



FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES
DÉPARTEMENT GÉNIE CIVIL

Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme de Master

Spécialité : Génie Civil

Option : VOA

Présenté par :

DJILLAILI Mokhtar

Sujet du mémoire

Détermination de la résistance en compression d'un béton à hautes performances recyclé à base de laitier (El Hadjar Annaba)

Soutenu publiquement le **29/09/2021** devant le jury composé de :

Mr B. SERBAH

Président

Mme Z. RENNAK

Rapporteur

Mr H. BEKKI

Examineur

Mme A. DRAOUI

Examineur

PROMOTION : 2020-2021

الملخص

الحصى المستخدم في أعمال البناء والهندسة المدنية يجب أن يفي بمتطلبات الجودة والخصائص الخاصة بكل استخدام.

و يتميز حصى الخرسانة المعاد تدويرها بقدرة عالية على استيعاب المياه، وذلك بسبب وجود خليط متبقي وبالتالي فقدان قوة الخرسانة المضغوطة التي تتراوح بين 10% و30%، من أجل إستبدال (كلي/ جزئي) للحصى الطبيعي بالحصى المعاد تدويره.

إن الهدف من هذه الدراسة التجريبية يتلخص في إتقان تصميم الخرسانة عالية الأداء المصنوعة من الحصى المعاد تدويره (الخبث) ، في حين تعمل على تبيين المنتجات المتاحة في السوق الجزائرية في شكل جديد وصلب على حد سواء.

ركزنا أبحاثنا على تأثير استبدال أجزاء الحصى الطبيعي 8/3 و 15/8 ملم بواسطة نفس أجزاء الحصى المعاد تدويره على خصائص الخرسانة العالية الجودة المعادة التدوير خ ع أ م ت (المقاومة الميكانيكية). ومن الضروري تحديد الخصائص المختلفة عن طريق اختبارات مخبرية مختلفة. ولكي نفعّل هذا، فقد وضعنا وصفاً للحصى المستخدمة في تكوين أربع مخاليط: خرسانة عالية الجودة خ ع ج شاهدة، وثلاثة مخاليط خ ع أ م ت المعاد تشكيلها (نسبة متغيرة من الاستبدال 25% ، 50% و75%).

بين تحليل نتائج اختبارات الضغط والشد التي أجريت على خرسانة ع أ وخرسانة ع أ م ت أن معدل الاستبدال له تأثير كبير على السلوك الميكانيكي للخرسانة عالية الأداء المعاد تدويرها، هذا التأثير ملحوظ بشكل خاص على شكل منحنى الضغط وقوة الشد بدلالة أعمار جميع المخاليط.

الكلمات الرئيسية: الخبث، الحصى المعاد تدويره ، خرسانة عالية الأداء ، توصيف ، مقاومة

Résumé

Les granulats utilisés dans les travaux de bâtiment et de génie civil doivent répondre à des impératifs de qualité et à des caractéristiques propres à chaque usage.

Les granulats recyclés de béton sont caractérisés par une forte capacité à absorber l'eau, en raison de la présence du mortier résiduel et donc des pertes de résistance à la compression du béton allant de 10% à 30%, pour un remplacement (total/partiel) du granulat naturel par un granulat recyclé.

Notre étude a pour objectif la valorisation de résidus minéraux comme ajout dans les matériaux de construction, tout en valorisant les produits disponibles sur le marché Algérien à l'état frais comme à l'état durci.

Nous avons, axé notre recherche sur l'effet de la substitution (remplacement) des granulats naturels de fraction 3/8 et 8/15 mm par les granulats recyclés de même fraction sur les propriétés du BHPR (résistances mécaniques). Il est nécessaire d'en établir les différentes caractéristiques par différents essais de laboratoire. Pour ce faire, nous avons procédé à la caractérisation des granulats entrant dans la composition de quatre mélanges : un BHP témoin, trois bétons recomposés BHPR (pourcentage de remplacement variable 25%, 50% et 75%).

L'analyse des résultats d'essais de compression et de traction effectués sur le béton HP et le béton HPR montre que le taux de remplacement a une influence importante sur le comportement mécanique du béton à hautes performances recyclés.

Mots clés : Laitier, Granulat recyclé, Béton à Hautes Performances, caractérisation, résistance

Abstract

The aggregates used in building and civil engineering work must meet quality requirements and characteristics specific to each use.

Recycled concrete aggregates are characterized by a high capacity to absorb water, due to the presence of residual mortar and thus losses of compressive strength of concrete ranging from 10% to 30%, for replacement (total/partial) natural aggregate by recycled aggregate.

The objective of this experimental study is to master the design of high-performance concretes based on recycled aggregates (slag), while promoting the products available on the Algerian market in both fresh and hard form. We focused our research on the effect of the substitution (replacement) of natural aggregates of fraction 3/8 and 8/15 mm by recycled aggregates of the same fraction on the properties of BHPR (mechanical resistances).

It is necessary to establish the different characteristics by different laboratory tests. To do this, we have made a characterization of the aggregates used in the composition of four mixtures: a control BHP, three recomposed BHPR concretes (variable percentage of replacement 25%, 50%, and 75%).

