



Mémoire de fin d'études

PRESENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION DU
DIPLOME DE : (Master)

Filière : Génie Civil
Option : Matériaux

THÈME:

*Etude Des Caractéristiques Physico-mécaniques d'un BHP à base
d'un sable préparé.*

Préparé par :
Ben Yaiche Taous
Dellidj Yasmine

Encadreur : Bouglada Med Sallah
Co - Encadreur : Noui Ammar

Soutenu le : 21 Juin 2016

Devant le jury :

Président : Achuore Yacine
Examineur : Logzit Nacer
Examineur : Loumachi Lazher

MAA Université de BBA
MAA Université de BBA
MAA Université de BBA

Année Universitaire 2015-2016

REMERCEMENTS

*Au terme de ce travail, nous tiens à remercions "**ALLAH**" le tout puissant qui nous a donné la force et la patience pour réaliser ce présent travail comme Il devrait. Nous voudrions remercier **Nos parents** qui nous toujours encouragés et soutenu durant toute la durée de nos études.*

*Nous adressons nos profonds remerciements à notre encadreur de mémoire **Mr BOUGLADA** qui m'a proposé ce thème et m'a initié dans cette voie de recherche pour avoir accepté nous encadrer, pour ses directions et ses conseils avisés.*

*Nos remerciements vont également **Mr NOUI .A S** qu'il 'avoir accepté de participer comme Co-encadreur dans ce travail et ses orientations.*

*Nous voudrions remercions l'ensemble de notre jury de mémoire, qui a bien voulu examiner ce travail : **LOGZIT. N _ LOUMACHI .L***

*Président : **ACHOUR .Y** et Tous les enseignements de : Génie Civil.*

Enfin, Nos remerciements l'ensemble des personnes ayant, contribué de loin ou du près au bon déroulement de mes travaux.



Merci à tous !



Dédicace

Je dédie ce modeste travail en signe de respect

*À mes très chers parents qui n'ont jamais cessé d'allumer mon chemin
par leurs amour et prières et leurs sacrifices et leurs encouragements.*

À mes grandes mères et mes grands pères

À ma petite belle sœur sabi et mes chers frères hicham, yacine, redha

À ma cher grande famille, ben yaiche, mezhoud,

*À tous mes amies proches yasmine, sihem, salema, bouchra, sara, amel,
yasmina, sabrina, rezkia,*

*À tous mes amis abdarrahman, ammar, atheman, mouhamed, hakime,
souhil et tous mes collègues sans exception*

*Et pour tout les gens qui me connais et tous ceux que
j'aime et qui m'aiment.*

Taous





Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

À mes très chers parents,

*A' mon grand père 'papa hadj', ma grande mère 'mama hadja 'et mes
grands pères et mes grands mère*

À mes chers frères et sœurs,

marwa, khaoula, Mohamed, Yacine, Abdrrahman

A mon marie

À ma cher grande famille, Dllidj, Guedoudj,

*À tous mes amis proches Taous, hadjer, rania, hadjer, manel, selma
,sihem, bouchera, chaima, ismahan ,sihem ou loin,*

A tous ma promos et de génie civil.

*à tous ceux qui sont chers, et qu'ils trouvent leur place
dans mon coeur.*

yasmine



Résumé

Résumé

Le BHP est de plus en plus utilisé dans les nouvelles réalisations architecturales (gratte-ciel, ouvrage d'Art, pont et autres..) pour des raisons économique ; esthétique et technique.

Les travaux effectués dans le cadre de cette étude consistent à confectionner un béton de haute performance (BHP) en utilisant les matériaux locaux. Trois types de sable sont prévus dans la présente expérimentation dont deux sable sont préparés par addition des ajouts en substitution des fraction fines du sable (sable contenant une pouzzolane naturel , sable contenant un laitier de hauts fourneaux) et un troisième type sans ajouts servant comme témoin (sable témoin) , à base de ces trois sable des bétons haute performance (BHP) Sont formulés en utilisant un ciment avec déchets de verre introduit par substitution avec deux variante de dosage soit 400 et 500 kg/m³, tout en visant l'évaluation de l'effet de ces ajouts (pouzzolane, laitier) et les déchets de verre sur le comportement physico-mécanique des bétons (BHP) étudiés .

Les résultats obtenus en termes de résistance à la compression montrent que les sables préparés à base des deux types d'ajouts (laitier, pouzzolane) offrent plus de performance mécaniques notamment le sable qui contient le laitier des hauts fourneaux, comparativement à un sable témoin.

Sans ignorer que ces résultats sont appuyés et favorisés aussi par l'utilisation de à l'ajout des déchets de verre dans le ciment et d'un super plastifiant qui demeure obligatoire dans le cas des BHP pour assurer une bonne mise en œuvre et permet de réduire le dosage en eau jusqu'à $E/L = 0,28$.

Mots clés : BHP, matériaux locaux, résistance, ajouts, super plastifiant.

Abstract

BHP is increasingly used in new architectural projects (skyscrapers, work of art, bridge and others ..) for economic reasons; aesthetic and technical.

Work in the context of this study are to make a high performance concrete (HPC) using local materials. Three types of sand are provided for this experiment, two sand were prepared by adding additions in substitution of fine sand fraction (sand containing natural pozzolan, sand containing blast furnace slag) and a third type without additions serving as witness (control sand), based on these three sand high performance concrete (HPC)

Résumé

Formulas are using a cement with waste glass introduced by substitution with two metering variant is 400 and 500 kg / m³, while aiming to evaluate the effect of these additions (pozzolan, slag) and glass waste the physico-mechanical behavior of concrete (HPC) are studying.

The results in terms of compressive strength show that the sands are preparing based on the two types of additions (slag, pozzolan) offer greater mechanical performance including sand containing slag from blast furnaces, compared to a control sand.

Without ignoring that these results are trustest and also favored by the use of the addition of waste glass in cement and super plasticizer which remains mandatory in the case of BHP to ensure proper implementation and allows reduce the dosage of water to $E / L = 0.28$.

Keywords: BHP, super plasticizer, additions, local materials, strength

ملخص

تستخدم الخرسانة العالية الأداء بشكل متزايد في المشاريع المعمارية الجديدة (ناطحات السحاب، عمل فني والجسور وغيرها ..) لأسباب اقتصادية جمالية وتقنية.

برنامج العمل في هذه الدراسة يسعى إلى تقديم مساهمة ملموسة للخرسانة العالية الأداء (BHP) باستخدام المواد المحلية. وتقدم ثلاثة أنواع من الرمال لهذه التجربة، وذلك بإضافة استبدال جزء من الرمل الناعم برمل يحتوي على البوزلان الطبيعي والرمل تحتوي على خبث الفرن)، ونوع ثالث من دون إضافات يستخدم للمقارنة الرمال استنادا إلى هذه الرمال الثلاثة الخرسانة عالية الأداء ملموسة (BHP)

يستخدم الاسمنت ممزوج بالنفايات الزجاجية و بتركيز مختلف بحيث 400 و 500 كغ / م³، في حين تهدف هذه الاخيرة إلى تقييم تأثير هذه الإضافات (البوزلان، الخبث) والنفايات الزجاجية على السلوك الفيزيائي و الميكانيكي للخرسانة (BHP) المدروسة.

تظهر النتائج من حيث قوة الضغط ان الرمال المعالجة بهذين النوعين من الإضافات (الخبث، والبوزلان) ترفع من الأداء الميكانيكي خصوصا الرمال التي تحتوي على الخبث الأفران العالية، بالمقارنة مع الرمال الغير معالجة.

دون تجاهل أن هذه النتائج في تزايد أيضا عن طريق استخدام إضافة بالنفايات الزجاجية في الأسمنت و اللدنات التي لا تزال إلزامية في حالة الخرسانة عالية الأداء لضمان التنفيذ السليم ويسمح بخفض جرعة من الماء $E / L = 0.28$.

المفتاح: الخرسانة عالية الأداء ، المواد المحلية ، المقاومة، الإضافات ، اللدنات .

Liste des matières

Remerciement

Résumé

Abstract

ملخص

Liste des figures

Liste des tableaux

Listes des images

Chapitre I Introduction générale

I.1 Introduction.....	01
I.2 But.....	02
I.3 Problématique.....	02
I.4 Structure de mémoire.....	02

Chapitre II Revue Bibliographique

II.1 Introduction.....	03
II.2 définition.....	03
II.3 Présentation des BHP.....	04
II.4 Principe des BHP.....	05
II.5 Les constituants spécifiques aux BHP.....	06
II.5.1 Sélection du ciment.....	07
II.5.1.1 Hydratation du ciment.....	08
II.5.2 Sélection de l'adjuvant.....	10
II.5.2.1 Définition.....	10
II.5.2.2 Modes d'action.....	10
II.5.2.3 Fonctions.....	10
II.5.3 Eau.....	11
II.5.3.1 L'Influence de la quantité d'eau de gâchage.....	12
II.5.4 Les granulats.....	12
II.5.4.1 Granulat fin.....	14
II.5.5 Ajouts ou additions minérales.....	14
II.6 Propriétés essentielles du béton à haute performance (BHP).....	15
II.6.1 A l'état frais.....	15

Sommaire

II.6.1.1 Ouvrabilité.....	15
II.6.2 A l'état durci.....	16
II.6.2.1 Résistance mécaniques d'un BHP.....	16
II.6.2.2 Retrait.....	18
II.6.2.3 Elasticité.....	19
II.6.2.4 Plasticité.....	19
II.6.2.5 Perméabilité.....	19
II.6.2.6 Etanchéité.....	19
II.6.2.7 Durabilité.....	20
II.7 Méthodes de formulation de BHP.....	21
II.7.1 La méthode de L'Université de Sherbrooke.....	21
II.7.1.2 Rapport eau/liant.....	22
II.7.1.3 Dosage en eau.....	23
II.7.1.4 Dosage en super plastifiant.....	24
II.7.1.5 Dosage en gros granulat.....	24
II.7.1.6 Teneur en air.....	25
II.7.1.7 Feuille de calcul.....	25
II.8 Avantages des BHP.....	29
II.9 Conclusion.....	29

Chapitre III : Les ajouts minéraux

III.1 Introduction	30
III.2 définition des additions normalisées pour Les BHP	30
III.2.1 Les ajouts inertes	30
III.2.2 Les ajouts actifs	30
III.3 bénéfices d'utilisation des ajouts minéraux.....	31
III.3.1 Bénéfices fonctionnels.....	31
III.3.2 Bénéfices économiques.....	31
III.3.3 Bénéfices écologiques et environnementaux.....	31
III.4 Classification des ajouts minéraux	31
III.4.1 Les ajouts minéraux actifs	31
III.4.1.1 La pouzzolane.....	31
III.4.1.2 Les laitiers de hauts fourneaux.....	33
III.4.1.3 la fumée de silice.....	35

Sommaire

III.4.1.4 Les cendres volantes	38
III.4.2 Les ajouts minéraux inertes	39
III.4.2.1 Fillers calcaires.....	39
III.4.2.2 verre	41
III.5 Effets des additions.....	42
III.5.1 Effet fillers ou effet de remplissage	42
III.5.2 Effet physique ou de surface	42
III.5.3 Effet chimique ou pouzzolanique	43
III.6 L'intérêt de l'utilisation des ajouts minéraux dans le génie civil.....	43
III.6.1 Intérêt du point de vue économique	43
III.6.2 Intérêt du point de vue technique	43
III.7 L'utilisation des ajouts en Algérie.....	44
III.8 Conclusion	44

Chapitre IV Matériaux, Matériels et essais

IV.1 Introduction.....	45
1^{er} partie : Caractérisation et préparation des matériaux	
IV.2 Matériaux utilisés.....	45
V.2. 1.Ciment	45
IV.2. 1.1.caractéristiques de ciment	45
IV.2.2.Sable	47
IV.2.2.1 Origine du sable.....	48
IV.2.2.2 Préparation des différents types de sable.....	48
IV.2.2.3 Méthode de préparation du quartz	48
IV.2.2.4 Classification granulométrique des produits.....	49
IV.2.3 Gravier.....	49
IV.2.3.1 préparation de Gravier.....	50
IV.2.4 Les ajouts minéraux.....	50
IV.2.4.1 Les caractéristiques chimiques.....	51
IV.2.5 Les adjuvants.....	54
IV.2.5.1 Super plastifiant– haut réducteur d'eau.....	54
IV.2.6 Eau de gâchage.....	55

Sommaire

2^{ème} Partie : Protocole d'essai

IV.3. Caractéristiques des matériaux utilisés.....	56
IV.3.1 Caractéristiques du Ciment.....	56
IV. 3.1.1 Masse volumique apparente.....	56
IV.3.1.2 Masse volumique absolue.....	57
IV.3. 1.3 La finesse.....	58
IV.3.1.4 Essai au mini-cône (NF EN 1961).....	59
IV.3.1.5 Temps de début de prise d'un ciment selon NF EN 196-3.....	60
IV.3.2 Sable	63
IV.3.2.1 Analyse granulométrique par tamisage.....	63
IV.3.2.2 Modules de finesse [NA EN 12620]	64
IV.3.2.3 Masse volumique du Sable (NF P18-555).....	65
IV.3.2.4 Equivalent de sable [NA EN 933-8].....	67
IV.3.3 Caractéristiques du gravier	69
IV.3.3.1 Analyse granulométrique par tamisage [NA EN 933-5].....	69
IV.3.3.2 La masse volumique	72
IV.3.3.3 La densité	75
IV.3.3.4 La porosité.....	75
IV.3.3.5 La compacité.....	75
IV.3.3.6 L'indice des vides.....	75
IV.3.4 les ajouts minéraux.....	76
IV.3.5 Super plastifiant	76
IV.3.6 formulation de béton	76
IV.3.6.1 présentation de la méthode de formulation.....	77
IV.3.6.2 Définitions et formules.....	77
IV.3.6.3 Teneur en ajout cimentaire.....	77
IV.3.6.4 Teneur en super plastifiant.....	78
IV.3.6.5 Densité d'un super plastifiant.....	78
IV.3.6.6 Teneur en solides.....	78
IV.3.6.7 Masse d'eau contenue dans un certain volume de super plastifiant.....	79
IV.3.6.8 masse des particules solides et volume de super plastifiant nécessaire.....	79
IV.3.6.9 volume des solides contenus dans Vliq.....	79
IV.3.7 types et composition des différents bétons.....	80
IV.3.8 Feuille de calcul.....	81

Sommaire

IV.4 Confection et contrôle des éprouvettes.....	81
IV.4.1 Malaxage du béton.....	81
IV.4.2 maniabilité.....	82
IV.4.3 Serrage du béton.....	83
IV.4.4 Conservation des éprouvettes.....	83
IV.4.5 Mesure des résistances.....	84
IV.5 conclusion.....	84

Chapitre V Présentation et analyse des résultats

V.1 Introduction.....	85
V.2 résultats des essais à l'état frais.....	85
V.3 la résistance à la compression.....	89
V.3.1 Interprétation des résultats à la compression.....	90
V.4 Analyse comparative des résultats de Rc en fonction du dosage (500 et 400) kg/m ³	91

Chapitre VI Conclusion et perspective

VI .1 Conclusion général.....	94
-------------------------------	----

LISTE DES FIGURE

Chapitre II : Revue Bibliographique

Figure II.1 : Représentation schématique de deux pates de ciment fraîches de rapports respectifs de 0,65 et 0,25.....	05
Figure II.2 : Organigramme d'amélioration de la résistance.....	06
Figure. II.3 : Evolution de la poudre de ciment lors d'hydratation.....	09
Figure II.4 : l'action de l'adjuvant.....	11
Figure. II.5 : Mode d'action des réducteurs d'eau suivant leur nature ionique.....	11
Figure. II.6 : Mesure de l'affaissement au cône d'Abrams.....	15
Figure II.7 : Organigramme de la méthode proposée pour formuler des BHP.....	22
Figure II.8 : Relation proposée entre le rapport E/L et la résistance à la compression.....	23
Figure II.9 : Détermination du dosage en eau.....	24
Figure II.10 : Dosage en gros granulat.....	24
Figure II.11 : Feuille de composition d'un BHP.....	26

Chapitre III : Les ajouts minéraux.

Figure. III.1 Effet de la fumée de silice sur le compactage d'un mélange liant-granulats, d'après	37
--	----

Chapitre IV Matériaux, Matériels et essais

Figure IV.1 : appareil Vicat.....	61
Figure IV.2 : courbe granulométrique du sable de oeu-d-souf.....	64
Figure .IV.3 : essai d'équivalent de sable.....	67
Figure IV.4: courbe granulométrique de gravier 3/8.....	71
Figure IV.5: courbe granulométrique de gravier 8/16.....	72
Figure IV.6 : Représentation schématique d'un super plastifiant.....	78
Figure IV. 7: Composition des BHP.....	81

Chapitre V Analyse et interprétation des résultats

Figure V.1 : La variation des masses volumiques à l'état frais des BHP étudiés (Dosage 500 Kg/m ³).....	86
--	----

LISTE DES FIGURE

Figure V.2 : La variation des masses volumiques à l'état frais des BHP étudiés (Dosage 400 Kg/m ³).....	86
Figure V.3 : La variation des masses volumiques à l'état durci des BHP étudiés (Dosage 500 Kg/m ³).....	87
Figure V.4 : La variation des masses volumiques à l'état durci des BHP étudiés (Dosage 400 Kg/m ³).....	87
Figure V.5 : La variation d'affaissement à l'état frais des bétons étudiés (Dosage 400 Kg/m ³).....	88
Figure V.6 : La variation d'affaissement à l'état frais des bétons étudiés (Dosage 500 Kg/m ³).....	88
Figure V.7 : Evolution de la résistance à la compression des BHP étudiés (Dosage 500 Kg/m ³).....	89
Figure V.8 : Evolution des résistances à la compression des bétons étudiés (Dosage 400 Kg/m ³).....	90
Figure V.9: Comparaison de l'évolution des réponses mécanique des BHP en fonction du dosage en liant.....	92
Figure V.10 : Comparaison de l'évolution des réponses mécanique des BHP en fonction du dosage en liant.....	92
Figure V.11 : Comparaison de l'évolution des réponses mécanique des BHP en fonction du dosage en liant.....	93

Liste des tableaux

Chapitre II : Revue Bibliographique

Tableau II.1: Les classes de résistance des Bétons.....	04
Tableau II.2: Les fonctions principale et secondaire d'un adjuvant.....	10
Tableau II.3: Résistance à la compression de BHP en fonction Eau/liant.	12
Tableau II.4 : Les granulats les plus utilisées.....	13
Tableau II.5 : Forme des granulats.....	14
Tableau. II.6 : Appréciation de la consistance en fonction de l'affaissement au cône.....	16
Tableau .II .7 : Classes du Béton à haute performance (BHP) et (BTHP).....	17
Tableau II.8 : Eprouvettes utilisées en compression et en traction.....	18

Chapitre III : Les ajouts minéraux.

Tableau III.1 : Composition chimique type des laitiers des hauts fourneaux.....	34
Tableau III.2 : Composition chimique type de certaines fumées de silice	36

Chapitre IV : Matériaux, Matériels et essais

Tableau IV.1 : Composition chimique du ciment.....	47
Tableau IV.2 : Composition minéralogique du ciment.....	47
Tableau IV.3 : Résistance à La Compression du ciment.....	47
Tableau IV.4 : Propriété physique.....	47
Tableau IV.5 : la composition du Sable témoin.....	49
Tableaux IV.6 : Les fractions de chaque type de sable.....	49
Tableaux IV.7 : Les fractions de gravier utilisées.....	49
Tableau. IV.8: Composition chimique type de laitiers de haut fourneau.....	51
Tableau IV.9: composition chimique de pouzzolane utilisé.....	52
Tableau IV.10 : analyses chimique de la poudre de verre.....	52
Tableau IV.11 : caractéristique du super-plastifiant.....	55
Tableau IV.12 : les analyses de l'eau de gâchage.....	55
Tableau .IV.13 : les résultats de la masse volumique apparente obtenus de ciment.....	56
Tableau IV.14: Masse volumique de ciment utilisé.....	57
Tableau IV.15: les résultats des diamètres d'étalement.....	60
Tableau IV.16 : les résultats du temps de prise de ciment utilisée.....	62

Liste des tableaux

Tableau IV.17 : série des tamis utilisés pour le tamisage de sable.....	63
Tableau IV.18 : Analyse granulométrique du sable d'OUED SOUF.....	64
Tableau IV.19 : Module de finesse du sable.....	65
Tableau IV.20 : les résultats de la masse volumique absolu du sable.....	66
Tableau IV.21 : la masse volumique apparente de sable.....	67
Tableau IV.22 : Qualité du sable en fonction des valeurs d'équivalent de sable ESV et ESP.....	69
Tableau IV.23 : L'analyse granulométrique de gravier concassé (3/8).....	70
Tableau IV.24 : L'analyse granulométrique de gravier concassé (8/16).....	71
Tableau IV.25 : Masse volumique apparente du gravier concassé.....	73
Tableau IV.26 : masse volumique absolue du gravier concassé (3/8) (8/16).....	74
Tableau IV.27 : porosité, compacité et indices des vides du gravier.....	76
Tableau IV.28 : la masse volumique et la finesse des ajouts.....	76
Tableau IV.29 : Les dosages en super plastifiant utilisé dans notre formulation.....	76
Tableau IV.30 : Différents types des bétons étudiés.....	80
Tableau IV.31 : Composition théorique des différents bétons.....	80

Chapitre V Analyse et interprétation des résultats

Tableau V 1 : Les propriétés rhéologique (masse volumique, affaissement) et E /L efficace.....	85
Tableau V.2 : Evolution de la résistance à la compression des bétons étudiés (Dosage 500 Kg/m ³).....	89
Tableau V.3 : Résistance à la compression des bétons de dosage 400 Kg/m ³	90
Tableau V.4 : Les résistances à la compression des bétons témoin des deux dosages différents.....	91
Tableau V.5 : Les résistances des bétons laitier des deux dosages différents.....	92
Tableau V.6 : Les résistances des bétons pouzzolanes des deux dosages différents.....	93

Liste des photos

Chapitre II : Revue Bibliographique

Photo II.1 : Types de ciments 52.5 R.....	07
Photo. II.2 : Types de graviers pour BHP.....	13

Chapitre III : Les ajouts minéraux.

Photo III.1 : Types de pouzzolanes.....	32
Photo III.2 : type Pouzzolane naturelle.....	32
Photo .III.3 : Type de pouzzolane artificielle.....	33
Photo III.4 : Schéma de fabrication du laitier bouleté.....	34
Photo III.5 : Laitier de haut fourneau.....	35
Photo III.6 : le fumé de silice.....	36
Photo III.7: Le fumé de silice.....	37
Photo III.8 : Cendres volantes de charbon: Point d'origine: Guangdong China.....	38
Photo III.9: les fillers calcaires.....	39

Chapitre IV Caractérisation des matériaux

Photo IV.1 : <i>Ciment utilisé CEMI 52,5</i>	46
Photo IV.2: des fractions du différent quartz.....	48
Photo IV.3 : tamis utilisé.....	50
Photo IV.4: Laitier de haut fourneau.....	51
Photo IV.5 : pouzzolane utilisé.....	52
Photo IV.6 : le verre utilisé.....	52
Photo IV.7: Concassage des ajouts (pouzzolane, laitier).....	53
Photo IV.8: le broyeur utilisé.....	53
Photo.9 : entonnoir utilisé.....	56
Photo .IV.10 : mini-cône utilisé.....	59
Photo IV.11: appareil Vicat.....	61
Photo IV.12 : essai d'équivalent de sable.....	67
Photo IV.13 : agitateur électrique.....	68
Photo IV.14 : Une colonne de tamis.....	70
Photo IV.15 : l'essai de la masse volumique apparente de gravier.....	74
Photo IV.16 : Malaxeur utilisé.....	82
Photo IV.17 : l'affaissement avec le cône d'abrams.....	82

Liste des photos

Photo IV.18 : Table vibrante utilisé.....	83
Photo IV.19 : Conservation dans l'eau potable en température ambiante.....	83
Photo IV.20 : Presse utilisé.....	84

I.1 Introduction

Le béton est le matériau de base, le plus utilisé dans le monde de la construction, il demeure à nos jours un élément nécessaire et irremplaçable dans son domaine compte tenu de ses avantages économiques et techniques, étant donné qu'il est facile à confectionner et qualifié pour des usages multiples

La diversité d'applications de ce matériau et le grand espace qu'il occupe dans un monde qui se développe avec une cadence impressionnante nous permettent d'affirmer qu'il est toujours en évolution pour pouvoir faire face aux exigences et aux défis de ce développement. Ces dernières années ont vu une révolution dans le domaine du béton, avec l'apparition de béton à hautes performances (BHP) qualifié comme béton ductile, durable et assez résistant.

Les exigences de la construction et la nature des ouvrages à réaliser est la raison pour laquelle les chercheurs sont amenés à améliorer et à développer les propriétés du béton, de multiples recherches ont mené à la production des bétons à hautes performances avec une technologie avancée qui consiste à une formulation qui assure un compromis et une meilleure coordination entre les différentes caractéristiques rhéologique, physique et mécanique.

Pour améliorer les performances d'un BHP, il convient d'en réduire la porosité en agissant sur la granulométrie par l'incorporation des particules ultrafines, et l'ajout d'un adjuvant de type super plastifiant en outre la qualité du liant et la nature des agrégats soient des facteurs très importants, A cet effet, avoir un BHP de bonnes qualités avec des matériaux peu coûteux et disponible en grande quantité est le but recherché par de nombreux pays en voie de développement.

L'Algérie est l'un des pays en voie de développement notamment dans le domaine de construction et tant que certains de ses régions présente des réserves très importantes en matériaux (sable, gravier, pouzzolane naturelle et laitier de haut fourneaux) elle est appelée à exploiter ces ressources pour fabriquer des BHP dans l'intérêt d'améliorer ses caractéristiques physico-mécaniques.

Les sous-produits de l'industrie tel que le laitier de hauts fourneaux ont une large utilisation comme un ajout dans les ciments, mortiers et bétons, c'est dans ce cadre le béton à haute performance ouvre le champ à une nouvelle vision d'utilisation des déchets industriels qui ont un pouvoir pouzzolanique du à leur teneur en agent réactifs.

