

*REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE*  
*MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA*  
*RECHERCHE SCIENTIFIQUE*  
*UNIVERSITE DE JIJEL*



*FACULTE DES SCIENCES ET DE LA*  
*TECHNOLOGIE*  
*Département de Génie Civil et Hydraulique*



## *Mémoire*

*En vue de l'obtention du diplôme*  
*Master académique en Travaux Public*

*Option : Voies Et Ouvrages D'art*

## *Thème*

**La contribution des déchets de marbre à la  
confection des BHP**

*Encadré par :*

*Melle S. Ben Messaoud.*

*Présenté et soutenu par :*

*Mebirouk bessam.*

*Devant le jury composé de :*

*Mr T. CHIKER*  
*Mme F. SAIDAT*

*Université de Jijel*  
*Université de Jijel*

*Promotion : 2021*

بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِیْمِ

وَمَا أُوتِیْتُمْ مِنَ الْعِلْمِ إِلَّا قَلِیْلًا (85)

سورة الإسراء

وَقُلْ رَبِّ زِدْنِي عِلْمًا (114)

سورة طه

# Remerciements

*Avant tout choses remercions mon DIEU et DIEU de toutes les espèces d'avoir créé cette forme de vie, le tout puissant, le miséricordieux, de nous avoir donné la santé et le courage et tout dont ma nécessitons pour L'accomplissement de ce modeste travail.*

*Je tenais à formuler nos gratitudees et nos profondes reconnaissances à l'égard de mon encadreur « M. BENMASSAOUD SONIA »*

*Qui a supervisé ce travail de recherche, Pour l'effort fourni, les conseils prodigués, sa disponibilité, son soutien, son efficacité et sa patience et surtout ses encouragements le long de la réalisation de ce travail.*

*Je tiens aussi à remercier tous les enseignants du département de Génie Civil et Hydraulique pour leurs offerts considérables, qui nous ont donné les bases de la science.*

*Je remercies également aux membres de jury de nous avoir fait l'honneur de bien vouloir participer au jury de ce mémoire et pour toute attention qu'ils ont prêté au jugement de ce mémoire.*

*Enfin, je saurai terminer ce remerciement, sans mentionner toute personne ayant participée de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.*

# *Dédicace*

*Je dédie ce travail en signe  
De Respect et de reconnaissance  
Aux être les plus chers.*

*A*

*Ma mère et la mémoire de mon père*

*Pour leurs sacrifie ces durant*

*Toute leur vie pour me guider au sucées*

*Mes chers sœurs et frères*

*Toute ma famille « MEBIROUK »*

*Toutes mes chères amies*

*A tous mes enseignants depuis le primaire jusqu'à*

*Maintenant,*

*Tous ceux que j'aime et ceux qui m'aiment*

*BMBI  
BESSAM*

## RÉSUMÉ

---

La mise en décharge des déchets présente de nombreux problèmes (lieu de stockage, coûts élevés, impact nocif sur l'environnement), la réalisation des constructions n'est pas uniquement un problème à la fin des cycles de vie de ces produits mais aussi au début. Donc il est nécessaire de trouver un moyen de récupérer et de réutiliser ces déchets.

Il est nécessaire de trouver une voie pour la récupération et la réutilisation de ces déchets, donc cette étude a pour objet de valoriser et d'utiliser les matériaux industriels locaux en Algérie.

Ce travail est une contribution d'utiliser ce genre de déchet (les déchets de marbre) à différentes proportions dans la confection d'un béton à haute performance.

L'objectif principal de cette étude est de démontrer la faisabilité technique de l'utilisation des déchets de marbre sous forme d'additifs minéraux par l'ajout d'un superplastifiant, analysé les propriétés mécaniques et physiques pour la préparation d'une nouvelle formulation, confirmé par une série des essais au laboratoire basant sur les caractéristiques mécaniques (la résistance), et la fluidité du béton à confectionner.

### **Mots clés :**

Béton à haut performance - déchets - Valorisation - marbre - formulation.



## **Abstract**

---

The landfill of waste presents many problems (storage location, high costs, harmful impact on the environment), the realization of constructions is not only a problem at the end of the life cycles of these products but also at the beginning. So, there is a need to find a way to recover and reuse this waste.

It is necessary to find a way for the recovery and reuse of this waste, so this study aims to enhance and use local industrial materials in Algeria. This work is a contribution to using this kind of waste (marble waste) in different proportions in the manufacture of high-performance concrete.

The main objective of this study is to demonstrate the technical feasibility of using marble waste in the form of mineral additives by adding a superplasticizer, analyzed the mechanical and physical properties for the preparation of a new formulation , confirmed by a series of laboratory tests based on the mechanical characteristics (resistance), and the fluidity of the concrete to be made.

### **Key words:**

High performance concrete - waste - Recovery - marble - formulation.

يطرح مكب النفايات العديد من المشاكل (موقع التخزين ، التكاليف المرتفعة ، التأثير الضار على البيئة) ، وصناعة البناء والتشييد لا تشكل فقط مشكلة عند نهاية دورة حياة هذه المنتجات ولكن أيضًا في البداية. لذلك من الضروري إيجاد طريقة لاستعادة وإعادة استخدام هذه النفايات.

من الضروري إيجاد طريقة لاستعادة وإعادة استخدام هذه النفايات، لذا تهدف هذه الدراسة إلى تعزيز واستخدام المواد الصناعية المحلية في الجزائر.

يساهم هذا العمل في تنمية استخدام هذا النوع من النفايات (نفايات الرخام) بنسب مختلفة في صناعة الخرسانة عالية الأداء.

الهدف الرئيسي من هذه الدراسة هو إثبات الجدوى الفنية لاستخدام نفايات الرخام في شكل إضافات معدنية عن طريق إضافة مادة فائقة اللدونة، وتحليل الخواص الميكانيكية والفيزيائية لتحضير تركيبة جديدة مؤكدة بسلسلة من الاختبارات المخبرية على أساس الخصائص الميكانيكية (المقاومة) وسيولة الخرسانة المراد تصنيعها.

الكلمات الدالة :

خرسانة عالية الأداء - نفايات - استرجاع - رخام - تركيبات.

# SOMMAIRE

Remerciements .....	I
Dédicace .....	I
Résumé .....	IV
Abstract.....	v
ملخص .....	VI
Sommaire.....	Vii
List des figures ET list des tableaux .....	xi
INTRODUCTION GENERAL .....	1

## Chapitre I : Etude bibliographique

I.1. Introduction .....	4
I.2.Historique sur les bétons à haute performance.....	5
I.3. Modes et formulation des bétons à haute performance.....	6
I.3.1. Définition d'un béton à haute performance.....	6
I.3.2. Les caractéristiques des bétons à haute performance.....	7
caractéristique physique .....	8
Ouvrabilité.....	8
Porosité.....	8
Perméabilité.....	10
Le retrait .....	11
Le fluage.....	12
Fragilité et la ductilité.....	12
Résistance aux agents agressifs .....	13
Migration des ions chlorure.....	13



Tenue aux attaques gel/dégel.....	13
Carbonatation .....	13
Adhérence acier-béton.....	13
Réduction des flèches et des déformations des structures.....	14
Propriétés thermiques .....	14
Des propriétés exceptionnelles à l'état frais.....	14
Des performances élevées aux jeunes âges .....	14
Caractéristiques mécaniques .....	14
Résistance en traction .....	16
La résistance à la traction par flexion.....	17
I.4.1. Les ouvrages d'art :.....	18
I.4 .2. Le pont de l'île de Ré (Charente-Maritime, France 1988).....	19
I.4 .3.Le pont de Normandie (Le Havre, France.2007) :.....	19
I.4 .4. Le bâtiment : La Pacific Tower (France) :.....	20
I.4 .5.La Grande Mosquée Hassan II (Casablanca, Maroc. 1986) :.....	21
I.5.Les avantages des bétons à haute performance .....	22
I.6. Formulation des BHP .....	23
I.6.1. Les étapes de la formulation.....	23
I.6.2. Méthode de Formulation .....	24
I.6.3. Formulation des bétons .....	25
I.6.4. Détermination du dosage en granulat.....	25
I.6.5. Sélection des granulats .....	25
Granulat fin.....	25
Gros granulat concassé ou gravier.....	26
I.6.6.Optimisation du dosage en super plastifiant et du rapport E/C.....	27
I.6.7. Optimisation du dosage en ciment .....	27
I.7. L'optimisation de la formulation d'un BHP .....	29
Défloculation des grains de ciments et réduction de la teneur en eau .....	29

L'évolution des bétons à haute performance : .....	29
I.8. Les adjuvants .....	31
Les adjuvants qui modifient l'ouvrabilité du béton : .....	32
Les adjuvants qui modifient la prise et le durcissement : .....	33
Les adjuvants qui modifient certaines propriétés du béton : .....	33
Les plastifiants ou réducteurs d'eau : .....	33
I.8.1. Le super plastifiant .....	34
Les avantages du super plastifiants .....	38
Les différents types de super plastifiant .....	38
I.9. les déchets .....	39
I.9.1. Définition du déchet .....	39
I.9.2. Définition réglementaire .....	39
I.9.3. Calcification des déchets .....	40
I.9.4. Différents types des déchets .....	40
Déchets ménagers et assimilés .....	40
Déchets encombrants .....	41
Déchets spéciaux .....	41
Déchets spéciaux dangereux .....	41
Déchets inertes .....	41
Marbre .....	42
I.9.5. Gestion des déchets .....	43
Définition .....	43
Déchet de Marbre .....	44
Marbre .....	45
La poudre de marbre (PM) .....	45
Propriétés des bétons des déchets de Marbre .....	46
Utilisations des bétons de déchets de Marbre .....	46
Avantage d'utilisation les déchets de marbre .....	47

I.10. Conclusion.....	47
-----------------------	----

***Chapitre II : Les caractéristiques des matériaux et formulation des BHP***

II.1. Introduction.....	50
II.2. Le choix et sélection des constituants du BHP :.....	50
II.3. Les caractéristiques de matières premières utilisées:.....	50
Ciment.....	50
II.4. Granulats.....	51
Gravier.....	51
Sable :.....	53
II. 5.caractéristiques physiques et mécaniques des matériaux utilisés :.....	56
II.6.Super plastifiant.....	56
Mode D'emploi.....	57
Dosage.....	57
L'eau de gâchage :.....	57
II. 7. La méthode de formulation de l'université de Sherbrooke.....	57
Rapport eau/liant :.....	58
Dosage en eau:.....	59
Dosage en super plastifiant:.....	59
Dosage en gros granulat:.....	59
Teneur en air:.....	60
Les formules du calcul :.....	60
II.8. Formulation du béton.....	63
II.8. Essai de ramollissement.....	71
II.9. Essai d'absorption d'eau.....	72
II.10. Conclusion.....	73

## Chapitre 3 : Résultats et discussions

Résultats et discussions .....	74
III.1. Introduction .....	75
III.2. Méthodologie adaptée pour les manipulations .....	75
III.3.1. Essai au cône d'Abrams (mesure d'ouvrabilité) .....	75
III.3.1.1. Définition .....	75
III.3.1.2. Principe de l'essai .....	75
III.3.1.3. Commentaire .....	76
III.4. Essai réalisé à l'état durci .....	77
III.4.1. Essai de compression (NF P 18-406) .....	77
III.4.2. Préparation et positionnement des éprouvettes .....	78
III.5. Résultats de l'essai : .....	79
III.6. Résultats d'essai de ramollissement .....	81
III.8. Résultats et discussions .....	81
III.9. CONCLUSION .....	84
CONCLUSION GENERALE .....	85

## LISTES DES FIGURES

Figure1/CH1 : exemple de BHP.....	6
Figure 2/ CH1: Un organigramme pour l'obtention d'un BHP [3].....	7
Figure3/CH1 : BHP.....	7
Figure 4/CH1 : Porosité des bétons ordinaires et des BHP [6]. ....	9
Figure 6/CH1: exemple de fluage .....	12
Figure 7/CH1: Diagramme contraintes- déformation [17].....	17
Figure8/CH1 : Béton à haute performance .....	17
Figure9/CH1 : domaine d'utilisation de BHP.....	18
Figure10/CH1 : le pont de Mila .....	19
Figure11/CH1 : Le pont de l'île de Ré (Charente-Maritime, France 1988).....	19
Figure12/CH1 : le pont de Normandie (Le Havre, France.2007) .....	20
Figure I.13: La Pacific Tower. ....	21
Figure I.14 : La Grande Mosquée Hassan II. ....	21
Figure 15/CH1 : exemple de formulation de BHP.....	24
Figure16/CH1 : Influence du dosage en ciment.....	28
Figure17/CH1 : EVOLUTION DES Résistances Mécaniques DU BHP.....	29
Figure 18/CH1 : les grandes classes d'adjuvants .....	32
Figure19/CH1 : Les différents types des adjuvants .....	34
Figure20/CH1 : Super plastifiants.....	34
Figure21/CH1 : caractéristiques du super plastifiant .....	35
Figure 22/CH1 : Les utilisations des super-plastifiants .....	36
Figure 23/CH1: Flocculat de ciment en l'absence de super plastifiant [4].....	37
Figure 24/CH1: Mécanisme de floculation avec et sans super plastifiants [4]. ....	37
Figure 25/CH1: Mécanisme de réduction d'eau avec et sans [4].....	38
Figure 26/CH1: Effet du super plastifiant sur les grains de ciment .....	38
Figure 27/CH1 : Marbre.....	43
Figure28/CH1: La composition des déchets solides en Algérie.....	44
Figure29/CH1 : Hiérarchisation de la gestion des déchets (Source : ADDOU, 2009) .....	45
Figure30/CH1 : Marbre.....	46

Figure31/CH1 : Distribution granulométrique de la poudre de marbre .....	47
Figure1/CH2 : le gravier utilisé.....	51
Figure3 /CH2: Courbe granulométrique des graviers utilisés.....	52
Figure 3/CH2 : Colonne des tamis .....	52
Figure4/CH2 : le sable utilisé.....	53
Figure II.5.: Courbes d'analyse granulométrique des sables utilisées .....	54
Figure 6/CH2 : Super plastifiant (MEDAFLOR30).....	56
Figure7/CH2 : La méthode de formulation de l'université de Sherbrooke.....	58
Figure 8/CH2 : Abaque de détermination du rapport E/L en fonction de la résistance [17]. ....	59
Figure 10/CH2: Dosage en gros granulat [17]. .....	59
Figure 11/CH2: Représentation schématique d'un super plastifiant.....	61
Figure 12/CH2 : Exemple d'une courbe de mélange OAB.....	63
Figure13 /CH2 : Malaxage du béton .....	70
Figure14, 15/CH2 : Préparation des moules avant le remplissage. ....	70
Figure17 ,18 /CH2 : Forme des éprouvettes .....	71
Figure19/CH2 : Conservation des éprouvettes.....	71
Figure20/CH2 : 02 éprouvettes à l'aire à 28 jours .....	72
Figure21 /CH2 : Le four.....	72
Figure1, 2/CH3 : L'essai D'écoulement.....	76
III.4. Essai réalisé à l'état durci.....	77
Figure3, 4/CH3 : l'essai compression .....	78
Figure3/CH3 : Les résultats d'essais de compression.....	79

## LISTES DES TABLEAUX

Tableau 1/CH1 : Les classes du Béton à haute performance (BHP) et (BTHP).....	15
Tableau 2/CH1 : Présente quelques résultats d'essais de compression .....	16
Tableau 3/CH1. Compositions en granulats des bétons étudiés.....	25
Tableau 4/CH1 : Effet de la variation du dosage en super plastifiant.....	28
Tableau 5/CH1: Dosage en adjuvants par rapport au poids du ciment [27].....	31
Tableau 6/CH1 : Composition chimique de la poudre de marbre. ....	45
Tableau 1/CH2: La résistance à la compression du CPA- CEM I. ....	51
Tableau 2/CH2: Analyse granulométrique par tamisage des graviers utilisés. ....	52
Tableau 3/CH2 : Analyse granulométrique par tamisage des sables utilisé .....	54
Tableau 5/CH2: Caractéristiques physiques et mécaniques des granulats utilisés .....	56
Tableau 6/CH2 : Valeurs de K en fonction du dosage en ciment, de la puissance de la .....	64
Tableau 7/CH2 : Pourcentage de chacun des granulats pour des différentes compositions du béton            BHP .....	65
Tableau 8/CH2 : Composition des bétons (BHP) avec E/ C sans ajoutes.....	66
Tableau 9/CH2: Composition des bétons (BHP) avec E/C = 0.25.....	67
Tableau 10/CH2: Composition des bétons (BHP) avec E/C = 0.30.....	68
Tableau 11/CH2: Composition des bétons (BHP) avec E/C = 0.35.....	69
Tableau III.1 : Résultats d'essai d'écoulement des différents bétons étudié.....	76
Tableau III.2 : Résultats d'essai d'écoulement des différents bétons étudié. ....	76
Tableau III. 4. Résultats d'essai d'écoulement des différents bétons étudié. ....	76
Tableau III. 4. Résultats d'essai d'écoulement des différents bétons étudié.....	76



# INTRODUCTION GENERALE

---

## INTRODUCTION GENERALE

Le béton à haute performance est perçu comme un nouveau type de béton dont les propriétés, et les possibilités d'applications ne cessent de se répondre à la fois en volume et en diversité.

L'importance et l'utilisation du béton à hautes performances est très vaste ; elle recouvre tous les aspects qui lui rend différent du béton traditionnel, c.-à-d. des changements relatifs tant aux constituants, à la composition, et à la mise en œuvre qu'aux propriétés, il ait été surtout utilisé dans des applications mettant en valeur leur résistance élevée, il est inévitable que, dans un avenir très proche, le BHP sera de plus en plus utilisé pour sa durabilité plutôt que pour sa résistance.

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

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

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

De ce fait il peut être le réceptacle de différents sous-produits (déchets) qui peuvent être « englutis » en son sein contribuant ainsi à l'action environnementale devenue un enjeu majeur mobilisant la communauté internationale dans son ensemble.

Les déchets qui autrefois ne suscitaient guère d'intérêt ni d'inquiétude, ont commencé à constituer un problème économique et écologique. Les quantités énormes des déchets qui sont générées sans cesse immobilisent de plus en plus de grandes surfaces pour le stockage et réduisent ainsi les disponibilités des terrains sans compter la pollution de l'environnement avec toutes ses conséquences.

La protection de l'environnement est une préoccupation majeure qui se traduit, dans le domaine du génie civil, par la recherche de nouveaux procédés de construction ou de

## INTRODUCTION GENERALE

---

nouveaux produits à faibles impacts environnementaux .Si, par ailleurs, ces éco-produits amélioreraient les propriétés d'usage des bétons actuels ou diminueraient la sinistralité, leur développement devrait requérir plus d'intérêt.

La production des granulats recyclés répond au besoin d'une source de granulats et à la réduction des volumes de déchets. Parmi ces derniers, les déchets de marbre qui peut être broyée et utilisés comme une addition cimentaire pour la fabrication du béton à haute performance.

### **Objectifs :**

Les objectifs de ce travail c'est :

- ✓ L'optimisation de la méthode de la formulation des BHP ;
- ✓ Le rôle des ajouts cimentaires (**les déchets de marbre**) sur les caractéristiques physiques et mécaniques des BHP à l'état frais et durci.
- ✓ La protection de l'environnement.

### **Plan du mémoire :**

Ce travail est une contribution d'utiliser ce genre de déchet (**les déchets de marbre**) à différentes proportions dans la confection d'un béton à haute performance.

Donc Le mémoire à l'issue élaboré est en trois chapitres : une recherche bibliographique et une étude expérimentale.