Analysis of the results of compression and tensile tests carried out on HP and HPR concrete shows that the replacement rate has a significant influence on the mechanical behaviour of recycled high-performance concrete.

This influence is particularly noticeable on the shape of the compression and tensile strength curve as a function of the age of all mixtures.

Keywords: Slag, Recycled granulate, High Performance Concrete, characterization, strength



Remercîment

Nous tenons tout d'abord à remercier **ALLAH** pour nous avoir guidés vers le bon chemin de la lumière et du savoir et pour nous avoir donné du courage, de la volonté afin de pouvoir réaliser ce modeste travail.

Nos remerciements à nos parents, pour leurs soutiens et leurs encouragements pendant toute la vie et qui continueront à nous aider dans tous les projets de l'avenir. Ainsi que tous les membres de nos familles qui ont participé de près ou de loin à nous encourager et nous aider dans notre projet.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à notre Encadreur **Z. RENNAK** pour l'encadrement de ce mémoire son aide, sa patience et sa confiance qu'elle nous a accordée. Nous tenons à remercier les membres de jury pour avoir accepté de juger notre travail.

Mes sincères remerciements vont également à tous les enseignants, du département de Génie Civil de l'université de Tiaret, qui ont participé à notre formation.

Enfin nous remercions tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.

« MERCI »



Dédicace

Je dédie avec grand plaisir, ce modeste travail à :

Tout d'abord je tiens à remercier Dieu Tout puissant ;

Je puisse les honores ;

A ma chère mère ;

A toute ma famille ;

*Et tous mes amis proches surtout MAACHOU Samir, KEBRIT Mohamed et
HARDOUDI Larbi;*

Et a Tous mes collègues génie civil spécialité VOA 2021.

DJELAILI MOKHTAR

Sommaire

المخلص	I
Résumé	II
Abstract	III
Liste des figures	IV
Liste des tableaux	V
Introduction générale	1

Chapitre I : Béton à Haute performance

I.1 Introduction	4
I.2 Composition des bétons à hautes performances	4
I.2.1 Le ciment	5
I.2.2 Les granulats.....	6
I.2.3 Les ajouts minéraux :	7
I.2.3.1 Le laitier.....	7
a) Laitier vitrifier moulu de haut fourneau	8
b) Composition chimique du laitier	8
c) Hydraulicité du Laitier Vitrifie	8
I.2.3.2 La fumée de silice	9
I.2.3.3 Cendres volante	10
I.2.3.4 Fillers	11
I.2.4. Eau	11
I.2.5. Adjuvants superplastifiants	12
I.3 Influence du rapport E/L	12
I.4 Microstructure des BHP	13
I.4.1 Composition et hydratation d'un ciment Portland	14
I.4.1-a Silicate tricalcique Ca_3SiO_5 ou alite (C_3S dans la notation des cimentiers)	14
I.4.1-b Silicate bicalcique Ca_2SiO_4 ou bélite (C_2S la notation des cimentiers).....	14
I.4.1-c Aluminate tricalcique $Ca_3Al_2O_6$ ou célite (C_3A la notation des cimentiers)	14
I.4.1-d Alumino-ferrite tétracalcique $Ca_3Al_2O_10Fe_2$ (C_4AF la notation des cimentiers).....	15
I.4.2 Principaux hydrates de la pâte de ciment durcie	15
I.4.2.1 Silicate de calcium hydraté C-S-H	15
I.4.2.2 Portlandite.....	15
I.4.3 Particularité de l'hydratation des BHP	15
I.4.4 Porosité de la pâte de ciment	16
I.4.5 Influence de l'auréole de transition	16
I.5 Les voies d'obtention des hautes performances	17
I.5.1 Défloculation des grains de ciments et réduction de la teneur en eau	17
I.5.2 Optimisation du squelette et de l'empilement granulaire	17
I.6 Propriétés physico-chimiques et mécaniques des BHP	18
I.6.1 La résistance à la compression / et à la traction.....	18
I.6.2 Module d'élasticité.....	19
I.6.3 Retrait	20
I.6.4 Fluage.....	21
I.6.5 Durabilité	22
I.6.6 Résistance au feu	22
I.6.7 Résistance aux agents agressifs	22

I.6.8 Tenue aux attaques gel / dégel	23
I.6.9 Carbonatation	23
I.6.10 Adhérence acier-béton	23
I.6.11 Réduction des flèches et des déformations des structures	23
I.6.12 Propriétés thermiques	23
I.7 Principaux domaines d'applications	23
I.7.1 Structures coulées en place	24
I.7.2 Produits préfabriqués en béton	24
I.8 Réalité des bétons HP	25
I.8.1 Les ouvrages d'art	25
I.8.2 Le Bâtiment	27
I.8.3 Les BHP en Algérie	29
I.9 Conclusion	30