Dans le cadre d'utilisation et la valorisation des différents déchets notamment le verre se place cette tentative d'amélioration de la compacité des BHP vu les qualités qui disposent ce déchet recyclé tel que sa finesse et son activité pouzzolanique.

I.2 But de la recherche

Le but recherché dans cette étude est :

- La formulation d'un béton à haute performance à partir des matériaux disponibles localement
- L'évaluation de l'effet de l'utilisation des ajouts de pouzzolane naturelle et le laitier de hauts fourneaux par leur incorporation dans le squelette granulométrique d'un des constituants solide et inerte du béton qui est le sable par substitution des fraction les plus fine en présence d'un super plastifiant, sur les propriétés physico-mécaniques d'un BHP

I.3 problématique

Est-ce que on peut intervenir dans la composition d'un des constituants inerte du béton pour améliorer les caractéristiques mécanique d'un BHP tout on préservant une ouvrabilité acceptable.

La substitution des ajouts minéraux actifs dans la composition granulométrique du sable peut-elle nous assurer un avantage purement chimique qui se résume dans l'amélioration du degré d'hydratation du liant du fait que ce matériau est par définition un élément inerte qui ne participe que physiquement dans le développement des réponses mécanique des bétons en présence des ultras fins et un super plastifiant.

I.4 Méthodologie du travail

Ce mémoire s'articule sur quatre parties structurées comme suit:

- **La première partie** : est destinée à l'étude bibliographique où nous avons exposé une revue général sur les bétons et les bétons à haut performance (BHP) ainsi les méthodes de formulation des BHP, nous avons également donné un aperçu sur l'effet des additions minéraux sur les propriétés mécaniques des BHP
- **La deuxième partie** : Est consacrée à l'expérimentation, nous présentons les différentes méthodes d'essais réalisés et la caractérisation des matériaux utilisés et les méthodes de formulation.
- **Troisième partie** : présentation des résultats expérimentaux obtenus et leur interprétation.
- **La quatrième partie** de la mémoire donne une conclusion générale qui met l'accent sur les principaux résultats et les perspectives en termes d'expérimentation pour meilleure compréhension de l'effet des ajouts minéraux sur le comportement des BHP.

Chapitre II : Revue Bibliographique

II.1 Introduction

De nos jours, le bon béton doit répondre à plusieurs exigences en matière de performances physico-mécaniques, de durabilité, d'environnement et d'aspect architectural. La continuité des recherches a permis la création des bétons spéciaux tel que les bétons à haute performances (BHP), les bétons à très hautes performances (BTHP).

Les bétons à haute performance ou à haute résistance sont des bétons qui peuvent être considérés comme des bétons ordinaires, ils sont fabriqués avec une technologie spéciale que celle utilisée pour avoir les bétons ordinaires, les matériaux utilisés pour les fabriquer sont choisis avec beaucoup de soin.

II.2 définition

Les bétons de haute performance (BHP) ont été d'abord appelés (bétons de haute résistance), sont des bétons hydrauliques durables dont la résistance caractéristique en compression à 28 jours est supérieure à 50 Mpa. Au-delà de 80 Mpa, on parle plutôt de bétons à très hautes performances (BTHP). Ils sont maintenant couramment utilisés dans les grands ouvrages d'art, Tunnels et ouvrages souterrains, les bâtiments de grande hauteur (Gratte-ciel), les bâtiments industriels, et structures préfabriquées.

Les BHP, sont des bétons durables dont la diminution de la porosité rendue possible par le choix d'un spectre de mélange granulaire; par l'ajout d'éléments ultrafins et éventuellement par l'ajout de super plastifiant qui diminuent la teneur en eau nécessaire pour l'obtention d'une maniabilité suffisante. Ces bétons présentent une bonne protection mécanique et chimique aux agents agressifs grâce à sa compacité maximale qui peut être définie par l'élimination plus au moins complète des pores cette propriété peut être déterminée par des essais de la microstructure approfondie afin de contrôler la forme, les dimensions et les pourcentages des pores aussi avec l'essai de perméabilité qui contrôle les transferts des fluides. Cette propriété est fonction de la microstructure du matériau, caractérisée par la porosité, la distribution des tailles de pores, la densité et l'ouverture des fissures.

Le BHP apporte en outre des avantages multiples par rapport au béton ordinaire citons, à titre d'exemple :

- 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'eau et solution agressives très réduite [1]

II.3 Présentation des BHP

Les BHP sont souvent classés selon leur résistance caractéristique à la compression à 28 jours f_{c28} en MPa. C'est ainsi que les spécialistes distinguent :

Tableau II. 1 : *Les classes de résistance des Bétons (Aitcin.P-C, 2001) [2]*

Bétons	Résistance (Mpa)
Béton ordinaire	20 -50
Béton a haute performance	50-100
Béton a très haute performance	100-150
Béton a ultra haute performance (exceptionnel)	≥ 150

Les **BHP** nécessitent l'emploi du ciment choisi, type HPR. Dosé à environ 400kg/m³, leur fabrication suppose l'utilisation d'adjuvants réducteurs d'eau qui permettent de maintenir le rapport E/C à des valeurs comprises entre 0.35 et 0.40 tout en garantissant une bonne maniabilité ont utilisent des granulats spéciaux qui présentes des propriétés excellentes soit vis-à-vis la granulométrie , la forme et la propreté. [2]

II.4 Principe des BHP :

Il faut admettre que pendant longtemps les progrès réalisés dans le domaine des BHP ont été plutôt le fruit d'une approche empirique que d'une approche fondamentale et scientifique. Cependant, à l'heure actuelle, on peut quand même expliquer les meilleures performances des BHP en se basant sur des principes scientifiques établis, bien qu'il ne soit pas toujours possible d'expliquer toutes les propriétés des BHP dans leurs moindres détails. [3]

Le Béton De Haute Performance est basé sur le principe de:

- Réduire le rapport eau/ liant

Quand le rapport eau/ciment de la pâte de ciment hydraté est réduit, les particules de ciment se rapprochent les unes des autres dans mélange fraîchement malaxé (Figure II.1). Les particules de ciment étant maintenant plus rapprochées les unes des autres, les produits d'hydratation externes ont moins d'espace à remplir pour relier les différentes particules de ciment et développer une certaine résistance initiale. [4]

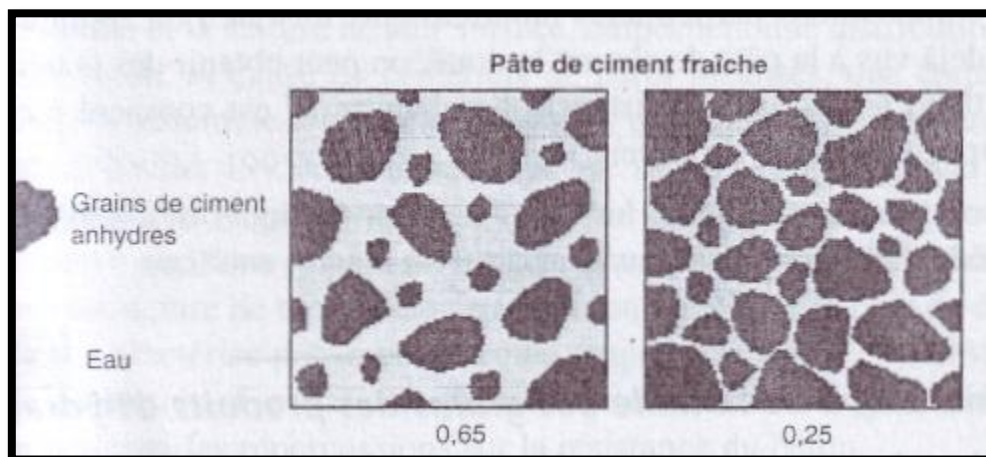


Figure II.1 : Représentation schématique de deux pâtes de ciment fraîches de rapports respectifs de 0,65 et 0,25. [4]

Dans cette représentation schématique, le rapport de la surface d'eau et de celle des grains de ciment est égal au rapport massique eau/ciment.

- l'utilisation des super plastifiants.
- Et l'ajout d'un produit ultrafin (fumée de silice, déchet de verre, filler de calcaireetc.)
- l'optimisation de la répartition granulométrique des composants pour obtenir un matériau très compacte cette propriété qui nous offre un béton durable avec une résistance très élevée

Donc pour l'amélioration de la résistance il faut :

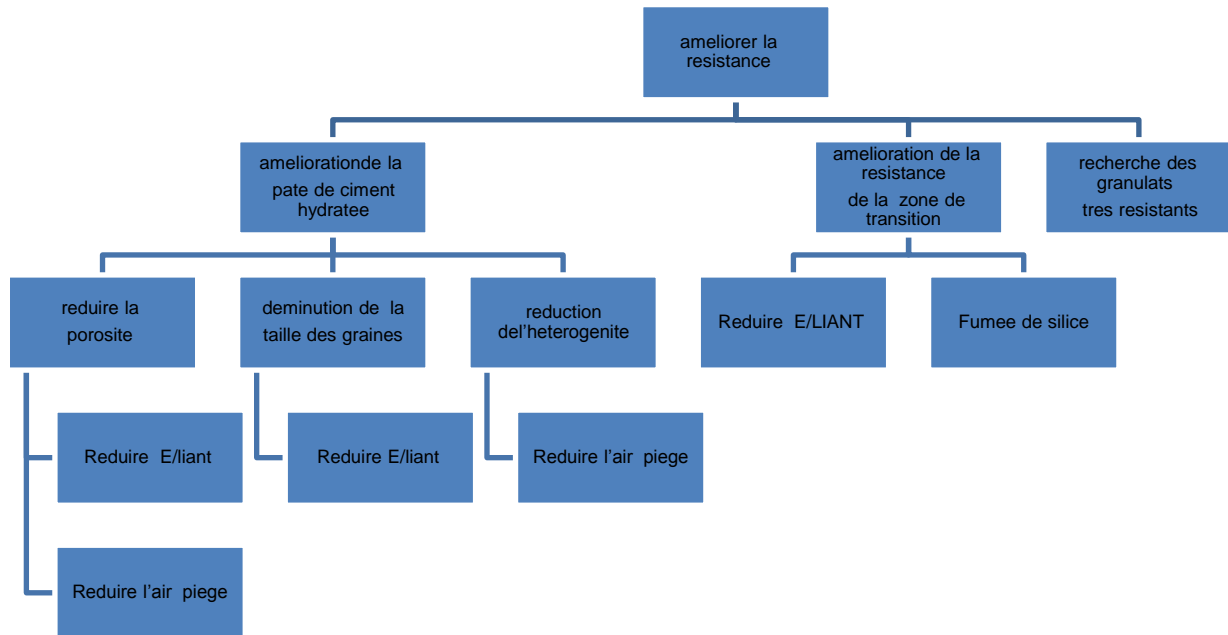


Figure II.2 : Organigramme d'amélioration de la résistance.

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

- ❖ **Réduire la Porosité** : un grand nombre de gros pores ou de vides de diamètre supérieur à 50 nm, concentrés en un endroit donné peuvent diminuer considérablement la résistance d'un matériau ;
- ❖ **La sélection des tailles des granulats** : en général, la résistance d'une phase cristalline augmente lorsque la taille des grains diminue ;
- ❖ **Amélioration de l'homogénéité** : avec des matériaux multiphasiques, les hétérogénéités microstructurales sont une source de perte de résistance. [4]

II.5 les constituants spécifiques aux BHP

Pour un béton ordinaire, le problème de la composition consiste à réaliser un mélange le plus compact possible ayant une maniabilité acceptable et un coût inférieur, ce qui conduit en générale à limiter le dosage en ciment, composant le plus cher. Pour les BHP, l'investissement n'est pas vraiment le même. L'objectif est de confectionner un béton avec une résistance à la compression supérieur accompagné

d'une amélioration remarquable dans le comportement du béton, aussi bien à l'état frais, qu'à long terme. Alors le rapport E/L en présence des ultrafines implique l'utilisation de super plastifiants qui représente une approche très importante. [4]

Lorsque l'on choisit les matériaux pour fabriquer un BHP, aucun matériau ne peut être à l'abri d'une sélection précise et rigoureuse. Ainsi on commencera à considérer la sélection du ciment Portland même dans le cas où d'autres ajouts cimentaires sont utilisés en conjonction avec le ciment Portland. La sélection se poursuit par celle du super plastifiant afin d'optimiser la combinaison ciment/super plastifiant. Quand ces choix cruciaux sont faits, on évalue l'utilisation d'un ou plusieurs ajouts cimentaires. La sélection des granulats viendra par la suite puisque leur qualité devient de plus en plus critique pour augmenter la résistance à la compression du **BHP**. [4]

II.5.1 Sélection du ciment

Le premier choix sur lequel il faut s'attarder lorsqu'on veut fabriquer un BHP est celui du ciment, même lorsque l'on utilisera d'autres ajouts cimentaires parce que la performance du ciment en termes de rhéologie et de résistance devient critique au fur et à mesure qu'augmente la résistance à la compression visée. [4]

Les ciments utilisés pour les BHP sont en général des ciments dits à hautes performances (**CPA-CEM I 52.5**) dont la résistance à 28 jours sur éprouvette de mortier normal (**4*4*16cm**) est en général supérieure à 60Mpa. Les hautes résistances sont la plupart du temps obtenues grâce à une finesse de mouture élevée. Les valeurs de finesse Blaine (fournies par un fabricant) valent approximativement 3000-3200 cm²/g pour un CPA 55 (**CPA-CEM I 42.5**), 3600 cm²/g pour un CPA HPR (**CPA-CEM I 52.5**), ou encore 4000-4100.



Photo II.1 : Types de ciments 52.5 R

II.5.1.1 Hydratation du ciment**Introduction**

Le ciment est un liant hydraulique il se combine à l'eau en donnant des hydrates stables qui lui confèrent une résistance mécanique. La réaction chimique d'hydratation du ciment conduit donc à la formation d'une pâte qui, après prise, durcit progressivement à l'air ou dans l'eau. Les mécanismes fondamentaux de l'hydratation du ciment ont été mis en lumière, dès la fin du siècle dernier, par Henri le Chatelier. Il a notamment décrit les trois phénomènes concomitants qui concourent :

- La dissolution des constituants du ciment dans l'eau.
- La formation de solution sursaturée par rapport aux différents hydrates.
- La précipitation et la cristallisation au phénomène de prise :
de ces hydrates dans les vides inters granulaires [5].

Hydratation des composants du ciment

La prise du ciment n'est pas un séchage de la pâte après ajout de l'eau ; il s'agit d'un ensemble de réactions chimiques d'hydratation permettant le passage de la pâte de ciment (ciment additionné d'eau) de l'état liquide à l'état solide. La pâte de ciment hydraté est le résultat de réactions chimiques entre l'eau et les composés du ciment. Il s'agit d'un processus complexe dans lequel les principaux composés du ciment C₃S, C₂S, C₃A, et C₄AF réagissent pour former de nouveaux composés insolubles qui entraînent la prise et le durcissement progressif du matériau. L'hydratation du ciment Portland implique, nous venons de le voir, la réaction des quarts phases minérales qui le composent. Comme le ciment est composé principalement de C₃S, c'est l'hydratation du C₃S qui contrôle la cinétique globale de l'hydratation. Il existe cependant une synergie entre différentes réactions Principales réactions avec l'eau [6].

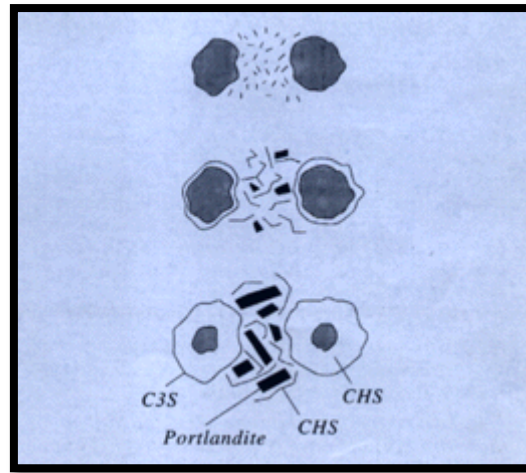
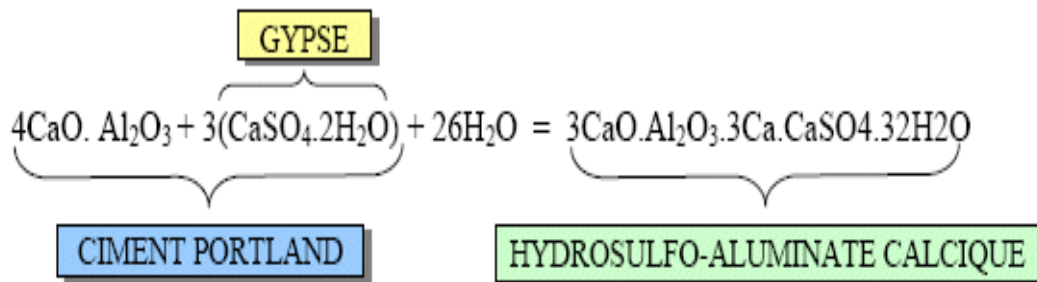
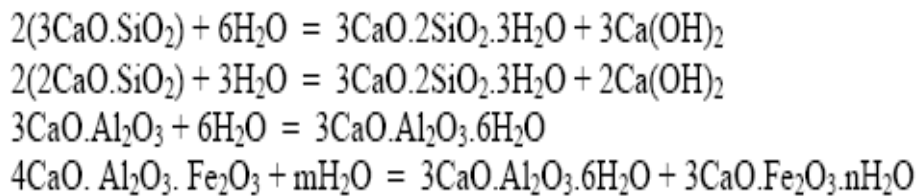


Figure. II.3 Evolution de la poudre de ciment lors d'hydratation. [6].



Conclusion

La réaction d'hydratation du ciment combine les réactions d'hydratation des principaux composants du clinker et , éventuellement , celles de ses composants secondaires .Cependant, les réactions sont plus complexes du fait des interactions chimiques et thermiques qui se produisent au cours du processus d'hydratation et du fait des impuretés présentes dans la solution solide qui influencent beaucoup l'hydratation de chaque phase .

II.5.2 Sélection de l'adjuvant

II.5.2.1 Définition

On appelle adjuvant, tout ingrédient autre que le ciment, les granulats et l'eau, que l'on ajoute au mélange. Ce sont le plus souvent des polymères de synthèse au poids moléculaire assez élevé (20000- 30000). Les adjuvants de béton sont des produits chimiques solubles dans l'eau qui modifient principalement :

- les solubilités
- les vitesses de dissolution
- l'hydratation des divers constituants d'un liant hydraulique [4]

II.5.2.2 Modes d'action

Leur action est différente d'un adjuvant à un autre en contact des grains de ciment. D'une manière générale, les adjuvants enrobent le grain de ciment pendant l'hydratation pour augmenter une charge négative sur la surface de la particule de ciment. Nous détaillerons plus bas, certaines réactions des différents adjuvants avec le ciment.[4]

II.5.2. 3 Fonctions

Les adjuvants possèdent une fonction principale et une ou plusieurs fonctions secondaires [4]:

Tableau I.2 : Les fonctions principale et secondaire d'un adjuvant [4]

<i>1- Fonction Principale</i>	<i>2- Fonctions secondaires</i>
Chaque adjuvant est défini par une fonction principale unique. Elle est caractérisée par la ou les modifications majeures qu'elle apporte aux propriétés du béton à l'état frais ou durci. Cette fonction peut varier selon le dosage de l'adjuvant et les matériaux utilisés.	En plus de sa fonction principale, un adjuvant peut avoir une ou plusieurs fonctions secondaires (ex: plastifiant retardataire, retardataire plastifiant. Réducteur d'eau).

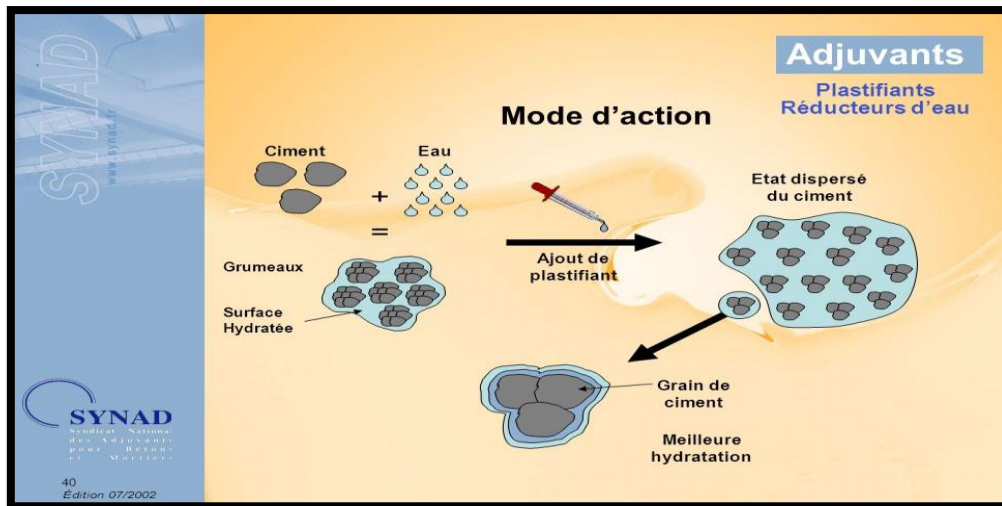


Figure II.4 : l'action de l'adjuvant

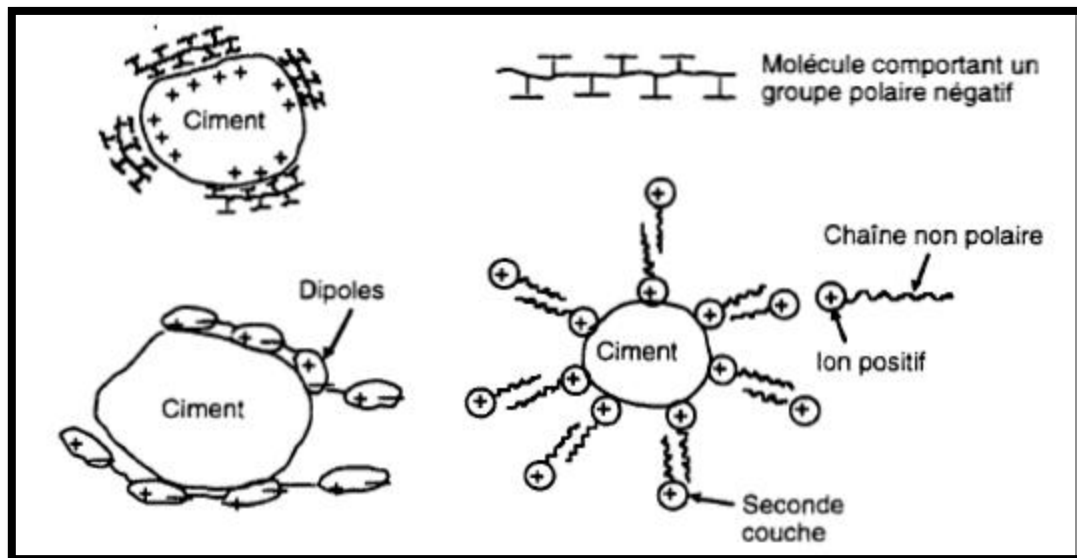


Figure. II.5 : Mode d'action des réducteurs d'eau suivant leur nature ionique

II.5.3 Eau

L'eau présente dans le béton joue deux fonctions principales : Elle lui confère sa maniabilité à l'état frais (ses propriétés rhéologiques) et assure l'hydratation du ciment.

L'eau est constituée de molécules polaires de H₂O dont la taille est approximativement égale à 1 angström. Ces particules exercent les unes sur les autres des forces d'attraction qui jouent un rôle fondamental sur ses propriétés rhéologiques. L'eau étant un milieu diélectrique, elle modifie les forces inter-granulaires. Son action n'est pas négligeable pour les grains très fins (tels que les ciments et les fines).

L'eau donne au béton sa maniabilité, d'une part par son action lubrifiante sur les différents grains, d'autre part par la cohésion due à la pâte provoquée par l'association des grains fins (ciment et fines) avec elle. [7].

Le dosage en eau doit donc être limité au «juste nécessaire» à l'hydratation du liant et aux exigences d'ouvrabilité. L'eau est le mal nécessaire de réglage le plus simple de la consistance, mais son augmentation entraîne une diminution de la résistance à la compression de béton et affecte la durabilité.

II.5.3.1 L'Influence de la quantité d'eau de gâchage :

La quantité d'eau de gâchage introduite dans le béton a une influence prépondérante sur la résistance. Le tableau II-11. Donne la variation de résistance du béton à la compression en fonction du rapport E/L. [8]

Tableau II.3 : Résistance à la compression de BHP en fonction Eau/liant [8]

E/L	Variation de la résistance à la compression maximale (en MPa)
0.40-0.35	50à75
0.35-0.30	75à100
0.30-0.25	100à125
0.25-0.20	Plus de 125

II.5.4 les granulats

Le granulat est un fragment de roche, d'une taille inférieure à 125 mm .destiné à la composition des matériaux destinés à la fabrication d'ouvrage de travaux publics, de génie civil et de bâtiment.

Les granulats représentent 75 % du volume du béton et selon leur qualité, peuvent non seulement limiter la résistance du béton, mais d'effectuer sa durabilité et ses performances structurales. [9]

Tableau. II.4 : Les granulats les plus utilisées.[site web 1]

<i>Les granulats les plus utilisés</i>		
<i>Familles</i>	<i>Dimensions</i>	<i>Caractéristiques</i>
<i>Fillers</i>	0/D	D < 2 mm avec au moins 85 % de passant à 1,25 mm et 70 % de passant à 0,063 mm
<i>Sables</i>	0/D	d = 0 et D ≤ 4 mm
<i>Graves</i>	0/D	D ≥ 6,3 mm
<i>Gravillons</i>	d/D	d ≥ 2 mm et D ≤ 63 mm

Les granulats utilisés pour fabriquer des BHP peuvent être des sables naturels, des graviers ou des granulats concassés. La résistance des granulats naturels dépend de la nature de la roche-mère qui a été concassée où usée à la dimension actuelle après avoir subi différents processus naturels ou mécaniques. Si les granulats concassés sont utilisés pour fabriquer un BHP, il faut que leur fabrication conduise à l'obtention des particules individuelles qui contiennent la quantité minimale d'éléments faibles. Si l'on veut augmenter la résistance d'un béton, il faut porter une attention particulière à la nature du granulats lors de sa sélection.