Le premier chapitre présente une synthèse bibliographique des travaux réalisés, sont présente généralité et des définitions sur les bétons à haute performance, en suit la formulation et les constituants des bétons à haute performance, les caractéristiques physicomécaniques sur les BHP. Enfin donné des exemples application sur les BHP et les avantages de béton à haute performance dans le domaine de génie civil ; généralités sur les déchets et les déchets de marbre ; Gestion des déchets ; le recyclage du déchet.....etc.

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

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

En fin une conclusion générale.

*Chapitre I : Etude  
bibliographique*

## I.1. Introduction

Dans ce chapitre on effectue une recherche bibliographique sur les bétons à hautes performances avec les déchets des Marbres. On va présenter quelques généralités sur les BHP, leur constituant et notamment le rôle des super plastifiants 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. Et dans autre part on avoir aussi généralités sure les déchets ; les déchets de marbre ; le recyclage du déchet ; Gestion des déchets .....etc.

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

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

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

Dans les années 1980, on découvre le moyen de diminuer ces vides avec l'ajout de microparticules et d'adjuvants de types plastifiants, ainsi naissent les bétons à hautes performances [1].

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



**Figure1/CH1** : exemple de BHP

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

Le béton à haute performance n'est pas un matériau révolutionnaire, car il contient exactement les mêmes constituants que le béton ordinaire. Les constituants de ce nouveau matériau sont : Les granulats ordinaires quoique de bonne qualité, du ciment Portland ordinaire (ciment Portland à haute résistance initiale), lorsque des résistances élevées au jeune âge sont nécessaires a un dosage important de (450 à 550 kg/m<sup>3</sup>), et il est constitué aussi par la fumée de silice (généralement de 5 à 15% de la masse totale du liant ) , et parfois par d'autres ajouts minéraux comme des cendres volant; ou du laitier de haut fourneau granulé broyé....etc. : toujours du super plastifiant, le dosage en varie entre 5 et 15 litres par mètre cube de béton selon la teneur en matières sèches et sa nature ; un tel dosage permet de réduire la quantité d'eau du béton de 45 à 75 kg /m<sup>3</sup>. Il est essentiel que le béton à haute performance puisse être mis en place dans la structure en utilisant des méthodes usuelles et qu'il soit mûri de manière habituelle même si un bon mûrissement humide est nécessaire. Généralement le béton à haute performance se différencie à des autres bétons par son très faible rapport eau/ciment : toujours inférieur à 0,3 quelquefois ne dépassant pas 0.25 et occasionnellement 0.20 [2].

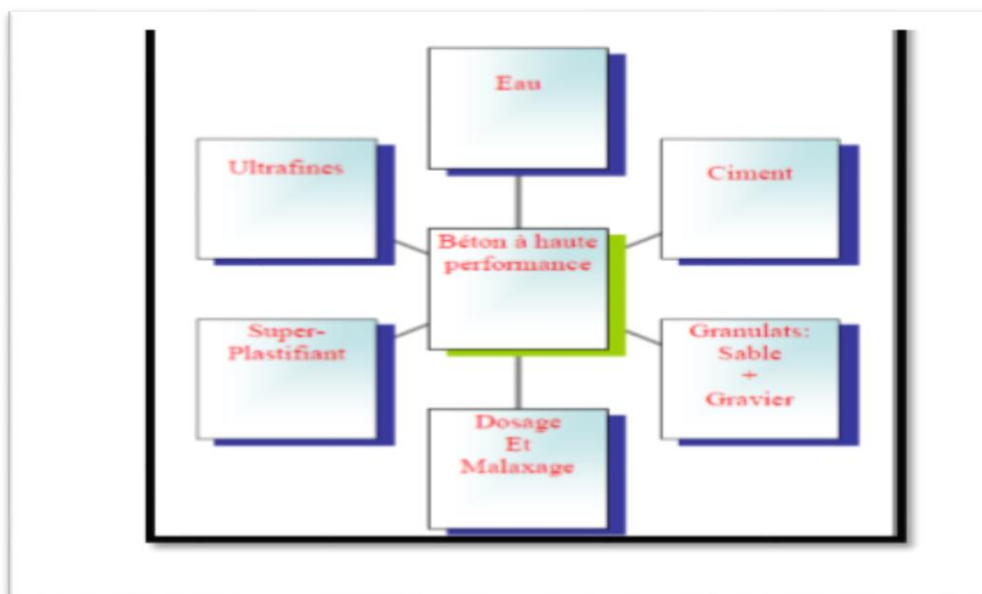


Figure 2/ CH1: Un organigramme pour l'obtention d'un BHP [3]

### I.3.2. Les caractéristiques des bétons à haute performance

BHP se caractérisent par :

- ❖ Une résistance à la compression à 28 jours supérieure à 60 MPa.
- ❖ Un rapport Eau efficace/liant équivalent inférieur à 0,4.
- ❖ Ils présentent une micro texture très dense et une faible porosité et sont donc très résistants à la pénétration d'agents agressifs.



Figure3/CH1 : BHP

## ➤ caractéristique physique

### ▪ 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 15 à 18 cm, mais il faut impérativement étudier :

- ❖ les granulats (module de finesse du sable) ;
- ❖ le choix du ciment et du super plastifiant ;
- ❖ 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.

La fluidité du mélange de béton croît avec l'augmentation de la quantité d'eau. Le mortier de ciment, non seulement remplit les vides et enrobe les grains des agrégats, mais les écarte également les uns des autres, en créant entre eux des couches abondantes qui diminuent le frottement entre les grains : ceci augmente la fluidité.

Si les agrégats sont plus gros, la surface spécifique est en général moindre, par conséquent, pour une même quantité de mortier de ciment, les couches intermédiaires entre les grains des agrégats se trouvent plus épaisses ce qui rend le mélange de béton plus fluide. L'augmentation de la quantité de sable au-dessus de la quantité optimale, diminue la fluidité de la pâte par suite de l'accroissement de la surface totale des agrégats. La forme des grains influe sur la fluidité, si la surface des grains est arrondie et lisse, la surface de contact et le frottement entre eux seront plus petits donc le mélange plus fluide que le mélange formé avec des granulats concassés [4].

### ▪ 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.

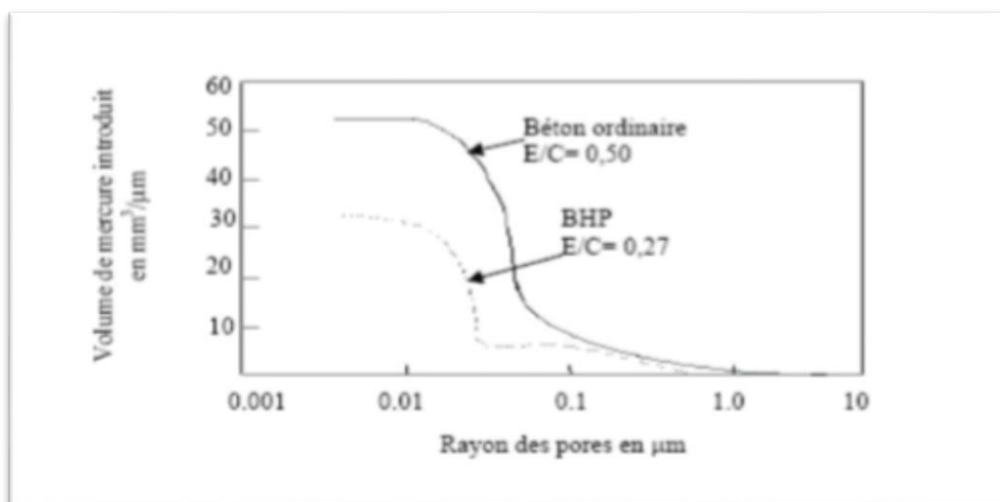
Au fur et à mesure que l'hydratation se développe et que la taille des pores capillaires diminue, les mouvements de l'eau dans le système deviennent de plus en plus difficiles, si bien que l'hydratation des grosses particules de ciment se fait plutôt par diffusion.

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 [5].

Les dimensions et le volume des pores capillaires sont les principaux paramètres 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. 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 [6].

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.

On note que la porosité totale des BHP est inférieure à celle des bétons ordinaires. La distribution des dimensions des pores, observée sur la courbe porosimétrique des BHP se situe sous celle des bétons ordinaires (Figure 4/CH1).



**Figure 4/CH1 : Porosité des bétons ordinaires et des BHP [6].**

Tant que les granulats et particulièrement les plus gros, sont suffisamment résistants, au fur et à mesure que la porosité de la pâte de ciment décroît, la résistance du béton augmente.

Ainsi, la sélection et la composition des ingrédients d'un BHP sont beaucoup plus critiques que dans le cas des bétons usuels [6].

### ■ Perméabilité

La perméabilité est caractérisée par la valeur de débit de transport des fluides et des gaz (eau, chlorure, sulfates, oxygène...) à travers des pores capillaires et des fissures du béton.

A cause de leur très grande compacité, les BHP ne sont que très peu perméables. On peut s'en rendre compte lorsqu'on brise des échantillons de béton conservés pendant un an dans l'eau, on constate que le cœur de l'éprouvette est absolument sec.

Cette imperméabilité peut s'expliquer aussi par la présence de très nombreuses particules de ciment non hydratées qui arrivent à stopper la progression de l'eau vers l'intérieur du béton tout en le rendant encore plus imperméable. Des mesures allemandes de perméabilité de mortier conduisent à des valeurs comprises entre 0,64  $10^{-12}$  m/s pour  $E/C = 0,40$  et à 440  $10^{-12}$  m/s pour  $E/C = 0,75$ . Ces résultats confirment des essais américains anciens qui montraient que la perméabilité d'un béton était réduite d'un facteur égal à 1000 lorsque le rapport  $E/C$  passait de 0,80 à 0,40 [7].

La perméabilité d'un béton à faible rapport  $E/C$  est donc appréciée par la mesure du débit d'air ou d'autre gaz (oxygène, oxyde de carbone) et par celui des ions chlore transitant dans le béton sous l'effet d'un gradient de pression ou de courant.

La microstructure de la pâte de ciment hydraté du béton de 20 MPa est très ouverte et l'on peut y voir des pores, de grands cristaux d'étrangéité et de portlandite  $Ca(OH)_2$  avec de plus petites aiguilles de silicate de calcium hydraté.

Il est possible de voir que la zone de transition entre la pâte de ciment et les granulats est très poreuse dans le cas du béton usuel. A l'inverse, il est impossible de discerner les moindres cristaux dans la microstructure du BHP qui a un rapport eau/liant de 0,25 ; la pâte de ciment hydraté a un aspect amorphe et est très compacte.

Cette différence de microstructure des BHP a deux conséquences très importantes du point de vue résistance à la compression et du point de vue perméabilité : la résistance à la compression d'un BHP augmente au fur et à mesure que le rapport eau/liant diminue et la perméabilité d'un BHP est considérablement plus faible, pratiquement impossible à mesurer selon Torrent et Jornet [8], sauf si l'on recourt à la mesure de la « perméabilité » dite aux ions chlore selon la norme ASTM C [9].

Un béton qui a un rapport eau/liant de 0,45 a une « perméabilité aux ions chlore » qui

varie entre 3 000 et 5 000 coulombs, alors qu'elle n'est que de 100 à 500 coulombs pour un BHP qui contient de la fumée de silice et qui a un rapport eau/liant inférieur à 0,25. Cette très faible « perméabilité aux ions chlore » des BHP indique qu'il existe encore un réseau de capillaires très fins interconnectés, mais que ces capillaires sont suffisamment fins pour que l'eau ne s'y écoule pas d'elle-même.

### ■ Le retrait

Le retrait est principalement dû à l'évaporation de l'eau du béton, au contact de l'atmosphère. De façon générale, l'eau existe dans le béton dans les états suivants : - sous forme de gel dans les sels hydrates. - en fermée dans les petits interstices sous forme capillaire. - libre dans les vides les plus importants entre les granulats et la pâte. Le processus du séchage de l'eau dans le béton est le suivant : lorsque le béton sèche, l'eau s'évapore d'abord à la surface des tubes capillaires ; il en résulte un accroissement de la courbure du ménisque de capillaire, et une tension qui attire l'eau des vides les plus importants ; qui se déplace vers les capillaires. Ce processus se répète, le béton se dessèche de plus en plus au voisinage de la surface. Au fur et à mesure il recule des ménisques intérieurs, les gels d'hydratation arrivent au contact direct avec l'atmosphère. A priori, on pourrait penser que pour un béton qui contient une grande quantité de pâte du ciment et d'eau, les pores capillaires sont nombreux et le séchage est accéléré. Dans le béton à haute résistance, la réaction chimique de la chaux  $\text{Ca(OH)}_2$  avec la silice  $\text{SiO}_2$  donne naissance à un silicate du calcium  $\text{CaOSiO}_2, n\text{H}_2\text{O}$ . Ce silicate, qui remplit les pores capillaires réduit leur volume libre, ce qui évite la migration de l'eau et le séchage des gels. Par conséquence, la déformation de retrait est réduite. D'après Chaid et al : Le retrait total des bétons avec ajouts cimentaires, mesuré sur éprouvettes 7 x 7 x 28 cm, est plus faible que celui mesuré sur celles de béton de référence figure (5/CH1). Cependant, le béton avec ajout de calcaire se comporte mieux. Ce fait, est du en particulier à la grande finesse de cet ajout, qui avantage la densification dès les premières échéances et diminue par conséquent le retrait.



**Figure 5/CH1:** le problème de retrait dans le BHP

## ■ Le fluage

Le fluage du béton à hautes performances – c'est-à-dire la déformation croissante sous l'effet d'une contrainte constante – est fréquemment inférieur au fluage observé pour un béton de résistance conventionnelle. L'âge du béton au moment de la sollicitation est également extrêmement important pour le BHP. Lorsque la charge est exercée sur un béton jeune, la déformation par fluage sera plus importante que dans le cas d'un béton plus âgé. Il en va de même en ce qui concerne le béton conventionnel. La norme EN 1992-1-1:2004 définit les formules nécessaires au calcul du fluage. Il en ressort par exemple que le coefficient de fluage d'un béton de classe de résistance C 25/30 est environ trois fois supérieur à un béton de classe de résistance C 90/115 pour une humidité relative de 50 %. Il convient cependant de conserver à l'esprit que les contraintes observées dans le BHP sont nettement supérieures à celles inhérentes au béton conventionnel. Les déformations immédiates peuvent dès lors devenir aussi importantes – en fonction, bien évidemment, de la résistance à la flexion, dans le cas d'une poutre par exemple. Il va sans dire que ce phénomène est encore renforcé à long terme par le biais de l'utilisation d'un coefficient de retrait. En cas de constructions en BHP, la limitation des déformations et des flèches peut devenir le facteur déterminant du projet, plutôt que la portance proprement dite.



**Figure 6/CH1:** exemple de fluage

## ■ Fragilité et la ductilité

La fragilité du béton caractérise sa capacité à atteindre la rupture en ne subissant qu'un minimum de déformation. A chaque fois la résistance d'un BHP augmente, le caractère de ce matériau sera fragile. La surface de rupture des bétons HP et THP montre que les fissures traversent indifféremment la pâte et les granulats, il y a donc une certaine parenté avec le caractère des matériaux fragiles. Ce caractère fragile, c'est à dire non ductile, pourrait être préoccupant, car les méthodes de dimensionnement modernes reposent entre autres sur les théories de la plasticité des matériaux et prennent en compte leur comportement non-linéaire. Ceci est particulièrement vrai pour les structures soumises aux séismes, aux chocs ou à des déformations imposées. Les essais de rupture en flexion d'éléments en BHP armé, confirment le fait que la ductilité réelle de ces éléments est équivalente à celle d'éléments en béton armé ordinaire. Le caractère fragile des bétons sous compression est éliminé par le présent d'armatures longitudinales, qui permettent un report de l'effort sur l'acier évitant ainsi une rupture quasi-instantanée de l'élément- d'armatures transversales, qui empêchent ou retardent le flambement des armatures longitudinales lorsque la résistance du béton est épuisée.

## ■ 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, etc..).

## ■ Migration des ions chlorure

La résistance des BHP à la migration des ions chlorures est largement 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 [10].

La faible perméabilité des BHP et le faible rapport E/C favorisent une résistance plus importante aux risques d'écaillage. Il est possible de formuler des BHP qui résistent bien aux cycles gel/dégel et à l'écaillage sans ajouts d'entraîneur d'air.

## ▪ 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 [10].

## ▪ Adhérence acier-béton

La grande résistance mécanique du BHP et sa microstructure interne permettent de mobiliser une liaison supérieure entre les armatures en acier et le BHP et donc d'améliorer les qualités d'adhérence, ce qui permet une réduction des longueurs d'ancrage et de scellement.

## ▪ Réduction des flèches et des déformations des structures

Plusieurs propriétés, de nature soit rhéologique, soit mécanique, permettent de réduire les flèches et les déformations dans les structures et les dalles en BHP: résistance à la traction du béton plus grande, module d'élasticité plus élevé, fluage plus faible et adhérence acier-béton supérieure.

## ▪ Propriétés thermiques

Les propriétés thermiques des BHP, telles que conductivité, diffusité, chaleur spécifique et coefficient de dilatation ne diffèrent pas sensiblement de celles des bétons traditionnels.

## ▪ 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:

- garantie d'un bon remplissage des moules et des coffrages et de l'enrobage parfait des armatures;

- amélioration de l'écoulement du béton, en particulier dans les zones très ferraiées;
  - réduction du délai d'exécution de l'ouvrage et gain de productivité;
  - exécution de bétonnages complexes dans des conditions d'accès difficiles.
- Le BHP présente aussi:
- une bonne stabilité à l'état frais, ce qui garantit l'absence de ségrégation;
  - une faible viscosité qui autorise le pompage sur de longues distances.
- **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;

## ➤ **Caractéristiques mécaniques**

On sait très bien que la formation des silicates de calcium hydratés créés durant l'hydratation des silicates di et tricalciques soit essentiellement responsable des gains de résistance de béton. Les phénomènes complexes liés à l'hydratation du ciment (mouvements thermiques ou retrait) provoquent la création des défauts. Dans le cas des bétons classiques, ces défauts sont particulièrement localisés dans l'auréole de transition.

Dans les BHP cette zone est inexistante [11] et, les défauts prennent naissance dans la matrice, siège des phénomènes d'hydratation. C'est à partir de ces défauts (microfissures, microcavités ...) que vont se développer les micros ruptures lors des sollicitations mécaniques.

### ▪ **Résistance en compression**

C'est la propriété d'usage la plus importante, c'est aussi celle dont l'amélioration est plus spectaculaire : on a pu réaliser en laboratoire [12] des bétons dont la résistance à la compression dépassait 200 MPa. Cependant, si l'on cherche à fabriquer des bétons maniables avec des granulats ordinaires, on devra se limiter, dans l'état actuel de la technologie à des valeurs comprises entre 100 et 120 MPa en résistance moyenne à 28 jours. Une explication de cette augmentation de la résistance est due au rôle accélérateur de la fumée de silice, selon la nouvelle loi de Féret [12].

Où :

- ❖  $f_{c28}$  est la résistance moyenne en compression du béton à 28 jours.
- ❖ E, C et S sont le poids respectif d'eau, du ciment et de fumée de silice par mètre cube



de béton.

- ❖  $k_g$  est un paramètre qui dépend de la qualité des granulats (pour des granulats courants  $K_g = 4,91$ ).
- ❖ Résistances à la compression simple et module d'élasticité des bétons (Confectionnés avec différents types de granulats) et des mortiers, en fonction du rapport E/L [13].

