité accrue. Le rapport E/C réduit ce qui signifie que la quantité d'eau est très faible par rapport à la masse de ciment, les grains de ciment sont très près les uns des autres. Toute l'eau pourra réagir avec le ciment et il ne restera que très peu de porosité capillaire, la perméabilité du béton sera très faible et les propriétés mécaniques du béton seront très élevées.

La cinétique de montée en résistance notée est rapide ceci résulte du dosage en ciment élevé (finesse de mouture et la teneur en aluminates) la teneur en retardateur de prise, ainsi que, bien sûr, de la température du béton.

On voit clairement qu'on a atteint les résistances visées par la méthode de formulation de l'université de Sherbrooke, par exemple :

Pour **E/C = 0.25** on obtient 100 MPa à 28 jours, pour notre cas on a trouvé :

- 82.93 MPa pour le **BHP25** avec un rapport **E/C = 0.25**.
- 78.82 MPa pour le **BHP16** avec un rapport **E/C = 0.25**.
- 74.83 MPa pour le **BHP8** avec un rapport **E/C = 0.25**.

Ceci est surprenant puisque les travaux de Pierre Claude Aïtcin. [2001] [1] ont montré que la résistance mécanique du béton augmentait lorsque les particules des granulats sont petites, plus elles sont résistantes, par suite de concassage qui élimine les défauts internes des granulats, tels que les gros pores, les microfissures et les inclusions des minéraux. L'expérience montre aussi qu'il est très difficile de produire des BHP de classe II en utilisant des gros granulats supérieurs à 25 mm. Dans le cas de la plupart des granulats naturels, il semble qu'une taille maximale de 10 à 12 mm est probablement optimale pour fabriquer des BHP, ce qui ne signifie pas qu'un granulats de 25 mm ne puisse être utilisé sans affecter négativement la maniabilité et la résistance du béton, alors cela revient à nous de faire des essais d'affaissement et de compression sur des bétons à base de plusieurs fractions de granulats et d'avoir de nouveaux résultats.

Sur la base des résultats obtenus, et sous l'effet du rapport E/C et la variation de la classe granulaire choisis pour la formulation des BHP à l'état durci, on peut constater :

- Le rapport E/C qui gouverne la résistance du béton en compression simple n'est plus le seul paramètre qui influence la résistance des bétons à hautes performances.
- La hausse de résistance est engendrée par la baisse du rapport E/C pour tous les différents bétons étudiés.
- L'augmentation de la taille maximale des granulats a une influence importante sur la résistance mécanique du béton, les trois fractions D_{\max} (8, 16, 25) mm.

- Les BHP présentent des résistances en compression importantes aux jeunes âges, ils atteignent 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.
- Les résistances de tous les bétons augmentent régulièrement avec l'âge de conservation de toutes les éprouvettes, cela peut être attribué au temps nécessaire à l'hydratation du ciment et son durcissement.
- Sur la base des résultats des essais effectués nous pouvons conclure clairement que la composition du béton **BHP25** avec un rapport $E/C = 0.25$ a la plus grande résistance mécanique de 80 MPa pour les différents milieux de conservation.
- La chute de résistance des bétons conservés dans l'eau de mer par rapport aux bétons conservés dans l'eau potable était prévisible, dans notre cas la chute maximale est celle du béton **BHP25EM** avec un rapport $E/C = 0.35$, la résistance du béton a chuté de 5.76 % par rapport à celle du béton conservé dans l'eau potable.
- Un béton avec un rapport E/C diminue résiste mieux dans l'eau de mer, sa chute de résistance est minime, 3.21 %, 1.92%, et 0.92% pour les bétons **BHP25**, **BHP16**, et **BHP8** consécutifs. Et d'après cette constatation le **BHP8** marque la plus faible chute de résistance par rapport aux autres bétons étudiés, ce qui traduit par la faible perméabilité du béton.
- 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 supérieures à 50 MPa quel que soit le milieu de conservation. Encore plus, les résistances augmentent avec l'âge.

A partir de la Figure III.6 qui rassemblent les résultats des résistances mécaniques des bétons testés dans les deux milieux (eau potable et eau de mer), pour l'échéance 28 jours, le **BHPEP** (béton à haute performance dans l'eau potable) s'affiche plus résistant que celui dans l'eau de mer, cela peut être expliqué par la substitution du poids ciment dans l'eau de mer, ce qui influe sur l'hydratation du ciment ainsi sur le taux des produits de cette hydratation (C-S-H) éléments responsables des résistances de la matrice cimentaire.