Les BHP ont surtout un rapport eau/liant plus faible que celui des bétons usuels ; ils contiennent assez souvent des particules ultrafines telles que la fumée de silice pour améliorer la résistance de la pâte de ciment hydraté surtout dans la zone de transition et ils, sont fabriqués avec des granulats résistants. Puisque les particules du liant sont rapprochées les unes des autres, elles peuvent développer des liens très forts durant leur hydratation, mais cette proximité des grains de ciment peut aussi créer les problèmes rhéologiques dans le béton frais [4].



Photo. II.2 : Types de graviers pour BHP.

II.5.4.1 Granulat fin :

En générale, 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 comprise entre 2.7 et 3.0.

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. Le remplacement partiel d'un sable naturel par un sable manufacturé peut présenter quelques avantages surtout si le sable manufacturé a été fabriqué en utilisant une roche très résistante [4].

Influence de la forme des granulats:

La forme est d'autant meilleure qu'elle est proche d'une sphère ou d'un cube:

- La facilité de mise en œuvre et le compactage du béton.
- La compacité du mélange, donc le volume des vides à remplir par la pâte de ciment.
- L'adhérence du granulat à la pâte de ciment [10]

Tableau II.5 : Forme des granulats [10]

Cubes sphères	Trois dimensions à peu près égales (bonne compacité)
Plaquettes	Une dimension beaucoup plus petite que les deux autres (mauvaise compacité)
Aiguilles	Une dimension beaucoup plus grande que les deux autres (très mauvaise compacité)

II.5.5 Ajouts ou additions minérales

Les ciments, dont le constituant principal est le clinker, peuvent contenir d'autres éléments minéraux, sous forme d'ajouts au clinker ayant ou non des propriétés pouzzolaniques ou hydraulique.

Ces constituants, quand ils se substituent à une partie du clinker, agissant sur les propriétés du matériau à l'état frais et à l'état durci. En effet, ils modifient le processus d'hydratation du ciment, la nature et la structure des produits hydratés. Leur incorporation agit ainsi sur l'ouvrabilité, la porosité, la perméabilité, la diffusivité et les résistances mécaniques des matériaux cimentaires.

Conformément à la norme, les ciments portland peuvent être additionnés de divers minéraux naturels ou artificiels, ce qui permet de moduler leurs propriétés d'usage. Les dosages sont en général de l'ordre de 12% à 15% et peuvent aller jusqu'à 35%, pour les classes CPJ. Elles peuvent s'élever à plus de 80% dans les CLK [9].

II.6 Propriétés essentielles du béton à haute performance (BHP)

II.6.1 A l'état frais

II.6.1.1 Ouvrabilité:

Le béton frais présente une bonne ouvrabilité liée aux super plastifiants entrant dans sa composition. La valeur d'affaissement au cône d'Abrams supérieure à 15cm. (d'environ 20 cm en sortie de malaxeur). [11]

- **Affaissement au cône d'Abrams :**

Cet essai (slump-test) est incontestablement un des plus simples et des plus fréquemment test utilisés, car il est très facile à mettre en œuvre. Il ne nécessite qu'un matériel peu coûteux et peut être effectué directement sur chantier par un personnel non hautement qualifié mais ayant reçu simplement les instructions nécessaires au cours de quelques séances de démonstration. L'appareillage est décrit dans la norme NF P 18-451 et est schématisé sur la

figure II.6 [12].

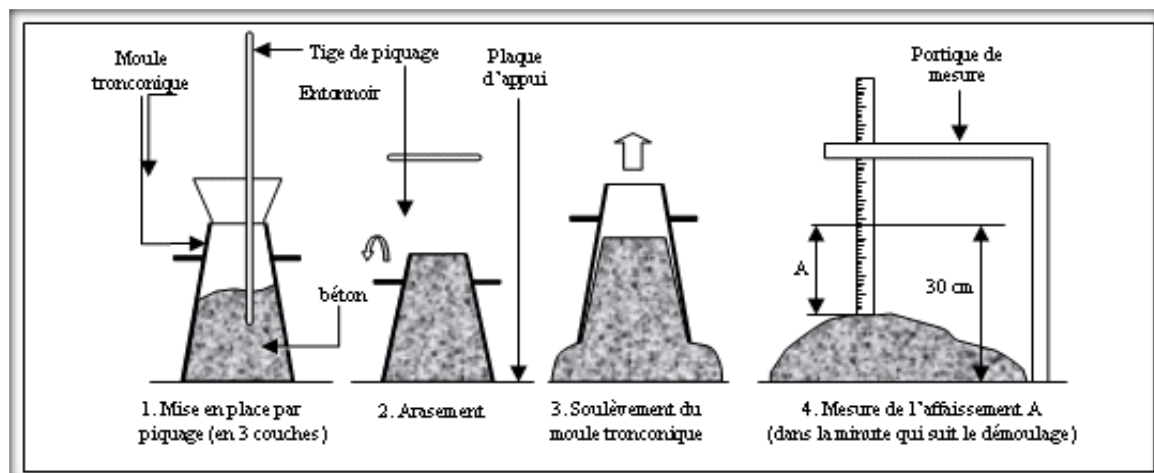


Figure. II.6 : Mesure de l'affaissement au cône d'Abrams. [12]

Les mesures sont évidemment quelques peu dispersées et il ne faut pas accorder à cet essai un caractère trop rigoureux, mais on peut admettre qu'il caractérise bien la consistance d'un béton et permet le classement approximatif indiqué au tableau II.4

Tableau. II.6 : *Appréciation de la consistance en fonction de l'affaissement au cône.*

Classe de consistance	Affaissement (cm)	Tolérance (cm)
Ferme F	0à4	1cm
Plastique P	5à9	2cm
Très plastique TP	10à15	3cm
Fluide Fl	≥16	

II.6.2 A l'état durci

II.6.2.1 Résistance mécaniques d'un BHP:

La résistance se présente sous deux aspects: résistance à la compression, et résistance à la traction.

La résistance à la compression joue un rôle très important en béton armé.

On doit donc s'efforcer d'aboutir à des résultats convenables aussi bien pour la résistance à la compression qu'à la traction.

a- Résistance à la compression:

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

A l'heure actuelle, l'expression "béton à haute performance" couvre des bétons ayant une grande gamme de résistances.

On peut diviser les BHP en cinq classes différentes définies chacune par des résistances à la compression qui peuvent être considérées comme des barrières technologiques dans l'état actuel de la technologie des BHP. (Voir le tableau II-5) [13]

Tableau .II .7 : *Classes du Béton à haute performance (BHP) et (BTHP). [13]*

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

b- Résistance à la traction:

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

- **Moules et éprouvettes utilisés:**

Le contrôle des propriétés mécaniques des bétons à hautes performances, sur des échantillons de forme cylindrique en acier. [14]

Tableau II.8 : *Eprouvettes utilisées en compression et en traction [14]*

Cylindres (diamètre x hauteur) cm²
(7.5x15)
(10 x 20)
(15 x 30)
(16 x 32)

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

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

En conclusion, une bonne résistance à la compression est la qualité bien souvent recherchée pour le béton durci. Cette bonne résistance est généralement liée à une bonne compacité, ce qui est favorable à la durabilité du béton. La résistance d'un béton dépend d'un certain nombre de paramètres, en particulier la classe et le dosage du ciment, la porosité du béton et le rapport du dosage en eau au dosage en ciment [9].

II.6.2.2 Retrait:**Introduction**

Les déformations libres du béton (retraits ou gonflements) sont des propriétés de première importance pour le constructeur. Le contrôle géométrique de l'ouvrage exige leur prise en compte. De plus, des déformations libres non homogènes dans des parties monolithes provoquent souvent des fissurations, chemins privilégiés de pénétration des agents agressifs.

La conception d'ouvrages durables passe donc par une maîtrise des déformations libres. [09]

a- Différents types de retrait

Il existe les retraits suivants:

- Avant prise (retrait plastique)
- Pendant la prise et le durcissement : phénomènes thermiques et retrait endogène
- A long terme retrait exogène

b- Retrait avant prise (retrait plastique)

A près mise en œuvre, le béton frais est susceptible de perdre une partie de son eau par évaporation. [14]

c- Retrait Pendant la prise et le durcissement : (phénomènes thermiques et retrait endogène)

Diminution de volume de la pâte liante provoquée par son assèchement interne du fait de la consommation de l'eau pour l'hydratation ; on dit aussi retrait d'autodissociation ou retrait d'hydratation. (La quantité totale de chaleur dégagée pendant la prise augmente avec le dosage en ciment)[14]

d- Retrait à long terme:(retrait exogène)

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

A partir du décoffrage, et lorsque l'humidité ambiante est inférieure à celle qui règne dans la porosité du béton, des migrations d'eau se produisent de l'intérieur vers l'extérieur de la structure. [14]

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

Le retrait de dessiccation à l'état durci est plus faible compte tenu du faible dosage en eau. Le retrait endogène (ou d'auto dessiccation), compte tenu de la finesse de la

microstructure et de la forte réduction du rapport E/C est d'un coefficient plus élevé (150 à 250x10⁻⁶) pour un BHP que pour un béton traditionnel (60x10⁻⁶) [3]. Le retrait d'autodissociation est d'autant plus précoce et élevé que le rapport E/C faible. [09]

II.6.2.3 Elasticité

Le module d'élasticité des BHP est supérieur à celui des bétons traditionnels. [09]

II.6.2.4 Plasticité

La plasticité est la propriété d'un matériau de changer sa forme sans se fissurer et de garder cette forme après l'enlèvement de la charge [15]

II.6.2.5 Perméabilité

La perméabilité K des bétons caractérise leur aptitude à se laisser traverser par un fluide sous l'effet d'un gradient de pression. Elle s'exprime au moyen de la relation de DARCY, valable en régime d'écoulement laminaire et s'exprime en m² dans le système internationale: [14]

$$Q = M / K.A .dp/dz$$

Q : Débit volumique du fluide

M: Viscosité de fluide

K : Perméabilité

A : Aire apparente du matériau

II.6.2.6 Etanchéité

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

Pour qu'un béton soit étanche, il faut que les cheminements possibles dans la masse des infiltrations des eaux extérieures soient aussi réduits que possible. Par conséquent, il faut réaliser un béton très compact pour éviter ces cheminements.

Des essais très nombreux ont été faits sur la perméabilité des bétons pendant plusieurs années. Leurs conclusions sont les suivantes: [16]

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

- Au-dessous de 1500 cm²/g tous les ciments donnent des bétons perméables.
- Au-dessus de 1800 cm²/g, les filtrations sont pratiquement nulles.

II.6.2.7 Durabilité**a- Résistance aux agents agressifs:**

La faible perméabilité des BHP leur confère une bonne résistance à la pénétration et au transfert dans la masse du béton des agents agressifs en phase gazeuse ou liquide (eau de mer, eaux sulfatées, solutions acides, dioxyde de carbone, etc....) [17]

b- Résistance aux Cycle de Gel Dégel:

Les BHP, correctement formulés, résistent aux cycles gel/dégel par leur forte compacité et à leurs résistances mécaniques élevées. [17]

c- Résistance à l'abrasion:

La résistance à l'abrasion se détermine pour les matériaux destinés aux planchers, aux revêtements routiers, aux marches d'escaliers, etc. certains matériaux sont également essayés à l'usure. [15]

On appelle usure la destruction d'un matériau soumise à l'action commune de l'usure par abrasion et du choc. [15]

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

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

La résistance des bétons à hautes performances aux agressions chimiques est en générale supérieure à celles des bétons normaux, c'est particulièrement le cas pour la réaction alcalis granulats. Cette amélioration est lié à:

- Une structure poreuse fins et discontinue qui réduit la perméabilité, la percolation, les diffusions ionique au travers de la matrice et de l'interface matrice granulats;
- une réduction de la teneur en Ca(OH)_2 par l'effet pouzzolanique de la fumée de silice. [09]

II.7 Méthodes de formulation de BHP

L'objectif de toutes les méthodes de formulation de bétons est de déterminer la combinaison de matériaux à utiliser pour produire le béton qui aura les propriétés désirées et qui sera le plus économique possible. Il a toujours été très difficile de développer une méthode théorique universelle permettant de formuler un béton avec n'importe quelle combinaison de ciment portland, d'ajout cimentaire, de granulat et d'adjuvant. En règle générale, une méthode de formulation permet 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.

Et parmi les formulations excitent pour les BHP on trouve :

- la méthode de l'université de sherbrooke.
- la méthode suggérée par le comité ACI 363 (1993).
- la méthode proposée par de larrard (dite des coulis du LCPC en 1990).
- la méthode présentée par Mehta et Aitcin (1990).

On présente brièvement la méthode de sherbrooke.

II.7.1 La méthode de L'Université de Sherbrooke:

La méthode de formulation développée à l'université de Sherbrooke permet de formuler un BHP sans air entraîné; elle peut aussi être utilisée pour formuler un BHP à air entraîné à condition de tenir compte de la réduction de la résistance à la compression due à la présence du réseau de bulles d'air contenu dans le béton [18].

Cette méthode très simple. Il S'agit d'une combinaison de résultats empiriques et de calculs basée sur la méthode des volumes absolus. La quantité d'eau contenue dans le super plastifiant est considérée comme faisant partie de la quantité d'eau de gâchage. L'organigramme de cette méthode est présenté dans la figure II.7

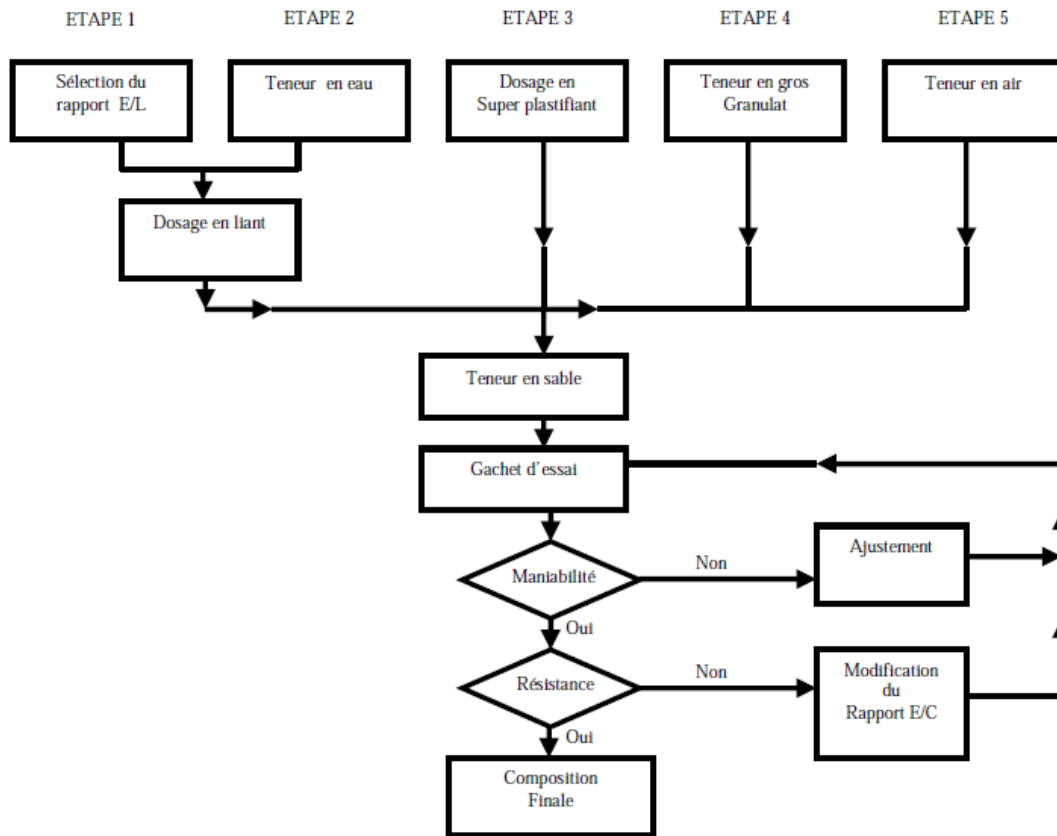


Figure II.7 : Organigramme de la méthode proposée pour formuler des BHP [18].

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.

II.7.1.2 Rapport eau/liant :

On peut trouver le rapport E/L en utilisant la figure II.6 pour des bétons ayant une résistance à la compression donnée à 28 jours. Par suite des variations de résistance dues aux différences des liants Le fuseau de la figure II.6 donne une gamme relativement étendue de rapport eau/ciment pour une résistance donnée. Si l'on ne connaît pas l'efficacité du liant que l'on utilise, on peut commencer par prendre la valeur moyenne donnée par ce fuseau [18].

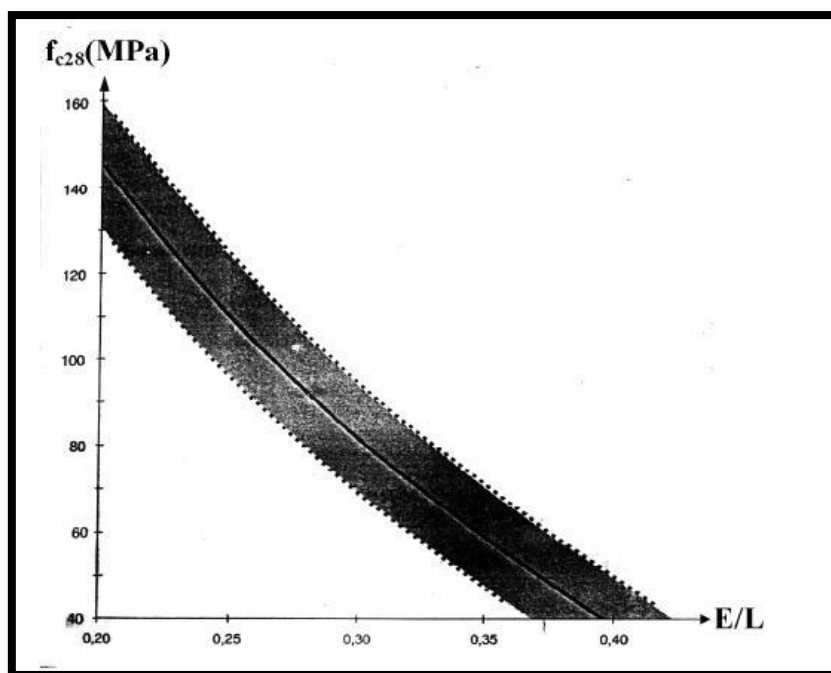


Figure II.8 Relation proposée entre le rapport E/L et la résistance à la compression. [18]

II.7.1.3 Dosage en eau:

Une des plus grandes difficultés rencontrées lorsque l'on calcule la composition d'un BHP est de déterminer la quantité d'eau qu'il va falloir utiliser pour fabriquer un béton qui aura un affaissement de 200 mm plus d'une heure après son malaxage. En effet, la maniabilité d'un BHP est contrôlée par plusieurs facteurs: la quantité initiale d'eau, la réactivité du ciment, la quantité de super plastifiant et son degré de compatibilité avec ce ciment particulier [18]. On peut concevoir un BHP de 200 mm d'affaissement en utilisant un faible dosage en eau et un fort dosage en super plastifiant ou, inversement, un dosage en eau plus élevé et un dosage en super plastifiant plus faible. Du point de vue économique, il n'y a pas tellement de différence entre ces deux options, mais, du point de vue rhéologique, la différence peut être très significative selon la réactivité rhéologique du ciment et l'efficacité du super plastifiant. Ainsi, la quantité minimale d'eau de gâchage qui permet de fabriquer un béton de 200 mm d'affaissement peut varier sensiblement selon la finesse, la composition phasique, la réactivité des phases et selon la composition et la solubilité des sulfates de calcium et des sulfates alcalins du ciment. Si la quantité d'eau de gâchage est trop faible, le béton peut devenir rapidement collant et perdre de l'affaissement. Il faudra alors utiliser une assez grande quantité de super plastifiant

pour obtenir un affaissement élève, mais il ne faudra pas s'étonner alors de faire face à un certain retard dans le durcissement de ce béton

La meilleure façon de trouver le bon rapport entre la quantité d'eau et la quantité de super plastifiant est d'utiliser un plan d'expérience (Rougeron et Aitcin, 1994). La Figure II.7 présente une approche simplifiée, basée sur le concept de point de saturation. Pour calculer une formulation robuste, on peut ajouter 5L/m³ à toutes les valeurs présentées à la Figure II.7. Lorsque le point de saturation du super plastifiant n'est pas connu, on suggère de commencer avec une quantité d'eau de malaxage égale à 145 L /m³ [17].

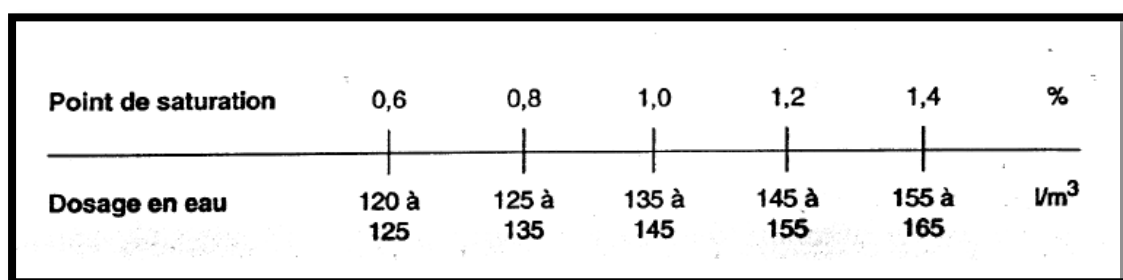


Figure II.9 : Détermination du dosage en eau [19].

II.7.1.4 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%

II.7.1.5 Dosage en gros granulat :

Le dosage en gros granulat peut être déduit de la figure II.8 en fonction de la forme des granulats. S'il y a quelque doute sur la forme des granulats ou si on ne la connaît pas, on peut toujours commencer avec une quantité de gros granulats de 1000 kg/m³.

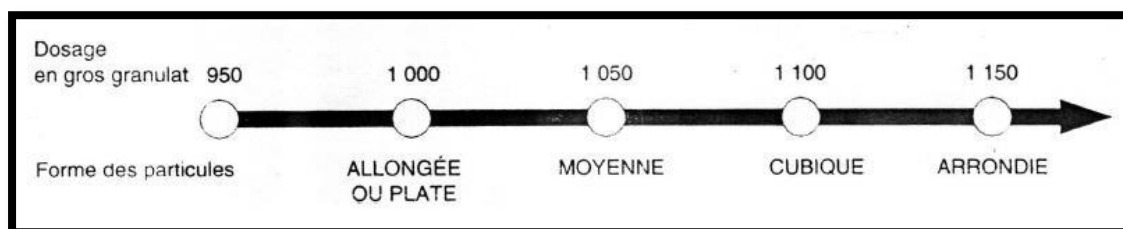


Figure II.10 : Dosage en gros granulat [17].

II.7.1.6 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 [17].

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

L'expérience a démontré qu'il était assez difficile de fabriquer des BHP qui contiennent moins de 1% d'air piégé et que, dans les pires des cas, la teneur en air piégé peut être aussi élevée que de 3%. Par conséquent, certains auteurs suggèrent d'utiliser une valeur de 1.5% comme valeur initiale de la quantité d'air piégé [17].

Tous les calculs nécessaires à la formulation d'un BHP sont présents sur une seule feuille de calcul (Figure II.9).

II.7.1.7 Feuille de calcul:

Tous les calculs nécessaires à la formulation d'un BHP sont présents sur une seule feuille de calcul (Figure II.9). Cette feuille de calcul est divisée en trois parties. Dans la partie supérieure, on retrouve les propriétés spécifiques du BHP qui doit être fabriqué ainsi que les caractéristiques de tous les ingrédients qui entreront dans sa composition. Avant d'effectuer quelque calcul que ce soit, cette partie de la feuille doit être remplie puisque chacune de ces données est essentielle aux calculs subséquents. Si certaines des propriétés physiques des granulats ne sont pas connues, il sera nécessaire de fixer leurs valeurs en se basant sur les meilleures informations disponibles. Dans la partie médiane de la feuille, on trouve les calculs relatifs au dosage en super plastifiant.

La feuille de calcul utilise les symboles suivants:

dc: densité du ciment ou des ajouts cimentaires

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

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

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

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

dsup: densité du super plastifiant liquide

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

Msol: masse de solides dans super plastifiant

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

Vliq: volume de super plastifiant liquide

VE: volume d'eau dans le super plastifiant

Vsol: volume de solides dans le super plastifiant

E: masse d'eau en kg/m3 dans le béton

L: masse de liant par mètre cube de béton

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

SUPERPLASTIFIANT									
Densité (G _{sup})	Teneur en solides (s) (%)	M _{sol} = c*d/100	V _{liq} = M _{sol} *100/s*G _{sup}	V _E = V _{liq} *G _{sup} *(100-s)/100	V _{sol} = V _{liq} -V _E				
		[15]	[E]	[24]	[E]	[21]	[G]	[11]	[H]

Matériaux	1		2		3		4		5		6	
	Teneur Kg/m3		Volume L/m3		Dosage état SSS kg/m3		Correction D'humidité L/m3		Composition			
									1 m3		Gâchée d'essais	
Eau	[1]	[2]	[2]	[2]	[2]				[23]			[25]
Ciment	E/L = 0.	[3]	[4-1]	[8-1]	[4-1]				[4-1]			[26-1]
			[4-2]	[8-2]	[4-2]				[4-2]			[26-2]
			[4-3]	[8-3]	[4-3]				[4-3]			[26-3]
Gros granulat	[5]		[9]	[5]	[18]			[17]			[27]	
Granulat fin			[13]	[14]	[20]			[19]			[28]	
Air	POURCENTAGE		[10]		0							
	[6]	%										
Super plastifiant	[7]	%	[11]	[15]	[21]			[24]	[V _{sup}]			[29]
Total			[12]	[16]	[22]							[30]

Figure II.11 : Feuille de composition d'un BHP.