**Tableau 1/CH1** : Les classes du Béton à haute performance (BHP) et (BTHP)

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

**Tableau 2/CH1** : Présente quelques résultats d'essais de compression

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

### ■ 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 [13]. PE dèches [14] a montré que la résistance en traction par flexion à 28 jours avec un BHP à la fumée de silice varie entre 5 et 9 MPa. Il a montré dans la même étude que l'ensemble des points ( $R_t$  et  $R_c$ ) se situait au-dessus de la courbe représentant la relation adoptée par les règlements de béton armé [15] et de béton précontraint [16] :

$$R_t = 0,6 + 0,06 R_c \quad (I.1)$$

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

$$R_t = 5,5 + 0,027 R_c \quad (I.2)$$

Ahmad et al. [17] avaient déjà proposé une relation pour des résistances en compression supérieures à 84 MPa :

$$R_t = 0.44R_c^{2/3}$$

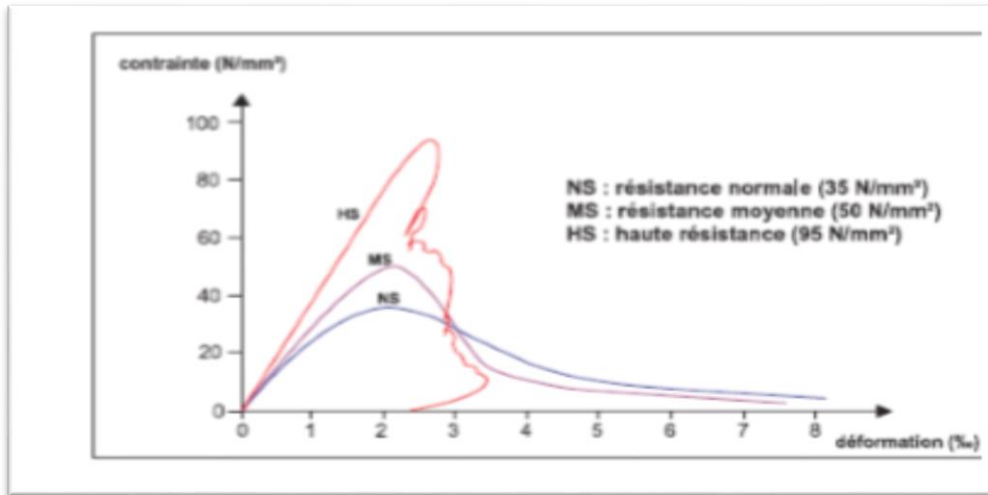


Figure 7/CH1: Diagramme contraintes- déformation [17]

## ■ La résistance à la traction par flexion

La résistance à la flexion croît 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; 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.

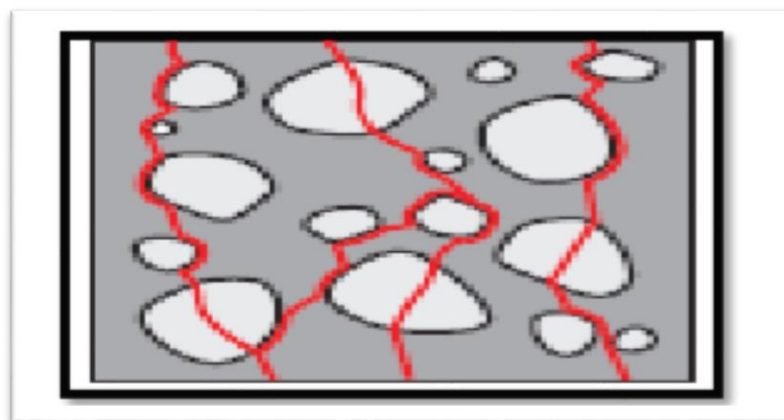


Figure8/CH1 : Béton à haute performance

## I.4. Domaine d'utilisation de BHP

Le béton haute résistance (BHP), qui à 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]



**Figure9/CH1** : domaine d'utilisation 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.

Les BHP sont utilisés notamment pour la réalisation de :

- ❖ Préfabrication ;
- ❖ Ponts routiers ;
- ❖ 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

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

Le béton est le matériau de construction le plus utilisé, il permet de réaliser des prouesses technologiques telles que les barrages, les ponts, les immeubles, les tunnels et les

centrales nucléaires. Son intérêt vient de sa grande facilité de mise en œuvre, sa résistance à la compression, sa durabilité, son faible coût et d'autres qualités

## I.4.1. Les ouvrages d'art :

### I.4.1. Pont de Mila



Figure10/CH1 : le pont de Mila

### I.4 .2. Le pont de l'île de Ré (Charente-Maritime, France 1988)

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

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



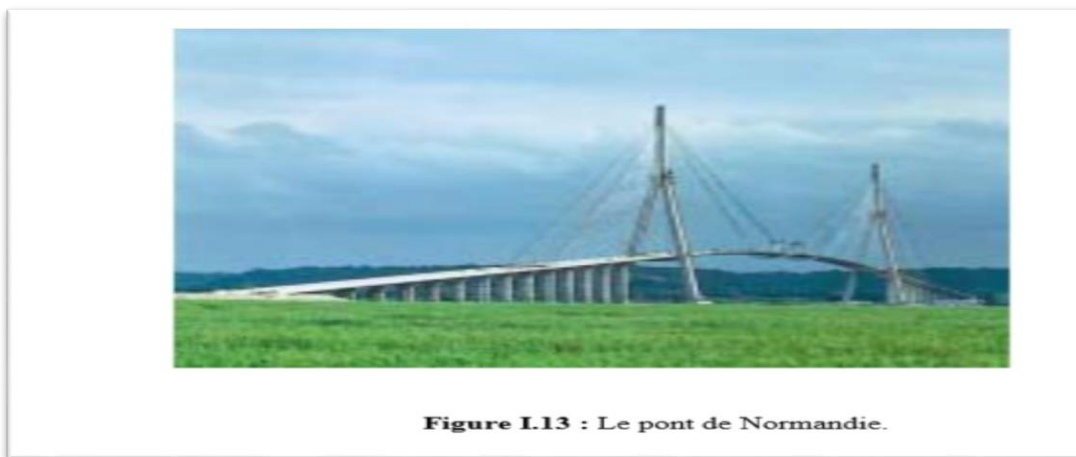
Figure11/CH1 : Le pont de l'île de Ré (Charente-Maritime, France 1988)

## I.4 .3.Le pont de Normandie (Le Havre, France.2007) :

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

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

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



**Figure12/CH1** : le pont de Normandie (Le Havre, France.2007)

## I.4 .4. Le bâtiment : La Pacific Tower (France) :

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

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

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





**Figure I.13:** La Pacific Tower.

### **I.4 .5. La Grande Mosquée Hassan II (Casablanca, Maroc. 1986) :**

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

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



**Figure I.14 :** La Grande Mosquée Hassan II.

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

## I.5. Les avantages des bétons à haute performance :

Le béton à hautes performances apporte en outre des avantages multiples par rapport au béton ordinaire. Parmi les avantages du BHP :

- ❖ La maniabilité est accrue sans risque de ségrégation lors de la mise en œuvre.
- ❖ La durabilité des structures est améliorée par la forte compacité du béton avec une perméabilité à l'air et à l'eau réduite, une résistance aux agressions, et une meilleure résistance à l'alcali-réaction, une plus grande résistance à l'abrasion, une meilleure tenue aux cycles de gel/dégel.
- ❖ La conception des structures plus minces grâce à l'augmentation des caractéristiques mécaniques (compression, traction, module d'élasticité) tant au jeune âge qu'à terme, Cependant les propriétés améliorées des bétons à hautes performances ne peuvent être obtenues que grâce à plusieurs dispositions simultanées comme :
  - ❖ Les granulats qui doivent être de bonne qualité, la résistance du béton pouvant être limitée par celle des granulats eux-mêmes,
  - ❖ L'emploi d'adjuvants spécifiques, notamment des super plastifiants réducteurs d'eau ainsi que des ajouts minéraux tels que la cendre volante, le laitier du haut fourneau, la fumée de silice.... etc.
  - ❖ Permet des bétonnages complexes dans des conditions d'accès difficiles ;
  - ❖ Un E/C plus faible par l'utilisation de super plastifiants hauts réducteurs d'eau ;
  - ❖ Diminution des délais de mise en charge des structures (précontrainte accélérée) ;
  - ❖ L'optimisation des cycles de coffrage/décoffrages et des séquences de production ;
  - ❖ Haute résistance en compression, permettant de réduire les sections des éléments de béton [19] ;
  - ❖ Diminution du retrait pour une limitation des fissures ;
  - ❖ 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 ;
  - ❖ Des décintrements et des décoffrages rapides ;
  - ❖ 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 ;
  - ❖ Élévation du module d'élasticité avec diminution du fluage ;
  - ❖ 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 ;

- ❖ Élévation de la résistance à l'abrasion ;
- ❖ 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) ;
- ❖ Renforcement de l'adhérence acier/béton ;
- ❖ Des délais avant mise en tension des armatures de précontraints raccourcis ;
- ❖ Diminution des sections et des densités de ferrailage et augmentation des portées (Résistance finale élevée)
- ❖ L'emploi de ciments de classe élevée à des dosages compris entre 400 et 550 kg/m<sup>3</sup>.  
L'utilisation du béton à hautes performances progresse constamment dans le domaine de construction et le nombre d'édifices en béton à hautes performances ne cesse d'augmenter car les concepteurs et les maîtres d'œuvre réalisent la valeur et la durabilité de ce béton.

## I.6. 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 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 [19].

Le principe général de formulation des BHP, passe par la réduction de la porosité du béton. Cet effet est obtenu principalement en diminuant le rapport E/C (en ajoutant un super plastifiant), et/ou en ajustant granulométrie par des additions ultrafines. Le travail présenté, rentre dans le cadre d'une étude en cours, qui tend à mettre en place une méthodologie simplifiée pour la formulation des bétons à hautes performances fibrés et non fibrés. La partie présentée dans cet article est une étude préliminaire qui examine principalement, l'optimisation des dosages de super plastifiant et du ciment. Les résultats de cette étude, permettront ultérieurement de finaliser l'approche globale de Formulation en traitant les volets additions ultrafines et adaptation de la méthode pour les BFHP.

### I.6.1. Les étapes de la formulation

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

- A/ Détermination d'une formule théorique prévisionnelle :



- ❖ Sélection des constituants en fonction de l'expérience locale.
- ❖ Détermination des proportions des constituants.
- ❖ Optimisation du squelette granulaire.
- B/ Optimisation du mélange en laboratoire:
  - ❖ Validation de la compatibilité ciment / adjuvant.
  - ❖ Ajustement de la quantité de pâte et de l'adjuvantation.
  - ❖ Vérification du comportement rhéologique du béton frais.
- C/ Validation de la formule:
  - ❖ Vérification du comportement rhéologique du béton frais.
  - ❖ Vérification des éventuelles spécifications complémentaires telle que la pompabilité.
  - ❖ Vérification des caractéristiques du béton.

## I.6.2. Méthode de Formulation



**Figure 15/CH1** : exemple de formulation de BHP

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 [20].

La 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 présentée par Mehta et Aitcin(1990) ;

- ❖ Méthode suggérée par le comité ACI 363 (1993) ;
- ❖ Méthode proposée par de Larrard (dite des coulis du LCPC en 1990)

### I.6.3. Formulation des bétons

Comme précisé, cette partie d'étude propose de formuler un BHP d'un rapport E/C efficace avec de bonnes caractéristiques rhéologiques, en passant par une optimisation des dosages de super plastifiant et du dosage en ciment. Pour cela, l'approche consiste à cibler une bonne ouvrabilité de départ (affaissement de 18-25 cm). Après avoir déterminé le dosage en granulats, en fixant le rapport G/S et en adaptant la méthode [22], l'étude passe par les deux étapes suivant

- ❖ Détermination du dosage super plastifiant et du rapport E/C
- ❖ Détermination du dosage en ciment

### I.6.4. Détermination du dosage en granulats

En fixant le rapport gravier sur sable ( $G/S=1.1$ ) et en estimant la compacité du béton par les coefficients des compositions de la compacité donnés par G. Dreux [22], les Compositions en granulats des bétons étudiés (B500, B600 et B700) sont présentées dans le Tableau 6

**Tableau 3/CH1.** Compositions en granulats des bétons étudiés

Constituants	B 500	B600	B700
Ciment	500	600	700
Gravier 3/8	433	411	388
Gravier 8/15	433	411	388
Sable 0/1	134	126	118
Sable 0/3	662	627	595

### I.6.5. Sélection des 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 la propreté des particules.

### ■ 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 caractéristique 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 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.

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 point de 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. Tout le sable naturel utilise pour fabriquer un BHP doit contenir le moins possible de particules supérieures à 5mm, lorsque ces particules sont plutôt friables, car elles constituent alors le maillon faible du BHP. Le remplacement partiel d'un sable manufacturé a été fabriqué en utilisant une roche très résistante. En pratique, le choix du sable que l'on peut utiliser pour fabriquer un BHP est très souvent limité dans la plupart des usines de béton prêt à l'emploi, car elles ne disposant que d'une seule benne pour entreposer le sable. Comme ces centrales doivent aussi livrer des bétons usuels pour leurs clients habituels, il est assez difficile de disposer de deux sables différents dans une même usine : un sable pour le béton usuel et un autre pour le BHP .Cependant, si deux bennes sont disponibles pour le granulat fin, on peut en réserver une pour le sable plus grossier qui sera utilisé pour fabriquer les BHP.

### ■ 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 .Il n'est pas encore clairement établi si des granulats qui sont potentiellement réactifs face aux alcalis du ciment peuvent

être utilisés pour fabriquer des

BHP. Dans l'état actuel des connaissances, il est donc préférable de s'abstenir et de n'utiliser que des gros granulats qui ne sont pas potentiellement réactifs. 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 équilibrées dimensionnelles (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 le cassage 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 (Aitcin, 1989). La sélection du gros granulat peut être faite en examinant de façon attentive la minéralogie et la pétrographie du granulat, de façon à s'assurer que toutes les particules sont résistantes et permettent de retarder le plus possible la rupture prématurée du BHP.

### **I.6.6. Optimisation du dosage en super plastifiant et du rapport E/C**

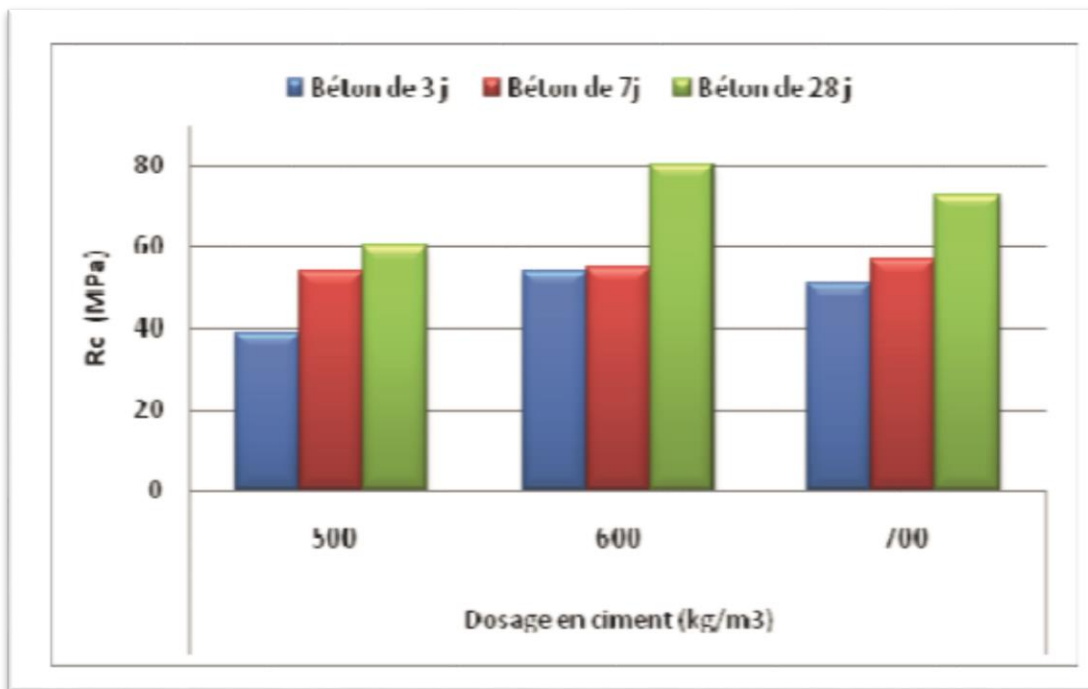
Cette partie d'étude a été réalisée avec deux dosages en ciment (500 et 600 kg/m<sup>3</sup>). En ciblant la plage d'affaissement souhaitée, on varie le dosage en super plastifiant et on détermine le rapport E/C correspondant. Afin d'avoir une idée primaire sur la qualité du béton à optimiser, la résistance à la compression des bétons étudiés a été mesurée à 7 et 28 jours. Les résultats sont regroupés dans le tableau 7

Les résultats montrent que le point de saturation en super plastifiant est au delà de 1%. Néanmoins les dosages étudiés (0.65, 0.85 et 1%) ont permis l'obtention d'un rapport E/C assez faible (<0.42) et de respecter l'ouvrabilité ciblée (affaissement > 20 cm), notamment pour les bétons dosés à 600 kg de ciment où un rapport de E/C de 0,29 a pu être obtenu. Ces résultats, nous ont permis de connaître le dosage indicatif du super plastifiant pour un rapport E/C optimal. Ce dosage peut être ajusté pour d'autres dosages en ciment.

### **I.6.7. Optimisation du dosage en ciment**

Afin d'ajuster le dosage en ciment, une étude de la résistance à la compression à 3, 7 et 28 jours a été réalisée sur trois bétons B500, B600 et B700, ayant respectivement des dosages en ciment de 500, 600 et 700 kg/m<sup>3</sup>. Les quantités des granulats des bétons étudiés sont

présentées dans le tableau 5. Pour ces bétons, le rapport E/C de 0.29 a été maintenu fixe et le dosage de super plastifiant à 1%. Les résultats obtenus sont présentés dans la **figure18**.



**Figure16/CH1** : Influence du dosage en ciment  
Sur l'évolution de la résistance en compression.

**Tableau 4/CH1** : Effet de la variation du dosage en super plastifiant  
Et du ciment sur le rapport E/C et la résistance en compression.