La différence des résistances des bétons conservés dans l'eau de potable et celles des bétons conservés dans l'eau de mer est faible et parfois même négligeable. Donc, il n'y a pas eu de réactions chimiques qui entraînent des chutes de résistances appréciables, on peut dire que la durée de conservation n'a pas eu d'effet sur la résistance (28 jours). L'effet du milieu agressif peut apparaître à long terme.

III.5. Conclusion

Le présent chapitre était consacré à la discussion des résultats obtenus par la formulation et la caractérisation des BHP. A la lumière des résultats obtenus au cours de cette étude plusieurs enseignements peuvent être tirés :

- Les BHP sont des bétons fluides avec une E/C très bas. Les valeurs d'affaissement au cône sont supérieures à 15 cm dans la plupart des cas.

Un BHP livré en chantier se doit donc de conserver une maniabilité adéquate pendant peu près 1 h 30 tandis que, dans les usines de préfabrication où la mise en place est plus rapide, il est suffisant en général qu'il conserve une bonne maniabilité pendant environ 30 minutes.

- Les gains de résistance se manifestent dès le jeune âge ; un béton à 80MPa à 28 jours peut dépasser 25 MPa à 24 heures et 50 MPa à 48 heures.

Les clefs de ces performances sont:

- ✓ La réduction de la quantité d'eau opérée par l'ajout de superplastifiants, alors que, du point de vue de la résistance, il est essentiel d'utiliser le rapport E/C le plus faible possible.
- ✓ l'optimisation de la répartition granulométrique des composants.
- L'effet du rapport E/C et la variation du diamètre maximal des granulats (D_{max}) dans les formulations des bétons étudiés sur la résistance à la compression est remarquable.
- La durée de conservation n'a pas eu d'effet sur la résistance à la compression, les valeurs de la résistance restent proches les unes aux autres, l'effet du milieu agressif peut apparaître à long terme selon la concentration du milieu.

Conclusion générale

La problématique traitée dans ce travail de mémoire concerne l'influence des facteurs tels que le rapport E/C et d'estimer leur influence sur les propriétés mécaniques des BHP, l'influence de la variation du diamètre maximal des granulats (D_{max}) sur la formulation concerné dans cette étude du béton BHP, ainsi le milieu de conservation (eau potable et eau de mer). Les propriétés testées pour notre béton d'étude sont : l'affaissement, et la résistance à la compression.

Nous tenons à rappeler que l'objectif principal du présent travail est l'étude de la formulation des bétons à hautes performances et les facteurs influençant sur le comportement mécanique des différents mélanges confectionnés.

Ainsi, les résultats expérimentaux nous ont permis de tirer les conclusions suivantes :

- On constate que le béton **BHP16** avec un rapport **E/C = 0.30** donne la meilleure valeur d'affaissement (24mm).
- Le mélange du béton **BHP25** avec un rapport **E/C = 0.25** (540 kg/m³ de ciment, 146 kg/m³ de l'eau et 18 kg/m³ en superplastifiant) donne la meilleure résistance à la compression de 82.93 MPa à 28 jours.
- La valeur minimale de résistance en compression est celle du béton **BHP8** avec un rapport **E/C = 0.35**, à différentes âges 1, 2, 7, et 28 jours par rapport aux d'autres bétons étudiés.
- On conclue que les mélanges **BHP25**, **BHP16** et **BHP8** avec des rapports **E/C** 0.35, 0.30 et 0.25 consécutifs donnent des résistances en compressions presque égaux et cela pour les échéances 1, 2, 7, et 28 jours.
- On remarque une chute de résistance des bétons conservés dans l'eau de mer à 28 jours, de l'ordre 3 à 6% pour les **BHP25EM**, 2 à 4% pour les **BHP16EM**, et 1 à 2% pour les **BHP8EM**.
- Les bétons **BHP8** marque la plus faible chute résistance par rapport aux autres bétons étudiés, Elle est pratiquement nulle (1 à 2 %).

De nombreux progrès dans la compréhension des propriétés des BHP, et plus généralement dans celles du béton, ont suivi les progrès réalisés grâce à une meilleure connaissance de la microstructure des bétons. Le programme expérimental réalisé dans le cadre de cette étude a permis de comprendre et d'apporter des éléments de réponse aux questions posées qui ont constitués les objectifs du présent travail. Plusieurs renseignements ont été tirés :

- ✓ L'ensemble des mélanges des BHP présentent des bétons très fluides avec des valeurs d'affaissements aux alentours de 170 à 240 mm.