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

La partie inférieure de la feuille de calcul comprend des cases numérotées dans l'ordre dans lequel il faut les remplir. Cette partie de la feuille de calcul est divisée en

six colonnes, numérotées à leur partie supérieure. Dans la première colonne, on reporte les données initiales et les premiers calculs ; dans la colonne 2, on calcule le volume du granulat fin ; dans la colonne 3, on retrouve les proportions du béton avec des granulats à l'état SSS ; dans la colonne 4, on calcule les corrections d'eau ; dans la colonne 5, on retrouve les proportions du béton dans l'état om l'on utilise les matériaux ; dans colonne 6, on retrouve les proportions de la gâchée d'essai prévue.

Les paragraphes ci-dessous expliquent les calculs détaillés qu'il faut effectuer pour remplir chacune des cases de la figure II.11.

Case1: Reporter la valeur du rapport E/L telle que choisie à la figure II.9

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

Case3: calculer la masse de liant.

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

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

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

Case7: Ecrire la quantité de super plastifiant qu'il sera nécessaire d'utiliser en se basant sur la valeur du point de saturation.

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

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

Case9: calculer le volume de gros granulat.

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

Case11: calculer le volume V_{sol} .

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

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

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

Case14: calculer la masse de granulat fin.

Case15: calculer la masse de solides dans le super plastifiant M_{sol} .

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

Jusqu'à présent, les masses de granulats ont toujours été calculées dans des conditions SSS. Il faut donc corriger le dosage en eau de gâchage.

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

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

Case19: Calculer la masse SSS du granulat fin

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

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

Case22: Ajouter algébriquement toutes les corrections d'eau.

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

Case23: Ajouter la correction de l'eau.

Case24: Ecrire le dosage en super plastifiant Vliq.

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

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

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

La formulation d'un BHP est tout autant un art qu'une science à l'heure actuelle. Il est en effet difficile de formuler un BHP en ne connaissant que la fiche technique des matériaux qui le composent. En effet plusieurs combinaisons des mêmes matériaux permettent d'obtenir une résistance à 28 jours donnée.

Cependant la formulation d'un BHP ne relève pas uniquement du plus pur empirisme, elle s'appuie plutôt sur un certain nombre de résultats de l'expérience et sur la méthode de calcul dite des volumes absolus. Plusieurs approches ont été proposées par différents chercheurs, nous avons présenté celle qui est utilisée à l'Université de Sherbrooke non pas parce que nous sommes convaincus que c'est la meilleure, mais parce que c'est celle que nous utilisons tous les jours. Cette méthode est simple, facilement comprise par les étudiants et les techniciens et elle nous a donné satisfaction au cours des années.

Quelle que soit la méthode de calcul qui aura été utilisée, il faudra bien finir par faire des gâchées d'essais, mais si on peut limiter ce nombre au strict minimum, c'est autant de gagné.

II.8 Avantages des BHP

- Ce béton est doté de certaines ou de toutes les propriétés suivantes:
 - Facilité de mise en place.
 - Meilleure durabilité et durée de vie.
 - Caractéristiques mécaniques améliorées (résistance, rigidité, ductilité).
 - Retrait et fluage réduits.
- Economie de matière : la quantité de béton à utiliser est la moitié de la quantité de béton à utiliser pour un tablier "normal"
- Élégance : les ouvrages obtenus ont un élancement plus élevé que les ouvrages classiques, ce qui donne une apparence de légèreté
- La durée de vie globale de l'ouvrage est prolongée.
- La période qui s'écoule avant que des travaux d'entretien soient nécessaires est beaucoup plus longue que pour le béton conventionnel; les travaux de réparation perturbent donc moins le public et les coûts d'entretien sont moins élevés.
- Le BHP est moins perméable que le béton conventionnel, d'où sa plus grande résistance au sel dans l'eau de mer, aux cycles de gel-dégel et aux dommages causés par le déglacage à l'aide de produits chimiques.
- Une résistance accrue permettra d'utiliser des membres plus minces et plus petits et d'avoir des travées plus longues, ce qui devrait réduire le coût de construction des ouvrages. [20]

II.9 Conclusion

Le BHP a été avant tout conçu pour des applications très particulières, comme les Buildings. Il a des différentes reprises de mis en œuvre pour la réalisation de gratte-ciel, avec des bétons présentant des résistances très élevées. Cependant, le BHP peut également être une solution alternative pour les constructions réalisées habituellement en béton conventionnel car il présente des avantages et des performances très intéressantes par rapport au béton traditionnel. Les ressources réfléchies aux BHP exigent de toute évidence une participation très réduite entre le Propriétaire, l'architecte, l'ingénieur, l'entrepreneur, la centrale à béton et le laboratoire de recherche.

Chapitre III : Les ajouts minéraux.**III.1 Introduction**

On peut fabriquer des BHP en utilisant seulement du ciment portland. Cependant, l'addition d'un ou plusieurs ajouts cimentaires lorsqu'ils sont disponibles à des prix compétitifs peut être avantageuse, non seulement du point de vue économique, mais aussi du point de vue environnementale et surtout du point de vue résistance.

L'ajout de tels aditifs permet d'accomplir deux fonctions, l'une physique et l'autre chimique. La première fonction assure le remplissage des micro vides de l'empilement des grains de ciment tout en améliorant la compacité du mélange et en faisant progresser encore les qualités de sa rhéologie à l'état frais, tandis que le deuxième intérêt (fonction chimique) concerne la fixation de la portlandite produite lors de l'hydratation du ciment pour former un composant de silicate de calcium hydraté plus dense et plus résistant que celui des bétons ordinaires (Benmansour M. et col., 2011).

Ces constituants, quand ils se substituent à une partie du clinker, agissant sur les propriétés du matériau à l'état frais et à l'état durci. En effet, ils modifient le processus d'hydratation du ciment, la nature et la structure des produits hydratés. Leur incorporation agit ainsi sur l'ouvrabilité, la porosité, la perméabilité, la diffusivité et les résistances mécaniques des matériaux cimentaires. [09]

III.2 Définition des additions normalisées pour Les BHP

Les ajouts minéraux sont des produits ultrafins composés de particules de très faibles dimensions qui, ajoutés au ciment, améliorent notablement les performances du béton grâce à leurs propriétés physiques et chimiques [21].

III.2.1 Les ajouts inertes :

Sont des produits qui n'ont aucune influence sur le processus de fabrication d'hydratation et de durcissement du ciment, ces ajouts finement broyés sont ajoutés au clinker avant le broyage.

III.2.2 Les ajouts actifs :

On appelle ajouts minéraux actifs les substances naturelles ou artificielles finement broyées et ajoutées au clinker avant ou après le broyage, améliorent la résistance du ciment et son pouvoir hydraulique [22].

III.3 Bénéfices d'utilisation des ajouts minéraux.**III.3.1 Bénéfices fonctionnels**

- ❖ Incorporation des particules fines améliore la maniabilité et réduit la demande en eau (à l'exception des ajouts d'une grande finesse).
- ❖ Peuvent modifier la nature et la texture des hydrates formés.
- ❖ Prise et durcissement pour les ajouts qui interviennent dans le processus réactionnel du ciment avec l'eau.
- ❖ Il y a une amélioration des propriétés mécaniques et de la durabilité du béton.
- ❖ Il y a une diminution de la chaleur d'hydratation dégagée du béton, ce qui diminue la fissuration d'origine thermique.

III.3.2 Bénéfices économiques

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

III.3.3 Bénéfices écologiques et environnementaux

- ❖ Diminution de l'émission de CO_2 par l'industrie cimentière.
- ❖ Élimination des sous-produits de la nature. [23]

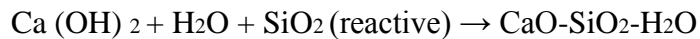
III.4 Classification des ajouts minéraux

Selon la norme [ENV 2006] paragraphe 3.1.5, les ajouts minéraux dans le ciment sont classés en actifs et inertes. On distingue quatre classes d'ajouts minéraux : [24]

III.4.1 Les ajouts minéraux actifs**III.4.1.1 La pouzzolane**

Les pouzzolanes sont des matériaux, naturels ou artificiels, Les pouzzolanes ne durcissent pas elles mêmes en présence d'eau [24], mais elles réagissent à température ambiante en présence d'eau, avec l'hydroxyde de calcium $\text{Ca}(\text{OH})_2$ libéré au cours de l'hydratation du clinker, pour former des composés nouveaux tel que des CSH et des aluminates de calcium hydratés [25] stables, peu solubles dans l'eau et possédants des propriétés liantes. [24]

Les ciments aux pouzzolanes sont obtenus en mélangeant les produits pouzzolaniques finement broyés avec le portland.



(La réaction pouzzolanique forme le CSH stable dans l'eau), [26].

Les normes françaises donnent les définitions suivantes des pouzzolanes entrant dans la fabrication des ciments. [27]

a- pouzzolane naturelle

Les pouzzolanes naturelles sont essentiellement des substances d'origine volcanique ou des roches sédimentaires ayant une composition chimique et minéralogique appropriées. Elles sont essentiellement composées de silice, d'alumine et de fer, et développent naturellement des propriétés pouzzolanique[24],

Les pouzzolanes naturelles sont des matériaux qui peuvent avoir été calcinées dans un four ou transformées, puis broyées pour obtenir une fine poudre. [04]



Photo III.1 : *Types de pouzzolanes.*

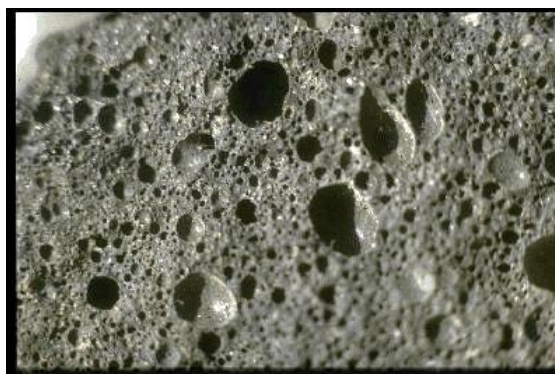


Photo III.2 : *type Pouzzolane naturelle.*

b- Pouzzolane artificielle

Les pouzzolanes artificielles correspondent à des produits essentiellement composés de silice, d'alumine et d'oxydes de fer qui, activés thermiquement, développent des propriétés pouzzolanique (argiles ou schistes par exemple). [25]



Photo III.3 : *Type de pouzzolane.*

c- Propriétés des pouzzolanes

Les pouzzolanes possèdent des diverses propriétés qui sont :

➤ **Propriétés hydrauliques**

La pouzzolane réagit avec l'eau, en présence d'une quantité suffisante de chaux, pour former des hydrates stables, peu solubles et résistants à long terme.

➤ **Propriétés physiques de remplissage**

En plus de leur effet pouzzolanique, elles jouent un rôle de remplissage des pores des produits hydratés et de correcteurs granulaires, ce qui améliore la compacité et diminue la perméabilité. [28]

III.4.1.2 Les laitiers de hauts fourneaux :

Le laitier de haut fourneau, ou le laitier broyé comme il voudrait peut-être mieux l'appeler est un sous-produit de la fabrication de la fonte brusquement refroidi par aspersion d'eau, c'est un matériau hydraulique lorsqu'il est activé. Il se présente sous forme de nodules dont la composition chimique comporte de l'oxyde de calcium dans des proportions de l'ordre de 40 à 50 %, de la silice entre 25 à 35%, de l'alumine entre 12 à 30% ainsi que la magnésie et d'autres oxydes en très faibles quantités, tous ces éléments étant pratiquement les mêmes que ceux du clinker. [29]

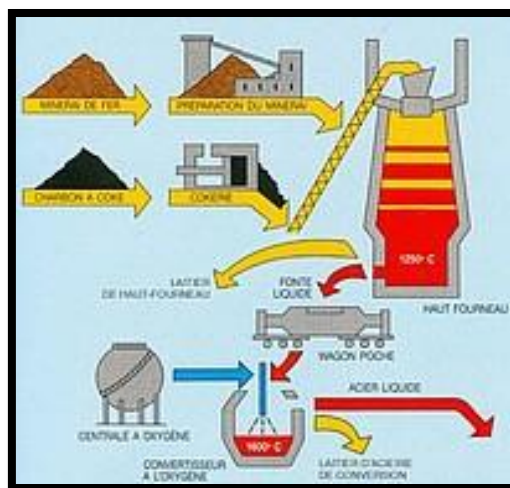


Figure III.1 : production de laitier.

Tableau III.1 : Composition chimique type des laitiers des hauts fourneaux.

OXYDES	Laitier français	Laitier nord U S A	Laitier algérien
% SiO ₂	29 à 36	33 à 42	38 à 42
% Al ₂ O ₃	13 à 19	10 à 16	8 à 12
% CaO	40 à 43	36 à 45	48 à 52
% Fe ₂ O ₃	4	0.3 à 20	2.0
% MgO	6	3 à 12	4.7

Le laitier peut être mélangé avec du ciment après avoir été séparé ou après avoir été broyé avec le clinker. Le laitier retient moins bien l'eau de gâchage que le ciment Portland et craint donc d'avantage la dessiccation. Par contre il résiste normalement mieux à l'action destructrice des sulfates, à la dissolution de chaux par les eaux pures ainsi que par celles contenant du gaz carbonique. La réactivité du laitier peut être augmentée de trois façons :

- Broyage poussé.
- Chaleur (étuvage, autoclavage).
- Produits chimiques (la chaux, la soude (Na OH) ou des sels de soude, le sulfate de calcium (gypse) [29].



Photo III.4: Schéma de fabrication du laitier bouleté.

III.4.1.3 la fumée de silice

La fumée de silice (silica, silica fume) est une poussière très fine avec un effet fortement pouzzolanique, utilisée en qualité d'**ajout** et de **stabilisateur**.

Les micros silices sont un sous produit de la fabrication du silicium et du Ferro-silicium. [23]

La fumée de silice est un sous-produit de la fabrication du silicium, de différents alliages de Ferro silicium ou de zircone. Le silicium et les alliages de silicium sont produits dans des fours à arc électrique chargé du quartz où ce quartz est réduit en présence de charbon (et de fer pour la production de Ferro silicium). Durant la réduction de la silice dans l'arc électrique, un composé gazeux, SiO se forme et s'échappe vers la partie supérieure du four, il se refroidit, se condense et s'oxyde sous forme de particules ultrafines de silice SiO₂. Ces particules sont récupérées dans un système de dépoussiérage c.-à-d., des gaz chargés de poussières dont certains s'oxydent à l'air libre pour donner des fumées de silice. [24]

D'un point de vue chimique, la fumée de silice est essentiellement composée de silice [24] et du point de vue structural, la fumée de silice est essentiellement composée de silice vitreuse. Du point de vue morphologique, les particules de fumée de silice se présentent sous forme de sphères de telle sorte que la dimension moyenne des sphères de fumée de silice est 100 fois plus faible que celle d'une particule de ciment. [30]

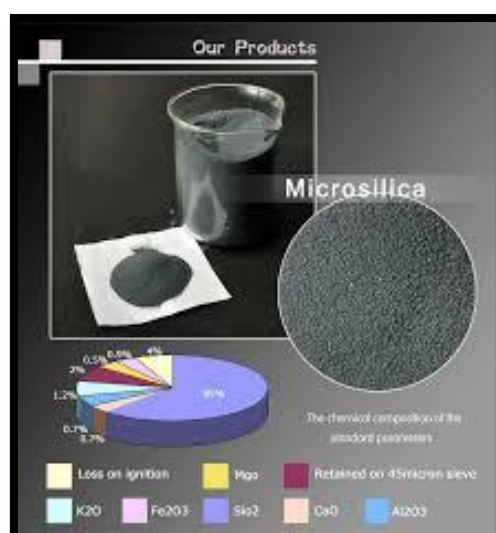


Figure III.2 : le fumé de silice.

Tableau III.2 Composition chimique type de certaines fumées de silice.

Composés	Silicium (grise)	Ferro silicium (grise)	Blanche
% SiO ₂	93.7	87.3	90.0
% AL ₂ O ₃	0.6	1.0	1.0
% CaO	0.2	0.4	0.1
% Fe ₂ O ₃	0.3	4.4	2.9
% MgO	0.2	0.3	0.2
% Na ₂ O	0.2	0.2	0.9
% K ₂ O	0.5	0.6	1.3
% Perte au feu	2.9	0.6	1.2

Les caractéristiques très particulières de la fumée de silice c'est être très réactive à cause de sa très forte teneur en silice, de son état amorphe et de son extrême finesse. Les effets bénéfiques de la fumée de silice qui se présente sous la forme d'une poudre ultra fine de couleur claire ou grise sur la microstructure et les propriétés mécaniques du béton sont d'être au début un substitue du ciment, pour réduire les quantités de ciment utilisées c.-à-d., pour des raisons d'économie et joue un rôle filler sous le nom effet physique. Ces deux effets entraînent à la fois une forte augmentation de la compacité et une amélioration des résistances mécaniques et les propriétés du béton, aussi bien à l'état frais qu'à l'état durci. [24]



Photo III.5 : *Le fumé de silice.*

✓ **L'effet de la fumée silice :**

Les propriétés rhéologiques exceptionnelles de la fumée de silice, par la forme sphérique de ses grains, permirent de la substituer à l'eau et d'obtenir des matériaux à faible porosité, augmentent ainsi la compacité du béton. En comblant les interstices laissés entre les particules fines et les granulats, elle joue un rôle de lubrifiant. [3].

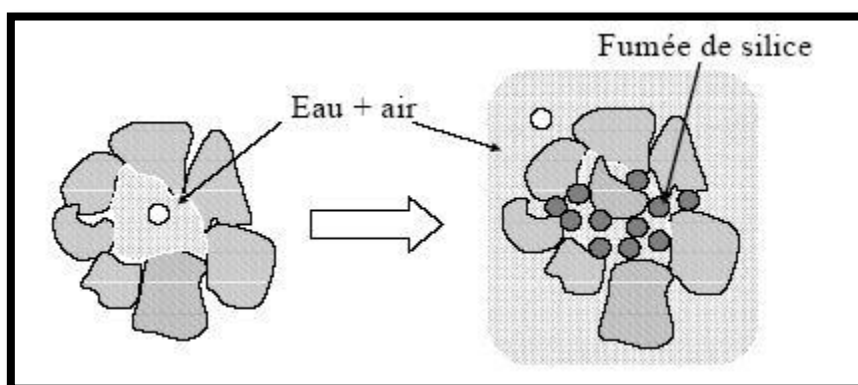


Figure III.3 : *Effet de la fumée de silice sur le compactage d'un mélange liant-granulats, d'après [31]*

Dans le béton frais les fumées de silice induisent les effets suivants:

- Faible tendance au **ressuage**, à la sédimentation.
- Meilleure cohésion interne, légèrement thixotrope.
- Bon pouvoir de rétention d'eau
- Faibles pertes d'air pour le béton à air entraîné.
- Meilleure adhérence sur le support.
- Réduction du rebond et amélioration de la résistance du béton projeté.
- Augmentation du **besoin en eau**.
- **Consistance** plus ferme.

- Le béton frais devient plus «collant».
- L'introduction de pores d'air artificiels est plus difficile.
- Risque accru de fissures liées au retrait précoce.
- Durée de la cure plus importante. [23]

III.4.1.4 Les cendres volantes :

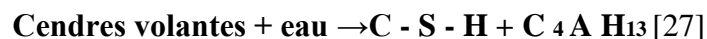
Les cendres volantes sont des particules très fines récupérées dans les dépoussiéreurs de cheminée des centrales thermiques fonctionnant au charbon pulvérisé divisé. Ils peuvent avoir différentes compositions chimiques et différentes composition de phase, ils peuvent être classés en quelques grandes familles, parmi ces grandes famille en trouve : les cendres silicoalumineuses, les cendres silico-calciques et les cendres sulfocalcique qui on une très forte teneur en calcium et en soufre. Ce n'est pas toujours facile d'inclure une cendre volante dans une de ces classes, et pouvoir prédire son comportement pouzzolanique. [32]



Photo III.6: *Cendres volantes de charbon: Point d'origine: Guangdong China (Mainland) [33]*

Les particules de cendres volantes peuvent avoir des formes très différentes les unes aux autres. Elles peuvent avoir une forme sphérique, avec une distribution granulométrique semblable à celle du ciment portland, [34] Les cendres volantes se présentent généralement sous forme de sphère de verre solide, et peuvent être partiellement ou totalement cristallisées. Ces sphères peuvent être creuses ou pleines et ont un diamètre compris entre un et 100 μm . Comme le laitier granulé, les cendres volantes ont besoin d'être activées pour développer des propriétés hydrauliques. Leur activation par la chaux libérée lors de l'hydratation du clinker conduit à la formation des produits suivants: [27]

Chaux (Activation)



Pour développer une réaction pouzzolanique, la cendre volante doit contenir une quantité non négligeable de matériaux vitreux, de cet effet, il faut porter beaucoup d'attention et en se basant pas sur une généralisation de leurs efficacité quand elles sont utilisées comme ajouts dans les BHP. [34]

III.4.2 Les ajouts minéraux inertes :

III.4.2.1 Fillers calcaires

Un filler est un matériau très finement broyé à une finesse à peu près identique a celle du ciment Portland, qui, en raison de ses propriétés physiques, a un effet bénéfique sur certaines propriétés du béton, telles que la maniabilité, la masse volumique, la perméabilité, la capillarité, le ressuage ou la tendance à la fissuration.

Les fillers sont en général chimiquement inertes, mais le fait qu'ils présenter; certaines propriétés hydrauliques n'est pas en soi désavantages, le même que s'ils présentent une réaction avec certains composés développés au cours de l'hydratation. [04]

Les produits désignés dans le commerce comme fillers sont des poudres fines à granulométrie contrôlée, dont les plus gros grains ne dépassent pas 80 microns obtenus par broyage ou par pulvérisation de certaines roches (calcaires, basalte, bentonite, cendres volantes).



Photo III.7 : *Les fillers calcaires.*

Les fillers se différencient les uns des autres par:

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

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

Les différents résultats montrent que les fillers calcaires ajoutés à un CPA peuvent jouer plusieurs rôles:

- Un rôle de remplissage en substitution du ciment dans les éléments fins de la courbe granulométrique (bétons ouvrables retenant mieux l'eau).
- Un rôle rhéologique par leur pouvoir fluidifiant sur la pâte interstitielle.
- Un rôle chimique et physique conduisant à l'accélération de l'hydratation du C3S et du C3A et à la formation de carboaluminates: germes de cristallisation et points d'ancrage des hydrates.
- Un rôle physique en permettant un arrangement initial différent ce qui réduit l'épaisseur entre la pâte et le granulat. [35]

✓ **L'effet filler**

On explique parfois à tort l'activité d'une addition calcaire par ce que l'on appelle "*l'effet filler*"; intuitivement, on imagine que les grains fins de la poudre se glissent entre les grains plus gros (ceux du sable), qu'ils augmentent ainsi la compacité et, par conséquent, la résistance. Or, même si les grains fins de l'addition participent à l'optimisation de la courbe granulométrie, cela n'a pas de conséquence sur la valeur de l'indice d'activité tel qu'il est défini. Une caractéristique importante du béton frais est sa porosité $e+v$ (somme du dosage en eau nécessaire e pour avoir cette consistance et de la teneur en air occlus v dans le béton, après mise en place). Si l'on fait varier le dosage en éléments fins du béton (tous les grains inférieurs à 63 micromètres, qu'ils appartiennent au ciment, à l'addition ou aux granulats), on observe l'existence d'un dosage optimal pour lequel la porosité du béton frais est minimale.

Pour un béton dont la dimension maximale du plus gros granulat est de 20mm, ce dosage optimal en éléments fins est de l'ordre de **350 kg/m³**.

Il n'y a aucune raison pour que l'effet filler soit considéré comme une propriété des additions puisque c'est, en fait, une propriété, à consistance constante, de la granularité optimale des bétons. Cet optimum granulométrique et, tout

particulièrement, l'optimum en éléments fins, a bien d'autres effets bénéfiques sur le comportement du béton frais : il limite le ressuage, augmente la cohésion, facilite le démoulage immédiat [36].

III.4.2.2 verre

Du fait de sa nature amorphe et qu'il contient des quantités relativement appréciables de silice, le verre est en générale considéré comme étant pouzzolanique s'il est finement broyé. Ainsi il pourrait être utilisé en remplacement du ciment portland dans les bétons. [35]

Plusieurs travaux ont été conduits dans les années soixante sur l'utilisation du verre comme granulats dans les bétons. [37]

Depuis, l'idée a été en partie abandonnée. Ce n'est que depuis une vingtaine d'années que le sujet est redevenu d'actualité. En effet, pour des raisons économiques et environnementales, l'utilisation du verre recyclé dans les ciments et bétons a causé l'intérêt d'innombrables municipalités et celles-ci ont encouragé de nouvelles études [38].

a-Comportement du verre dans un milieu cimentaire

Le verre incorporé dans les bétons peut manifester plusieurs types de comportements, essentiellement en fonction de sa granularité : une granularité grossière tend à provoquer un phénomène d'alcali-réaction générateur de désordres, alors qu'un verre fin développe une action bénéfique identifiable à une réaction pouzzolanique. [39].

b-Réaction pouzzolanique du verre

L'activité pouzzolanique du verre peut être évaluée par diverses méthodes : les tests mécaniques sur éprouvettes de mortier et béton à base de ciment ou sur des mortiers à base de chaux, ou encore test chimique de consommation de chaux notamment par l'essai chapellet, ATG et DRX. [35]

Cette activité peut être influencée par divers facteurs :

- 1-La taille des grains de verre joue un rôle prépondérant sur l'activité pouzzolanique : plus les grains de verre sont fins, meilleure est son activité pouzzolanique.
- 2-La résistance des mortiers et bétons diminue à mesure que leur teneur en verre augmente.

3-L'activité pouzzolanoïque varie d'un verre à un autre, selon leur couleur, le verre brun est le verre qui procède la plus faible activité, par contre le verre vert et le verre blanc présentent une activité pouzzolanoïque.

c-L'utilisation simultanée de verre et de pouzzolane

Concernant ce point, plusieurs études en laboratoires ont été conduites.