Chapitre II : Granulats recyclés

II.1 Introduction	32
II.2 Intérêt du recyclage dans le génie civil	32
II.3 Sources de déchets utilisés en génie civil	33
II.3.1 Déchets de construction et de démolition	33
II.3.2 Déchets de sous-produits de l'industrie	33
II.4 Classifications des déchets dans le génie civil	33
II.4.1 Déchets inertes.....	33
II.4.2 Déchets banals.....	33
II.4.3 Déchets dangereux.....	33
II.5 Descriptions du granulats recyclé.....	34
II.6 Les types des granulats recyclés	34
II.7 Élaboration des granulats de béton recyclé.....	35
II.7.1 Propriétés du béton à base des granulats recyclés à l'état frais	36
II.7.2 Propriétés du béton à base des granulats recyclés à l'état durci.....	37
II.7.3 Propriétés liées à la durabilité.....	38
II.8 Conclusion.....	38

Chapitre III : Essai sur Béton

III.1 Introduction.....	39
III.2 Matériaux utilisés:	39
III.2.1 Ciment :	40
III.2.1.1 Les propriétés de ciment :	40
III.2.1.2 Les données de ciment :	41
III.2.2 Les granulats (Sable) :	42
III.2.2.1 Les caractéristiques physiques:	42
III.2.2.2 Equivalent de sable:	42
III.2.2.3 Analyse granulométrique :	45
III.2.2.4 Modules de finesse : [NF P 18-540]	45
III.2.3 Granulat(gravier) :	46
III.2.3.1 La masse volumique du gravier 3/8 et 8/15 :	46
III.2.3.2 La masse volumique et spécifique du gravier 3/8 et 8/15.....	46
III.2.3.3 Mesure du coefficient d'aplatissement : [NF P18-561]	47
III.2.3.4 Coefficient d'absorption : [P18-554] [P18-555]	48

III.2.3.5 Mesure de la propretésuperficielle :[NF P18-591]	49
III.2.3.6 Essais Los Angeles : (P18-573)	49
III.2.3.7 Essaid'usure Micro-Deval : [P18-572]	50
III.2.3.8Essai au bleu de méthylène : (P18-592)	50
III.2.3.9 Essai de carbonatation accélérée : (XP P18-458)	51
III.2.4 L'eau de gâchage :	51
III.2.5 Super plastifiants	51
III.2.6. Le Laitier	52
III.3 Formulation du béton:	53
III.3.1 Fabrication des échantillons :	57
III.4 Démoulage et conservation des eprouvettes.....	60
III.5 Surfaçage des eprouvettes.....	61
III.6 Essai sur béton durci :	61
III.6.1 Détermination de la résistance à la compression (fcj) :	62
III.6.2Détermination de la résistance à la traction par flexion.....	64
III.7 Conclusion.....	65

Chapitre IV : Analyse des Résultats

IV.1	66
IV.2 Les granulats :	66
IV.2.1 Analyse granulométrique par tamisage.....	66
IV.2.1.1 Sable naturel :	66
IV.2.1.2 Gravier naturel :	67
IV.2.1.3 Gravier recycle(laitier)	67
IV.2.2 Courbes ranulométriques.....	68
IV.2.2.1 Sable naturel et Gravier naturel :	68
IV.2.2.2 Graviers recyclés (béton à base de laitier) :	68
IV.2.3 Caractéristique.....	69
IV.2.3.1 Le Coefficient d'Aplatissement (A)	69
IV.2.3.2 Essai Los-Angeles (LA)	69
IV.2.3.3 Essai Micro-Deval (MDE)	70
IV.2.3.4 Masse volumique apparente (Mvapp)	70
IV.2.3.5 Masse volumique absolue (Mvabs)	71
IV.2.2.6 Taux d'absorption d'eau (Ab %)	72
IV.2.2.7 La propreté des sables (ES, VB)	73
IV.2.2.8 Résultats d'essai de carbonate	74
IV.3 Analyse des résultats de caractérisation :	74
IV.3.1 l'état frais	74
IV.3.2 L'état durci :	75
IV.3.2.1 Résistance en compression :	75
IV.3.2.2 Résistance en traction par flexion :	78
IV.4 CONCLUSION	86
CONCLUSIONS GÉNÉRALES.....	87
Bibliographie	

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau I.1.	Résistance à la compression de BHP en fonction du rapport Eau/liant	13
Tableau (I.2)	Les deux voies d'obtention des BHP	18
Tableau (I.3)	Résistance caractéristique à la compression des différents bétons	19
Tableau (I.4)	Caractéristique de résistance et de déformation suivant la norme EN1992	20
Tableau (I.5)	Comparaison entre le retrait des bétons ordinaires et celui des BHP	21

Chapitre III

Tableau (III.1)	Composition chimique du ciment CEM I 42,5 N-LH SR5 utilisé	41
Tableau (III.2)	Composition minéralogique du ciment CEM I 42,5 N-LH SR5 utilisé	41
Tableau (III.3)	Dimensions en millimètres	47
Tableau (III.4)	Caractéristiques des adjuvants utilisés (MEDAFLOW RE 25)	52
Tableau (III.5)	Composition chimique du laitier	53
Tableau (III.6)	Détermination de la dose de saturation	56
Tableau (III.7)	Composition d'un m ³ béton BHPL et BHPLR(en kg)	56