Dosage en Ciment	Dosage en Super-Plastifiant (%)	Slump A (cm)	E/C	R <sub>c</sub> (MPa)	
				7 jours	28 jours
500 kg/m <sup>3</sup>	0.65%	20	0.40	49	56
	0.85%	23	0.42	47	55
	1.00%	21	0.34	54	60
600 kg/m <sup>3</sup>	0.65%	23	0.36	52	50
	0.85%	20	0.31	51	61
	1.00%	24	0.29	52	82

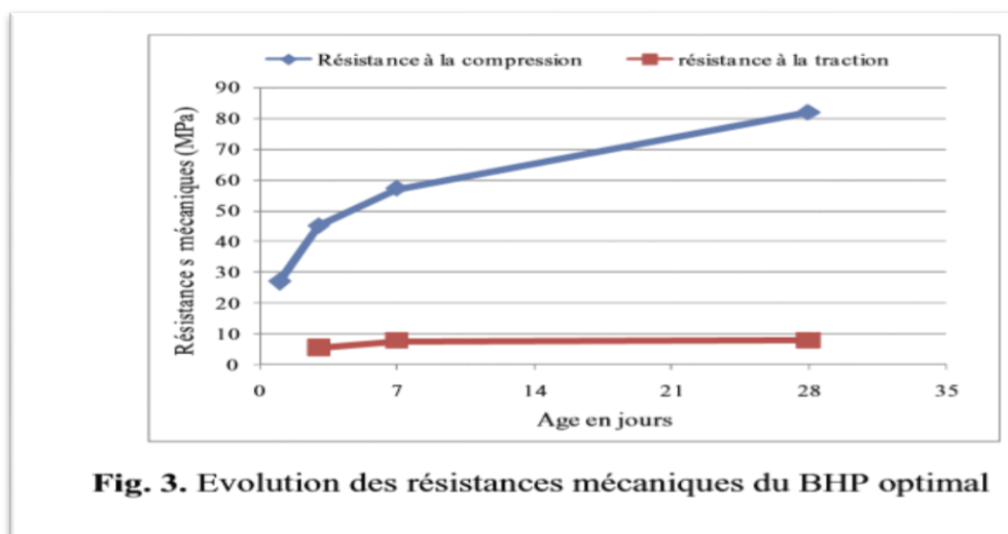


Fig. 3. Evolution des résistances mécaniques du BHP optimal

Figure17/CH1 : EVOLUTION DES Résistances Mécaniques DU BHP

### I.7. L'optimisation de la formulation d'un BHP

Deux voies sont généralement associées pour optimiser la formulation d'un BHP.

#### ■ Défloculation des grains de ciments et réduction de la teneur en eau

L'emploi des super plastifiants permet une réduction de la teneur en eau du mélange à consistance égale (entraînant la suppression d'un volume important d'eau non mobilisée par l'hydratation du ciment). Les rapports E/C sont de l'ordre de 0,35 au lieu de 0,45 à 0,50 pour un béton usuel (soit une réduction de la teneur en eau de plus de 30 %).

Les super plastifiants s'opposent à la floculation des grains de ciment en suspension dans l'eau, ce qui augmente leur réactivité, facteur de résistance à court terme. Ils permettent une réduction sensible de l'eau de gâchage (une partie de l'eau n'est plus piégée dans les floccs de ciment) tout en garantissant une ouvrabilité satisfaisante, une amélioration de la fluidité et une diminution très importante de la porosité du béton à l'état durci

#### ■ L'évolution des bétons à haute performance :

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

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

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

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

## I.8. Les adjuvants :

### ■ Définition des adjuvants :

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

Généralement le béton définitif d'un ouvrage n'est pas forcément satisfaisant, même si sa composition a été déterminée suivant les règles connues fixant les proportions respectives de liant, de sable, de granulat et d'eau. Bien des facteurs interviennent au stade de sa fabrication, de son transport, de sa mise en place dans les coffrages, de sa prise et de sa montée en résistance.

Diverses solutions existent pour augmenter la possibilité d'arriver à un résultat concret, parmi lesquelles celles apportées par les adjuvants.



Quel que soit l'adjuvant, les spécifications normatives visent d'abord à définir et à quantifier sa fonction, c'est-à-dire la façon dont il modifier, dans le sens recherché, les propriétés du béton, ensuite, à limiter les effets non recherchés sur les autres propriétés du béton [28].

## ■ Dosage en adjuvants par rapport au poids du ciment

**Tableau 5/CH1:** Dosage en adjuvants par rapport au poids du ciment [27].

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

## ■ La classification des adjuvants :

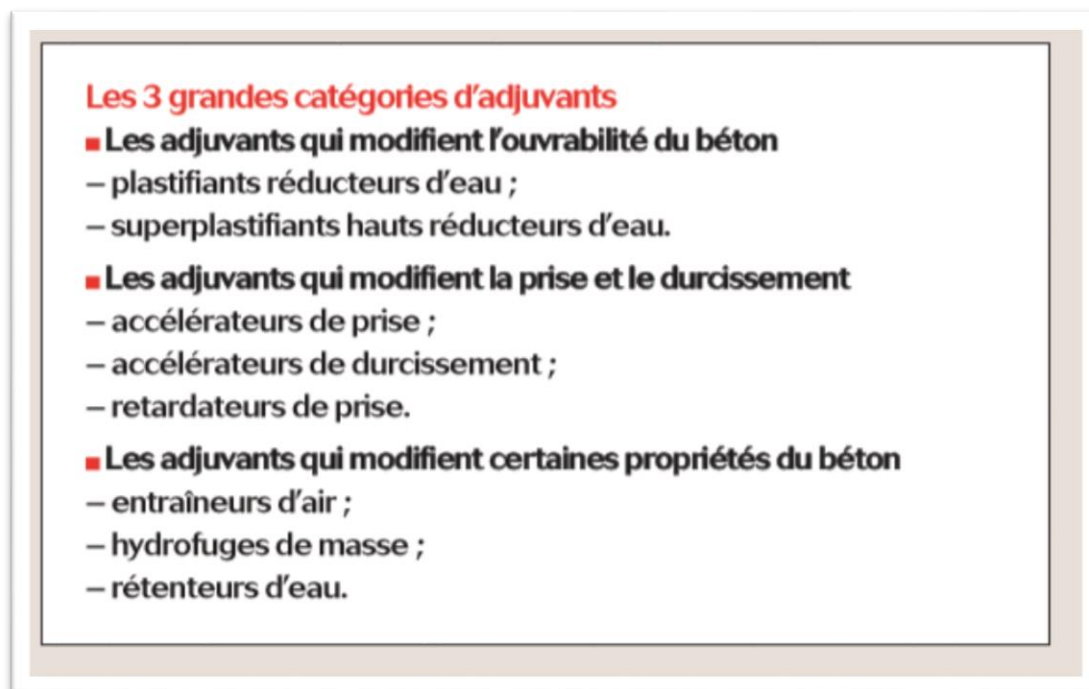
Les adjuvants sont utilisés depuis très longtemps mais leur développement réel et la multiplication de leur utilisation n'ont commencé que depuis 1960. Leur qualité et leur constantes s'améliorent sans cesse.

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

Les adjuvants peuvent être organiques ou inorganiques selon leur composition chimique, mais leur caractère chimique, distinct de celui des autres minéraux utilisés dans la fabrication du béton, est essentiel. Ainsi dans la nomenclature américaine on les appelle adjuvants chimiques, mais ici cette qualification est superflue, car les produits minéraux incorporés dans le béton, dont la teneur est souvent supérieure à 5% de la masse du ciment, sont appelés liants ou ajouts [28].



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



**Figure 18/CH1** : les grandes classes d'adjuvants

■ **Les adjuvants qui modifient l'ouvrabilité du béton :**

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

❖ **Les adjuvants qui modifient la prise et le durcissement :**

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

■ **Les adjuvants qui modifient certaines propriétés du béton :**

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

■ **Les plastifiants ou réducteurs d'eau :**

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

Ils provoquent une défloculation des grains de ciment. En effet, il existe à la surface des grains de ciment des forces d'attraction qui ont tendance à les faire s'agglomérer entre eux sous forme de flocons ou flocs et piéger une partie de l'eau du mélange. Ils dispersent les grains de ciment et libèrent l'eau piégée, ce qui génère un gain de fluidité. Ils augmentent la compacité du béton par réduction de l'eau de gâchage. Ils permettent aussi de réduire le risque de ségrégation des bétons [26].

Adjuvants	Caractéristiques	% par rapport au poids du ciment
Plastifiant - Réducteur d'eau	Réduit la teneur en eau et augmente l'étalement. Facilite la mise en place du béton, améliore sa pompabilité, diminue le retrait, améliore à court (3jours) et à long terme (28 jours) les qualités mécaniques et l'imperméabilité.	1 à 5 %
Super-plastifiant Haut réducteur d'eau	Réduit fortement la teneur en eau et augmente considérablement l'étalement. Permet de réaliser des bétons ou mortiers fluides, diminue le retrait, améliore à court (3jours) et à long terme (28 jours) les qualités mécaniques et l'imperméabilité.	0.35 à 2 %
Accélérateur de durcissement	Accroît la vitesse de montée en résistance du béton, améliore les résistances mécaniques à court terme (3 jours), permet de décoffrer rapidement.	0.2 à 3 %
Accélérateur de prise	Accélère le temps de prise, améliore les résistances mécaniques à court terme (3jours), à utiliser pour des bétonnages par temps froid.	1 à 5 %

**Figure19/CH1** : Les différents types des adjuvants

## I.8.1. Le super plastifiant



Figure20/CH1 : Super plastifiants

▪ **Les super plastifiants:**

État actuel des connaissances La tendance actuelle est de les classer d’après leur composition et leur mode de préparation en quatre catégories [5]

Caractéristiques	Valeurs
Masse volumique	1,1 ± 0,02 g/cm <sup>2</sup>
ph	7,0 ± 1
Teneur en chlorures	< 0,1 %
Extrait sec	35 ± 2 %
Na <sub>2</sub> O	< 2 %

Figure21/CH1 : caractéristiques du super plastifiant

▪ **1ère catégorie :**

lignosulfonates de calcium ou de sodium modifiés (LMS) On sait que les lignosulfonates proviennent de l’industrie de la pâte à papier. Ce sont des produits tensio-actifs utilisés comme réducteurs d’eau. On peut les utiliser comme fluidifiants à condition d’opérer une sélection (poids moléculaire élevé, faible teneur en sucre) et de faire subir un certain nombre de traitements : précipitation, neutralisation, ultrafiltration (pour augmenter le poids moléculaire), fermentation (pour éliminer les sucres). Cet adjuvant est commercialisé sous la forme d’un liquide de couleur

brun foncé de pH environ 7.5

▪ **2ème catégorie :**

Condensé de mélamine sulfonât et de formaldéhyde (MSF) Ce super plastifiant résulte de la réaction entre une résine de mélamine et du formaldéhyde, suivie d'une sulfonation avec une solution bisulfite de sodium. On obtient par polymérisation un « poly condensé » d'un poids moléculaire voisin de 30000. Ce produit est disponible soit à l'état de poudre, soit en solution aqueuse à 20 % d'extrait sec. Le plus souvent, c'est sous forme liquide qu'il est utilisé : liquide clair, légèrement laiteux, ne contenant ni sucre, ni chlorure, de pH est compris entre 8 et 9

▪ **3ème catégorie :**

Condensé de naphthalène sulfoné et de formaldéhyde (NSF) Il résulte de la réaction entre le naphthalène et le formaldéhyde, suivi d'une sulfonation et d'une neutralisation par la soude caustique. Les produits commerciaux se présentent sous la forme d'une solution aqueuse de 20 à 40% d'extrait sec, de couleur brune (pH d'environ 9).

▪ **4ème catégorie :**

Nouvelles molécules à base de polymères carboxyliques Ce sont des adjuvants non chlorés d'une nouvelle génération chimique à base de polymères acryliques, carboxyliques. Le groupe actif anionique est  $\text{COO}^-$ . Ces polymères ne contiennent pas de groupes sulfoniques, avec leurs molécules de longues chaînes latérales et un poids moléculaire élevé (40000) arrivent à réduire l'eau d'environ 30 à 40 %, leur particularité est le maintien de l'ouvrabilité durant de longues heures sans provoquer d'effet retardateur.

La figure (1-32) permet de privilégier soit l'action « réduction d'eau » ou « l'effet fluidification » ou bien les deux, ensemble

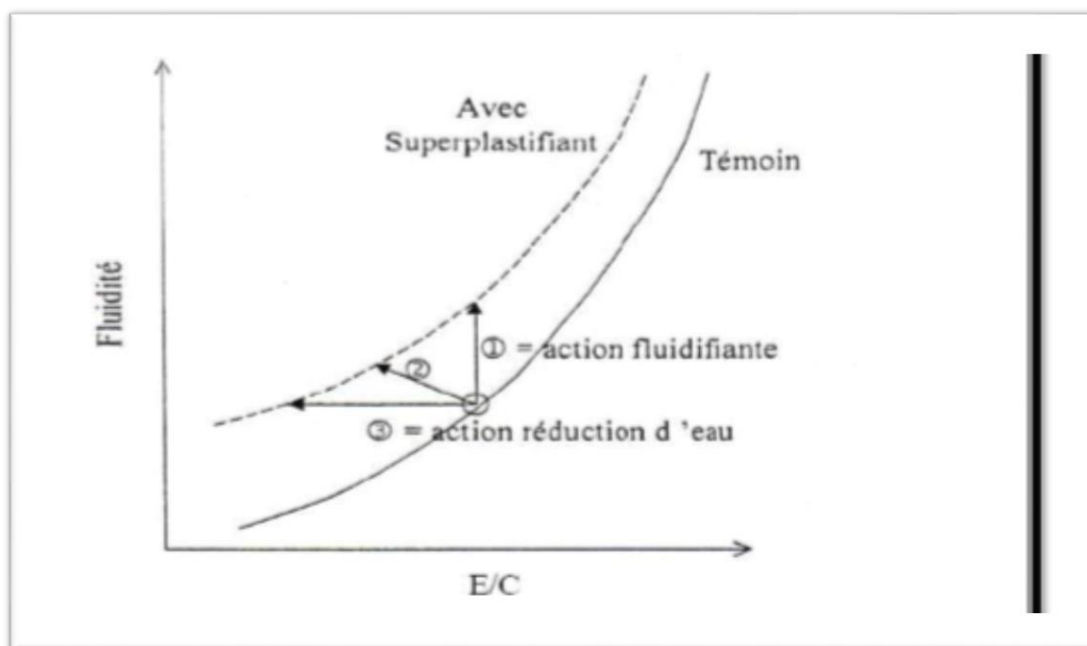
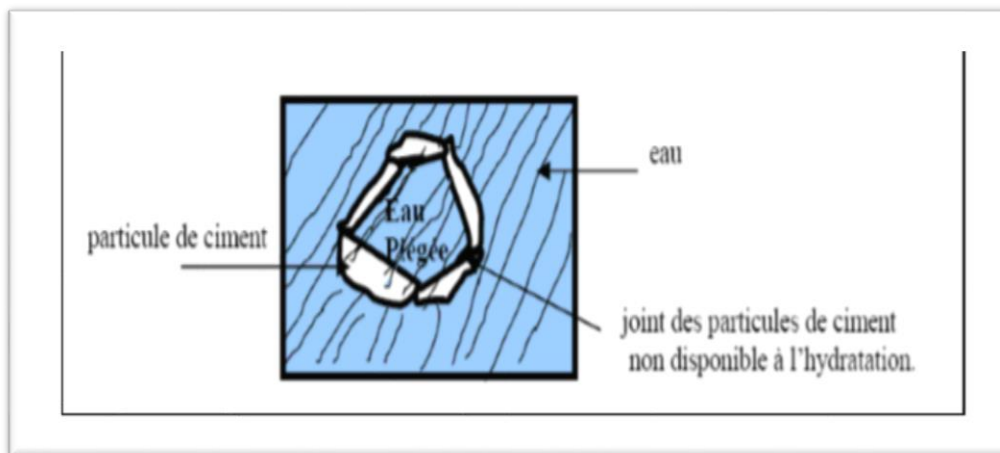


Figure 22/CH1 : Les utilisations des super-plastifiants

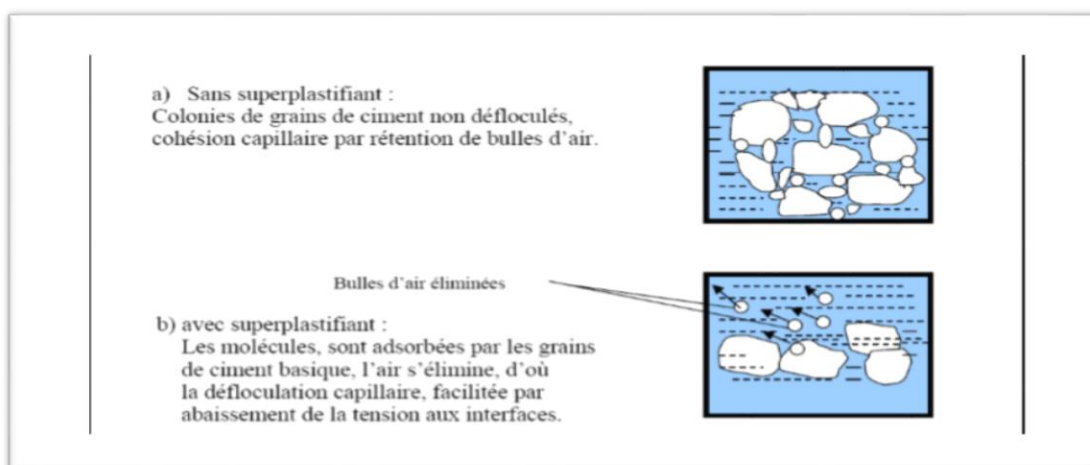
## ▪ Mécanisme de dispersion

Les grains de ciment Portland présentent un grand nombre de charges électriques sur leurs surfaces, si bien que lorsqu'ils rentrent en contact avec un liquide aussi polaire que l'eau, ils ont tendance à flocculer (représentation schématique sur la figure 1-33).



**Figure 23/CH1:** Flocculat de ciment en l'absence de super plastifiant [4]

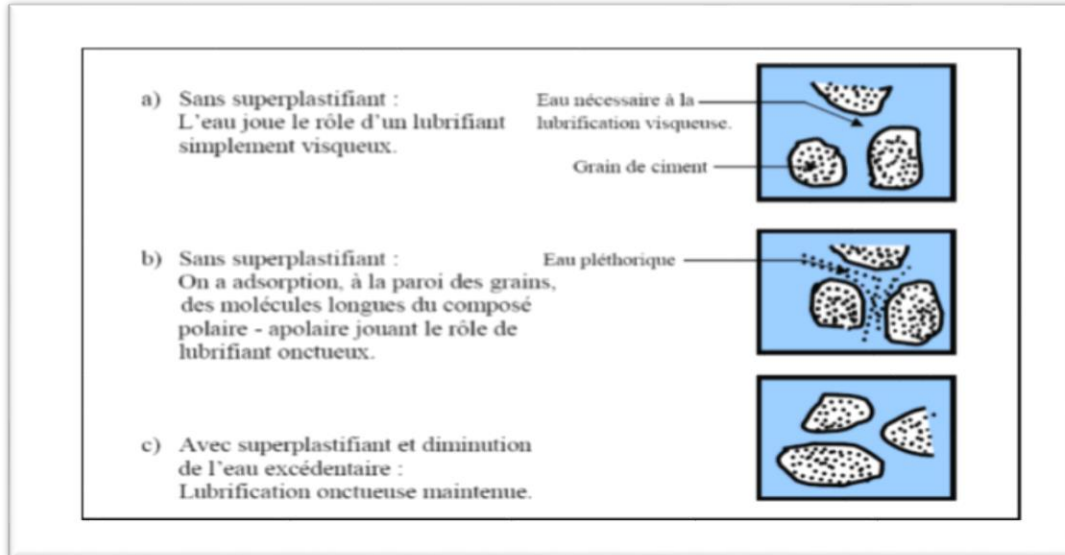
La figure 1-34 montre l'influence d'un super plastifiant sur les amas de ciment. Suite à la défloculation, une dispersion des bulles d'air et en parallèle une lubrification par adsorption sur les parois des grains sont observées. Les super plastifiants de deuxième génération sont les plus efficaces. Ils améliorent la dispersabilité, permettent une stabilité de dispersion à long terme, une excellente ouvrabilité et une résistance à la ségrégation. Leur action dispersive est essentiellement due à la répulsion électrique.