L'utilisation simultanée d'un verre et d'une pouzzolane notamment le fumé de silice, la cendre volante ou même le métakaolin en remplacement d'une fraction du ciment pourrait conduire à synergies intéressantes. Ainsi l'utilisation du verre serait plus intéressante que son emploi individuel [40].

d-Réaction alcali-silice du verre

Le remplacement partiel de granulats naturels ou du ciment par le verre dans les bétons, améliore ses propriétés mécaniques notamment les résistances en compression. Toutefois, certains travaux conseillent l'utilisation de ces matériaux en prenant certaines précautions.

Effectivement, les bétons à base de verre sont confrontés à un problème lié à leur durabilité.

La silice de verre en combinaison avec les alcalins du ciment donne naissance à des produits gonflants entraînant l'endommagement des bétons. La réaction alcali-silice dépend de différents paramètres, la bibliographie a montré que le processus de la réaction alcali-silice et des granulats de verre est un phénomène complexe influencé par plusieurs facteurs. [35]

III.5 Effets des additions

On peut résumer l'effet des additions minérales sous forme de fillers sur les propriétés des BHP comme suit [41]:

III.5.1 Effet fillers ou effet de remplissage

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

III.5.2 Effet physique ou de surface

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

facilité. L'addition minérale entraîne donc une meilleure hydratation du ciment à un instant donné.

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

III.5.3 Effet chimique ou pouzzolanique

La réaction pouzzolanique est une réaction chimique entre la silice et la portlandite. La silice, qui est généralement apportée par une addition minérale de type cendre volante, fumée de silice ou laitier de haut fourneau, réagit avec la portlandite formée lors de l'hydratation du ciment pour donner naissance au CSH secondaire. [34]

III.6 L'intérêt de l'utilisation des ajouts minéraux dans le génie civil

III.6.1 Intérêt du point de vue économique

L'introduction des ajouts dans la confection du ciment présente un facteur bénéfique car la consommation en clinker baisse en fonction des taux d'ajouts. En effet, le clinker étant obtenu par transformation de la crue (argile + calcaire) nécessite une dépense d'énergie très importante pouvant être réduite par l'introduction de cet ajout, ce au premier lieu et au deuxième lieu. Des produits industriels tels que les fumées de silice condensées sont de plus en plus utilisées dans les pays industrialisés parce qu'ils sont des déchets d'usine. Contrairement aux pouzzolanes naturelles, il n'est pas nécessaire de les pulvériser ou de les soumettre à un traitement thermique avant de s'en servir, et elle a été utilisée en grandes quantités dans plusieurs pays pour fabriquer des ciments Portland composés. Pour des raisons d'épargne d'énergie donc, une utilisation de ces matériaux se poursuivra et se développera de plus en plus. [19]

III.6.2 Intérêt du point de vue technique

L'intérêt technique des ajouts réside en premier lieu dans le fait qu'ils permettent l'obtention d'un ciment dont les performances sont aussi bonnes que celles d'un CPA (ciment Portland) de même classe de résistance. En second lieu, les ciments composés (CPA + ajouts) présentent souvent l'avantage sur le CPA, d'une meilleure résistance aux agressions chimiques.

Certains avantages techniques que présente l'utilisation des pouzzolanes dans le béton ne peuvent pas être atteints lorsqu'un CPA est utilisé seul. Parmi ces avantages, mentionnons une plus grande ouvrabilité, une maniabilité accrue, une meilleure

étanchéité à l'eau (l'ajout rend le béton plus compact), une réduction de la chaleur d'hydratation et des risques de fissuration sous l'effet de l'action thermique et une plus grande durabilité au milieu sulfaté ou acide [42].

III.7. L'utilisation des ajouts en Algérie

L'industrie cimentaire est d'importance primordiale pour l'Algérie comme tous pays en voie de développement. Cependant, parmi les moyens efficaces qui existent pour augmenter la production du ciment est celui d'utiliser des ajouts qui sont très peu coûteux et disponibles en grandes quantités en Algérie, comme le laitier d'El –Hadjar, le calcaire et la pouzzolane naturelle de Béni – Saf. Le (tableau III.1) donne une idée sur les ajouts utilisés dans les cimenteries algériennes. [24]

III.8 Conclusion

Un des arguments souvent avancé en faveur de l'utilisation des ajouts minéraux est qu'ils permettent d'économiser de l'énergie et de préserver les ressources naturelles comparées au ciment Portland. Cet argument est en partie juste, mais le principal argument en faveur de l'incorporation de ces matériaux dans les mortiers et bétons est en réalité qu'ils apportent des avantages techniques considérables. En effet, ils affectent la cinétique de la réaction d'hydratation, améliorent les caractéristiques physiques des mortiers et bétons à l'état frais et contribuent positivement aux résistances mécaniques des mortiers et bétons à l'état durci et ceci en raison de leur composition chimique, de leur réactivité, de leur granulométrie ainsi que de la forme de leurs éléments.

Chapitre IV Caractérisation des matériaux

IV.1 Introduction

La qualité de béton dépend de ces composants .c'est pour cela qu'il est nécessaire de bien les caractériser. Bien que les propriétés et les caractéristiques des matériaux de construction déterminent le domaine de leur application. Ce n'est qu'en évaluant ou en mesurant exactement les qualités et les caractéristiques les plus importantes, que nous pourrions confectionner des bétons qui nous permettent de construire des édifices et ouvrages solides, durables et de haute efficacité économique et technique.

1^{er} partie : Caractérisation et préparation des matériaux

IV.2 Matériaux utilisés

Les matériaux utilisés dans le cadre de réalisation de notre étude sont des matériaux purement locaux, nous avons donc effectué des divers essais de caractérisation pour les identifier au sein du laboratoire de génie civil à l'université El Bachir El Ibrahimi Bordj Bou Arreridj, et d'autres essais ont été réalisées dans laboratoire de la cimenterie de Ain El Kbir.

IV.2. 1 Ciment

Le ciment que nous avons utilisé pour ce programme expérimental est un ciment portland de classe CPA-CEM I 52,5 de Lafarge Sarie (wilaya de M'silla) conformément à la norme NA 442 – 2000.

Les ciments portland peuvent contenir entre 95% et 97% de Clinker.

IV.2. 1.1 Caractéristiques du ciment

a- Les Avantage du ciment Sarie 52,5

Ciment ultra haute performance CPA-CEMI 52.5 de Préfabrication lourde et légère Infrastructures (fondations) et éléments de superstructures nécessitants un décoffrage rapide permettant d'optimiser les délais de réalisation Bétonnage par temps froid Tous travaux techniques nécessitant des résistances élevées à jeune âge et de hautes performances.

b- Le Ciment le plus résistant du marché Algérien

- Ciment de classe vraie très élevée avec un faible retrait.
- Résistance élevée à jeune âge
- Compatibilité accrue avec les différents adjuvants (plastifiants, retardateurs de prise, accélérateurs de prise et de durcissement...).

c- Parfaitement adapté à la fabrication légère

- Augmentation de la productivité :
 - Durcissement rapide
 - Augmentation de la production
 - Gain en surface de stockage.
- Réduction du taux de casse

d- Idéal pour les bétonnages par temps froid

- Sarie résiste mieux au cycle gel/dégel qu'un ciment courant
- Grâce à sa prise rapide, Sarie est recommandé pour le travail par temps froid.

e- Domaine d'application :

- Préfabrication lourde et légère
- Infrastructures (fondations) et éléments de superstructures nécessitant un décoffrage rapide permettant d'optimiser les délais de réalisation.
- Bétonnage par temps froid.
- Tous travaux techniques nécessitant des résistances élevées à jeune âge et de hautes performances.



Photo IV.1 : *Ciment utilisé CEMI 52,5*

Les compositions chimiques et les propriétés physiques du ciment utilisé dans cette recherche sont données dans les tableaux (IV.1 – IV.2 – IV.3 et IV.4) :

Tableau IV.1 Composition chimique du ciment

<i>Composition chimique du ciment (%)</i>									
Composés	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Cl	PaF
Valeur %	19.17	4.80	3.08	62.05	1.75	3.20	0.622	0.017	5.31

Tableau IV.2 Composition minéralogique du ciment.

<i>Composition minéralogique du ciment</i>		
Éléments	Abréviation	Teneur (%)
<i>Silicate tri calcique</i>	C3 S	61.14
<i>Silicate bi calcique</i>	C2 S	8.86
<i>Aluminate tricalcique</i>	C3 A	7.51
<i>Alummino-ferrite tetracalcique</i>	C4 AF	9.37

Tableau IV.3 Résistance à La Compression du ciment (MPa).

<i>Résistance à la compression du ciment (MPa)</i>	
Age	Valeur
2 jours	≥20.0
28 jours	≥52.5

Tableau IV.4 Propriété physique.

<i>Propriété physique du ciment</i>	
Propriété	Valeur
Consistance normale de la pate ciment	25.0- 31.0
Finesse suivants la méthode de Blaine (NA 231)	3500-4500
Retrait à 28jr en µm /m	<1000
Expansion en mm	0.3-2.5

IV.2.2 Sable

Le sable utilisée, est un sable naturel (sable de dune), il est fait principalement de petites particules de silicium .il est propre, les graine sont de forme généralement isométrique et arrondie de dimension vrai entre 0.08 et 3 mm.

IV.2.2.1 Origine du sable:

- **Le gisement de Oued Souf** : située au sud-est de l'Algérie, à 620 km au sud-est d'Alger et c'est loin de Bordj Bou Arreridj 463 km sur la route nationale RN48.

IV.2.2.2 Préparation des différents types de sable

Préparation de sable utilisée (Quartz)

Lieu de préparation : laboratoire de département de Génie Civil de l'université Mohamed EL Bachir L'Ibrahim; Bordj Bou Arreridj.

IV.2.2.3 Méthode de préparation du quartz

Le sable est préparé selon les étapes suivantes :

- **Lavage** : Le lavage s'effectue par l'utilisation d'une façon abondante et continue de l'eau de température ambiante deux ou trois fois, pour éliminer les impuretés.
- **Séchage** : Le séchage est effectué à l'air libre.
- **tamissage** : Le tamisage est effectué manuellement sur série de tamis indiquée en suivant les étapes ci-dessus :
- Prélèvement d'une masse de matériau (Sable de Oued Souf sec).
- Constitution de colonne de tamis propres et sec dont l'ouverture des mailles de haut en bas (exprimée en mm) [3, 2.5, 1.25, 0.63, 0.315, 0.16, 0.08].
- Versement du sable sur la colonne de tamis et celle-ci est vibrée manuellement
- Les fractions obtenues dans chaque tamis ont été conditionnées dans des sacs séparés.

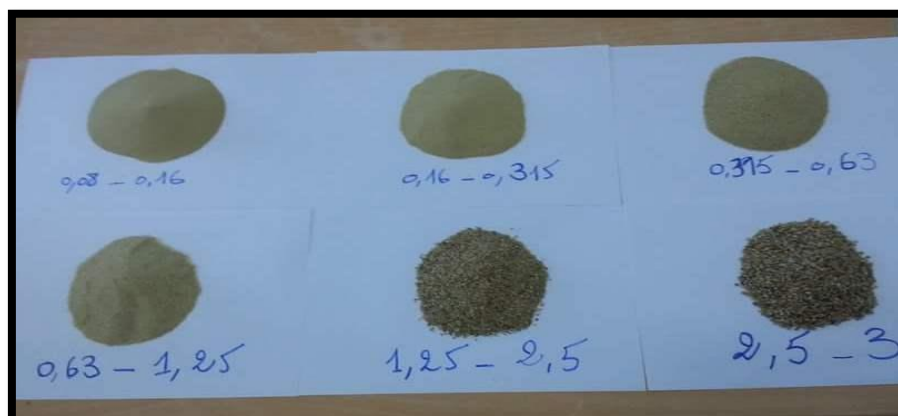


Photo IV.2: Des fractions du différent quartz.

- Les fractions du quartz ont été mélangées selon le Tableau (IV.5)
- **Sable témoin(ST)** : toutes les fractions en quartz.

Tableau IV.5 : *La composition du Sable témoin.*

Fraction	0.08- 0.16	0.16- 0.315	0.315- 0.63	0.63- 1.25	1.25- 2.5	2.5-3	
pourcentage	11%	16%	29%	19%	15%	10%	100%

IV.2.2.4 Classification granulométrique des produits

Les granulats sont classés en fonction de leur granulométrie déterminée par analyse granulométrique sur des tamis de contrôle à mailles carrées dans une série normalisée. Les fractions du sable et d'ajouts ont été mélangées selon les tableaux suivant :

Tableaux IV.6 : *Les fractions de Chaque type de sable.*

Fraction	Pourcentage	Sable témoin	Sable (01)	Sable (02)
0.08-0.16	10%	quartz	Pouzzolane	Laitier (10%)
0.16-0.315	15%	quartz	Quartz	Laitier (05%)
0.315-0.63	30%	quartz	Quartz	Quartz
0.63-1.25	20%	quartz	Quartz	Quartz
1.25-2.5	15%	quartz	Quartz	Quartz
2.5-3	10%	quartz	Quartz	Quartz

IV.2.3 Gravier

Le gravier utilisé pour la confection du béton dans notre étude expérimentale provient de la carrière de Sétif Salhi- El Mzara –route hammam sokhna .Les graviers concassés sont de nature calcaire avec une taille de la particule nominale de 8 mm (G1) et 16 mm (G2).

Tableaux IV.7 : *Les fractions de gravier utilisées.*

Fraction de Gravier	
(3/8)	(8 /16)
40%	60%

IV.2.3.1 préparation de Gravier

- **Lavage** : Le lavage s'effectue par l'utilisation d'une façon abondante et continue de l'eau de température ambiante deux ou trois fois.
- **Séchage** : Le séchage est effectué à l'air libre.
- **tamisage** : le tamisage est effectué manuellement sur série de tamis indiquée en suivant les étapes ci-dessus :

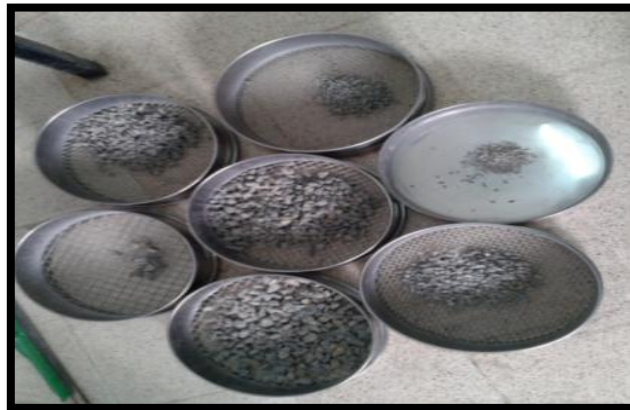


Photo IV.3 : *Tamis utilisés.*

- Prélèvement d'une masse de Gravier Constitution de colonne de tamis propres et secs dont l'ouverture des mailles de haut en bas (exprimée en mm)[16 -15- 10 -8 - 6.3 - 5]
- Versement du Gravier sur la colonne de tamis et celle-ci est vibrée manuellement
- Les fractions obtenues dans chaque tamis ont été conditionnées dans des sacs séparés.

IV.2.4 Les ajouts minéraux

Les ajouts utilisés dans notre programme expérimental sont les suivantes :

- **Le laitier de haut fourneau**
Le laitier choisi est un laitier de production local (EL HADJER), qui a été broyé jusqu'à une finesse de 4432 cm²/g.
- **Le laitier d'importation**
Est un laitier provient de l'Espagne qui a été broyé avec une finesse de 2907 cm²/g.



Photo IV.4: Laitier de haut fourneau

IV.2.4.1 Les caractéristiques chimiques

La composition chimique des ajouts a été déterminée dans le laboratoire de la cimenterie d'AIN EL KBIRA.

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau. IV.8: Composition chimique type de laitiers de haut fourneau.

Composés	SiO ₂ %	AL ₂ O ₃ %	CaO%	Fe ₂ O ₃ %	MgO%	SO ₃ %	K ₂ O%	PAF
Pourcentage	32.52	8.88	26.11	2.92	2.58	1.50	1.268	21.205

➤ Pouzzolane :

La pouzzolane naturelle utilisée dans ce travail a été ramené de la carrière de Beni Saf. Elle été broyé avec une finesse de 3083 cm²/g.



Photo IV.5 : Pouzzolane utilisé.

Tableau IV.9: Composition chimique de pouzzolane utilisé.

Composés	SiO ₂	AL ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	K ₂ O	PAF
	%	%	%	%	%	%	%	%
Pourcentage	37.26	15.37	17.01	10.55	3.06	0.38	1.339	15.024

- **Déchets de verre** : le verre choisi pour le programme expérimental est de forme de déchets des utilisations de verre tel que par exemple, les sources de fabrications industriel.



Photo. IV.6 : Le verre utilisé.

Tableau IV.10: Analyse chimique de la poudre de verre

Composés	SiO ₂	AL ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	LOI
	%	%	%	%	%	%	%	%	%
Pourcentage	70.26	0.85	8.92	2.03	1.71	0.18	0.58	5.00	0.62

➤ **Préparation des ajouts**

La préparation de tous les ajouts utilisés dans le cadre de la réalisation de notre étude passe par une chaîne d'opérations : un concassage et un broyage au niveau de la cimenterie « **d'AIN EL KBIRA** » de la wilaya de Sétif.

On a traité les pouzzolanes et les laitiers de façon à les pouvoir l'utiliser comme ajout de substitution dans le sable, par contre les fillers (verre) utilisé dans le ciment par substitution aussi.

- **1^{er} étape** : consiste le concassage, étant la fragmentation grossière, a pour objet de réduire les dimensions afin d'obtenir la granularité souhaitée et pour améliorer la forme des granulats.



Photo IV.7: Concassage des ajouts (pouzzolane, laitier).

2^{ème} étape : consiste le broyage, l'élaboration des fractions fines, petits gravillons et fillers. C'est une opération qui a pour but de donner à l'ajout une grande finesse désiré pour des diverses raisons.



Photo.8: Le broyeur utilisé.

❖ Concassage et broyage**a. Définition :**

La fragmentation primaire des matériaux se fait par un concasseur à mouchoir pour diminuer le diamètre et permettre un broyage facile à l'aide d'un broyeur à boulets.

b. Le but de concassage : Le concassage a pour objet de réduire les dimensions afin d'obtenir la granularité souhaitée et pour améliorer la forme des granulats

c. Principe de concassage et de broyage : Le concassage et de broyage utilisés se basent sur deux principes de rupture :

-Rupture par écrasement : se fait entre deux pièces métalliques dont l'une est mobile, soit par translation c'est le cas des mâchoires, soit par rotation c'est le cas des giratoires.

Ce processus est destiné à traiter les produits grossiers sortant du primaire, à élaborer des Gravillons gros ou fins ou à produire du sable.

-Rupture par chocs (Broyage): se fait contre des pièces mobiles en rotation, soit des marteaux, percussions ou soles tournantes, soit par projection centrifuge mais cette dernière travaille essentiellement par auto broyage. Ce processus est très intéressant du point de vue de la forme des grains. On utilise essentiellement des ruptures par chocs, ce qui donne un excellent affinage de la forme des grains [42].

IV.2.5 Les adjuvants

Les adjuvants permettent d'obtenir les propriétés de grande fluidité et de parfaite Homogénéité nécessaire à l'obtention à des matériaux élaborés. L'effet secondaire d'un tel produit est différent du rôle principal.

IV.2.5.1 Super plastifiant– haut réducteur d'eau**Description**

Lors de cette étude nous avons utilisé un adjuvant provenant de GRANITEX Oued Semmar. (Wilaya d'Alger). Le super-plastifiants est :

MEDAFLOW 30, il est conforme aux exigences des normes NFP 18333 et NFP 18336. Il permet d'obtenir des bétons et mortiers de très haute qualité. En plus de sa fonction principale de super-plastifiant, il permet de diminuer la teneur en eau du béton d'une façon remarquable, Med flow 30 est un super-plastifiant de la troisième génération de type poly carboxylate, les caractéristique de super plastifiant est présenté dans le tableau (IV.11) :

Tableau IV.11 : Caractéristique du super-plastifiant.

MEDAFLOW 30					
Forme	Couleur	PH	Densité	Teneur en chlore	Teneur en extrait sec
Liquide	Jaunâtre	6 – 6,5	1,07 ± 0,01	< 1g/L	30%

Mode d'emploi

Le **MEDAFLOW 30** est introduit dans l'eau de gâchage. Il est ajouté dans le béton après que 50 à 70% de l'eau de gâchage ait été introduite [43].

IV.2.6 Eau de gâchage :

Nous avons utilisés pour le gâchage de notre béton l'eau de robinet disponible au niveau de notre université. D'où ces caractéristiques physico-chimiques sont les suivants [44]

Tableau IV.12 : Les analyses de l'eau de gâchage.

paramètre	Quantités	Commentaires
Ph	8.18	acceptable pour le gâchage
conductivité	1250 µs /cm	/
taux de (Cl ⁻)	0.24 mg /l	0.05 à 0.50
taux de (NO ₂ ⁻)	0.15 mg /l	< à la concentration max (50)
taux de (NO ₃ ⁻)	1.8 mg/l	< à la concentration max (50)
turbidité	1.44 NTU	/
dureté total	6.72°F	15-50
Résidu sec	100 mg/L	/

2^{ème} Partie : Protocole d'essai

IV.3 Caractéristiques des matériaux utilisés

IV.3.1 Caractéristiques du Ciment

IV. 3.1.1 Masse volumique apparente

Matériels nécessaires

- un entonnoir monté sur trépied.
- un récipient calibré.
- une règle à araser.
- une balance.

Mode Opérateur

- ✓ Tarer le récipient P1.
- ✓ Remplir le récipient P1. posé au- dessous de l'axe du dispositif entonnoir avec la poudre de ciment.
- ✓ Faire l'opération sans vibration. Raser avec la réglette appuyée sur les bords de récipient.
- ✓ Nettoyer l'extérieur du récipient.
- ✓ Peser de nouveau le récipient rempli P2.



Photo.9 : Entonnoir utilisé

$$\rho = (p2 - p1) / V$$

Tableau. IV.13 : Les résultats de la masse volumique apparente obtenus de ciment.

Ciment	Facteurs	Essais n°1	Essais n°2	Essais n°3	Valeur moyenne ρ_{app} (g/cm ³)
CPA 52.5	P1	64	64	64	1.049
	P2	1098	1112	1130	
	V	1	1	1	
	Pabc	1.034	1.048	1.066	

IV.3.1.2 Masse volumique absolue

La technique expérimentale utilisée est celle de l'appareil appelé "le Densimètre de Le Chatelier".

Matériel nécessaire

- Un Densimètre Le Chatelier.
- Un liquide inerte vis-à-vis du ciment (alcool à brûler de préférence, à défaut eau).
- Une balance.
- Un entonnoir à long col.
- Une tige métallique.
- Une spatule.

Mode opératoire

- ✓ Peser 64 g de ciment
- ✓ Introduire le benzène jusqu'à la graduation inférieure trait marqué 0 soit V0
- ✓ Introduire l'ajout dans le densimètre
- ✓ Agiter doucement en faisant tourner le densimètre pour chasser l'air entraîné par la poudre après stabilisation du niveau lire le volume soit V1
- ✓ Calcul de la masse volumique absolue par la relation :

$$\rho = M / (V1 - V2)$$

Les résultats obtenus sont représentés dans les tableaux suivants :

Tableau IV.14: *Masse volumique de ciment utilisé.*

Ciment	Facteurs	Essais n°1	Essais n°2	Essais n°3	Valeur moyenne ρ_{abs} (g/cm ³)
CPA 52.5	V0	0	0	0	3.076
	V1	20.9	20.7	20.8	
	M	64	64	64	
	ρ_{abs}	3.062	3.091	3.076	

IV.3.1.3 La finesse

L'essai consiste à la mesure de la surface des grains contenus dans une masse unité de poudre, elle s'exprime en cm^2/g .

➤ Principe de l'essai:

Elle consiste à mesurer le temps mis par une quantité fixée d'air pour traverser un lit de poudre compacté à une dimension et une porosité spécifiées. La surface massique est proportionnelle au temps mis pour traverser la couche de poudre.

➤ Conduite de l'essai

- Peser une quantité de l'ajout et mettre la poudre dans la cellule puis compacter à l'aide du piston
- Placer la surface conique de la cellule dans le rodage conique au sommet du manomètre
- Obturer le dessus du cylindre avec bouchon adéquat. Ouvrir le robinet d'arrêt en amenant le niveau du liquide à la première ligne.
- Fermer le robinet d'arrêt et enlever le bouchon du cylindre.
- Démarrer le chronomètre dès que le liquide atteint la deuxième ligne.
- Arrêter le chronomètre dès que le liquide atteint le troisième repère.
- Relever le temps à 0.2s près et la température à 1°C près.
- Calculer la surface spécifique du ciment par la formule.

$$SSB = (K\sqrt{3e\sqrt{t}}) / (\gamma(1-e)\sqrt{0.1\eta})$$

Avec :

K : la constante de l'appareil.

γ : la masse volumique g/cm^3 .

η : viscosité de l'air à la température de l'essai en poise.

t : temps de passage de l'air dans la couche de poudre en seconde.

e : porosité de l'ajouts dans la cellule.

-La masse spécifique de Blaine de ciments utilisés est de 2968 cm^2/g .

IV.3.1.4 Essai au mini-cône (NF EN 1961)

- **Le but de l'essai**

C'est un essai qui nous permet d'avoir l'état de saturation de tel ciment en présence d'un adjuvant fluidifiant ou super plastifiant, afin de déterminer le rapport E/L qui convient.

- **Le principe de l'essai**

L'essai consiste à la caractérisation de la pâte du ciment à l'état frais, un mini-cône inspiré du cône d'Abrams et dont les dimensions lui sont proportionnelles servira essentiellement à la détermination des diamètres d'étalement sur une plaque plane horizontale en fonction des paramètres de composition, ces diamètres sont mesurés après 1 minute d'étalement. Le principal avantage de cet essai consiste dans la facilité et la rapidité d'exécution puisqu'il ne nécessite qu'une faible quantité de matériaux (volume inférieur à 40 ml et la Masse de liant égale à 200 g).