Chapitre VI

Tableau (IV.1)	Résultats de tamisage de sable	66
Tableau (IV.2)	Résultats de tamisage de gravier Naturel	67
Tableau (IV.3)	Résultats de tamisage de Gravier recyclé (béton à base de laitier)	67
Tableau (IV.4)	Résultats de Coefficient d'Aplatissement (A)	69
Tableau (IV.5)	Résultats de Essai Los-Angeles (LA)	69
Tableau (IV.6)	Résultats de EssaiMicro-Deval (MDE)	70
Tableau (IV.7)	Résultats de Masse volumique apparente (Mvapp)	70
Tableau (IV.8)	Masse volumique absolue (Mvabs)	71
Tableau (IV.9)	Taux d'absorption d'eau (Ab %)	72
Tableau (IV.10)	Équivalent de sable avant de se laver	73
Tableau (IV.11)	Équivalent de sable après lavage	73
Tableau (IV.12)	Caractéristiques des bétons à l'état frais	74
Tableau (IV.13)	Récapitulatif des valeurs des résistances en compression aux différentes échéances des bétons (BHPL)	76
Tableau (IV.14)	Résultats de la résistance en traction des bétons	79
Tableau (IV.15)	Récapitulatif des valeurs des résistances en compression aux	81

	différentes échéances des bétons (BHPLR 25%GN+75%GR)	
Tableau (IV.16)	Récapitulatif des valeurs des résistances en compression aux différentes échéances des bétons (BHPLR 50%GN+50%GR)	81
Tableau (IV.17)	Récapitulatif des valeurs des résistances en compression aux différentes échéances des bétons (BHPLR75%GN+25%GR)	82
Tableau (IV.18)	Récapitulatif des valeurs des résistances en Traction aux différentes échéances des bétons (BHPLR25%GN+75%GR)	83
Tableau (IV.19)	Récapitulatif des valeurs des résistances en Traction aux différentes échéances des bétons (BHPLR 50%GN+50%GR)	84
Tableau (IV.20)	Récapitulatif des valeurs des résistances en Traction aux différentes échéances des bétons (BHPLR 75%GN+25%GR).	84
Tableau (IV.21)	Comparaison des résultats expérimentaux des bétons à hautes performance	85

Liste des figures

Chapitre I

Figure (I.1)	Evolution du retrait endogène en fonction du rapport E/C	21
Figure (I.2)	Pont de l'Iroise	26
Figure (I.3)	Pont Rion-Antirion	26
Figure I.4	Pont de l'île Rousski	27
Figure I.5 :	Pont de Normandie	27
Figure I.6 :	Arche de la Défense (France)	28
Figure I. 7	Burj Khalifa	28
Figure I.18 :	la façade de l'aéroport	29
Figure I.19:	North Galaxy Towers (Belgique)	29

Chapitre II

Figure (II.1)	Représentation en chiffres des déchets	34
Figure (II.2)	Schématisme d'un granulats recyclés	34

Figure (II.3)	Différents types des granulats recyclés	35
----------------------	---	-----------

Chapitre III

Figure (III.1)	Ciment AL ESSES	40
Figure (III.2)	Détermination de la masse volumique	40
Figure (III.3)	Détermination de masse volumique absolue	41
Figure (III.4)	Echantillon de sable	42
Figure (III.5)	Détermination des masses volumiques et spécifiques	42
Figure (III.6)	Equivalent de sable	43
Figure (III.7)	Processus de l'essai d'équivalent de sable	43
Figure (III.8)	Machine d'agitation (mouvement rectiligne horizontale)	44
Figure (III.9)	Essai d'équivalent de sable (juste après agitation)	44
Figure (III.10)	Les trois éprouvettes pour l'essai de l'équivalent de sable (E_s) (phase de repos (20 mn))	44
Figure (III.11)	Colonne des tamis	45
Figure (III.12)	Essai d'analyse granulométrique	45
Figure (III.13)	Essai de la masse volumique du gravier 3/8 et 8/15	46
Figure (III.14)	Détermination de la masse volumique de gravier	46
Figure (III.15)	Détermination de la masse spécifique de gravier	47
Figure (III.16)	l'échantillon imbibé dans l'eau 24h	49

Figure (III.17)	Essai Micro-Deval ⁴³	50
Figure (III.18)	Essai au bleu de méthylène	51
Figure (III.19)	Super plastifiants MEDAFLOW	52
Figure (III.20)	Le Laitier	53
Figure (III.21)	Ecoulement au cône de Marsh et préparation des coulis	55
Figure (III.22)	Courbe de la dose de saturation	56
Figure (III.23)	Introduction des constituants dans le malaxeur du béton	57
Figure (III.24)	Malaxage à sec des ingrédients du béton	58
Figure (III.25)	Echantillon de béton réalisé	58
Figure (III.26)	Mesure de l'affaissement du béton	59
Figure (III.27)	Moulage des éprouvettes cylindriques	59
Figure (III.28)	Préparation des éprouvettes Cylindriques	59
Figure (III.29)	Dénouage des éprouvettes cylindriques et prismatiques	60
Figure (III.30)	Pesée des éprouvettes	61
Figure (III.31)	Conservation des éprouvettes cylindriques et prismatiques dans l'eau à 20 °C	61
Figure (III.32)	Chargements des éprouvettes cylindriques 16x32 cm (Essai de compression)	63
Figure (III.33)	Rupture des éprouvettes cylindriques BHPL	63