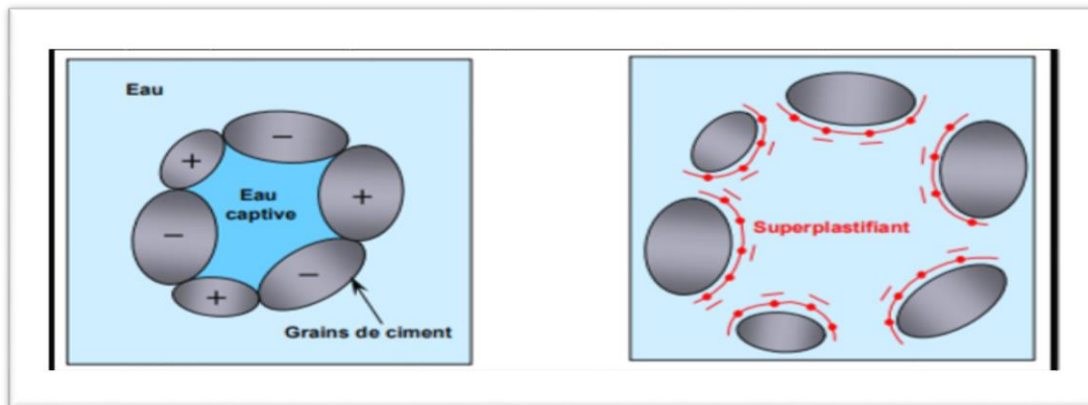
**Figure 24/CH1:** Mécanisme de flocculation avec et sans super plastifiants [4].

## ▪ Mécanisme de réduction d'eau

La figure (1-35) montre le mécanisme de réduction d'eau avec et sans super plastifiant



**Figure 25/CH1:** Mécanisme de réduction d'eau avec et sans [4]



**Figure 26/CH1:** Effet du super plastifiant sur les grains de ciment  
Par le phénomène de dispersion [26].

## ▪ Les avantages du super plastifiants

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

## ▪ Les différents types de super plastifiant

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

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

## **I.9. les déchets**

Les considérations économiques et environnementales affectent de plus en plus l'approvisionnement des déchets. Il y a des grands défis à la réalisation et au sens opposé des grandes objections à l'ouverture de nouveaux bancs de carrières. En même temps, on se heurte, des difficultés pour déposer à la décharge et de sous-produits inertes de l'industrie et, à l'existence des décharges sauvages qui affectent l'environnement.

Ces types de résidus peuvent être transformés en vue de leur utilisation dans la fabrication du béton.

L'usage de déchet de marbre pour la fabrication du béton est jugé, le niveau bas de recyclage

De ce dernier peut être à cause de manque des recherches dans leur application et utilisation en construction des routes.

Ce genre des déchets est une menace sérieuse pour l'environnement et hygiène des eaux souterraines de surcroît il a un aspect qui frappe désagréablement à l'œil.

Le traitement nécessaire des déchets n'est pas simple, parfois s'est plus onéreux, et demande des connaissances spécialisées, puisque aucun de ces matériaux n'est normalisé

### **I.9.1. Définition du déchet**

Les déchets peuvent être abordés de manière différente en fonction de leurs propriétés. Leur classification peut notamment se faire en fonction de leur état physique (solide, liquide, gazeux), de leur provenance (déchets ménagers, déchets industriels, déchets agricoles), de leur traitement (primaires, secondaires, ultimes) ou encore de leur dangerosité (déchets inertes, déchets banals, déchets spéciaux).

La variété de ces propriétés et des points de vue que l'on peut adopter lorsque l'on s'intéresse aux déchets amène la plupart des auteurs à dire qu'il n'existe pas de définition satisfaisante du déchet. Cette définition est différente en fonction du point de vue réglementaire, environnemental, économique ou encore fonctionnel.

### **I.9.2. Définition réglementaire**

La définition du déchet est établie par la loi française de 1975. Le déchet y est défini comme « tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, toute substance, matériau, produit ou, plus généralement, tout bien meuble abandonné ou que son détenteur destine à l'abandon.



## **a. Approche environnementale... puis sanitaire**

Le point de vue environnemental est le plus proche des problématiques de santé publique, de par le lien historique qui rapproche les nuisances environnementales des problèmes sanitaires. Le déchet est représenté comme une menace, un risque dès que l'on envisage son contact, direct ou après traitement, avec l'environnement. La diffusion des polluants dans le milieu s'accompagne souvent d'un risque sanitaire. L'évaluation des nuisances sanitaires associées aux déchets et leurs modes de gestion est un champ complexe de la santé environnementale qui, peut-être plus que tout autre champ, requiert une approche scientifique multidisciplinaire

L'approche environnementale et sanitaire a fortement influencé la réglementation relative aux déchets, le premier objectif de gestion étant de prévenir ou réduire la production et la nocivité des déchets.

## **b. Approche économique**

Le déchet est de plus en plus considéré comme une richesse potentielle dont on peut, grâce à des techniques novatrices, extraire une nouvelle valeur apte à réintégrer le circuit économique.

C'est tout l'enjeu de la valorisation, dont la part croissante doit permettre d'exploiter la richesse contenue dans les déchets et faire baisser la part des quantités stockées, stockage qui ne doit en principe concerner que les déchets ultimes

### **I.9.3. Calcification des déchets**

Les techniques de l'ingénieur »fait une classification très détaillée des déchets en six groupes comme suit selon leurs origines :

- ❖ Biologique
- ❖ Chimique
- ❖ Technologique
- ❖ Economique
- ❖ Ecologique
- ❖ Accidentelle

### **I.9.4. Différents types des déchets**

#### **▪ Déchets ménagers et assimilés**

Déchets issus de l'activité domestique des ménages ou déchets non dangereux provenant des

entreprises industrielles, des artisans, commerçants, écoles, services publics, hôpitaux, services tertiaires et collectés dans les mêmes conditions que les déchets des ménages. [29]

## ▪ Déchets encombrants

Toutes déchets provenant des ménages qui par leur poids, leur dimension ou leur volume ne peuvent être chargés dans les véhicules de collecte avec les déchets ménagers ordinaires et qui doivent faire l'objet d'une collecte spéciale. [30]

## ▪ Déchets spéciaux

Tous déchets issus des activités industrielles, agricoles, de soins, de services et toutes autres activités qui, en raison de leur nature et de la composition des matières qu'ils contiennent, ne peuvent être collectés, transportés et traités dans les mêmes conditions que les déchets ménagers et assimilés et les déchets inertes. [3]

## ▪ Déchets spéciaux dangereux

- ❖ Tous déchets spéciaux qui, par leurs constituants ou par les caractéristiques des matières nocives qu'ils contiennent, sont susceptibles de nuire à la santé publique et/ou à l'environnement. Sont considérés comme déchets dangereux les déchets de matériaux de construction suivants :
- ❖ Mélange de béton, briques, tuiles et céramiques contenant des substances dangereuses
- ❖ Verres contenant des substances dangereuses ou contaminés par de telles substances
- ❖ Bois contenant des substances dangereuses ou contaminés par de telles substances : traités à la créosote ou au cuivre-chrome-arsenic ou revêtus de peinture au plomb
- ❖ Mélange bitumeux contenant du goudron
- ❖ Goudron et produits goudronnés
- ❖ Déchets métalliques contaminés par des substances dangereuses
- ❖ Câbles contenant des hydrocarbures, du goudron ou autres substances dangereuses
- ❖ Terres, cailloux, boue de dragage, ballast de voie contenant des substances dangereuses

## ▪ Déchets inertes

- ❖ Tous déchets provenant de l'exploitation des carrières, des mines, des travaux de démolition, de construction ou de rénovation et qui ne sont pas constitués ou contaminés par des substances dangereuses ou autres éléments générateurs de nuisances. Ces déchets ne se décomposent pas, ne brûlent pas et ne produisent aucune réaction physique ou chimique. Ils ne sont pas biodégradables et ne se détériorent pas avec les autres matières avec lesquelles ils entrent en contact d'une manière susceptible d'entraîner la pollution de l'environnement ou de nuire à la santé publique.

Sont considérés comme déchets inertes les déchets de matériaux de construction suivants :

- ❖ Béton, briques, tuiles et céramiques
- ❖ Verre
- ❖ Déchets de construction et de démolition en mélange ne contenant pas de substances dangereuses et ne contenant que des déchets minéraux.
- ❖ Matériaux de construction à base de gypse (ne contenant pas de substances dangereuses) : carreaux de plâtre, plaques de plâtre, enduit plâtre.

## ▪ **Marbre**

Le marbre est une roche métamorphique dérivée du calcaire, existant dans une grande diversité de coloris, pouvant présenter des veines, ou marbrures (veines et colorie sont dus à des inclusions d'oxydes métalliques, le plus souvent).

Le déchet du marbre a été recyclé avec succès dans la confection des bétons hydrauliques en substitution du sable ou du gravier et ce à des différentes proportions.

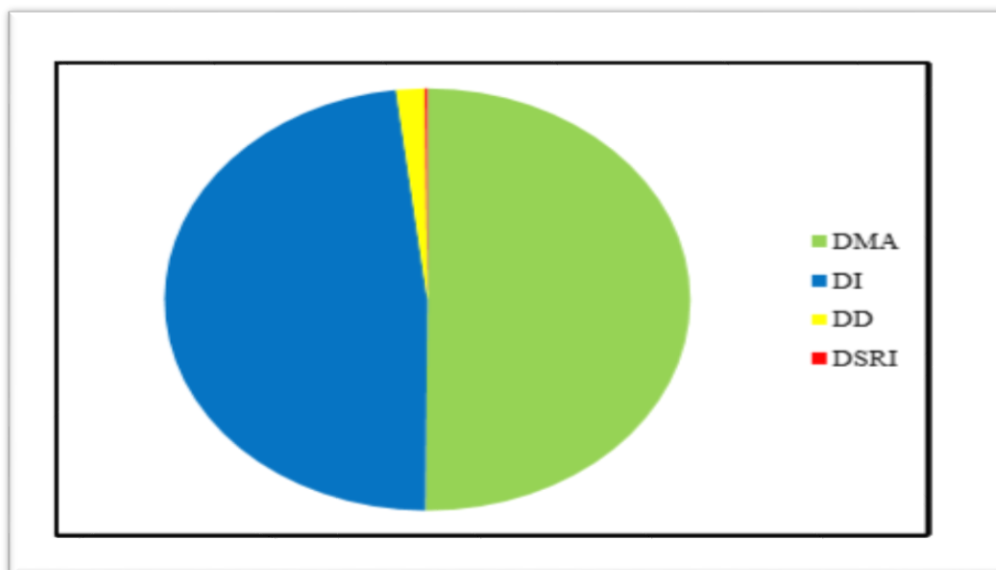
Les résistances obtenues restent raisonnables à celles données par les granulats naturels



**Figure 27/CH1 : Marbre**

## ▪ **En général, la composition des déchets solides en Algérie**

DMA : 11,5 MT/an Déchets inertes : 11 MT/an Déchets dangereux : 0,4 MT/an DASRI : 0,04 MT/an Soit un Total : **22,94 MT/an**



**Figure28/CH1:** La composition des déchets solides en Algérie

(Source: REVADE, 2016)

#### I.9.5. Gestion des déchets

##### ▪ Définition

La gestion des déchets est toute opération relative à la collecte, au tri, au transport, au stockage, à la valorisation et à l'élimination des déchets, y compris le contrôle de ces opérations (Loi 01-19). La réduction à la source, la réutilisation, le recyclage, la valorisation et l'élimination doivent être privilégiés dans cet ordre dans le domaine de la gestion des déchets.

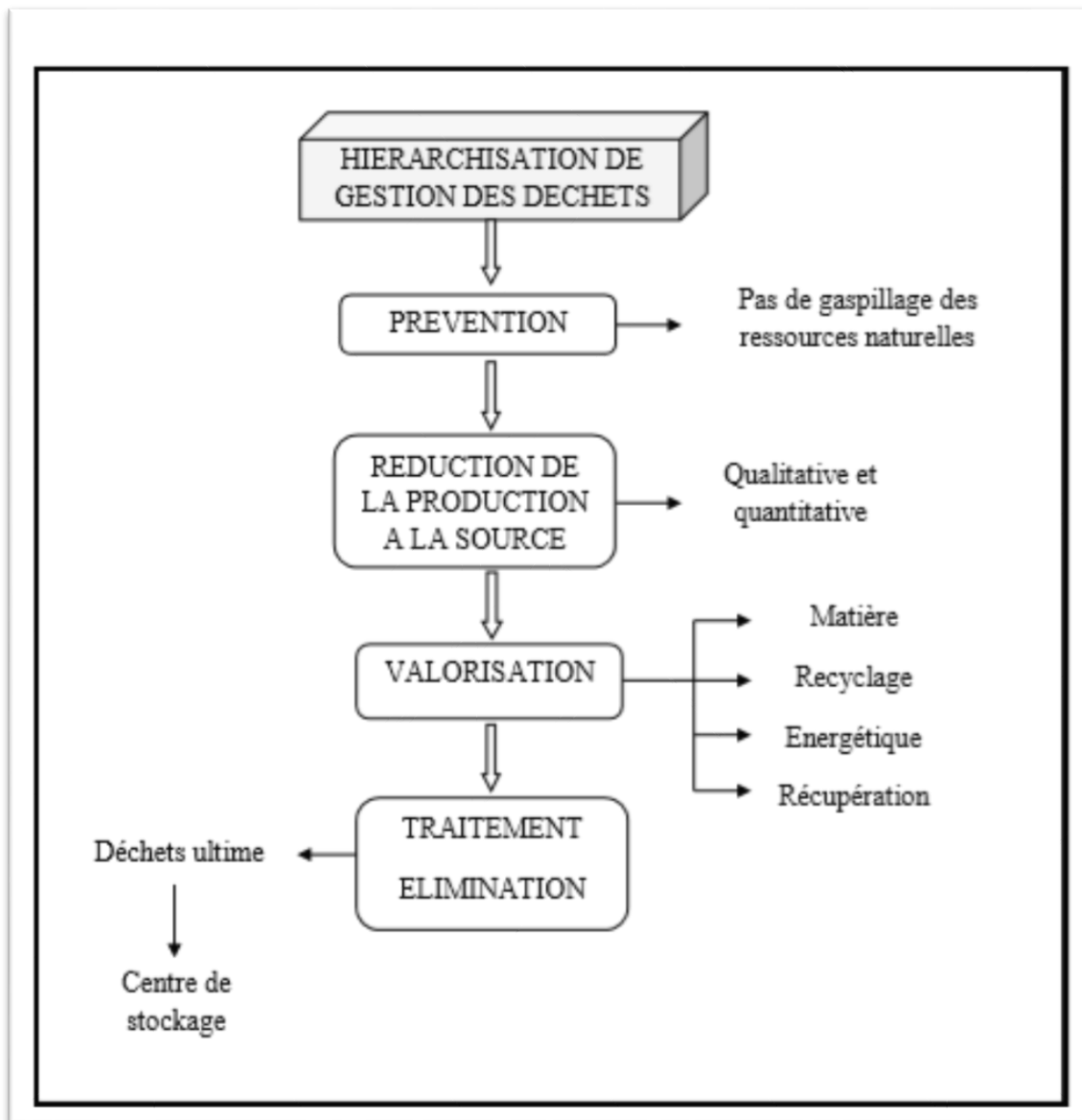


Figure29/CH1 : Hiérarchisation de la gestion des déchets (Source : ADDOU, 2009)

■ **Déchet de Marbre**

L’objectif de ce paragraphe est de donner quelques renseignements sur les déchets de Marbre .Vu leur emploi occasionnel, il y a peu des données sur ces matériaux et leur utilisation comme granulats du béton, malgré la consommation universel de leur matière première «Marbre» en grande masse, en conséquence, leur génération en quantités énormes.

En Algérie, selon les informations disponibles, la recherche sur ces matériaux est presque Négligeable

## ■ Marbre

Le marbre est une roche métamorphique dérivée du calcaire, existant dans une grande diversité de coloris, pouvant présenter des veines, ou marbrures (veines et coloris sont dus à des inclusions d'oxydes métalliques, le plus souvent).



**Figure30/CH1 : Marbre**

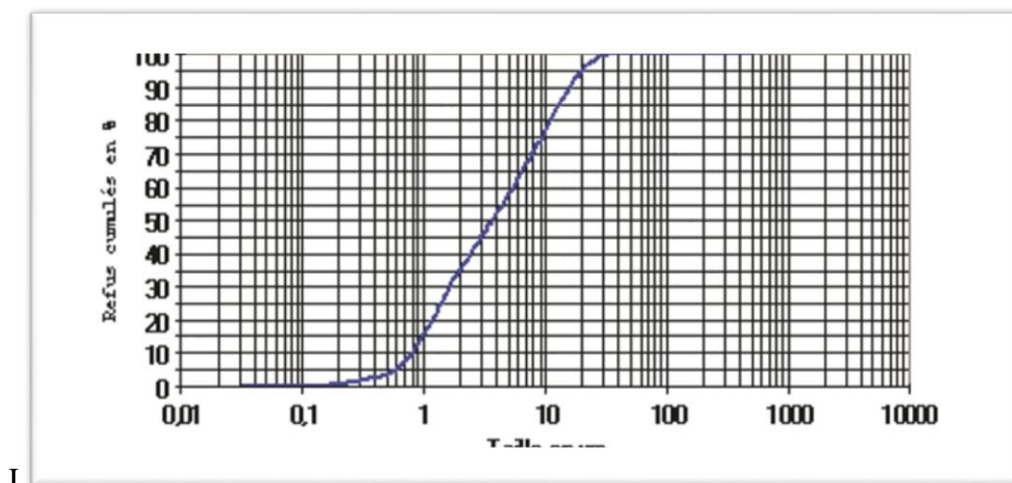
## ■ La poudre de marbre (PM)

La poudre de marbre utilisée est un déchet de marbreries. L'analyse chimique réalisée par fluorescence X (tableau 11) donnée en oxydes révèle un taux assez élevé de calcium (près de 40 % en oxyde), associée à de la magnésie et de silice en faibles teneurs.

**Tableau6/CH1 : Composition chimique de la poudre de marbre.**

<b>Éléments</b>	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>
<b>%</b>	39,431	1,245	0,382	0,174	2,554	0,184
<b>Éléments</b>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Na <sub>2</sub> O	ZnO	SrO	ZrO <sub>2</sub>	
<b>%</b>	0,005	0,096	0,021	0,020	0,005	

Les caractéristiques granulométriques sont mesurées à la granulométrie laser CILAS 1 180 et reportées en figure 41. La poudre de marbre a une surface spécifique Blaine de 12 000 cm<sup>2</sup>/g. Le point essentiel qui émerge des résultats granulométriques se résume par une grande finesse, en se basant sur le coefficient d'uniformité (Cu), apparaît granulométrie très serrée pour la poudre de marbre.



**Figure31/CH1** : Distribution granulométrique de la poudre de marbre

## ■ Propriétés des bétons des déchets de Marbre

Les déchets de Marbre utilisés pour la fabrication du béton et la performance de tel béton a été assez satisfaisante. Et l'usage de Marbre comme déchet est d'intérêt particulier.

Bien que largement usagé, il n'y avait pas d'études systématiques des différentes propriétés du béton du déchet de Marbre

Parmi les différentes propriétés, on peut citer :

- ❖ L'absorption déchet de Marbre est estimée entre 5 et 15 % par rapport au poids de la matière dans son état sec. C'était nécessaire, par conséquent, il faut saturer les déchets de Marbre avant tout mélange.
- ❖ L'ouvrabilité peut être appréciée à partir des mesures de consistance par affaissement au cône d'Abras ou par essai Ve Be.
- ❖ Il est nécessaire de procéder au maintien prolongé à l'état humide de tous les bétons de Marbre, pour empêcher le dessèchement des liants et la ségrégation de surface du béton.
- ❖ L'utilisation du déchet de Marbre peut produire un béton de structure de haute résistance avec une économie de poids allant jusqu'à 15 %.
- ❖ Le béton contenant de Marbre cuite comporte une résistance au feu beaucoup plus élevée.