- **Matériel et matériaux utilisés**

Matériel

- Un mini-cône.
- une plaque plane.
- un malaxeur.
- une balance de précision.
- une règle métallique.
- une éprouvette graduée.
- une spatule.

Matériaux

- 200 g de liant (ciment+verre).
- 60 ml (eau+super plastifiant).

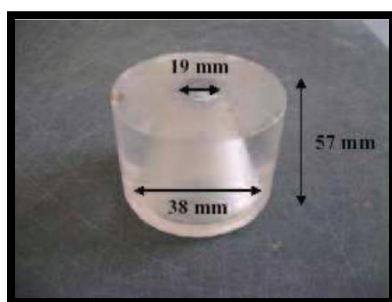


Photo. IV.10 : Mini-cône utilisé.

- **Mode opératoire :**

Le processus de cet essai est se déroule sous les étapes suivantes :

-**d'abord**, on pèse une masse de 200 g de liant (ciment+verre) et on mesure quantité de 60 ml d'eau + super plastifiant à l'aide d'une éprouvette graduée.

-**en suite**, on verse la masse de liant à pesé dans un malaxeur et on fait le marché et durant le malaxage on verse aussi la quantité d'eau et de super plastifiant et on laisse le tout à mélangés pendant 1min et 30 secondes.

-**en fin**, Just après l'arrêt de malaxeur on prend le mélange et l'introduit dans le mini-cône et ensuite on fait enlever ce dernier pendant 1min et après on détermine le diamètre d'étalement à l'aide d'une règle métallique.

Le tableau suivant représente les résultats des diamètres d'étalement obtenus à partir d'essai de mini-cône :

Tableau IV.15 : *Les résultats des diamètres d'étalement.*

Diamètre d'étalement				
Pourcentage de SP (%)	Masse de liant M (g)	SP (ml)	E/L	Diamètre d'étalement (cm)
0.8	200	1.6	0.30	11
1		2		13.50
1.2		2.4		15
1.4		2.8		17
1.6		3.2		19
1.8		3.6		20
2		4		23

IV.3.1.5 Temps de début de prise d'un ciment selon NF EN 196-3

- **Le but de l'essai**

Déterminer le temps de prise d'un ciment, c'est mesurer le temps qui s'écoule entre l'instant où le mélange liant eau a été réalisé et le début de prise - temps 0 : début de la mise en contact de l'eau et du ciment ; - temps 1 : changement de consistance de la pâte, c'est le début de la prise ; - temps 2 : la pâte devient dure, c'est la fin de la prise.

- **Principe de l'essai :**

Le temps de prise est déterminé par le suivi de la pénétration d'une aiguille normalisée dans une pâte de ciment de consistance normalisée jusqu'au moment où l'aiguille atteint une profondeur de pénétration spécifiée (entre 3 et 5 mm).

- **Matériel utilisés :**

- Une balance, permettant de peser à 1 g près.
- Une éprouvette graduée de 250 ml.
- Un malaxeur à mortier de 5 litres environ.
- Une règle à araser, une truelle (langue de chat).
- Un chronomètre au dixième de seconde.
- Un appareil de Vicat et ses accessoires décrits à la figure suivante, équipé d'une aiguille de Vicat.
- moule tronconique (anneau), reposant sur une plaque support.



Photo IV.11 : Appareil Vicat.

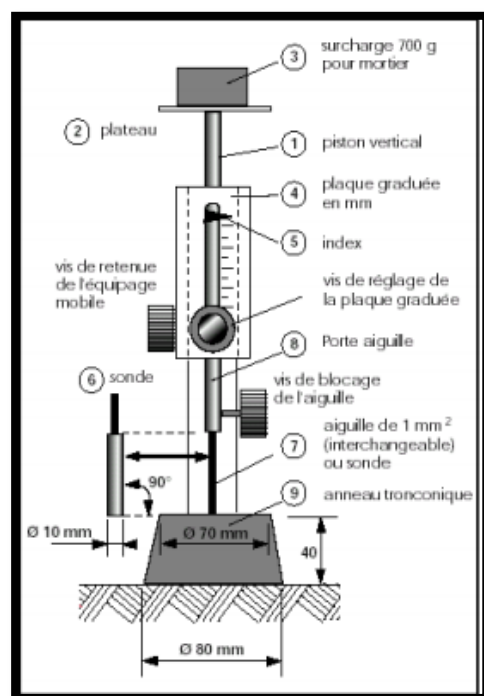


Figure IV.1 : Appareil Vicat.

- **Détermination du temps de la prise**

- Réaliser une pâte de consistance normale
- Noter le temps zéro.
- Equiper l'appareil de Vicat de l'aiguille, et régler l'appareil par abaissement de l'aiguille jusqu'à la plaque de base et ajustement du repère au zéro de l'échelle de la plaque graduée.
- Introduire immédiatement la pâte dans le moule et l'araser.
- Placer le moule rempli sous l'appareil de Vicat.
- Abaisser l'aiguille jusqu'au contact de la pâte.
- Observer une pause de 1 à 2 secondes à cette position, de manière à éviter une vitesse initiale des parties mobiles.
- Lâcher alors rapidement les parties mobiles et laisser pénétrer verticalement dans la pâte.
- Effectuer la lecture de l'échelle à la fin de la pénétration ou 30 secondes après la libération de l'aiguille.
- Noter la lecture de l'échelle qui indique la distance entre l'extrémité de l'aiguille et la plaque de base.
- Répéter l'essai de pénétration sur la même pâte à des positions espacées de plus de 10 mm des bords du moule, à des intervalles de temps réguliers de 10 à 15 minutes (nettoyer l'aiguille de Vicat aussitôt après chaque essai).
- Noter, à 5 minutes près, le temps écoulé entre l'instant Zéro et l'instant 1, au bout duquel la distance entre l'aiguille et la plaque de base est de $4 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$.

Tableau IV.16 : Les résultats du temps de prise de ciment utilisée.

Temps de début et fin de prise de liant						
Liant	Ciment +verre	Ciment +verre+ laitier	Ciment+ Verre+ pouzzo	Ciment +verre+SP	Ciment +verre+ Laitier+SP	Ciment+ Verre+ Pouzzo+SP
temps (min)	232	217	197	184	199	143
D (mm)	5	4	4	5	5	4
E/L	0.30	0.30	0.19	0.22	0.22	0.20
SP(%)	0	0	0	1.8	1.8	1.8

IV.3.2 Sable

IV.3.2.1 Analyse granulométrique par tamisage

[NA EN 933-1]

➤ But de l'essai

L'analyse granulométrique permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles de grains constituant l'échantillon.

➤ Principe de l'essai

L'analyse consiste à séparer et classer ces grains selon leur diamètre à l'aide de tamis, emboîtés les uns sur les autres dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. L'échantillon étudié est mis sur le tamis supérieur et le classement des grains est obtenu par vibration de la colonne de tamis.

➤ Matériels utilisés

- Une colonne de tamis propres et correspondants à chaque fraction.

Tableau IV.17 : Série des tamis utilisés pour le tamisage de sable.

Fraction	Tamis utilisés (exprimé en mm)
0/5	(5 – 2.5 – 1.25 – 0.63 – 0.32 – 0.16 – 0.08 et le fond)

➤ Préparation de l'échantillon

L'échantillon de sable est préparé selon la norme NF EN 933-1

La masse M de l'échantillon pour l'essai doit être supérieure à 0,2 D, avec M exprimée en kilogrammes et D plus grande dimension spécifiée en millimètres.

➤ Mode Opérateur

Le mode opératoire est le même que celui utilisé pour le gravier, la seule différence est la durée de l'essai ; au lieu de 7 minutes pour le gravier elle va être 4 minutes pour le cas du sable. Les résultats de l'analyse granulométrique de sable sont représentés dans le tableau IV.18.

Tableau IV.18 : Analyse granulométrique du sable d'OUED SOUF.

Diamètre des tamis (mm)	Refus élémentaires (g)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamisât cumulés (%)
5	1.58	1.58	0.16	1.58
2,50	17.16	18.74	1.87	18.74
1,25	58.5	77.24	7.72	77.24
0,63	222.33	299.57	29.96	299.57
0,315	423	722.57	72.257	722.57
0,16	225.33	947.9	94.79	947.9
0,08	48.33	996.23	99.62	996.23
Fond	3.66	999.89	99.99	999.89

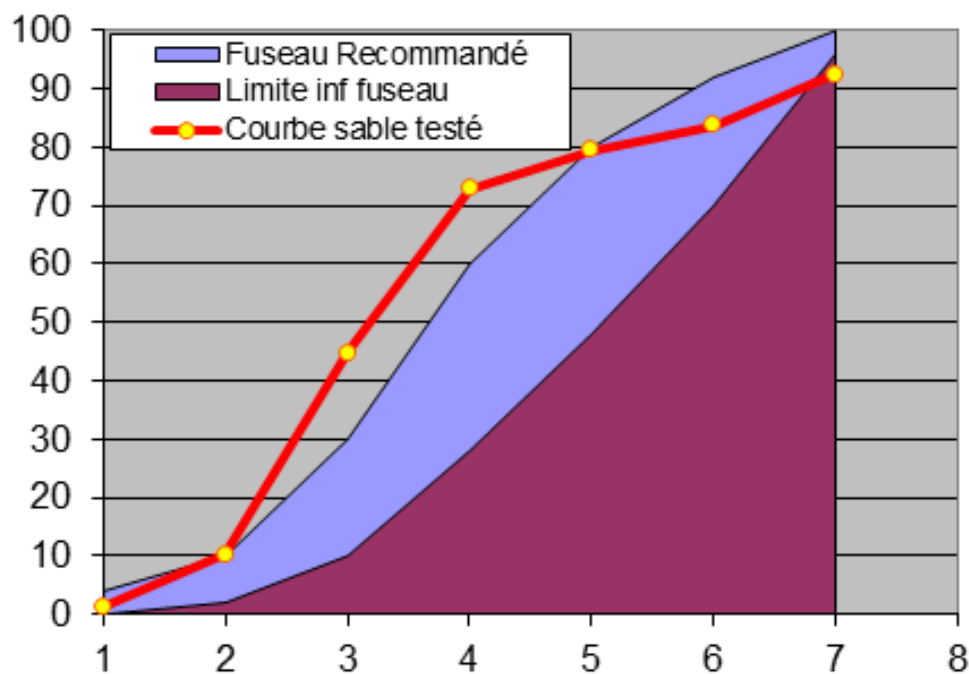


Figure IV.2: Courbe granulométrique du sable d'OUED SOUF.

IV.3.2.2 Modules de finesse [NA EN 12620]

Le module de finesse d'un sable est égal au 1/100 de la somme de refus exprimés en pourcentage sur les différents tamis.

$$MF = \sum R_i / 100$$

$$MF = (1/100) \sum (\text{refus cumulés en \% des tamis } (0.08-0.16-0.315-0.63-1.25-2.5-3.15))$$

Le module de finesse d'un sable est un paramètre qui détermine la finesse du sable. Un sable grossier ($2.8 < Mf < 3.2$) 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.[45]

Tableau IV.19: *Module de finesse du sable.*

Quantité du sable	Module de finesse
Gros	>2.5
Moyen	2 à 2.5
Fin	1.5 à 2
Très fin	1 à 1.5

Après l'analyse granulométrique on trouve que, le module de finesse du sable testé est
Égal à : $M_f = 2.07$

IV.3.2.3 Masse volumique du Sable : (NF P18-555)

A) Masse volumique absolue

▪ Définition

C'est la masse d'un corps par unité de volume absolu de matière pleine (volume de matière seule, pores à l'intérieur des grains exclus), après passage à l'étuve à 105 °C, notée ρ et exprimée en (g/cm³, kg/m³ ou T/m³).

▪ But de la mesure

L'essai permet en particulier de déterminer la masse ou le volume des différentes classes granulaires malaxées pour l'obtention d'un béton dont les caractéristiques sont imposées.

▪ Mode opératoire

Remplir une éprouvette graduée avec un volume d'eau V_1 , ($V_1 = 250$ ml).

Peser un échantillon sec M de granulats (environ 150g) et l'introduit dans l'éprouvette en

Prenant soin d'éliminer toutes les bulles d'air.

Le liquide monte dans l'éprouvette. Lire le niveau V_2 , la masse volumique est :

$$\rho_{\text{abs}} = m / V_2 - V_1$$

On refait l'opération trois fois et on trouve les résultats inscrits dans le tableau suivant :

Tableau IV.20 : Les résultats de la masse volumique absolue du sable.

Sable	Facteurs	Essais n°1	Essais n°2	Essais n°3	Valeur moyenne ρ_{abs} (g/cm ³)
Sable d'oued Essouf	M (g)	300	300	300	2.647
	V1 (ml)	400	400	400	
	V2 (ml)	510	515	515	
	ρ_{abs} (g/cm ³)	2.727	2.608	2.608	

B) Masse volumique apparente

On détermine la masse volumique apparente à état lâche du sable à l'aide d'un entonnoir standard de capacité 2 à 2,5 litres.

▪ Mode opératoire

- On remplit l'entonnoir avec du sable sec.
- On pèse le récipient vide de capacité 1 litre, soit M1 son poids.
- On place le récipient sous l'entonnoir de 10 à 15 cm et le remplit avec du sable.
- Une fois le récipient est rempli, on nivelle la surface du sable et on pèse le tout soit M2.

La masse volumique apparente du sable est donnée par la formule suivante :

$$\rho_{\text{app}} = M_2 - M_1 / V_1$$

Où V1 : est le volume de récipient.

Les résultats sont regroupés dans le tableau suivant :

Tableau IV.21 : La masse volumique apparente de sable.

Sable	Facteurs	Essais n°1	Essais n°2	Essais n°3	Valeur moyenne ρ_{app} (g/cm ³)
Sable d'oued Essouf	M (g)	1713	1688	1707	1.702
	V1 (l)	1	1	1	
	ρ_{app} (g/cm ³)	1.713	1.688	1.707	

IV.3.2.4 Equivalent de sable [NA EN 933-8]

➤ But de l'essai

Cet essai consiste à déterminer la quantité d'éléments fins (argile, limons, impuretés) contenus dans le sable par rapport à la quantité d'éléments sableux.

➤ Mode opératoire

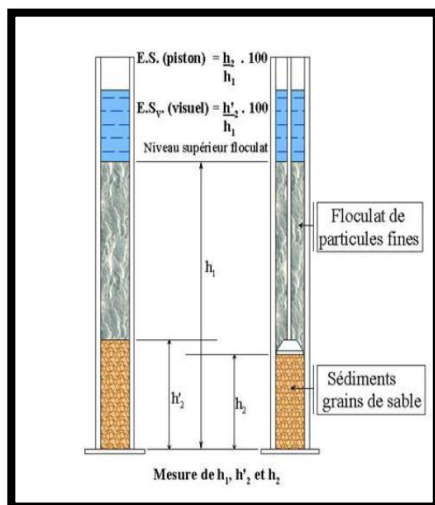


Figure .IV.3 : Essai d'équivalent de sable. Photo IV.12 : Essai d'équivalent de sable.

- Remplir l'éprouvette d'une solution la veille jusqu'au premier repère.
- A l'aide d'un entonnoir, verser l'échantillon de sable de 120 ± 1 g dans l'éprouvette et taper fortement à plusieurs reprises avec la paume de la main afin de libérer les bulles d'air et favoriser le mouillage de l'échantillon.
- Laisser reposer pendant 10 min.
- Boucher l'éprouvette à l'aide d'un bouchon en caoutchouc et lui imprimer 90 cycles de 20 cm de secousses horizontales en 30s à la main à l'aide de l'agitateur mécanique.



Photo IV.13 : *Agitateur électrique.*

- Retirer le bouchon de l'éprouvette, le rincer avec solution la vente au-dessus l'éprouvette et Rincer ensuite les parois de celle-ci.
- Faire descendre le tube laveur dans l'éprouvette le rouler entre le pouce et l'index en faisant tourner lentement le tube et l'éprouvette tout en imprimant au tube un léger piquage.
- Après 20 min de dépôt, lire la hauteur h_1 , de niveau supérieure de flocculat jusqu'au fond De L'éprouvette à l'aide d'une règle.
- Mesuré également avec la règle la hauteur h_2 compris entre le niveau supérieur de la partie Sédimentaire du fond de l'éprouvette.

Avec :

$$E_{sv} = (h_2/h_1)100\%$$

h_1 : hauteur du sable plus flocculat.

h_2 : hauteur du sable.

Introduire el piston dans l'éprouvette et la laisser descendre doucement jusqu'à ce qu'il repose sur le sédiment.

$$E_{sp} = (h'^2/h_1) \times 100\%$$

Avec :

h_1 : hauteur du sable plus flocculat.

h_2 : hauteur du sable.

Tableau IV.22: *Qualité du sable en fonction des valeurs d'équivalent de sable ESV et ESP*

Es _v	Es _p	Nature et qualité de sable
Es < 65	Es < 65	Sable argileuse : risque de retrait au de gonflement à rejeter pour des bitons de qualité.
65 < Es < 75	65 < Es < 80	Sable légèrement argileux de propriétés admissible convient parfaitement pour des bétons de qualité courante quand on ne craint pas particulièrement le retrait.
75 ≤ Es ≤ 85	75 ≤ Es ≤ 85	Sable propre à faible pourcentage de farine argileux convient parfaitement pour des bétons de haute qualité.
Es ≥ 85	Es ≥ 85	Sable très propre ; l'absence totale de fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra rattraper par une augmentation du dosage en eau.

Après la comparaison aux résultats proposés par G-DREUX :

- Le sable d'Oued Essouf est très propre.

IV.3.3 Caractéristiques du gravier

IV.3.3.1 Analyse granulométrique par tamisage : [NA EN 933-1]

➤ But de l'essai

L'analyse granulométrique permet de déterminer la grosseur et les des différents grains constituant l'échantillon.

➤ Principe de l'essai

L'essai consiste à classer les différents grains constituant l'échantillon en utilisant une série de tamis, emboîtés les uns sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. Les matériaux étudiés sont placés en partie supérieure des tamis et le classement des grains s'obtient par vibration de la colonne de tamis.

➤ Mode Opérateur

L'opération du tamisage du gravier se fait au moyen d'une tamiseuse ou on place la série des tamis sur le cercle inférieur du cadre de l'appareil en suite l'ensemble est serré aux montants par la couronne supérieure, à l'aide de deux jeux de ressort et vis de blocage.

La vibration se fait 03 fois durant 07 minutes à chaque fois.



Photo IV.14 : Une colonne de tamis

➤ **Matériels utilisés**

- Une colonne de tamis propres correspondants à chaque fraction.

Tableau IV.23 : L'analyse granulométrique de gravier concassé (3/8).

	Ouverture du tamis (mm)	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Moyenne	Refus cumulé	Refus cumulé (%)	Tamisa Cumulé (%)
Gavier 3/8 1600g	8	15	20	24	19.666	19.666	1.229	98.771
	6.3	605	592	638	611.666	631.332	39.458	60.542
	5	442.15	470	446	452.716	1084.048	67.753	32.247
	4	318	302	278	299.333	1383.381	86.461	13.539
	3.15	187	172	181	180	1563.381	97.711	2.289
	2.5	33	35	40	36	1599.381	99.961	0.039
	FOND	1	0	1	0.666	1600	100	0
	16	7	17	21	15	15	0.468	99.532

Tableau IV.24 : L'analyse granulométrique de gravier concassé (8/16).

Gruver	Ouverture du tamis (mm)	Essai	Essai	Essai	Moyenne	Refus cumulé	Refus cumulé (%)	Tamisa Cumulé (%)
		1	1	1				
8/16 3200g	12	533	468	508	503	518	16.187	83.813
	10	185	1181	1267	1211	1720	54.03	45.97
	8	180	1229	1150	1186.33	2915	91.10	8.9
	6.3	294	293	256	281	3196.33	99.88	0.12
	5	4	2	1	2.333	3198.663	99.95	0.05
	Fond	2	2	1	1.666	3200	100	0

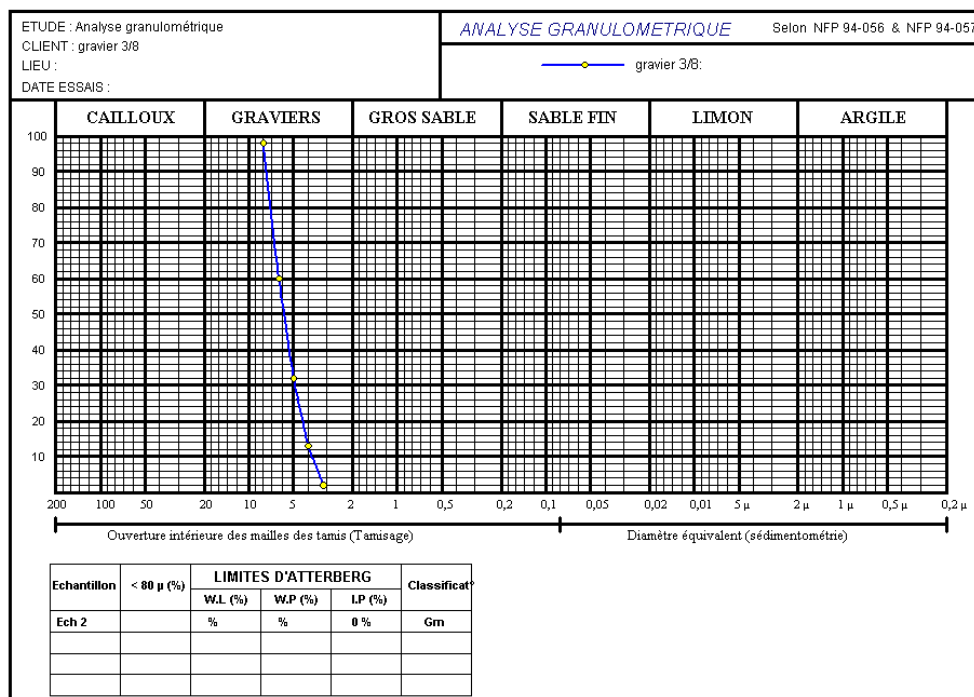


Figure IV.4 : Courbe granulométrique du gravier 3/8.

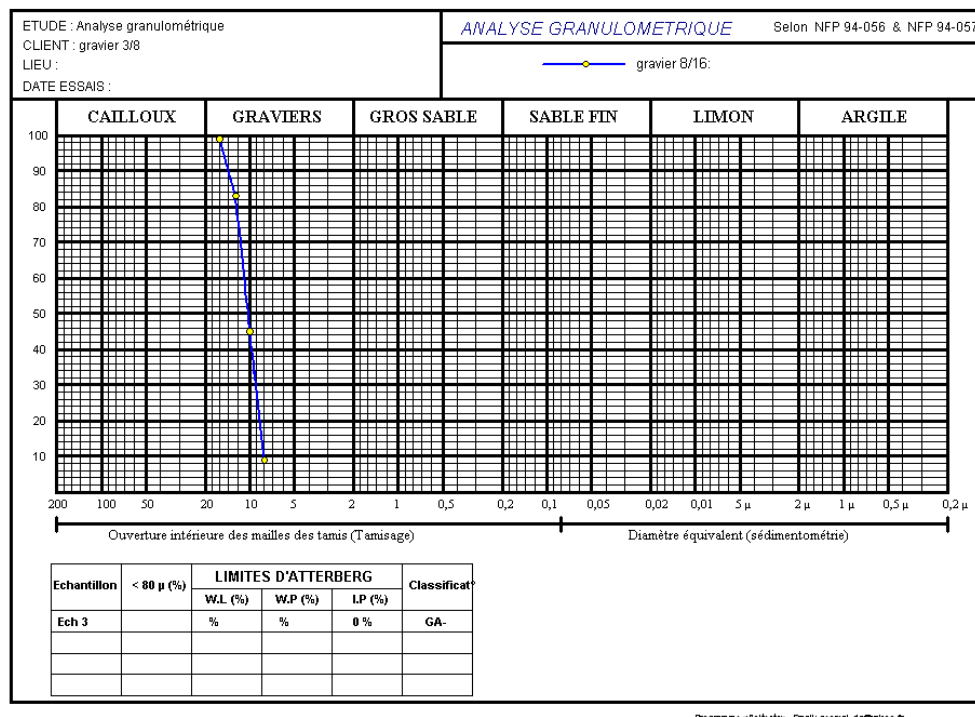


Figure IV.5 : Courbe granulométrique de gravier 8/16.

IV.3.3.2 La masse volumique

La masse volumique est une grandeur physique qui caractérise la masse d'un matériau par unité de volume, on distinguera :

A. La masse volumique apparente [NA EN 1097]

C'est le rapport entre la masse d'un corps est l'unité de volume apparent (y' compris les vides), Elle est exprimée en (g/cm³, Kg/m³, t/m³).

➤ **Principe de l'essai**

Le principe de cette mesure consiste à remplir un récipient avec un volume intérieur connu et de peser la quantité de granulats correspondant.

➤ **Matériels utilisés**

- Une balance avec une précision de 0.01g.
- Un récipient avec un volume de 5 litre.

- Une règle à araser.
- **Mode opératoire**
- Peser le récipient vide et taré.
- Prendre le matériau (gravier) dans les deux mains formant un entonnoir.
- Placer les deux mains à hauteur d'environ 10 cm au-dessous de récipient.
- Verser le matériau au centre de récipient jusqu'à qu'il soit rempli et débord au tour.
- Araser avec la règle sans compacter le matériau.
- Peser le contenu et noter la masse M.
- Répéter l'opération 3 fois afin de valider l'essai.
- La masse volumique apparente est déterminée par la formule suivante :

$$\rho_{app} = M/V$$

Les résultats obtenus sont représentés dans les tableaux suivants :

Tableau IV.25 : Masse volumique apparente du gravier concassé.

Gravier	M2 (kg)	V(L)	ρ_{app} (kg /l)	ρ_{gmoy} (kg)
3/8	1.569	5	1.569	1.553
	1.542		1.542	
	1.550		1.550	
8/16	6.980	5	1.396	1.402
	7.012		1.402	
	7.046		1.409	

B. La masse volumique absolue ou spécifique (ρ)

C'est la masse d'un corps par unité de volume absolu de matière pleine (volume de matière seule sans tenir compte des vides et des pores). Elle est exprimée en (t/m³, kg/dm³, g/cm³).