Figure (III.34)	Rupture des éprouvettes cylindriques à 28 jours Béton à haute performance BHPLR	64
Figure (III.35)	Chargement des éprouvettes prismatiques pour l'essai de traction	64
Figure (III.36)	Rupture des éprouvettes prismatiques (Béton HPL)	65

Chapitre IV

Figure (IV.1)	Courbes granulométriques de sable (0/4) et graviers (3/8 et 8/15)	62
Figure (IV.2)	Courbes granulométriques de graviers recyclés (3/8 et 8/15) (béton à base de laitier)	
Figure (IV.3)	Résultats d'Essai Los-Angeles (LA)	63
Figure (IV.4)	Résultats de Essai Micro-Deval (MDE)	70
Figure (IV.5)	Résultats de Masse volumique apparente (M_{vapp})	71
Figure (IV.6)	Masse volumique absolue (M_{vabs})	72
Figure (IV.7)	d'absorption d'eau (A_b %)	73
Figure (IV.8)	Résultats d'essai de carbonate	74
Figure (IV.9)	Affaissement des bétons	75
Figure (IV.10)	Histogramme d'évolution des résistances à la compression en fonction du temps	77
Figure (IV.11)	Evolution de la résistance à la compression des bétons en fonction du temps	78
Figure (IV.12)	Evolutions des résistances en traction par flexion en fonction du temps	80

Figure (IV.13)	La résistance en traction pour bétons en fonction du temps	80
Figure (IV.14)	Histogramme des valeurs des résistances en compression aux différentes échelles des bétons	82
Figure (IV.15)	Récapitulatif des valeurs des résistances en Traction aux différentes échelles des bétons	85
Figure (IV.16)	Développement de la résistance à la compression de béton HP contenant des additions minérales	86

Introduction générale

Introduction Générale

L'évolution historique des techniques de construction a vu l'utilisation de divers matériaux parmi lesquels on pourra citer le bois, la pierre de taille, l'acier et le verre pour les bâtiments, la terre battue, les dalles ou les pavés pour les infrastructures de transport. Chacun de ces matériaux trouve toujours son utilité pour des besoins spécifiques. Mais les méthodes de construction qui répondent aujourd'hui le mieux aux attentes de nos sociétés sont celles qui passent par la mise en œuvre de granulats, qui répondent à la définition de « matériaux granulaires utilisés dans la construction ». Ces matériaux sont issus d'une ressource pratiquement universelle, leur élaboration est relativement simple, leur transport facile, leur mise en œuvre rapide. Aujourd'hui, les mélanges granulaires, bétons, mortiers, graves traitées ou non traitées, enrobés, représentent la solution la plus logique et la plus économique pour la construction des infrastructures.

Ainsi, à l'heure où la préservation de l'environnement est devenue une exigence sociétale, l'exploitation des granulats naturels en carrières permet de s'assurer de la pérennité des approvisionnements, avec une volonté affichée de concilier les impératifs économiques et environnementaux dans une perspective de développement durable. Les granulats de part l'importance de leur utilisation à travers le monde constituent après l'air et l'eau, la troisième substance consommée par l'homme.

A titre d'information, on consommerait en moyenne par nature d'ouvrage et de granulats :

- 2 tonnes pour 1 mètre cube de béton ;
- 200 à 300 tonnes pour un logement ;
- 20000 à 40000 tonnes pour un hôpital ou un lycée ;
- 10000 tonnes pour 1 kilomètre de voie ferrée ;
- 30000 tonnes pour 1 kilomètre d'autoroute.

Les granulats font l'objet d'études de plus en plus poussées pour définir leurs propriétés et leurs caractéristiques. La technologie des bétons s'est développée de telle manière à obtenir des bétons de plus en plus performants avec un degré de technicité induisant des niveaux de performances et de sécurité requis pour la construction des ouvrages, ce qui a imposé une normalisation et une optimisation de la qualité des granulats.

Il faut avoir une connaissance précise de ces matériaux utilisés en génie civil. Ils doivent répondre à des critères précis de qualité et de régularité, définis par des normes. La recherche concernant la validation sur le béton a pour objectif de mettre en évidence l'influence des constituants, notamment leur dosage sur les différents paramètres (propreté, masse volumique,

Introduction Générale

coefficient d'aplatissement...).[BOUFEDAH BADISSI Ahmed2011]

En Algérie, au cours de ces dernières années, la demande en granulats est de plus en plus accrue pour répondre aux besoins de plusieurs projets majeurs et importants, tels que les ouvrages relatives à l'autoroute est-ouest, les ponts, Metro, la grande mosquée d'Alger, le tramway,

L'utilisation massive des ressources naturelles et l'énorme quantité de déchets de démolition inutilisés font échouer la protection de l'environnement. En effet, l'utilisation de granulats recyclés offre la plupart du temps une réduction significative sur le coût des matières premières, peut constituer un avantage environnemental et donc diminuerait l'épuisement des ressources naturelles.