## ■ Utilisations des bétons de déchets de Marbre

Les déchets de Marbre, surtout, ceux qu'on trouve en quantités énormes dans les tas de décombres de nos villes, ainsi que les incuits et surcuits de marbrerie, peuvent être concassés pour produire des granulats d'un béton léger:

- ❖ De structure pour semelles de fondation, pour parois de caves et éléments de construction

en béton armé d'un poids spécifique de 1600 à 2100 kg/ m<sup>3</sup>, d'une résistance à l'écrasement de 50 à 320 kg /cm<sup>2</sup>, présentant une élasticité remarquable à la pression et à la flexion composée, de faibles coefficients de retrait et des indices de conductibilité et de dilatation relativement bas.

❖ Le béton de déchet de marbre a déjà trouvé, il y a longtemps, son utilisation dans les revêtements de routes sur les ponts, suite de sa faible densité.

### ▪ **Avantage d'utilisation des déchets de marbre**

- ❖ Eviter la pollution d'environnements
- ❖ Une valeur économique
- ❖ Béton d'une forte résistance
- ❖ Béton économique

### **I.10. Conclusion**

Bien que les différentes caractéristiques des BHP offrent plusieurs avantages par rapport aux bétons usuels, il y a encore place à l'amélioration, les BHP, comme tous les autres



matériaux, ont encore des points faibles. En outre, il existe et il va toujours exister de nombreux cas où un béton de 20 à 30MPa sera le béton idéal pour répondre à des besoins particuliers : le développement des BHP n'éliminera pas l'utilisation des bétons usuels.

Du point de vue du matériau, un BHP est simplement un béton qui a une très faible porosité, cette dernière s'obtient en utilisant beaucoup moins d'eau de gâchage que dans les bétons usuels, de telle sorte que, dans la partie liante du béton, les particules de ciment et d'ajouts cimentaires sont plus rapprochées les unes des autres que dans un béton usuel.

Les propriétés mécaniques des BHP ne peuvent pas être déduites de la connaissance de la résistance à la compression comme c'est le cas pour les bétons usuels. En un sens, chaque BHP est unique, cette unicité provient de la composition du liant, du rapport eau/liant utilisé et des caractéristiques mécaniques des granulats, spécialement celles des gros granulats. Etant donné que les BHP agissent comme de véritables matériaux composites, il est normal que les caractéristiques de la pâte de ciment hydraté, de la zone de transition et des granulats influencent leurs propriétés mécaniques.

De nombreux progrès dans la compréhension des propriétés des BHP, et plus généralement dans celles du béton,

Le bon traitement et la bonne gestion des déchets permettent de limiter les impacts nuisibles sur les plans environnemental et sanitaire et d'offrir de nouvelles ressources renouvelables et durables qui contribuent dans le processus de construction de génie civil.

La valorisation des déchets de marbre, nous montre la possibilité d'utilisation de ces derniers (dits inertes) dans le domaine de génie civil,

Les déchets de marbre, peuvent être utilisés pour la fabrication du béton, par conséquent, pour être une solution de la réduction dans le poids mort de structure peut être désirable.

En général, les déchets de la marbre produisent des bétons d'une résistance acceptable, et peut être utilisé pour produire du béton de haute qualité.

Cependant, afin de valoriser ce type de déchets, d'apporter des améliorations aux caractéristiques des granulats à base de ces déchets et de connaître les performances extrêmes des bétons à base de ces granulats, des recommandations seront également données pour mieux apprécier et approfondir cette étude.

***Chapitre II : Les  
caractéristiques des  
matériaux et  
formulation des  
BHP***

## II.1. Introduction

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

Notre recherche a pour le but d'étudier l'option d'utiliser les déchets de marbre comme un remplacement d'un pourcentage du ciment dans le béton, avec des taux de substitutions de (5, 10,15)% . Puis on va mesurer la résistance dans chaque cas.

On a présenté d'une part l'identification des matériaux utilisés dans ce travail, aussi bien les matériaux ordinaires (sable, gravier, ciment, eau de gâchage...), que ceux recyclés (marbre)

La formulation du béton haute performance a été basée sur la méthode de « Dreux Gorisse »

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

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

Ce cheminement consiste à :

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

## II.3. Les caractéristiques de matières premières utilisées:

### ▪ Ciment

Le ciment utilisé dans cette formulation est un ciment Portland composé de type CPJ-CEM II/B-L 42,5N. De provenance de la SPA BISKRIA CIMENT.

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 :

**Tableau 1/CH2:** La résistance à la compression du CPA- CEM I.

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

#### II.4. Granulats

- **Gravier**

Tous les bétons ont été fabriqués avec du gravier concassé de calcaire dont le diamètre maximal (Dmax) 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.

**Figure1/CH2 :** le gravier utilisé

- **Analyse granulométrique :**

L'essai de l'analyse granulométrique est effectué selon les normes XP P18-545, NF EN933-1.

Il permet de déterminer les proportions massiques des passants cumulés, à travers les tamis de différents diamètres de maille, d'un échantillon de sable ou de gravillon. Les pourcentages de passant cumulé sont représentés sous la forme de courbe granulométriques dans la figure II.2 et Tableau4

Figure3 /CH2: Courbe granulométrique des graviers utilisés.

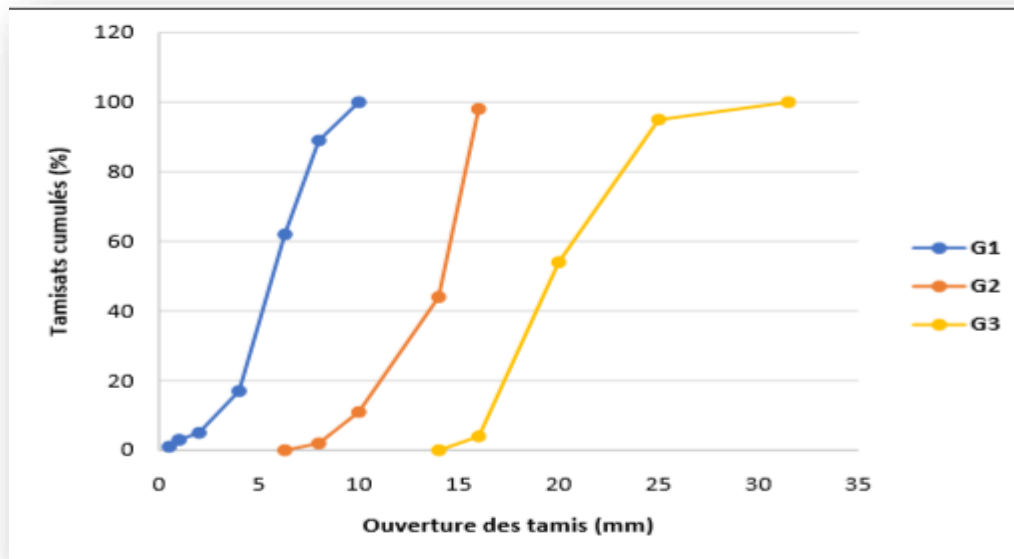


Figure 3/CH2 : Colonne des tamis

Tableau 2/CH2: Analyse granulométrique par tamisage des graviers utilisés.

Tami's (cm)	G1	G2	G3
31.5	-	-	100
25	-	-	100
20	-	-	065
016	-	099	008
12.5	-	084	000
010	100	052	000
008	098	017	000
06.3	088	005	000
004	031	000	000
002	008	000	000

**▪ Sable :**

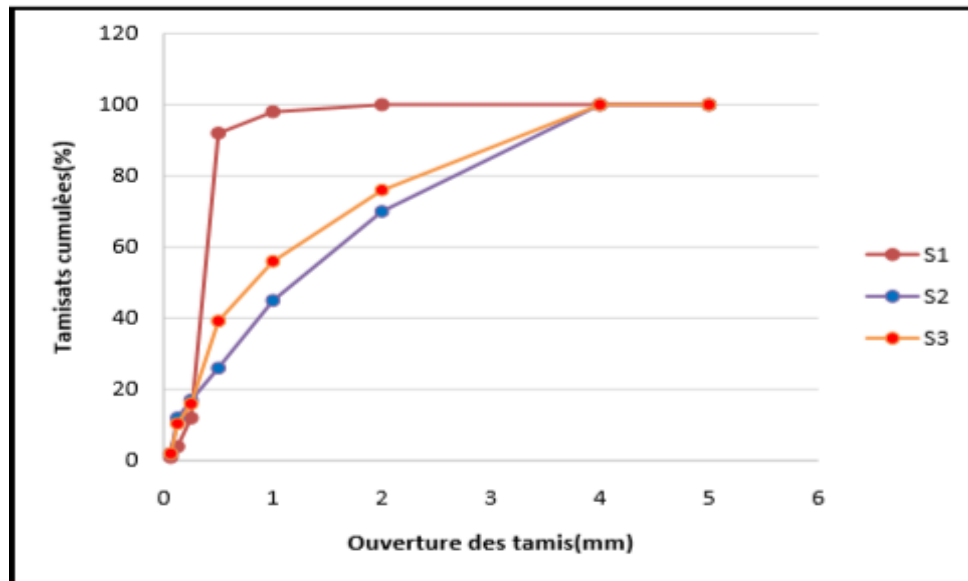
Dans cette étude, on a utilisé 2 séries du sable, un sable siliceux naturel (S1) de classe granulaire (0/1) avec un module de finesse  $MF_1=1.86$ , un sable de carrière (S2) de classe granulaire (0/3) avec un module de finesse  $MF_2=3.22$ , et un sable corrigée (S3) qui a été employé afin d'améliorer le module de finesse obtenue par le mélange de 50% du sable S1 et 50% du sable S2, avec un module de finesse  $MF_3=2.54$ . Les courbes granulométriques des sables utilisés pour tous les mélanges sont présentées dans la Figure II.5



**Figure4/CH2 : le sable utilisé**

**▪ Analyse granulométrique**

C'est la mesure de la distribution dimensionnelle des grains des granulats. 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



**Figure II.5.:** Courbes d'analyse granulométrique des sables utilisées

**Tableau 3/CH2 :** Analyse granulométrique par tamisage des sables utilisé

Tami's (cm)	S1	S2	S
004	-	100	100
002	-	072	100
001	100	045	072
0.25	16	019	019
0.125	003	012	008
0.063	092	010	005

▪ **Principe de l'analyse granulométrique**

L'analyse granulométrique a trois buts :

- ❖ Déterminer les dimensions des grains.
- ❖ Déterminer les proportions de grains de même dimension (% pondéral).
- ❖ En déduire le module de finesse.

▪ **Masses volumiques**

Les masses volumiques apparentes et absolues des différents granulats étudiés naturels ou recyclés sont mesurées d'après la norme NF P 18-554 et 555 [Normes AFNOR], les résultats sont résumés dans le Tableau II.6.

▪ **Module de finesse (NF P 18304)**

Le module de finesse d'un sable est égale au 1/100 de la somme des refus exprimés en pourcentage sur les différents tamis de la série suivante : 0.16 ; 0.315; 0.63 ; 1.25 ; 2.5 ; 5.

Le module de finesse d'un sable est un paramètre qui détermine la finesse du sable. Un sable grossier ( $2.8 < M_f < 3.2$ ) favorise l'obtention d'une bonne résistance mais risque d'entraîner une moins bonne maniabilité et une possible ségrégation, quant au sable fin ( $1.8 < M_f < 2.2$ ) il facilite la mise en œuvre du béton au détriment de la résistance.

Pour un béton à hautes performances, vu l'importante quantité de fines (ciment et ajout minéral), il est préférable d'utiliser un sable dont son module de finesse est compris entre 2.7 et 3.0

#### ▪ Absorption d'eau

On détermine un coefficient d'absorption qui est défini comme le rapport de l'augmentation de la masse de l'échantillon après immersion pendant 24 heures à 22°C à la masse sèche de l'échantillon conformément à la norme NF P 18-555.

#### ▪ Poudre de marbre blanche :

La poudre du marbre utilisée est le déchet des marbreries dues au découpage des pièces du marbre blanc. Les caractéristiques chimiques de cette poudre sont données dans le tableau

Tableau. 4: Composition chimique de la poudre de marbre.

Eléments	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Na <sub>2</sub> O	ZnO	SrO	ZrO <sub>2</sub>
%	39.43	1.24	0.382	0.174	2.55	0.18	0.005	0.096	0.021	0.002	0.005

Propriétés physiques

Mass volumique absolue = 2420 kg/m<sup>3</sup>

Surface spécifique = 6526 cm<sup>2</sup>/g



## II. 5. caractéristiques physiques et mécaniques des matériaux utilisés :

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

caractéristiques	Matériaux						Specification
	S1	S2	S1+S2	G1	G2	G3	
Masse Volumique absolue	2.651	0.735	-	2.70	2.705	2.724	-
Coefficient D'absorption	0.388	0.456	-	0.456	0.347	0.333	$\leq 2.5$
Coefficient D'aplatissement	-			17.56	12.23	6.33	$\leq 25$
Los Angeles	-			23.36			$\leq 30$
Micro Deval	-			9.31			$\leq 25$
Module finesse	1.87	3.24	2.56	-			

**Tableau 5/CH2:** Caractéristiques physiques et mécaniques des granulats utilisés

## II.6. Super plastifiant

Dans le cadre de notre étude, on a utilisé un super-plastifiant haut réducteur d'eau à base de poly carboxylates d'Ether et de dénomination commercial Granitex MEDAFLOW 30



**Figure 6/CH2 :** Super plastifiant (MEDAFLOW30)

### ▪ 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 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.

### ▪ L'eau de gâchage :

L'eau utilisée pour l'ensemble des essais est celle au laboratoire de génie civil qui répond aux critères d'acceptabilité des normes en vigueur, les résultats de l'analyse au laboratoire de génie civile de cette eau sont dans le tableau II.9.

**Tableau 6/CH2:** Composition de l'eau de gâchage (ml/l).

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

## II. 7. La méthode de formulation de l'université de Sherbrooke

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

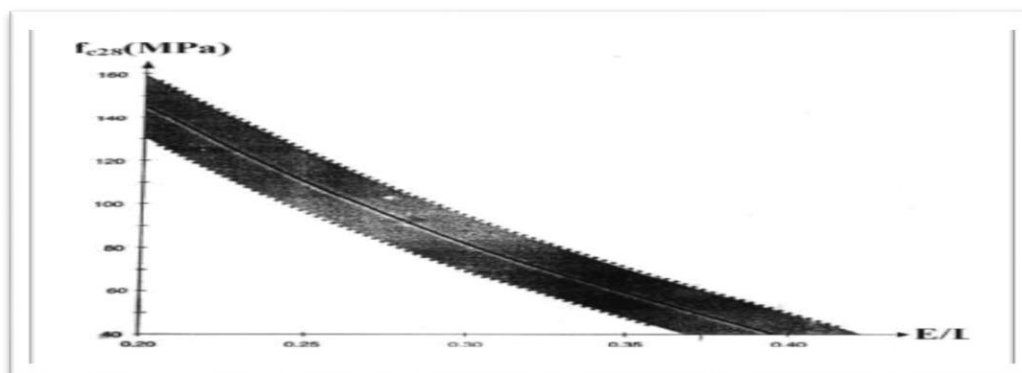
- ❖ Le rapport eau / liant.
- ❖ Le dosage en eau.
- ❖ Le dosage en super plastifiant.
- ❖ Le dosage en gros granulat.
- ❖ La teneur en air.



Figure7/CH2 : La méthode de formulation de l'université de Sherbrooke

#### ▪ Rapport eau/liant :

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



**Figure 8/CH2 :** Abaque de détermination du rapport E/L en fonction de la résistance [17].

▪ **Dosage en eau:**

La meilleure façon de trouver le bon rapport entre la quantité d'eau et la quantité de super plastifiant est d'utiliser un plan d'expérience.

La figure II.5 présente une approche simplifiée, basée sur le concept de point de saturation. Lorsque le point de saturation du super plastifiant n'est pas connu, on suggère de commencer avec une quantité d'eau de malaxage égale à 145 L/m<sup>3</sup> [17]

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

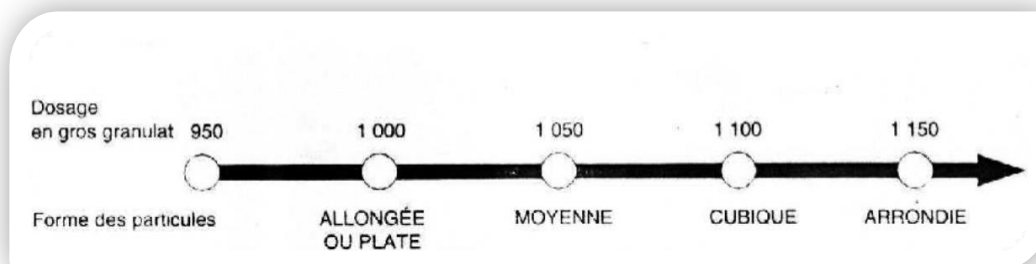
**Figure 9 /CH2:** Détermination du dosage en eau [17].

**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%.

▪ **Dosage en gros granulat:**

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



**Figure 10/CH2:** Dosage en gros granulat [17].

**▪ 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. 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.

**▪ Les formules du calcul :**

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

- ❖ **Le rapport E/C :** Reporter la valeur du rapport eau/liant telle que choisie dans la Figure 8/CH2
- ❖ **Le dosage en super plastifiant :** On prend la valeur de 1.5% du poids de ciment.
- ❖ **La quantité d'eau nécessaire :** Déduire la quantité d'eau nécessaire, selon le point de saturation montré dans Figure 9/CH2
- ❖ **Le dosage en liant :** D'après le rapport E/C et la quantité d'eau nécessaire on peut calculer la masse du liant, pour notre cas c'est le ciment CPA 42.5.
- ❖ **Le dosage en gros granulats :** Reporter la masse en gros granulat trouvée dans la Figure 10/CHIII
- ❖ **Les valeurs relatives au super plastifiant (Figure 11/CH2)**
- ❖ **Le volume de ciment :** On divise la masse du ciment sur densité absolue ( $l/m^3$ ).
- ❖ **Le volume en gros granulats :** Pour calculer le volume de gros granulats en divisant la masse du gros granulat (Figure) par sa densité absolue ( $l/m^3$ ).
- ❖ **La 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%.
- ❖ **La somme de tous les volumes :**
- ❖ C'est le total des volumes calculés précédemment; volume d'eau + volume du ciment + volume d'air + volume du solide dans le super plastifiant + volume de gros granulats.

❖ **Le volume de granulat fin :**

❖ Calculer le volume de granulat (en  $l/m^3$ ) en soustrayant de 1000 litres, le volume précédent.

❖ **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).

❖ **La masse volumique du béton :**

❖ On doit additionner tous les masses telles que, la masse d'eau, masse du ciment, masse de solide en SP, masse de gros granulat, masse de granulat fin ( $kg/m^3$ ).