- ✓ Lors de la sélection des granulats il est nécessaire de bien connaître leurs propriétés intrinsèques, Ces propriétés influencent les performances du béton.
- ✓ L'augmentation de la résistance est engendré par la diminution du rapport E/C et l'augmentation de la taille maximale des granulats pour tous différents bétons étudiés.
- ✓ D'une manière générale, on remarque une légère diminution dans la résistance à la compression des éprouvettes conservées dans l'eau de mer, on peut dire que la durée de conservation n'a pas eu d'effet sur la résistance (28 jours). L'effet du milieu agressif peut apparaître à long terme.

Concernant nos perspectives dans le domaine :

Nous proposons que la présente étude peut être complétée dans des travaux futurs par :

- ✓ L'utilisation d'autres types d'agrégats et d'autres superplastifiants pour la confection des BHP.
- ✓ Étude de la durabilité de ces bétons à haute performance.
- ✓ Enrichissement de l'étude corrélative par une évaluation d'autres types de béton (BAP, Béton fibrés,...).
- ✓ Utiliser plusieurs méthodes de formulation de bétons à hautes performance et de faire une étude comparative.

Liste des références

- [1] P.C Aitcin, Béton à haute performance, Édition Eyrolles ISBN 2-212- 01323-X, Paris, France, 660p, janvier 2001.
- [2] Alaejos Gutierrez P. et Fernandez Canovas M., "The modulus of elasticity of high performance concrete ", Materials and structures, vol. 28, n° 184, p. 559-568, 1995.
- [3] Les bétons à haute performance, Chapitre IV, 4p. Disponible sur: <http://www.la.refer.org/materiaux/chapitre-six-un.html>.
- [4] 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.
- [5] X. Brunetaud et L. Jausserand "Travaux pratiques ; Ciment et bétons," Ecole Polytechnique de l'Université d'Orléans, 2005.
- [6] L. Houst, R. Flatt J.P. Bowen et al. "New superplasticizers : from research to application," In : Proceedings of International Conference on modern concrete materials : Binders, Additions and admixtures, Edited by K. Ravindra, Dhir and Tomas D. Dyer, Dundee, Scotland, UK, pp. 446-456, 1999.
- [7] 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.
- [8] F. De Larrard, et P. Tondat, "Sur la contribution de la topologie du squelette granulaire à la résistance en compression du béton," Materials and structures, vol. 26, pp. 505-516, 1993.
- [9] A. Noumowe Nchambou, "Effet des hautes températures (200-600) sur les bétons : cas des bétons à hautes performances," Thèse Doct. Ing : INSA-Lyon, France, p.232, Juin 1995.
- [10] F. De Larrard, "Formulation et propriétés des bétons à très hautes performances," Rapport de recherche LCPC, Paris, France, p. 335, 1988.
- [11] F. Dutruel, "Les BHP et les BTHP, de quoi s'agit-il ?," Journée nationale d'échange d'informations sur les bétons à très hautes performances, organisée par le CERIB, pp. 8, 21 Juin 1995.
- [12] B.J. Addis and M-G. Alexandre, "A method of proportioning trial mixes for high strength concrete," in Second International Symposium on high strength concrete, Detroit, pp .310-321, 1990.