Le béton à hautes performances 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'air et à l'eau réduite, une résistance aux agressions et une meilleure résistance à l'alcali-réaction, une plus grande résistance à l'abrasion et une meilleure tenue aux cycles dégel/dégel, Il permet de concevoir des structures plus minces grâce à l'augmentation des caractéristiques mécaniques (compression, traction, module d'élasticité) tant au jeune âge qu'à terme.

Cependant, les propriétés améliorées des BHP ne peuvent être obtenues que grâce à plusieurs dispositions simultanées concernant :

- Les granulats doivent être de bonne qualité, la résistance du béton pouvant être limitée par celle des granulats eux-mêmes, L'emploi d'adjuvants spécifiques, notamment des super plastifiants réducteurs d'eau ainsi que des ajouts minéraux tel que la cendre volante, le laitier du haut fourneau, la fumée de silice...etc ;
- L'emploi de ciments de classe élevée à des dosages compris entre 400 et 550 kg/m³.

Dans cette étude, on s'intéresse au comportement d'un béton à hautes performances recyclés BHPR dans lequel le gravier concassé recyclé a été substitué (remplacé) par le gravier naturel à des taux de 25, 50, et 75% (par rapport à la masse totale du gravier naturel)

Notre travail expérimental consiste à étudier l'effet de la substitution (remplacement) des granulats naturels de fraction 3/8 et 8/15 mm par les granulats recyclés de fraction 3/8 et 8/15 mm sur les propriétés du BHP à l'état frais (caractéristique rhéologique) et durci (résistance mécanique).

Enfin, nous pouvons dire, que ce travail est une contribution à l'amélioration des propriétés des bétons BHP préparés à base de granulats recyclés.

Introduction Générale

Ce présent mémoire sera composé de quatre chapitres :

Le premier chapitre de ce travail est destiné à l'étude des bétons à hautes performances.

Dans cette partie, nous exposerons les travaux effectués par différents auteurs sur le comportement des BHP

Le deuxième chapitre introduit des généralités sur les granulats recyclés, il décrit l'intérêt du recyclage dans le génie civil et élaboration des granulats de béton recyclé.

Le troisième chapitre est consacré à l'expérimentation. Nous présentons dans cette partie les essais effectués sur les bétons (BHP et BHPR).

Le quatrième chapitre présente les résultats expérimentaux obtenus et les discussions tirées lors de cette étude.

Enfin, une conclusion générale reprend les principaux résultats dégagés lors de cette étude.

CHAPITRE I
Béton
à hautes performances

I.1. Introduction

Béton à Hautes performances signifie faciliter la mise en œuvre et la souplesse d'adaptation aux contraintes d'exécution des ouvrages.

Le béton à haute performance (BHP) est un béton exceptionnel tant en termes de résistance mécanique que de durabilité. Il est caractérisé par une très forte résistance à la compression puisque celle-ci est supérieure à 50 MPa à 28 jours, et des propriétés exceptionnelles à l'état frais, à court ou à long terme.

Les BHP ont une porosité extrêmement réduite, plus résistants aux agents agressifs et de façon générale, présentent une durabilité améliorée et une résistance accrue.

L'utilisation des Bétons à Hautes Performances « BHP » est actuellement en plein développement dans le domaine du génie civil, notamment dans la construction des ouvrages d'art. Ils peuvent supporter des charges supérieures ou permettre des constructions plus élancées. Ils peuvent également présenter des formes plus complexes et permettent de réaliser de plus grandes portées.

I.2 Composition des bétons à hautes performances :

Un Béton à Hautes Performances « BHP » peut être défini comme étant un béton qui a une porosité réduite. Cette minimisation de la porosité est généralement obtenue en utilisant des rapports Eau/Ciment ou Eau/Liant plus faibles que dans le cas des Bétons Ordinaires « BO », associé à l'ajout d'adjuvants afin d'assurer une ouvrabilité satisfaisante. Ainsi, plus le béton est compact plus sa résistance est meilleure.

La rupture d'un béton se développe dans la partie la plus vulnérable des trois régions suivantes : la pâte de ciment, les granulats, ou la zone de transition entre la pâte-granulats [Maso 1980].

Pour confectionner un béton résistant et performant, il faut par conséquent renforcer chacune de ces trois parties. Pour parvenir à réduire la porosité d'une pâte de ciment hydratée, il faut réduire la quantité d'eau de gâchage. Cela n'est possible qu'avec l'utilisation d'adjuvants. L'utilisation d'additions minérales (fumée de silice, filler calcaire par exemple laitier) va également dans ce sens. Une pâte de ciment compacte permet une bonne transmission des contraintes aux granulats. Concernant ces derniers, le choix de leur nature minéralogique, de leur forme, de la dimension du plus gros granulats ainsi que l'optimisation de la distribution du squelette granulaire sont nécessaires. La réduction du rapport eau/ciment de la pâte et le choix de la nature minéralogique des granulats sont des paramètres qui permettent également d'améliorer la résistance de la zone de transition (considérée comme le maillon faible dans le cas des bétons ordinaires).