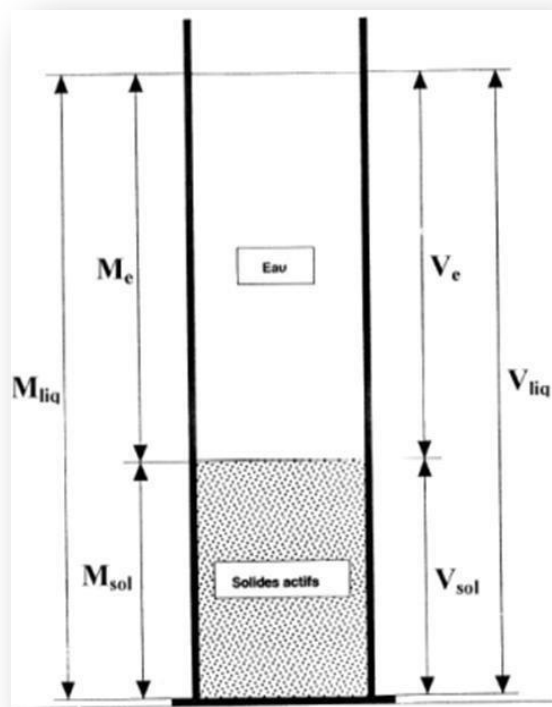
❖ **Les valeurs relatives au super plastifiant (Figure 12/CH2) :**

Figure 11/CH2: Représentation schématique d'un super plastifiant.

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

$$M_{sol} = \frac{CXD}{100}$$

Où :

C : La masse de liant.

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

- **Calculer le volume du super-plastifiant liquide Vliq (l/m<sup>3</sup>) :**

Le volume de super plastifiant liquide qui contient Msol se calcule de la façon suivant :

$$V_{liq} = \frac{M_{sol}}{S \times d_{sup}} \times 100$$

Msol: Masse des particules solides de super plastifiant.

dsup: Densité du super plastifiant.

S: Teneur en solides de super plastifiant.

$$M_{sol} = \frac{V_{liq} \times d_{sup}}{100}$$

- **Calculer le volume d'eau dans le super plastifiant Ve (l/m<sup>3</sup>) :**

$$V_e = \frac{V_{liq} \times d_{sup}}{100}$$

dsup: Densité du super plastifiant.

Vliq: Volume de super plastifiant liquide.

S:Teneur en solides de super-plastifiant

- **Calculer le volume des solides contenus dans le super-plastifiant (l/m<sup>3</sup>) :**

$$V_{sol} = V_{liq} - V_e$$

## II.8. 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 :

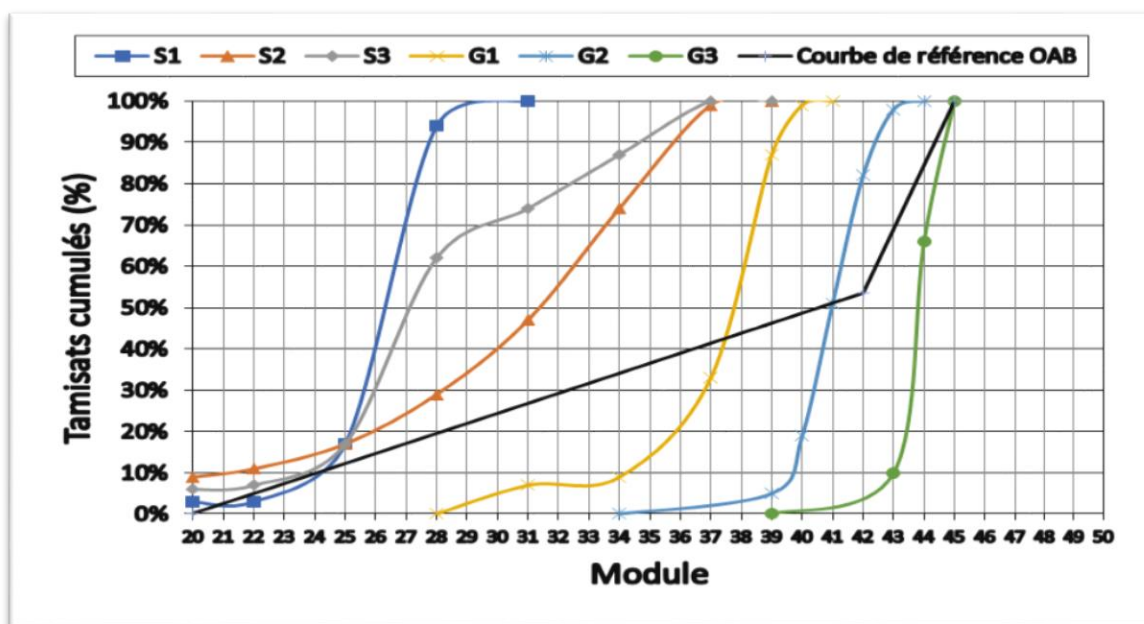


Figure 12/CH2 : Exemple d'une courbe de mélange OAB  
Par la méthode de DREUX-GORISSE.

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

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



Avec :

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

Y : est donné en pourcentage de passants

cumulés. En abscisse :

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

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

Correspondant à  $D_{max}$ . En ordonnée :

 **A est donné par la formule :**

$$Y_A = 50 - \sqrt{(D_{max})} + K'$$

Où

$$K' = K + K_s + K_p.$$

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

**Tableau 6/CH2 :** Valeurs de K en fonction du dosage en ciment, de la puissance de la

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

▪ **Correction supplémentaire  $K_s$  :**

La correction supplémentaire (sur  $K_p$ ) peut être effectuée en ajoutant la valeur  $K_s = (6 Mf - 15Mf)$  étant le module de finesse du sable qui peut varier de 2 à 3 avec une valeur optimale.

▪ **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 (Graphe) que les courbes granulométriques des granulats composants. On trace alors les lignes de partage entre chacun en joignant le point à 95% de la courbe granulaire du premier, au point à 5% de la courbe du granulats suivant, et ainsi de suite.

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

**Tableau 7/CH2 :** Pourcentage de chacun des granulats pour des différentes compositions du béton BHP

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

**BHP 25 sans  
ajoutes**

Matériaux	E/C		
	0,25	0,30	0,35
<b>Ciment CEM I CPA 42.5</b>	540	450	385,7
<b>Eau</b>	143,2	142,8	143
<b>Super plastifiant1%</b>	18	15	12,86
<b>G1 [kg/m<sup>3</sup>]</b>	455,9	455,9	455,9
<b>G2 [kg/m<sup>3</sup>]</b>	334,7	334,7	334,7
<b>G3 [kg/m<sup>3</sup>]</b>	274	274	274
<b>S1 [kg/m<sup>3</sup>]</b>	367,5	407,5	436,15
<b>S2 [kg/m<sup>3</sup>]</b>	367,5	407,5	436,15

**Tableau 8/CH2 : Composition des bétons (BHP) avec E/ C sans ajoutes**

**Pour E/C = 0.25 :**

<b>BHP 25</b>			
<b>Matériaux</b>	<b>E/L= 0.25</b>		
	<b>5% M</b>	<b>10% M</b>	<b>15% M</b>
<b>Ciment CEM I CPA 42.5</b>	513	500	459
<b>Marbrer</b>	27	54	81
<b>Eau</b>	143,2	143,2	143,2
<b>Super plastifiant1%</b>	18	18	18
<b>G1 [kg/m<sup>3</sup>]</b>	455,9	455,9	455,9
<b>G2 [kg/m<sup>3</sup>]</b>	334,7	334,7	334,7
<b>G3 [kg/m<sup>3</sup>]</b>	274	274	274
<b>S1 [kg/m<sup>3</sup>]</b>	367,5	367,5	367,5
<b>S2 [kg/m<sup>3</sup>]</b>	367,5	367,5	367,5

**Tableau 9/CH2:** Composition des bétons (BHP) avec E/C = 0.25

Pour E/C = 0.30 :

<b>BHP 25</b>			
<b>Matériaux</b>	<b>E/L= 0.30</b>		
	<b>5%M</b>	<b>10%M</b>	<b>15%M</b>
<b>Ciment CEM I CPA 42.5</b>	427,5	405	382,5
<b>Marbrer</b>	22,5	45	67,5
<b>Eau</b>	142,8	142,8	142,8
<b>Super plastifiant1%</b>	15	15	15
<b>G1 [kg/m<sup>3</sup>]</b>	455,9	455,9	455,9
<b>G2 [kg/m<sup>3</sup>]</b>	334,7	334,7	334,7
<b>G3 [kg/m<sup>3</sup>]</b>	274	274	274
<b>S1 [kg/m<sup>3</sup>]</b>	407,5	407,5	407,5
<b>S2 [kg/m<sup>3</sup>]</b>	407,5	407,5	407,5

**Tableau 10/CH2:** Composition des bétons (BHP) avec E/C = 0.30

Pour  $E/C = 0.35$  :

<b>BHP 25</b>			
<b>Matériaux</b>	<b>E/C= 0.35</b>		
	<b>5%M</b>	<b>10%M</b>	<b>15%M</b>
<b>Ciment CEM I CPA 42.5</b>	366 ,42	347,13	327,85
<b>Marbrer</b>	19,28	38,57	57,85
<b>Eau</b>	143	143	143
<b>Super plastifiant1%</b>	12,86	12,86	12,86
<b>G1 [kg/m<sup>3</sup>]</b>	455,9	455,9	455,9
<b>G2 [kg/m<sup>3</sup>]</b>	334,7	334,7	334,7
<b>G3 [kg/m<sup>3</sup>]</b>	274	274	274
<b>S1 [kg/m<sup>3</sup>]</b>	407,5	407,5	407,5
<b>S2 [kg/m<sup>3</sup>]</b>	436,15	436,15	436,15

**Tableau 11/CH2:** Composition des bétons (BHP) avec  $E/C = 0.35$

#### ▪ Malaxage du béton

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 :

Verser les constituants dans un bac :

- ❖ D'abord les sables après les gravillons puis le ciment.
- ❖ Malaxer à sec le mélange.
- ❖ Ajouter l'eau et le super plastifiant et malaxer le tous jusqu' avoir un béton bien malaxage.



**Figure13 /CH2 : Malaxage du béton**

▪ **Remplissage et vibration**

. 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.22),



**Figure14, 15/CH2 : Préparation des moules avant le remplissage.**



**Figure16/CH2 : Remplissage et vibration**

- **Forme des éprouvettes**

Dans les essais réalisés pour l'étude des bétons, un seul type d'éprouvette (Figure II.19 20) a été utilisé (cubes 15×15×15 cm)



Figure17 ,18 /CH2 : Forme des éprouvettes

- **Conservation des éprouvettes**



Figure19/CH2 : Conservation des éprouvettes

### II.8. Essai de ramollissement

✚ Dans cet essai on va mesurer le coefficient de ramollissement :

$$Kram = R_{sat} / R_{sec}$$

- ❖ 02 éprouvettes dans l'eau à 28j
- ❖ 02 éprouvettes à l'air à 28 jours





**Figure20/CH2** : 02 éprouvettes à l'aire à 28 jours

- ❖ **R<sub>sat</sub>** : résistance à la compression saturée
- ❖ **R<sub>sec</sub>** : résistance à la compression sèche

### II.9. Essai d'absorption d'eau

- ✚ Le bute d'essai est de calculer le coefficient d'absorption de BHP
- ✚ Donc on va mettre 02 éprouvettes dans l'eau 28J
- ✚ 01eprouvette dans le four 24H avant l'essai à 40°



**Figure21 /CH2** : Le four

- **W<sub>m</sub>** =  $(M_{sat} - M_{sec}) / M_{sec} 100\%$ .
- **W<sub>m</sub>** : le coefficient d'absorption.
- **M<sub>sat</sub>** : la masse d'éprouvette saturée.
- **M<sub>sec</sub>** : la masse d'éprouvette sèche.

### II.10. Conclusion

Ce chapitre a pour objectif de caractériser les bétons à hautes performances, après avoir identifié et caractérisé tous les matériaux de base utilisés. Les courbes granulométriques de toutes les classes granulaires sont présentées.

La méthode de formulation a été développée et le calcul des proportions des constituants de notre programme expérimental étant fait. Le détail des différentes formulations a été présenté dans cette partie pour obtenir les différentes valeurs des caractéristiques physiques, chimiques et mécaniques qui permettront d'optimiser la formulation du béton que nous allons utiliser pour l'étude de son comportement.

*Chapitre 3 :*  
*Résultats et*  
*discussions*

### III.1. Introduction

On présente dans ce chapitre les différents résultats du comportement à l'état frais et à l'état durci des différents mélanges réalisés au laboratoire.

### 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 :

- ❖ Préparer des gâchés pour confectionner 90 séries d'éprouvettes cubiques (15×15×15) cm<sup>3</sup>.
- ❖ La composition a été déterminée par la méthode de formulation de l'université de Sherbrooke.
- ❖ Les essais étant exécutés à : 7j, 14 j, et 28 jours.
- ❖ Les propriétés étudiées : l'affaissement, et la résistance à la compression Il fallait

#### III.3.1. Essai au cône d'Abrams (mesure d'ouvrabilité)

##### III.3.1.1. Définition

L'essai au cône d'Abrams est un essai réalisé sur le béton de ciment frais peu fluide pour déterminer sa consistance.

##### III.3.1.2. Principe de l'essai

Il s'agit de constater l'affaissement d'un cône de béton sous l'effet de son propre poids. Plus cet affaissement sera grand et plus le béton sera réputé fluide.



Figure1, 2/CH3 : L'essai D'écoulement

Les valeurs d'écoulement mesurées des bétons étudiés sont présentées dans les tableaux (1 .2.3.4) suivants (les résultats sans en cm)

Tableau III.1 : Résultats d'essai d'écoulement des différents bétons étudiés.

<b>BHP 25 sans ajoutés</b>			
<b>Matériaux</b>	<b>E/C</b>		
	<b>0,25</b>	<b>0,30</b>	<b>0,35</b>
<b>écoulement</b>	22,5	21	21,5

Tableau III.2 : Résultats d'essai d'écoulement des différents bétons étudiés.

<b>BHP 25</b>			
<b>Matériaux</b>	<b>E/C=0.25</b>		
	<b>5%M</b>	<b>10%M</b>	<b>15%M</b>
<b>écoulement</b>	22	21	21

Tableau III. 4. Résultats d'essai d'écoulement des différents bétons étudiés.

<b>BHP 25</b>			
<b>Matériaux</b>	<b>E/C=0.30</b>		
	<b>5%M</b>	<b>10%M</b>	<b>15%M</b>
<b>écoulement</b>	21	22	22

Tableau III. 4. Résultats d'essai d'écoulement des différents bétons étudiés

<b>BHP 25</b>			
<b>Matériaux</b>	<b>E/C=0.35</b>		
	<b>5%M</b>	<b>10%M</b>	<b>15%M</b>
<b>écoulement</b>	21	22	22

### III.3.1.3. Commentaire

Après analyse des différents résultats de l'affaissement, on peut conclure que:

- A) Si on diminue le dosage du super-plastifiant, l'écoulement du béton augmente, lorsqu'on augmente le rapport E/C on aura une diminution du dosage en ciment et augmentation en eau ce qui produit une augmentation de l'affaissement.
- B) Les BHP à un rapport E/C diminué sont légèrement maniabilité aux premières mesures d'affaissement par contre on voit la diminution d'ouvrabilité.
- C) Pour un même rapport (E/C) l'affaissement est différent.
- D) Les super-plastifiants sont des réducteurs d'eau à haute efficacité. Leur mode d'action principale est d'augmenter la maniabilité des bétons haute performance par le phénomène de dispersion.
- E) Les BHP sont des bétons fluides avec un E/C très bas. Les valeurs d'affaissement au cône sont supérieures à 20 cm dans la plupart des cas pour les différentes séries.

### III.4. Essai réalisé à l'état durci

#### III.4.1. Essai de compression (NF P 18-406)

La résistance mécanique en compression est le repère principal pour toute caractérisation de la résistance mécanique et de la qualité des bétons.

Les échantillons utilisés pour déterminer la résistance mécanique en compression des différents bétons étudiés sont des éprouvettes cubiques de dimension 15x15x15cm<sup>3</sup>.

Pour chaque type de béton et à chaque échéance d'essai, la résistance en compression obtenue est la moyenne issue de trois éprouvettes, la presse utilisée est d'une capacité maximale de 2000kN, asservie en force avec une vitesse de chargement de 2.4 kN/Sec (Figure III.3).

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

La compression est dite simple et elle est appliquée à l'axe des éprouvettes.

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

Où :

P : charge de rupture en N.

S : section transversale de l'éprouvette en mm<sup>2</sup>

#### III.4.2. Préparation et positionnement des éprouvettes

Avant de passer à l'action d'écrasement, il faut tenir compte des recommandations suivantes :

- ❖ Essuyer toute humidité excessive de la surface de l'éprouvette avant de la positionner dans la machine d'essai.
- ❖ Tous les plateaux de la machine d'essai doivent être essuyés, et les corps étrangers situés à surface de l'éprouvette, doivent être retirés.
- ❖ Centrer l'éprouvette sur le plateau.