➤ Principe

Le volume absolu ou réel d'un corps est généralement déterminé en mesurant le volume d'un liquide que déplace l'introduction de ce corps.

De nombreuses méthodes permettent de déterminer les masses et volumes des matériaux à étudier, dans notre étude on va utiliser la méthode de l'éprouvette graduée.

➤ **Mode opératoire**

- Mettre dans une éprouvette graduée en verre un volume d'eau V1 (400 ml).
- Peser une masse M du corps (300 g) et l'introduire dans l'éprouvette.
- Bien éliminer les bulles d'air.
- Lire le nouveau volume V2.
- Le volume absolu ou réel est : $V = V2 - V1$
- La masse volumique réelle est: $\rho = M / (V2 - V1)$
- L'opération se fait 03 fois et en prendre la moyenne.



Photo IV.15 : L'essai de la masse volumique apparente de gravier.

Tableau IV.26 : Masse volumique absolue du gravier concassé (3/8) (8/16).

Gravier	M(g)	V1 (ml)	V2 (ml)	$\gamma_{abc} (g/cm^3)$	$\gamma_{moy}(g/cm^3)$
3/8	300	400	510	2.727	2.687
			510	2.727	
			515	2.608	
8/16	300	400	520	2.5	2.611
			510	2.727	
			515	2.608	

IV.3.3.3 La densité

En sens physique ; c'est le degré de remplissage de la masse d'un corps par la matière solide. Elle est calculée par le rapport de la masse volumique de ce matériau à celle de l'eau à une température Elle est exprimée sans unité.

IV.3.3.4 La porosité

C'est le rapport du volume des vides d'un matériau et son volume total, elle représente Donc le degré de remplissage de son volume occupé par les vides.

La porosité est exprimée en pourcentage (%) et définie par la relation :

$$P(\%) = v_v / v_t$$

En peut exploiter les résultats des masses volumiques pour déterminer la porosité de notre gravier d'où :

$$P(\%) = (1 - \gamma_{abc} / \rho_{app}) \times 100$$

IV.3.3.5 La compacité

C'est le quotient du volume des grains solides et le volume total du matériau, elle Exprime en pourcentage (%) et donner par la relation suivante :

$$C(\%) = (V_s / V_t) \times 100$$

Aussi :

$$C(\%) = 1 - P$$

IV.3.3.6 L'indice des vides

C'est le rapport entre le volume occupé par les vides et le volume de la partie solide des grains étant le volume total occupé par les granulats.

$$e(\%) = V_v / V_s$$

Aussi :

$$e(\%) = (1 - c) / c$$

Tableau IV.27 : Porosité, compacité et indices des vides du gravier.

Gravier	Porosité P (%)	Compacité C(%)	Indice de vide e(%)
(3/8)	42.3	57.7	0.73
(8/16)	46.3	53.7	0.86

IV.3.4 les ajouts minéraux

La procédure, le mode opératoire et le matériel utilisé pour déterminer les caractéristiques physiques des ajouts est le même que celui utilisé pour le ciment et selon les mêmes normes. Les résultats des essais sont indiqués dans le tableau suivant :

Tableau IV.28 : La masse volumique et la finesse des ajouts.

	ρ_{abc} (g/cm ³)	SSB (cm ² / g)
Laitier de haut fourneau	2.807	4432
Laitier d'importation	2.9412	2907
Pouzzolane	2.7378	3083
Le verre	2.5837	5161

IV.3.5 Super plastifiant

Tableau IV.29 : Les dosages en super plastifiant utilisé dans notre formulation.

Mélanges	Témoin	Laitier	Pouzzolane	Témoin	Laitier	Pouzzolane
	500	500	500	400	400	400
SP (%)	1.8	1.8	1.8	2	2	2

IV.3.6 Formulation de béton

Le choix de proportions de chacun des constituants d'un béton afin d'obtenir les propriétés mécanique et de mise en œuvre souhaitées s'appelle la formulation.

IV.3.6.1 présentation de la méthode de formulation

La recherche des bétons à 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.

Le choix des proportions de chacun des constituants d'un béton afin d'obtenir les propriétés mécaniques et de mise en œuvre souhaitées s'appelle la formulation.

La formulation d'un béton à intégrer avant tout les exigences de la norme NF EN 206-1, laquelle, en fonction de l'environnement dans lequel sera mis en place le béton,

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

- a- Détermination d'une formule théorique prévisionnelle
- b- Optimisation du mélange en laboratoire.
- c- Validation de la formule centrale.

IV.3.6.2 Définitions et formules

Pour traiter notre formulation des BHP on a utilisé la méthode de L'Université de Sherbrooke.

IV.3.6.3 Teneur en ajout cimentaire

Lorsque les ajouts cimentaires ou les fillers sont ajoutés lors du malaxage, le terme teneur en ajout cimentaire se rapporte à la masse de ciment utilisée pour fabriquer le béton. Quand ils sont incorporés dans le ciment, le terme teneur en ajout cimentaire se rapporte à la masse totale du liant (ciment +ajout cimentaire ou filler).

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

$$d_c = A/(A-C)$$

A : Masse de ciment sec.

C : Pesée hydrostatique du ciment

IV.3.6.4 Teneur en super plastifiant

Il est toujours préférable d'exprimer la teneur en super plastifiant en pourcentage de solides par rapport à la masse de ciment parce que les super plastifiants commerciaux n'ont pas la même teneur en solides (actifs) ni la même densité

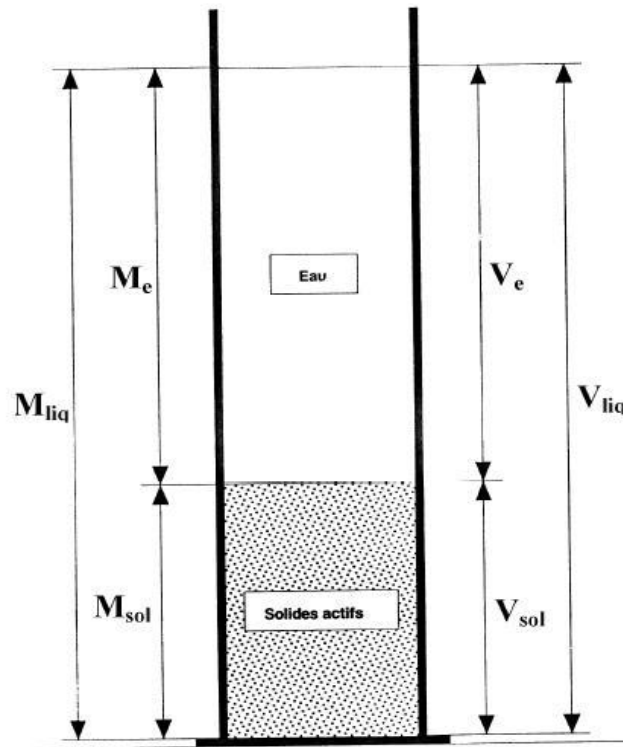


Figure IV.6 : Représentation schématique De la composition de la pate de ciment et le pourcentage en super plastifiant.

IV.3.6.5 Densité d'un super plastifiant

La densité est égale à :

$$d_{sup} = M^{liq} / V^{liq}$$

M^{liq} : Masse de liquide de super plastifiant

V^{liq} : volume de super plastifiant liquide

IV.3.6.6 Teneur en solides

Elle est égale à :

$$s = \frac{M_{sol}}{V_{liq}} * 100$$

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

M_{liq} : Masse de liquide de super plastifiant

IV.3.6.7 Masse d'eau contenue dans un certain volume de super plastifiant

Lorsque l'on ajoute plusieurs litres de super plastifiant dans un béton, il faut tenir compte de la quantité d'eau que l'on ajoute ainsi, de façon à pouvoir calculer le rapport (Eau / liant) réel du béton. Il est donc nécessaire de savoir calculer la quantité d'eau contenue dans un certain volume de super plastifiant.

$$ME = [(V_{liq} * d_{sup}) / S] * (100 - S)$$

Lorsque les unités **g** et **cm³** ou **kg** et **l**, on peut alors exprimer **ME** et **VE** par la même valeur :

$$VE = [(V_{liq} * d_{sup}) / S] * (100 - S)$$

d_{sup} : Densité du super plastifiant

s : Teneur en solides de super plastifiant.

V_{liq} :

volume de super plastifiant Liquide

IV.3.6.8 Masse des particules solides et volume de super plastifiant nécessaire

Si *c*'est la masse liant utilisée dans un béton et si *d* est le dosage en super plastifiant suggéré par le fabricant, alors la masse de solides est :

$$M_{sol} = (c * d) / 100$$

C : est la masse de liant.

D : est le dosage en super plastifiant (la masse de solides)

Le volume de super plastifiant liquide qui contient est calculé de la façon suivante :

$$V_{liq} = [M_{sol} / S * d_{sup}] * 100$$

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

d_{sup} : Densité du super plastifiant

s : Teneur en solides de super plastifiant.

IV.3.6.9 Volume des solides contenus dans V_{liq}

$$V_{sol} = V_{liq} [1 - d_{sup} * [(100 - S) / 100]]$$

d_{sup} : Densité du super plastifiant

s : Teneur en solides de super plastifiant.

V_{liq} : volume

L'étude a été menée sur 06 types des compositions des bétons représentés dans le tableau IV.30 :

Tableau IV.30 : Différents types des bétons étudiés.

Nom mélange	Liant (%)	Ciment (%)	Verre (%)	Sable (%)	Laitiers (%)	Pouzzolane (%)
Témoin 500	100	92	08	100	/	/
Laitier 500	100	92	08	85	15	/
Pouzzolane500	100	92	08	90	/	10
Témoin 400	100	92	08	100	/	/
Laitier 400	100	92	08	85	15	/
Pouzzolane400	100	92	08	90	/	10

IV.3.7 types et composition des différents bétons

Le tableau IV.31 présente la formulation complète des 06 mélanges de béton pour des rapports eau / ciment ou eau/liant de 0,30 pour le dosage 500Kg / m³ et 0.28 pour le dosage 400Kg / m³.

Tableau IV.31 Composition théorique des différents bétons.

N°	E /C (E/L)	Eau (l/m ³)	Ciment (kg/m ³)	Pierre Concassées (kg/m ³)	Sable (kg / m ³)	SP (l/m ³)	Laitier (kg / m ³)	Filler de verre (Kg / m ³)	Pouzzolane naturelle (kg/m ³)
Béton Témoin									
1	0.30	150	460	1050	660	9	/	40	/
2	0.28	112	368		668	8	/	32	/
Ajout laitier									
3	0.30	150	460	1050	660	9	105	40	/
4	0.28	112	368		668	8	105	32	/
Ajout pouzzolane									
5	0.30	150	450	1050	660	9	/	40	50
6	0.28	112	368		668	8	/	32	40

Après la détermination du dosage avec différents composants, une série d'essais a été effectué ayant pour but de connaître la performance de cette composition.

IV.3.8 Feuille de calcul

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

SUPERPLASTIFIANT					
Densité (G _{sup})	Teneur en solides (s) (%)	M _{sol} = c*d/100	V _{liq} = M _{sol} *100/s*G _{sup}	V _E = V _{liq} *G _{sup} *(100-s)/100	V _{sol} = V _{liq} -V _E
		15	E 24	F 21	G 11 H 11

Matériaux	1		2		3		4		5		6	
	Teneur Kg/m3		Volume L/m3		Dosage état SSS kg/m3		Correction D'humidité L/m3		Composition 1 m3		Gâchée d'essais	
Eau	1	2	2	2	2				23			25
Ciment	E/L = 0.	3	4-1	8-1	4-1				4-1			26-1
			4-2	8-2	4-2				4-2			26-2
			4-3	8-3	4-3				4-3			26-3
Gros granulat	5		9	5		18			17		27	
Granulat fin			13	14		20			19		28	
Air	6	POURCENTAGE		10		0						
Super plastifiant	7	%	11	15		21			24	V _{ss}	29	
Total			12	16		22					30	

Figure IV.7 : Composition des BHP

IV.4 Confection et contrôle des éprouvettes

IV.4.1 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 :

1. Verser les constituants dans la cuve : d'abord les gravillons, puis le sable et les fines.
2. Malaxer à sec pendant 30s.
3. Malaxeur.
4. Ajouter l'eau pendant 1 min 30s, le malaxeur en marche.
5. Le super-plastifiant est mélangé dans un tiers d'eau après l'introduction du premier tiers d'eau au cours du malaxage, ensuite on à introduire la quantité d'eau restante.



Photo IV.16 : *Malaxeur utilisé*

IV.4.2 Maniabilité

Après étude de la formulation théorique des différents bétons hauts performance nous expérimentons ces formulations en adaptant la quantité nécessaire d'eau avec un rapport

$E/L=0.30$ au maximum plus un super plastifiant et en respectant un affaissement au cône d'Abrams (supérieur ou égale à 15 cm).



Photo IV.17 : *L'affaissement avec le cône d'abrams.*

IV.4.3 Serrage du béton

L'opération consiste à réduire au maximum le pourcentage des vides à l'intérieur du béton et augmenter la compacité. Ils sont conservés ensuite dans une chambre à une température $20 \pm 2^\circ\text{C}$.



Photo IV.18 *Table vibrante utilisé.*

IV.4.4 Conservation des éprouvettes



Photo IV.19 *Conservation dans l'eau potable en température ambiante.*

IV.4.5 Mesure des résistances

La résistance en compression des bétons est mesurée sur des éprouvettes cubique $10*10*10 \text{ cm}^3$. L'effort est appliqué par une presse hydraulique.



Photo IV.20 Presse utilisé

IV.5 conclusion

Il a été vu dans ce chapitre, l'exposition de différentes propriétés physiques, chimiques et mécaniques des matériaux utilisés et leurs caractéristiques. Et une présentation des courbes granulométriques de toutes les classes granulaires. Il était important de définir la partie normative à laquelle doivent répondre les différents mélanges. La méthode de formulation a été développée et le calcul des proportions des constituants de notre programme expérimental étant fait, ainsi, les essais sur bétons.

Chapitre V Analyse et interprétation des résultats

V.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à la présentation, l'analyse et l'interprétation des résultats obtenus au cours de ce programme expérimental, relativement aux essais effectués sur le BHP conformément aux normes et au mode opératoire recommandé.

V.2 Résultats des essais à l'état frais

Tableau V 1: Les propriétés rhéologique (masse volumique, affaissement) et E/L efficace.

Types des bétons	ρ_{app} à l'état frais (kg/m ³)	ρ_{app} à l'état durci (kg/m ³)	Affaissement Aff (cm)	Rapport efficace (E/L)
		24h		
Témoin 500	2,469	2.465	22	0.3
15% laitier 500	2,564	2.599	23	0.3
10% pouzzolane 500	2,508	2.548	25	0.3
Témoin 400	2,495	2,345	22	0.28
15% laitier 400	2,517	2,527	22	0.28
10% pouzzolane 400	2,467	2,513	23	0.28

On présente ci-après les courbes interprétant les résultats de la masse volumique des différents types de bétons à l'état frais ainsi qu'à l'état durci.

a-à l'état frais :

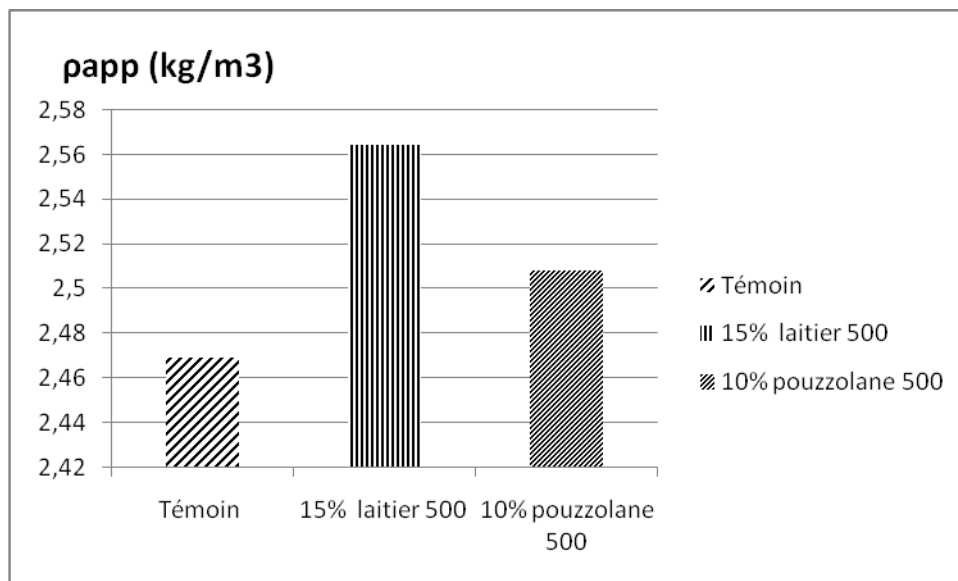


Figure V.1 : La variation des masses volumiques à l'état frais des BHP étudiés (Dosage 500 Kg/m³)

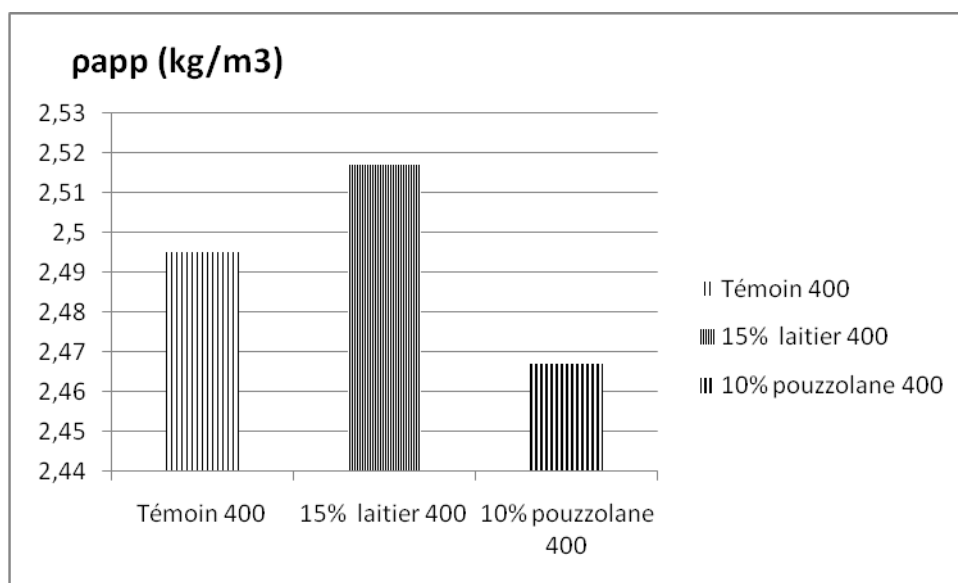


Figure V.2 : La variation des masses volumiques à l'état frais des BHP étudiés (Dosage 400 Kg/m³)

Interprétation des résultats

Les figures (V.1 et V.2) présentent la variation de la masse volumique à l'état frais, des différents types de BHP. On remarque que les deux types de BHP à base de sable qui contiennent des ajouts actifs (laitier et pouzzolane) ont une densité supérieure à celle du béton témoin (BT). En effet le BT présente une masse volumique de (2.469 t/m³) plus faible de 4 % que celle du béton à base d'ajout laitier BL (2.564 t/m³) qui est légèrement supérieur à celle du

béton à base de sable de pouzzolane, les résultats obtenus pour les deux dosages en liant (400 et 500 kg /m³) sont en concordance.

a-à l'état durci :

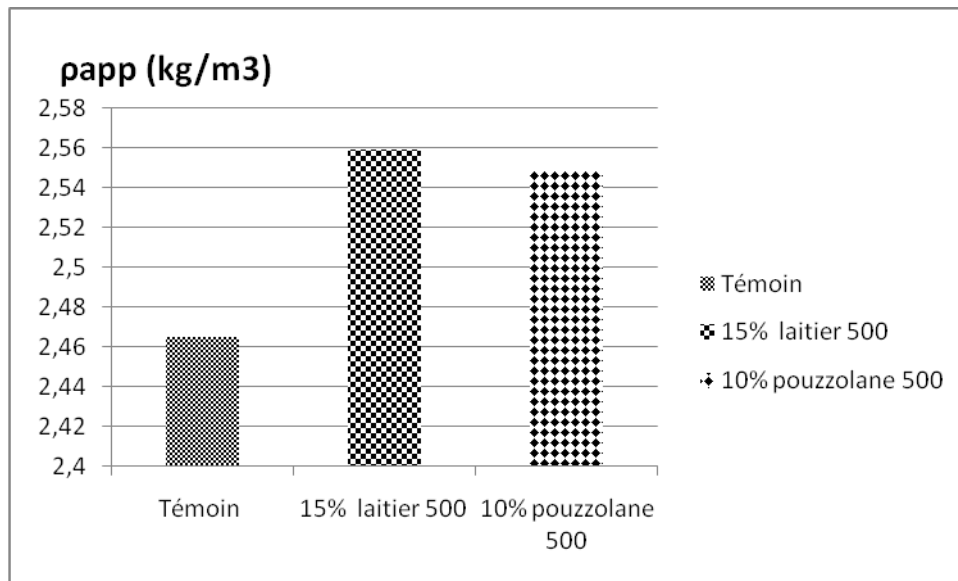


Figure V.3 : La variation des masses volumiques à l'état durci des BHP étudiés (Dosage 500 Kg/m³)

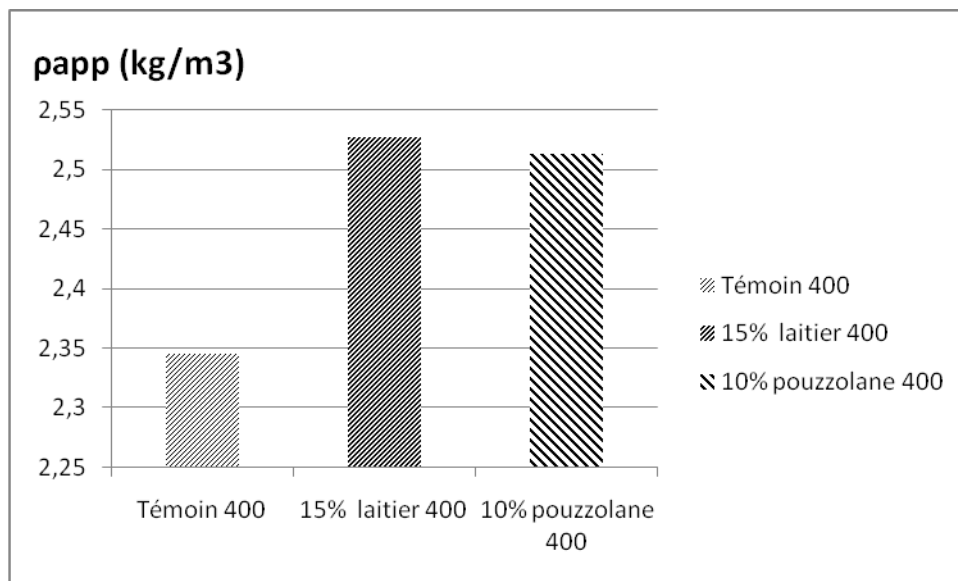


Figure V.4 : La variation des masses volumiques à l'état durci des BHP étudiés (Dosage 400 Kg/m³)

Interprétation des résultats

Les figures (V.3 et V.4) présentent la variation de la masse volumique l'état frais des différents types de BHP. On remarque que les deux types de BHP à base de sable qui contiennent des ajouts actifs (laitier et pouzzolane) ont une densité supérieure à celle du béton témoin (BT). En effet BT présente une masse volumique (2.465 t/m³) plus faible de 4 % que celle du

béton a base d'ajout laitier BL (2.559t/m³) qui est légèrement supérieur à celle du béton à base de sable de pouzzolane.

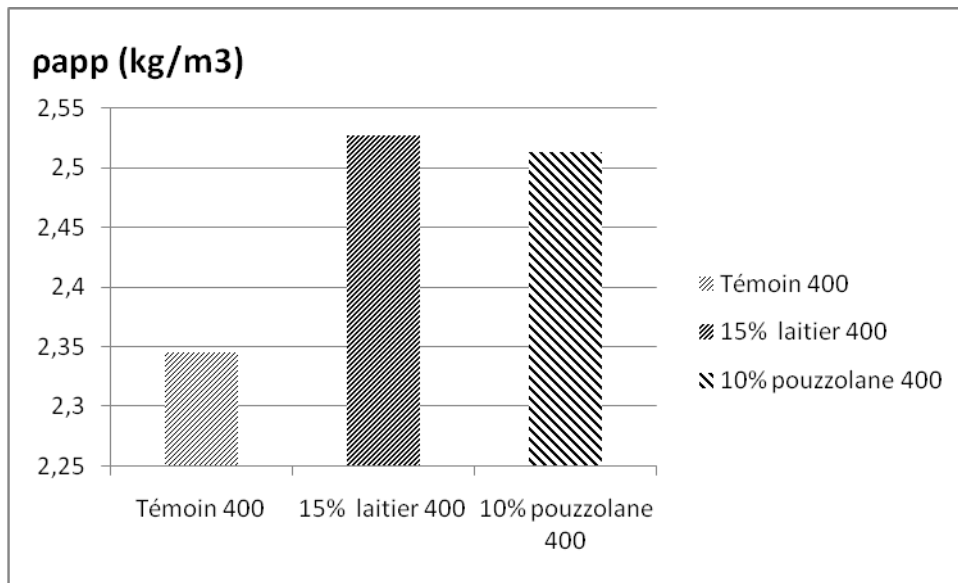


Figure V.5 : La variation d'affaissement à l'état frais des bétons étudiés (Dosage 400 Kg/m³)

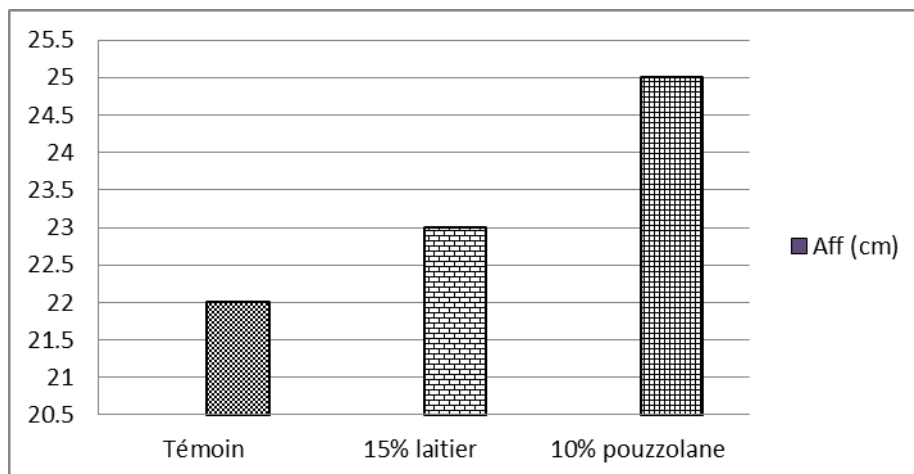


Figure V.6 : La variation d'affaissement à l'état frais des bétons étudiés (Dosage 500 Kg/m³)

Interprétation des résultats

D'après les résultats obtenus et représentés ci-dessus il est clair que les bétons à base de sables qui contiennent des ajouts actifs jouissent d'une ouvrabilité meilleure attestée par l'essai d'affaissement au cône d'Abrams qui montre une fluidité plus importante par rapport au BHP témoin et cela pour les deux dosages (400 et 500 kg/m³), ce qui s'explique par la présence de l'adjuvant super plastifiant qui possède une action purement chimique soit sur le ciment ou sur les fines des ajouts minéraux ce qui se traduit finalement par une meilleure fluidité.