I.2.1 Le ciment :

Le ciment doit permettre au BHP d'atteindre une classe de résistance donnée, tout en assurant une bonne maniabilité et une finition de qualité. A titre d'exemple, les BHP de la gamme 50-75 MPa peuvent être composés avec la plupart des ciments Portland commerciaux, alors que les BHP de résistance 75-100 MPa ne peuvent l'être qu'avec certains ciments, et rares sont les ciments Portland qui peuvent permettre d'obtenir des BHP de classe supérieure (BTHP de 100 à 125 MPa) [Aïtcin 2001]. Les performances des ciments commerciaux en termes de rhéologie et de résistance sont en effet très variables et seules quelques-uns possèdent simultanément de bonnes performances de résistances finales et de bonnes performances rhéologiques. Il existe bien évidemment, comme nous le verrons par la suite, des solutions qui permettent de pallier aux manques de performances des ciments commerciaux, (utilisation de superplastifiants réducteurs d'eau, additions minérales, etc.).

Les principales caractéristiques d'un ciment sont rappelées ci-dessous :

- ✓ **La finesse du ciment** : la recherche de la finesse optimale est une des exigences pour réaliser un BHP. La finesse régit de façon directe la résistance du béton. Plus le broyage est fin, plus les phases silicatées entourant les particules sont nombreuses, ce qui est bénéfique pour la résistance. Cependant, une finesse élevée rend les ciments réactifs et conduit à une formation rapide d'ettringite et de C-S-H lors de l'hydratation, impactant négativement la rhéologie. L'autre inconvénient d'une finesse importante est lié aux risques de fissuration dus à un fort retrait.
- ✓ **La teneur en C₃S** : les ciments à teneur élevée en C₃S présentent un intérêt pour la fabrication de BHP de forte résistance au jeune âge. En effet, le C₃S présente une meilleure réactivité par rapport au C₂S, ce dernier agissant plutôt sur les résistances à moyen et long terme. [W. Ladaoui 2010]
- ✓ **Composition de la phase interstitielle** : elle régit la durabilité du béton en termes d'attaques chimiques. D'une façon générale, les ciments présentant un PH de la solution interstitielle faible sont plus résistants aux altérations chimiques (attaques acides en particulier). Ceci en raison de la meilleure stabilité chimique des phases solides qu'ils contiennent et de la diminution des gradients ioniques avec le milieu agressif qui en découlent. Un béton contenant peu de portlandite sera en particulier plus stable qu'un béton qui en contiendrait beaucoup [Camps 2008].
- ✓ **La teneur et morphologie du C₃A** : pour la formulation des BHP, l'utilisation d'un ciment contenant une faible teneur en C₃A permet de faciliter le contrôle de la rhéologie.

Une morphologie du C_3A à dominante cubique est préférable à celle orthorhombique. En effet, la rhéologie d'un ciment à base de C_3A cubique est facile à contrôler [Vernet et Noworyta 1992].

En outre, la limitation de la teneur en C_3A améliore la durabilité du béton en permettant une meilleure résistance aux milieux agressifs, en particulier aux attaques sulfatiques externes en raison de la limitation du risque de formation d'ettringite secondaire.

I.2.2 Les granulats :

Les granulats doivent avoir les caractéristiques adéquates permettant :

- De résister aux contraintes transmises par la pâte de ciment ;
- D'optimiser la densité du squelette granulaire final pour un béton compact ;
- D'obtenir une zone de transition pâte-granulats de bonne qualité.

Pour cela, les critères de sélection des granulats portent sur :

- ✓ **La nature minéralogique** : son incidence sur la qualité (Interfacial Transition Zone) et sur les risques de développement de l'alcali-réaction semble avérée mais aussi sur les déformations différées du béton [Neville 1996]. Les granulats calcaires offrent en particulier une meilleure affinité chimique avec la pâte de ciment. Ils limitent les risques d'alcali-réaction et possèdent des modules de compressibilité plus proches de la pâte de ciment que les granulats siliceux. En revanche, ils peuvent être sensibles à certaines altérations chimiques acides.
- ✓ **Dimensions, volume et forme des granulats** : la taille des granulats a une influence sur les propriétés de résistance et de durabilité des bétons [Gonilho Pereira et al. 2008].

Bien que l'utilisation de gros granulats permette de diminuer la demande en eau (faible surface à mouiller par unité de masse), ce qui va dans le sens de l'augmentation de la résistance, il n'est pas recommandé d'en utiliser dans les BHP, car ils se comportent comme des inclusions rigides de grandes dimensions, induisant des systèmes d'auto-contraintes importants. Ils altèrent également les capacités de déformations différées et les propriétés thermiques. Il est admis que ces risques sont limités tant que la dimension maximale est inférieure à 10 ou 12 mm [Neville 2000]. [Nichols 1982] a établi que, pour chaque résistance de béton et donc pour chaque rapport eau/ciment, il existe une dimension maximale optimale pour le granulats.