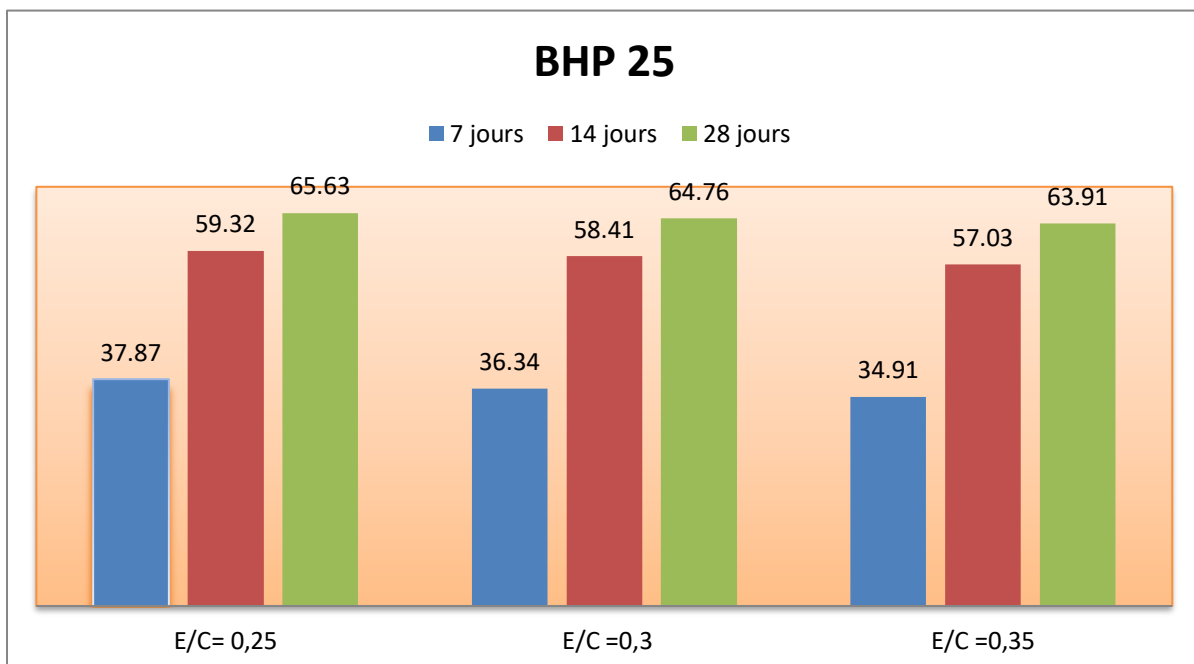
Figure3, 4/CH3 : l'essai compression



**Figure3/CH3 :** Les résultats d'essais de compression

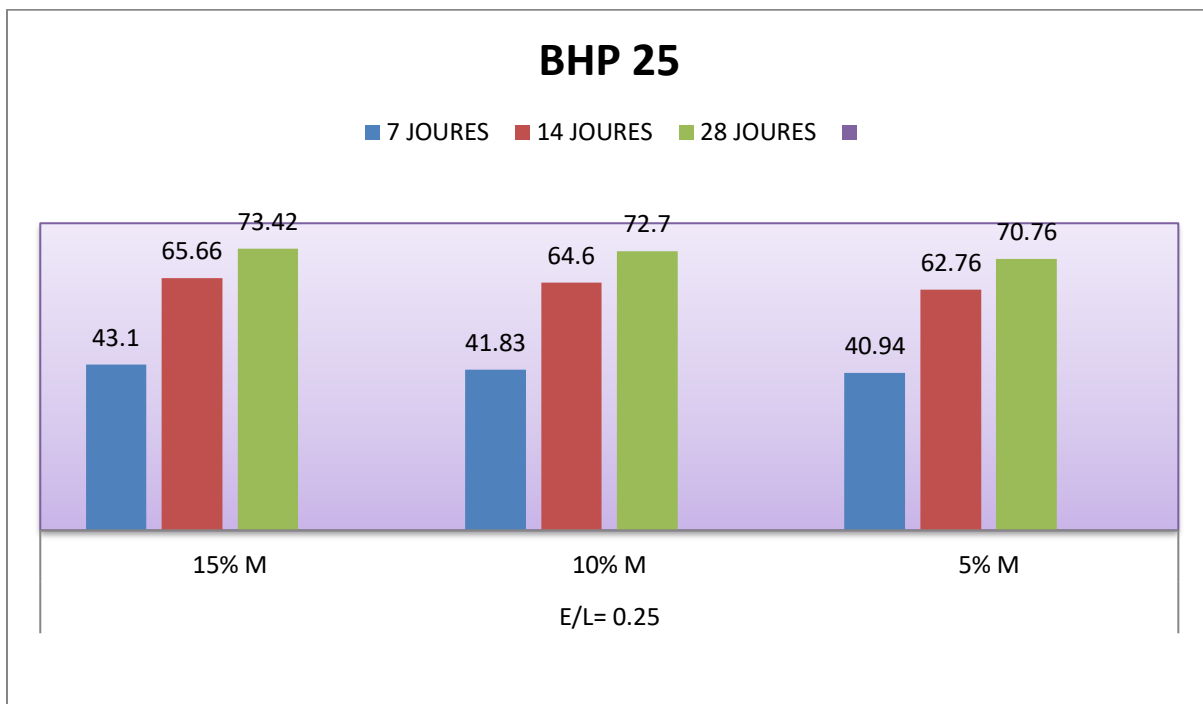
### III.5.Résultats de l'essai :

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 les figures suivant:

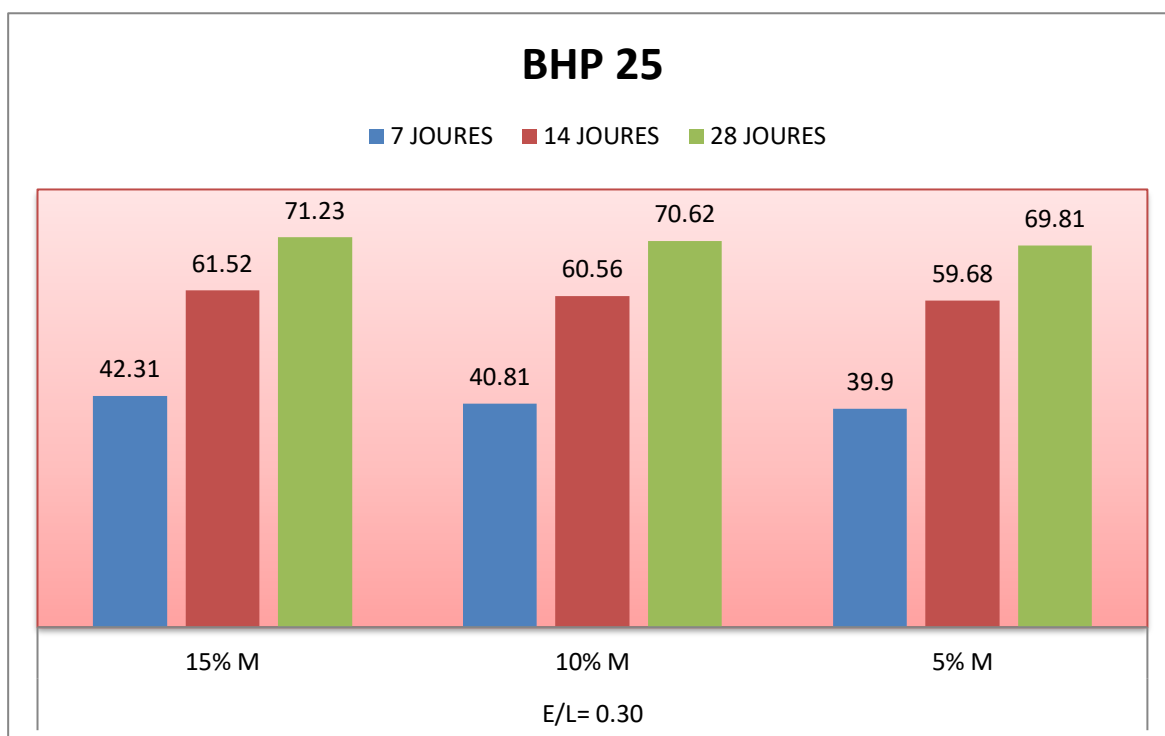


**Figure 04/CH03 :** Résistance à la compression à 7j, 14j et 28j/BHP sans ajoutes





**Figure 05/CH03** : Résistance à la compression à 7j, 14j et 28j/BHP avec ajoutes



**Figure 06/CH03** : Résistance à la compression à 7j, 14j et 28j/BHP avec ajoutes

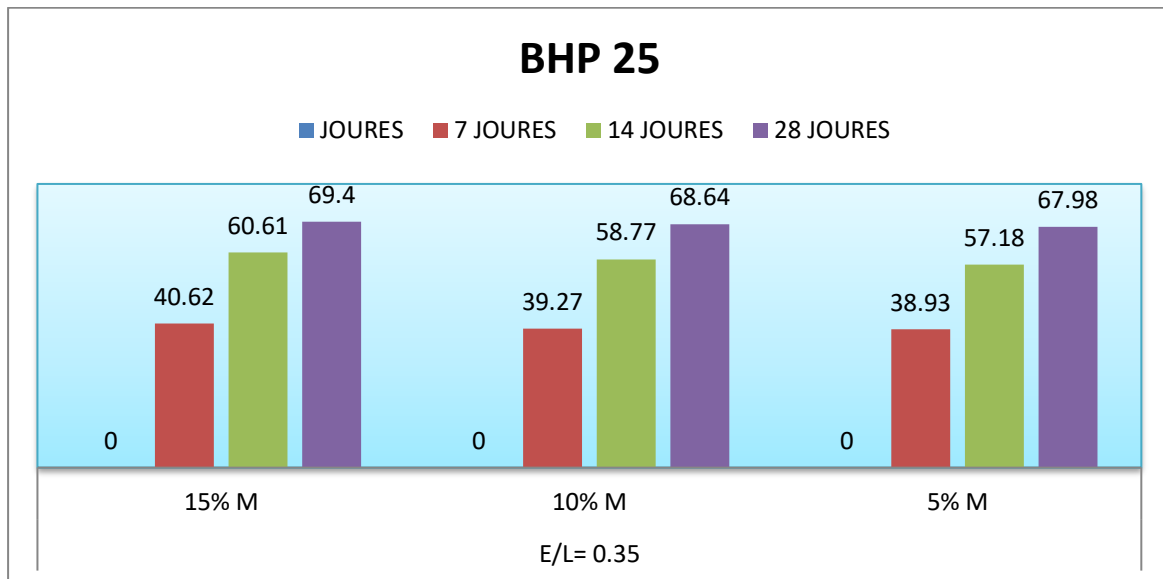


Figure 07/CH03 : Résistance à la compression à 7j, 14j et 28j/BHP avec ajoutes

### III.6. Résultats d'essai de ramollissement

$$K_{ram} = 71,12 \div 72,45 = 0,98$$

### III.7. Résultats d'Essai d'absorption d'eau pour le béton

$$W_m = (6,875 - 6,850) / 6,850 = 0,36\%$$

### III.8. Résultats et discussions

Dans ce travail, nous avons étudié la résistance du béton à la compression pour les différents cas en fonction de la variation du rapport E/C.

- ❖ Au premier cas (série01) : E/C (0.25, 0.30, 0.35) avec l'utilisation du super plastifiant et sans ajoutes
- ❖ Au deuxième cas (série02) : E/C (0.25) avec l'utilisation du super plastifiant et le déchet de marbre
- ❖ Au troisième cas (série 03) : E/C (0.3) avec l'utilisation du super plastifiant et le déchet de marbre
- ❖ Au quatrième cas (série04) : E/C (0.35) avec l'utilisation du super plastifiant et le déchet de marbre

▪ **D'après les résultats présentés sur les histogrammes nous constatons que :**

- ❖ Une résistance importante et augmentation rapide pendant les sept jours premiers qui atteint environ 75 % de la résistance totale.
- ❖ Une augmentation sensible de la résistance mécanique des bétons étudiés en fonction du dosage en ciment c'est-à-dire la résistance à la compression augmente en élevant le dosage en ciment. De très bonnes performances à jeune âge.
- ❖ La résistance à la compression démunie lorsque le rapport E/C est plus grand.
- ❖ Pour un rapport E/C = (0.25) une résistance importante par rapport E/C = (0.30 et 0.35).
- ❖ Après 28 jours une augmentation moyenne de la résistance qui atteint environ 30 % de la résistance de 7 jours.

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

❖ **Série 01 : sans ajoutes**

- **65,63MPa** pour un rapport E/C = 0.25.
- **64,76MPa** pour un rapport E/C = 0.3.
- **63,91MPa** pour un rapport E/C = 0.35.

❖ **Série 02 : Béton BHP 0,25 avec le déchet de marbre**

- **73,42MPa** pour un rapport E/C = 0.25.
- **72.70MPa** avec un rapport E/C = 0.3
- **70,76MPa** un rapport E/C = 0.35

❖ **Série 03 : Béton BHP 0,3 avec le déchet de marbre**

- **71.23MPa** pour un rapport E/C = 0.25.
- **70.62MPa** avec un rapport E/C = 0.3.
- **69,81MPa** un rapport E/C = 0.35.

❖ **Série 04 : Béton BHP 0,35 avec le déchet de marbre**

- **69 ,40MPa** pour un rapport E/C = 0.25.

- **68,64MPa** avec un rapport E/C = 0.3.
- **67,98MPa** un rapport E/C = 0.35.

Cette diminution de résistance est expliquée par plusieurs facteurs : • la qualité du sable et de gravier. • l'utilisation du CPJ au lieu du CPA.

Une augmentation des résistances entre 7 et 28 jours, pour tous les bétons. Cela est dû à l'hydratation de la pâte liante.

❖ 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.

❖ on constate une évolution de la résistance à la compression en fonction du temps. On a pu avoir le meilleur résultat qui est de **73,42MPa** à l'âge de 28 jours, avec un pourcentage de 1% de super plastifiant et 15% du déchet de marbre correspond à un rapport E/C de 0.25.

❖ 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.

❖ 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.

❖ on remarque une augmentation sensible de la résistance mécanique des échantillons élaborés avec l'ajout du déchet de marbre par rapport à l'échantillon sans du déchet de marbre, de résistance caractéristique à 28 jours.

❖ La résistance à la compression du béton avec un pourcentage de 1% du super plastifiant est inférieure à celle des bétons avec un pourcentage de 1% du super plastifiant et 15 % du déchet de marbre pour tous les différents bétons étudiés.

❖ Le BHP a une bonne résistance de l'eau

### III.9. CONCLUSION

Dans le présent travail on a utilisé le déchet de marbre comme addition cimentaire dans le béton à haute performance avec des taux de substitution ciment de 5%, 10% et de 15%

Dans ce dernier chapitre, les résultats obtenus nous ont permis d'éclaircir les évolutions obtenues des résistances à la compression en présence de différents granulats fins. 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.
- ❖ La résistance à la compression est une fonction croissante de tous les bétons hauts à performances étudiés, elle augmente régulièrement avec l'âge du béton.
- ❖ Les valeurs d'écoulement au cône sont supérieures à 20 cm dans tout les cas.
- ❖ L'effet du rapport E/C et la distribution de la qualité et la taille des grains de granulats fins naturels dans les formulations des bétons étudiés sur la résistance à la compression est remarquable.
- ❖ L'utilisation d'adjuvant réducteur d'eau dans la confection des bétons à hautes performances d'augmenter la résistance mécanique.
- ❖ La meilleure formulation est celle de 1% super-plastifiant et 15% du déchet de marbre et avec un E/C = 0.25.
- ❖ Le déchet de marbre permet d'obtenir des mélanges avec une cohésion très forte avec très peu de ressuage.

## CONCLUSION GENERALE

---

### CONCLUSION GENERALE

L'étude des caractéristiques des bétons à haute performance à base de déchet de marbre ainsi que l'analyse des résultats de la recherche bibliographique, nous ont permis de tirer les conclusions suivantes :

- ❖ On a pu avoir le meilleur résultat qui est de **73,42MPa** à l'âge de 28 jours, avec un pourcentage de 1% de super plastifiant et 15% du déchet de marbre correspond à un rapport E/C de 0.25.
- ❖ Il est possible de valoriser les déchets de marbre pour la fabrication du béton,
- ❖ Les déchets de marbre produisent en général, des bétons dont la résistance est acceptable.
- ❖ La résistance du béton est fonction de la densité des déchets de marbre, Plus la densité est importante plus la résistance du béton est grande.
- ❖ Les bétons à base de déchets de marbre confectionnés, présentent une homogénéité convenable.
- ❖ Les bétons à base de déchets de marbre obtenus sont des bétons légers.
- ❖ La porosité du béton augmente (compacité diminue) par substitution des déchets.

Enfin, la possibilité d'utiliser le déchet de marbre dans le domaine de génie civil pour la confection des bétons, ont donné des résultats satisfaisants dans ce travail de valoriser les déchets de marbre, il faut apporter des améliorations aux caractéristiques de ces derniers et de connaître leur performances extrêmes pour mieux apprécier et approfondir cette étude.

# Les Références

1. [http://www.ciment.wikibis.com/beton\\_hautes\\_performances.php](http://www.ciment.wikibis.com/beton_hautes_performances.php).
2. Adam M et Neville « Propriétés des bétons ». Edition Eyrolles, Paris, 2000
3. Boutiba Aldjia. Accélération du durcissement par énergies renouvelables du béton frais et caractérisation du béton durci, Mémoire de magistère, Université de M'Hamed Bagarra, Boumerdes.
4. Dreux G., « Nouveau guide du béton », E. Eyrolles, Paris, 1998
5. Aïtcin P-C., « Bétons haute performance », édition Eyrolles, 2001, ISBN 2-212- 01323-X
6. Auperin M., Richard F. et al, « Retrait et fluage des bétons à hautes performances ». Annales.I.T.B.T.P, n° 474, mai 1989.
7. Torrent R-J et Jornet A., « The quality of the concrete of Löw-medium and High straight concretes », 1991, ACI SP-126, p. 1147-1161.
8. ASTM C 1202-91, « Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration », Annual book of ASTM standards, Section 4.
9. Les bétons à haute performance, Chapitre V, 4p. Disponible sur: <http://www.la.refer.org/materiaux/chapitre-six-un.html>.
10. Le Roy R., « déformations instantanées et différées des bétons à hautes performances », Le béton hydraulique, LCPC, Paris, 1982, p. 343.
11. De Larrard F. et Malier Y., « Propriétés constructives des bétons à très hautes performances: de la microstructure à la macrostructure », les bétons à performances : caractérisation, durabilité, application, 2e édition par Y. Malier, presse de l'ENPC, Paris, 1992, p. 129-156.
12. De Larrard F., « Prévision des résistances en compression des bétons à hautes performances aux fumées de silice ou une nouvelle jeunesse pour la loi de Féret », Annales I.T.B.T.P, n° 483, mai-1990.

13. Pedeches J-M., « Béton à hautes et très hautes performances : propriétés mécaniques et retrait. Aide à la formulation », Annales I.T.B.T.P, n° 525, série bétons 311, p. 1-41, 1994.
14. BAEL 91, « Règles techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions en béton armé suivant les états limites », Bulletin officiel, fascicule n° 62, Titre 1, section I du CCTG.
15. Regourd M., « Hydratation du ciment Portland, dans le béton hydraulique », édité par baron J. Et Saute Rey R., 1982, Presses de l'école nationale des ponts chaussées, ISBN 2-85978-033-5, p. 193-221.
16. CIM béton. «Les bétons : formulation fabrication mise en œuvre». Tome2, 134p
- 17.19 Les bétons à haute performance, Chapitre V, 4p. Disponible sur:  
<http://www.la.refer.org/materiaux/chapitre-six-un.html>
18. S. Hadri., Le passage d'un Béton à Haute Performance à un Béton Auto plaçant Haute Performance, Mémoire de Magister, Université de Guelma, Algérie, 119 Pages, 2012.
19. P.C Aitcin., Béton à haute performance, Édition Eyrolles ISBN 2-212- 01323-X, Paris, France, 660p, janvier 2001.
20. Centre d'information sur le ciment et ses applications, (2013). Les bétons : formulation, fabrication et mise en œuvre, Paris.
21. H. Alioua., Formulation et caractérisation des bétons à hautes performance, Wilaya de Jijel, Mémoire de Fin d'Etudes, Master, Université Mohammed Seddik Ben Yahia de Jijel, Algérie, 62 Pages, Juin 2018
22. Y. Tanaka, A. Ohta and T. Sugiyama, "Poly carboxylate-base d avance d super plasticiens for High performance concrète, " in International Symposium on the rôle of ad mixture in High performance concrète, Edite by J-G. Cabrera and R.Rivera Villareal, Rilem, Monterrey, Mexico, pp. 135-140, March 21-26 1999.



- 23.4eme séminaire sur les technologies du béton: « le béton : durabilité, solutions et innovation », Édition Lavoisier 2007.
- 24.Duval. R et Kadr E.H I., « Influence of silicate fume on the workability and the compressive strength of High-performance concretes », Cernent and Concrete Research, Vol.28n°4, April 1998, pp 533-547.
- 25.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.
- 26.<https://www.infociments.fr/betons/adjuvants.pdf>.
- 27.Amouri Chahinez, Contribution à l'étude de l'influence des différents ajouts sur les propriétés des matrices cimentaires (caractérisation, performances, durabilité), Thèse de doctorat, Université de Mentouri, Constantine, 2009.
- 28.Les déchets : les classer pour mieux les connaître, les réduire pour mieux les maîtriser, Disponible sur [http://www.eduquer-au-developpement-durable.com/wpcontent/uploads/2011/04/Fiche\\_enseignant\\_1\\_petite\\_histoire\\_dechets.pdf](http://www.eduquer-au-developpement-durable.com/wpcontent/uploads/2011/04/Fiche_enseignant_1_petite_histoire_dechets.pdf).
- 29.Rapport sur l'Etat de l'Environnement du Maroc. Chapitre IV : Milieux Humains Déchets. Disponible sur : <http://www.minenv.gov.ma/PDFs/REEM/Dechets.pdf.p221-235>.
- 30.Boussaoui. W. : « Valorisation des sous-produits Caractérisation de bétons à base des granulats issus de recyclage des matériaux de construction ». Master en génie civil Option : Structures et Matériaux .Constantine : Université Mentouri 2010-2011.