V.3 la résistance à la compression

Le Tableau ci-dessous représente les différents résultats obtenus à l’essai d’écrasement des éprouvettes à la compression :

On a réalisé dans notre étude 06 types de bétons avec deux dosages de ciment différents (400 et 500 kg /m³) et trois type de sable (sable témoin, sable a base de laitier et sable a base de pouzzolane).

Les résultats enregistrés au niveau du tableau (V.2 et V.3) sont représenté sous forme de courbes afin de mieux comprendre l’évolution au cours du temps et voire l’influence de différents paramètres variables sur ces propriétés (la résistance mécanique)

Tableau V.2 : Evolution de la résistance à la compression des bétons étudiés (Dosage 500 Kg/m³).

Rc (Mpa)	7J	14J	28J
Témoin 500	82.92	84.59	88.76
Laitier 500	84.43	91.41	100.01
Pouzzolane 500	89.04	90.93	92.17

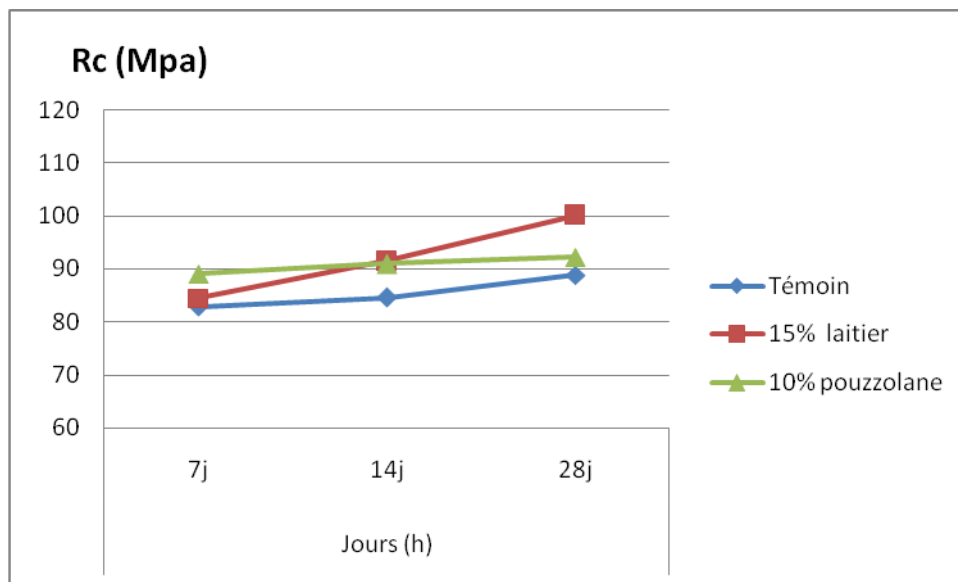
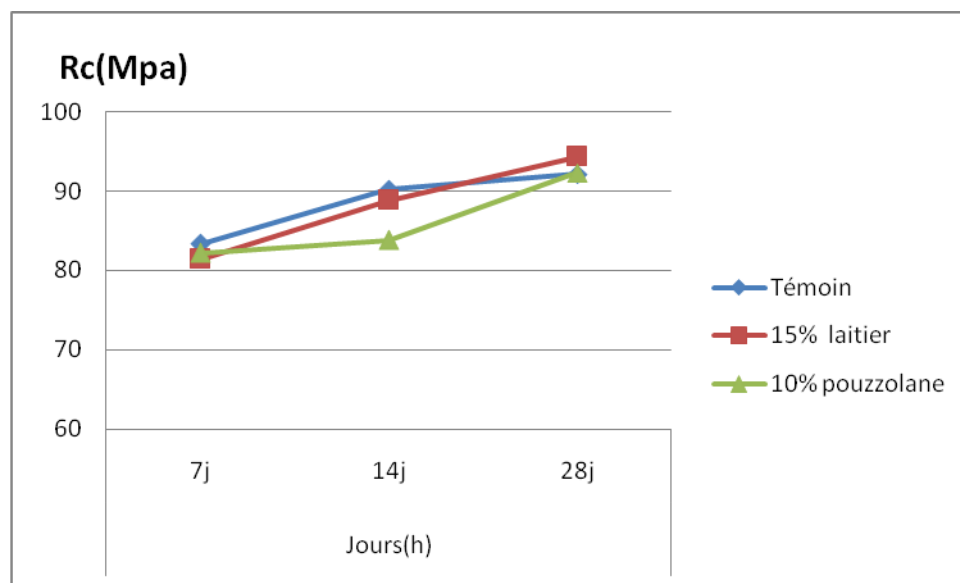


Figure V.7 : Evolution de la résistance à la compression des BHP étudiés (Dosage 500 Kg/m³)

Tableau V.3 : Résistance à la compression des bétons de dosage 400 Kg/m³.

R (Mpa)	7J	14J	28J
Témoin 400	83.33	90.15	92.11
Laitier 400	81.42	88.83	94.28
Pouzzolane 400	82.21	83.84	92.31

Figure V.8 : Evolution des résistances à la compression des bétons étudiés (Dosage 400 Kg/m³).

V.3.1 Interprétation des résultats

Les figures (V.7 et V.8) montrent la variation de la résistance en compression en fonction des différents sables utilisés dans les BHP formulés (BT, BL, BP) à différents âges (7, 14, et 28 jours).

1- BHP dosé à 400 kg / m³

Le béton BT (sans ajout minéral) présente un développement de la résistance à court terme supérieur à ceux qui contiennent des ajouts actifs. Après 14 jours, les BHP à base de sables préparés rejoignent le béton témoin et finissent par avoir la meilleure résistance à la compression, notamment pour l'ajout laitier qui provoque une amélioration assez importante comparativement avec l'ajout pouzzolane et qui atteint les 94 MPa à 28 jours.

2- BHP dosé a 500 kg / m³

Les BHP confectionné avec un dosage de 500 kg/m³ **BL et BP** (avec ajout minéral) présentent un développement de la résistance à la cour du temps supérieur par rapport au témoin notamment pour l'ajout laitier qui provoque une amélioration assez importante comparativement avec l'ajout pouzzolane et qui atteint les 100 MPa à 28 jours.

Les résultats obtenus dans cet étude montrent que l'utilisation de laitier de haut fourneau engendre une augmentation limitée de la résistance à jeune âge par contre au cours de temps l'augmentation de la résistance devient plus importante ce qui reflète l'avantage fonctionnel de l'ajout par sa participation au processus d'hydratation en présence d'eau qui permet la formulation des gels stables de C-S-H qui participent à l'amélioration de la résistance.

Ainsi que l'utilisation de la pouzzolane naturelles conduit à une augmentation de la résistance grâce à son effet pouzzolanique vue sa réaction à température ambiante en présence d'eau, avec l'hydroxyde de calcium Ca(OH)₂ libéré au cours de l'hydratation du ciment, pour former des composés nouveaux tel que des CSH et des aluminates de calcium hydratés, stables, peu solubles dans l'eau et possédants des propriétés liantes.

V.4 Analyse comparative des résultats de Rc en fonction du dosage (500 et 400) kg/m³

Les tableaux et les courbes ci-dessous présentent les résistances a la compression des bétons avec ajouts pour les deux dosages soit (BL 400 et 400 kg/m³) et (BP 400 et 400 kg/m³) ainsi que les bétons témoin (BT 500 et 400 kg/m³).

Tableau V.4 : *Les résistances à la compression des bétons témoin des deux dosages déferents.*

R (Mpa)	7J	14J	28J
Témoin 400	82.92	84.59	88.76
Témoin 500	83.33	90.15	92.11

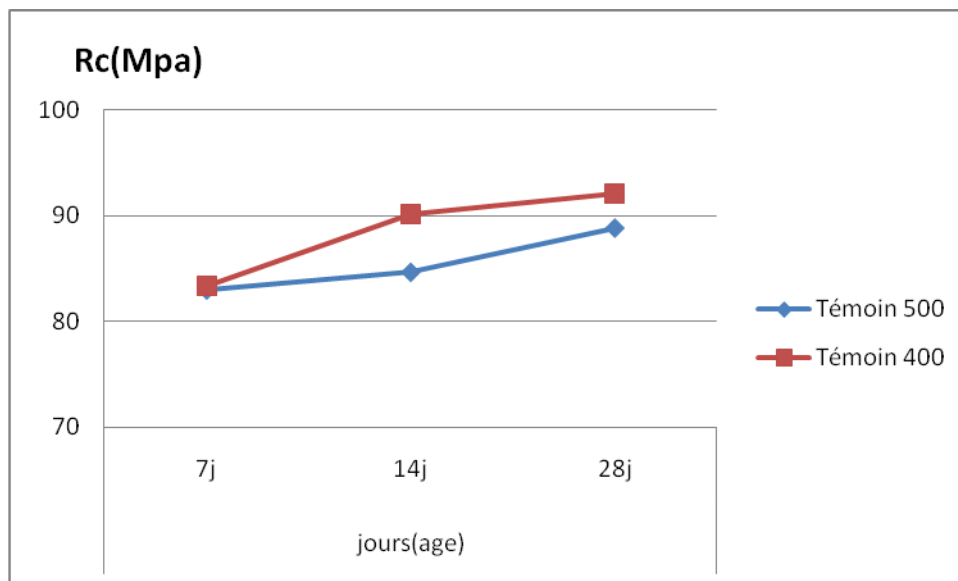


Figure V.3 : Comparaison de l'évolution des réponses mécanique des BHP en fonction du dosage en liant.

Tableau V.5 : Les résistances des bétons laitier des deux dosages déferents

R (Mpa)	7J	14J	28J
Laitier 500	84.43	91.41	100.01
Laitier 400	81.42	88.83	94.28

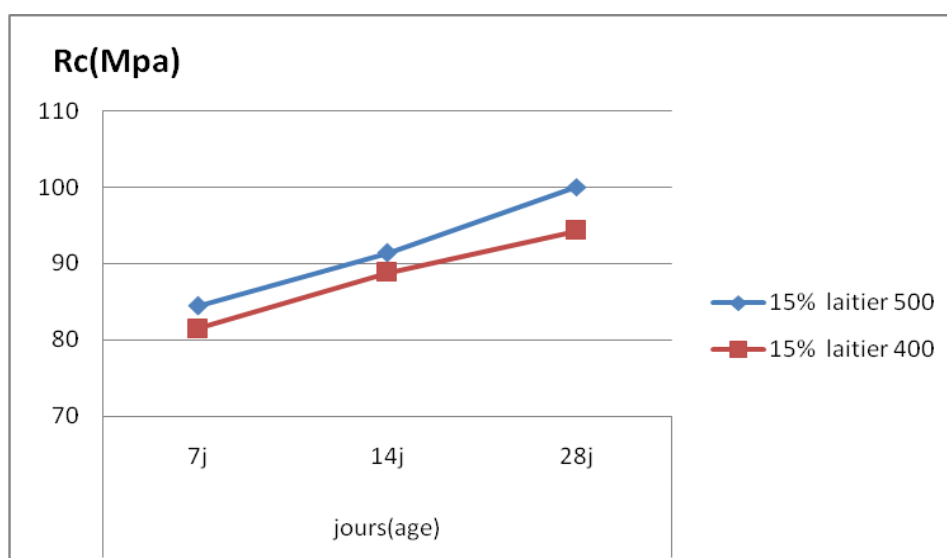
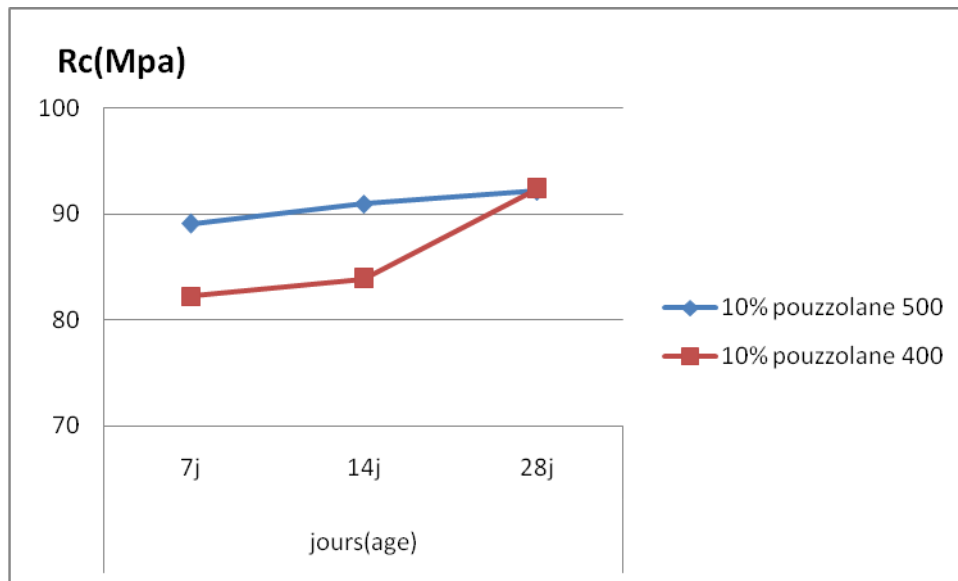


Figure V.9 : Comparaison de l'évolution des réponses mécanique des BHP en fonction du dosage en liant.

Tableau V.6 : Les résistances des bétons pouzzolanes des deux dosages déférents.

R (Mpa)	7J	14J	28J
pouzzolane 500	89.04	90.93	92.17
Pouzzolane 400	82.21	83.84	92.31

**Figure V.10 :** Comparaison de l'évolution des réponses mécanique des BHP en fonction du dosage en liant.

D'après les résultats on remarque clairement que le béton dosé a 500 kg/m^3 développe des résistances meilleures a court et long terme comparativement a un béton dosé a 400 kg/m^3 , c'est évident car une différence de 100 kg/m^3 peut faire une différence remarquable, reste a noté que pour le béton a base de sable qui contient de la pouzzolane nous avons eu le même résultats a 28 jours pour les deux dosage 400 et 500 kg/m^3 et qui dépasse les 92 MPa .

Conclusion générale :

Les objectifs visés dans ce mémoire sont -à notre avis- largement réalisés, nous considérons que le travail expérimental effectué dans le cadre de ce projet a touché la problématique posée au début.

Les résultats obtenus à travers l'étude de l'effet des additions minérales substitué dans le sable (laitier de haut fourneau et pouzzolane naturelle) sur les propriétés d'un BHP nous permettent de tirer les conclusions suivantes :

- les différents types de BHP à base de sable qui contient des ajouts actifs (laitier et pouzzolane) offrent une densité supérieure à celle du béton témoin.
- l'ouvrabilité des bétons a base des sable qui contiennent des ajouts actif en présence de l'adjuvant super plastifiant montre une fluidité plus importante par rapport au BHP témoin.
- l'analyse des résultats des béton dosés à 400 kg/m^3 , montre que le béton témoin (**BT**) sans ajout minéral développe à court terme (7j , 14j) une résistance supérieure à celle des bétons qui contiennent des ajouts actifs par contre à l'âge de 28 jours la résistance sera meilleur pour les BHP a base des sable qui contiennent des ajouts actif notamment le laitier, qui atteint les 94 MPa.
- les BHP confectionné avec un dosage de 500 kg/m^3 **BL et BP** (avec ajout minéral) présente un développement de la résistance au cour du temps supérieur par rapport au témoin notamment pour l'ajout laitier qui provoque une amélioration assez importante comparativement avec l'ajout pouzzolane et qui atteint les 100 MPa à 28 jours.
- L'utilisation de laitier apporte un effet avantageux sur la réponse mécanique en améliorant les propriétés physiques (**compacité élevée**) surtout en présence des filler de verre, ce qui correspond au résultats des masses volumique a l'état durci, ce qui explique l'évolution croissante de la résistance.
- Les BHP (témoin et à base de pouzzolane) dosé a 400 kg/m^3 présentent des résultats comparable à celle dosé a 500 kg/m^3 , l'exception est pour le BHP à base du laitier qui dépasse les 100 MPa et pénètre dans la classe des BTHP, donc ce sont les mixtes recommandé.

On se qui intéresse les perspectives nous espérons des futures travaux tout on insiste de traiter les points suivants :

- ✓ Etude comparative de l'effet des formulations sur le comportement d'un BHP.
- ✓ Refaire la même étude pour les trois types de béton (BT, BL, BP) avec des bases dosages contrairement les BHP qui sont confectionné avec des dosages assez élevés en point de vue économique.
- ✓ Etudier l'effet de la combinaison des additions minérales et adjuvant (réducteur d'eau) avec des pourcentages recommandés de telle sorte on utilise des rapports réduits de E/L qui conduit une amélioration de la résistance mécanique.
- ✓ Approfondir notre étude en effectuant des essais non destructifs (scléromètre, ultrason....) avec les de MEB et DRX pour mieux apprécier la micro structure du BHP.
- ✓ Etude de la durabilité des BHP à base d'un sable préparé dans les milieux agressifs.

Référence bibliographique

- [01] <http://www.infociments.fr/betons/types/betons-hautes-performances>
- [02] <http://www.infociments.fr/betons/types/betons-hautes-performances>
- [03] **P-CLAUDE. AITCIN.** « Bétons haute performance ». Edition Arolles, Janvier 2001, INSB2-212-01323-X. Université de Sherbrooke, Québec, Canada.
- [04] **MENNAI AMOR.** « Contribution à l'étude rhéologique d'un béton à haute performance (BHP) local ». Mémoire de magistère université de 20 out Skikda, Algérie.
- [05] **HOLCIM,** Le béton auto compactant, recommandation éditées par HOLCIM, Suisse, novembre 2005.
- [06] **T.SEDRAN,** Les bétons auto nivelant (BAN) synthèse bibliographique, Bulletin de liaison LCPC, mars 1995.
- [07] **F. Gabrysiak** – Matériaux – Les bétons – Chapitre 4.
- [08] **PIERRE-CLAUDE AITCIN** est Professeur à l'Université de Sherbrooke "Bétons haute performance" Editions Eyrolles 2001.
- [09] **REZIG DJEBALI.** «Etude d'un béton à haute performance à base de sable de dune destines aux ouvrages au milieu agressif et très agressif». Université kasdi Merbah Ouargla, Algérie ; 2012.
- [10] [http:// WWW.la.refer.org/materiaux/default.html](http://WWW.la.refer.org/materiaux/default.html) "Matériaux de construction Expériences".
- [11] "Les bétons à hautes performances/caractéristique, durabilité, applications".
- [12] <http://www.batiproduits.com/batiwiki/Cone-Abrams/>
- [13] **PIERRE-CLAUDE AITCIN** est Professeur à l'Université de Sherbrooke "Bétons haute performance" Editions Arolles 2001.
- [14] "Les bétons à hautes performances/caractéristique, durabilité, applications".
- [15] **A.KOMAR** "Matériaux et éléments de construction" Edition MIR 1978.
- [16] Réunion d'Ingénieurs "Matériaux de construction "Troisième édition.
- [17] **CIM béton,** Centre d'information sur le ciment et ses application, Fiche technique Tome2 "Les bétons: formulation, fabrication et mise en œuvre "1997.
- [18] **PIERRE-CLAUDE AITCIN** est Professeur à l'Université de Sherbrooke " Bétons Haute Performance" Editions Arolles 2001.
- [19] **K. Krenkler** " Chimie des bauwesens " tome I:anorganische chimie, springer- Verlag, Berlin, pp : 346-380 -1980.
- [20] <http://www.infociments.fr/betons/types/betons-hautes-performances>
- [21] **Jacques Baron; et Jean- Pierre OLLIVER.** «Les bétons bases et donnée pour leur formulation», Edition Arolles 61, Bld Saint-Germain 75240 Pais Cedex.

Référence bibliographique

- [22] **R. Morin; G. Haddad; P-C Aitkin.** «Des structure des BHP sans fissure»,
<http://www.usherb.ca/CENTRES/crib/>.
- [23] **AZZOUZ Hocine.** «Etude des bétons à base des sables de dune» mémoire de magister.
Université Mohamed Kheider Biskra.2009.
- [24] **BEGHOURA Imed, TOUATI Issam.** «Contribution à la formulation des bétons à
hautes performances à base des matériaux locaux. »Mémoire de master. Université Mohamed
El Bachir El Ibrahimi-Bordj Bou Arreridj.2015.
- [25] [http:// WWW.lasim.org /](http://WWW.lasim.org/) Société de l'industrie minérale "Les composantes de la matrice
cimentaire "Rappels et interactions.
- [26] **Kobayashi K, Uno Y,** « *Influence of alkali on carbonation of concrete, 2. Influence of
alkali in cement on rate of carbonation of concrete* » *Cem. Concr. Res.*, 20, 4, PP. 619-622,
1990.
- [27] **Fadent** “ Durabilité du béton: caractérisation et modélisation des processus physiques et
chimiques de dégradation du ciment ” Thèse de doctorat, Université d’Orléans – 1992.
- [28]**FITAH KAMEL BAARA NABIL.** « Etude du comportement physico-mécanique d’un
béton ordinaire et auto plaçant à base de différent types de sable préparé » mémoire de
master. Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi-Bordj Bou Arreridj.2014.
- [29] **B. Gérard.** “ Contribution des couplages mécanique –chimie-transfert dans la tenue à
long terme des ouvrages de stockage des déchets radioactifs. ” Thèse de doctorat, Ecole
Normale Supérieure de Cachan, France et Université Laval, Québec, Canada-1996.
- [30] **F. Badouix.** “ Modélisation de l’altération à long terme des bétons : prise en compte de
la carbonatation ” Thèse de Doctorat, Ecole Normale Supérieure de Cachan, France- 2000.
- [31] **Ashby M.F,** Jones D.R.H, « Matériaux.2 », Dunod, édition 1991.
- [32]. **AITCIN P. C, AUTPAGE F.** “comparative study of de cementitious properties of
different fly ashes”. ACI SP-91, 1986.
- [33] <http://french.alibaba.com>.
- [34] **LAKHAL RIDHA.** « Elaboration des bétons à haut performances à base des sous
produits locaux, formulation et caractérisation physico-mécanique» mémoire de magister.
Université Badji Moukhtar Annaba.2011.
- [35]**ZEROUB Hamid.** «Valorisation du verre dans l’élaboration de béton durable (approche
expérimentale)».Mémoire de magister .Université M’Hamed Bougara-Boumerdes.2012.
- [36] **Jacques Baron; et Jean- Pierre OLLIVER.** «Les bétons bases et donnée pour leur
formulation», Edition Arolles 61, Bld Saint-Germain 75240 Pais Cedex.

Référence bibliographique

- [37] **PIKE, R.G. ,HUBBARD, D. et NEWMAN, E.S.** Binary silicate glasses in the study of alkali-aggregate reaction, Highway Research Board Bulletin,n°275,1960.
- PATTENGIL, M. et SHUTT T.C.** Use of ground glass as a pozzolan; Albuquerque symposiums on Utilization of Waste Glass in Secondary Products.Albuquerque, New Mexico, U.S.A.1973.
- [38] **KOJIMA, T., TAKAGI, N. et HARUTA, K.** Expanding charactersctics of mortar in glass powder produced from waste bottles, 11th international conference on Alkali Aggregate Reaction, Quebec. 2000.
- Norme ACI** (American Concrete Institute) 116R-90 (ACI 1990b).
- [39] **H .SCHOLZE.** Le verre, nature, structure et propriétés ; institut du verre, Paris 1980.
- [40] **BYARS, E., ZHU, H. et MORALES, B.** Conglasscrete, the Waste and Resources Action Programme, Mars 2004.
- SCHWARZ, N et NEITHALATH, N.** Influence of a fine glass powder on cement hydration : Comparison to fly ash and modeling the degree of hydration,Cement and Concrete Research, vol. 38, n°4. 2008.
- [41] **BEHIM;** Cours de matériaux “structuration et hydratation des ciments”, Cours du Première année Post Graduation Génie Civil Option Matériaux et durabilité, université d’Annaba 2006 / 2007.
- [42] **BOUFEDAH BADISSI AHMED** « «influence de la granularité sur les caractéristiques des granulats et sur les propriétés des bétons ordinaire »thèse de magister – université Mentouri Constantine, janvier 2011.
- [43] **Dossier technique de la société.** «GRANITEX-NP, Oued Smar, Alger»
- [44] NF P 18-406 relative aux essais de compression des bétons.
- [45] **GAHER HAIFA.** «Analyse de résistance à la traction et retrait de béton à haute Performance». Université des sciences et de la technologie houari Boumediene, 04 Décembre 2004.
- Site web 1 :** www.google.com/ béton fibré à ultra haute performance écrite par Gaston D. et col.