- [13] F. de Larrard, "Formulation et propriété des bétons à très hautes performances," Thèse de doctorat de l'ENPC, France, rapport de LCP n°149, Mai 1988.
- [14] F. de Larrard, P. Acker et Y. Malier, "Very high strength concrete : from the laboratory to the construction site," comptes rendus, Utilization of high strength concrete, édition Tapir. Trondheim, Norvège. ISBN 82-519-0797-7, 1987.
- [15] M. Amor, "Contribution à l'étude rhéologique d'un béton à hautes performances (BHP) local," Université 20 aout55 Skikda, Algérie, mémoire magister, 2010.
- [16] Djaffal Nardjes, "Bétons de Fibres Métalliques," Thèse Doct. Université de Skikda, Skikda, Algérie, ,90p, Juin 2012.
- [17] R.J. Flatt, N.S. Martys, L. Bergstrom. "La rhéologie des matériaux cimentaires," Revue Ciments, Bétons, Plâtres, Chaux, No 867, pp. 48-55, Juin- Juillet 2004.
- [18] J.P. Jacobs et al. "Le béton à haute performance," Bulletin FEBELCEM, 2007.
- [19] N Hinrichs, I. Older, "Investigation of the hydration of Portland blast furnace slag cement : hydration kinetics ," Advances in Cement Research, VOL. 25, pp 9-13, 1989.
- [20] I. Hager, " Comportement à haute température des bétons à haute performance : évolution des principales propriétés mécaniques," Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées et Ecole Polytechniques de Cracovie, 2004.
- [21] C.Y Huang, R.F Feldman, " Hydration reactions in Portland cement-silica fume blends," Cem Concr Res, 15, pp. 585, 1985.
- [22] H. V.Terrisse, " Interaction des Silicates de Calcium Hydratés, principaux constituants du ciment, avec les chlorures d'alcalins. Analogie avec les argiles," Thèse de doctorat, Université de Bourgogne, France, 2000.
- [23] I. Klur, " Etude par RMN de la structure des silicates de calcium hydratés," Thèse de doctorat, Université de Paris, France, 1996.
- [24] T. D., Nguyen " Etude de la zone d'interphase granulats calcaires poreux –pâte de ciment," Thèse de doctorat, l'Ecole National Supérieure des Mines de Saint-Etienne, France, 2013.
- [25] J.C Maso, "La liaison pâte-granulats," in le béton hydraulique, Presse de l'ENPC, Paris, 1982.
- [26] C. De Sa, "Etude Hydro-mécanique et thermo-mécanique du béton : influence des gradients et des incompatibilités de déformation," Thèse de doctorat, ENS de Cachan, 2007.

- [27] P.C Aitcin, “ The durability characteristics of high performance concrete,” a review, *Cement and Concrete Composites*, 25, pp. 409-420, 2003.
- [28] E.Vejmelkov, “ High performance concrete containing lower slag amount : A complex,” *Construction and Building Materials*, pp 2237-2245, 2009.
- [29] M.Auperin, F. Richard et al. “ Retrait et fluage des bétons à hautes performances,” *Annales. I.T.B.T.P*, n° 474, mai 1989.
- [30] Les bétons à haute performance, Chapitre V, 4p. Disponible sur: <http://www.la.refer.org/materiaux/chapitre-six-un.html>.
- [31] F. De Larrard et Y. Malier, “Propriétés constructives des bétons à très hautes performances : de la microstructure à la macrostructure,” les bétons à très hautes performances : caractérisation, durabilité, application, 2e édition par Y. Malier, presse de l’ENPC, Paris, France, pp. 129-156, 1992.
- [32] Pedeches J-M., “ Béton à hautes et très hautes performances” : propriétés mécaniques et retrait. Aide à la formulation,” *Annales I.T.B.T.P*, n° 525, série bétons 311, pp. 1-41, 1994.
- [33] BAEL, “ Règles techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions en béton armé suivant les états limites,” *Bulletin officiel*, fascicule n° 62, Titre 1, section I du CCTG ,1991.
- [34] BPEL, “ Règles techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions en béton précontraint suivant les états limites,” *Bulletin officiel*, fascicule n° 62, Titre 1, section II du CCTG, 1991.
- [35] S.H Ahmad, “Short term mechanical properties. high performance concrete and application,” By S.P. Shah and S.H. Ahmad, Melbourne, Auckland: Edward Arnold London, pp. 27-64, 1994.
- [36] P.Coussot, C. Ancey. “Rheophysics of pastes and suspensions,” EDP Sciences, Paris, France, 300p, 1999.

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

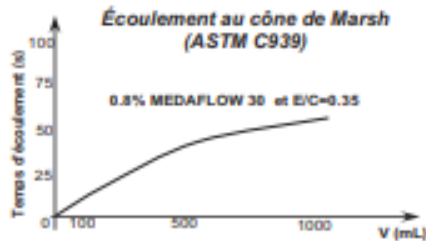
- Bétons à hautes performances
- Bétons auto - plaçant
- Bétons pompés
- Bétons précontraints
- Bétons architecturaux.

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



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.



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



58

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

MEDAFLOW 30

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

Délai de conservation :

Une année dans son emballage d'origine, à l'abri du gel et de la chaleur ($5^{\circ}\text{C} < t < 35^{\circ}\text{C}$).

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

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