De même, le volume des granulats possède un effet sur les propriétés mécaniques du béton.

D'après [Stocks et al 1979], les propriétés mécaniques (résistance en compression et module d'élasticité) augmentent avec la proportion de granulats, du moins dans le domaine des concentrations usuelles en granulats (60-75% en volume). Le même constat a été fait sur les

déformations différées. Le fluage est d'autant plus faible que le volume relatif des granulats est conséquent. Il a été observé que le passage de la teneur volumique en granulat de 65 à 75% entraîne une diminution du fluage de 10 % [Pons et Torrenti 2008]. Quant à la forme, l'utilisation de granulats concassés ou semi-concassés permet d'obtenir des meilleurs comportements mécaniques comparativement aux formes roulées [Mallier 1992].

- ✓ **L'optimisation de la distribution granulaire** : elle permet d'augmenter la densité du squelette granulaire final et par conséquent d'obtenir un béton compact ayant de bonnes propriétés mécaniques. Parmi les méthodes d'optimisation de la répartition granulaire d'un béton, on peut citer (Powers 1968), (Bolomey 1935), (Caquot 1937), (Faury 1953).

I.2.3 Les ajouts minéraux :

I.2.3.1 Le laitier :

Le laitier est un sous-produit issu de la fabrication de la fonte. Lors de l'élaboration de la fonte dans le haut fourneau, il y a production de composés gazeux (gaz de haut fourneau), liquides (fonte, laitier) et solides (poussière de gaz). Ces éléments proviennent de la gangue des minerais, des cendres de combustibles et des additions siliceuses, calcaires ou magnésiennes des fondants. Les quantités de laitier par tonne de fonte sont donc déterminées par les conditions mêmes d'exploitation, et aussi par la nature du minerai.

Il sort du trou de coulée à une température de l'ordre de 1500°C, il contient de la chaux (45 à 50%), de la silice (25 à 30%), de l'alumine (15 à 20%) et 10% environ de magnésie, oxydes divers et manganèse. Le laitier est un véritable ciment manifestant par lui-même des propriétés hydrauliques, grandement activées d'ailleurs par la présence du clinker. Son hydratation, qui se traduit par le développement de résistances mécaniques est moins rapide que celle du portland surtout dans sa période initiale. Elle dégage parallèlement moins de chaleur et accuse une sensibilité plus marquée aux variations de température (abaissement ou élévation).

Le laitier retient un peu moins bien l'eau de gâchage que le portland et craint donc davantage la dessiccation.

Mais chimiquement, il résiste normalement mieux tant à l'action destructrice des sulfates, qu'à la dissolution de la chaux par les eaux pures ou chargées en certains sels, ainsi que par celles contenant du gaz carbonique agressif.

La composition du laitier varie dans des proportions sensibles, suivant la marche du Haut fourneau et les conditions de son fonctionnement. Par voie de conséquence, les Constituants secondaires du laitier ne se trouveront pas aux mêmes concentrations, suivant que Le rapport laitier / fonte sera faible ou élevé. Ceci influera sur les propriétés du laitier.

Le laitier en fusion, liquide se séparant par gravité de la fonte en fusion, est évacué par le trou de coulée. Selon le mode de solidification, on obtient des produits différents tel que le laitier cristallisé, obtenu par refroidissement lent à l'air, donne une roche dure, angulaire et frottant qui, après concassage et criblage, est utilisé comme granulats dans le béton, matériaux d'assises de chaussées, enrobés bitumeux, remblais-Le laitier vitrifié, obtenu par refroidissement brutal (trempe) :

-par de l'eau sous pression (granulation) donnant le laitier, de granulométrie 0/5.

-à l'eau et l'air donnant le laitier bouleté, de granulométrie 0/20 environ.

Il résulte un laitier comparable au laitier granulé mais à granulométrie très étalée, ce qui permet son utilisation, d'une part une partie comme laitier granulé et d'autre part une autre comme granulats de laitier expansé. Cette technique de traitement offre notamment l'avantage d'un investissement modéré, de frais d'entretien raisonnables et d'une faible consommation d'eau (1 m³/t de laitier, soit 8 à 10 fois moins qu'en granulation classique) [MehamedNacerGuettache 2002].

a) Laitier vitrifier moulu de haut fourneau :

Le laitier vitrifié moulu est une addition du type II. La norme distingue deux classes de laitier A et B ; la dernière est la plus réactive, sa finesse étant la plus élevée. Tous les laitiers couverts par la norme sont de type II au sens de la norme [NF P 18-506 1992], mais seuls les laitiers de classe B sont substituables au sens et sous les conditions de la norme. Depuis que cette norme est publiée (1992), aucune utilisation industrielle du laitier comme addition au béton n'a été signalée en France .

b) Composition chimique du laitier :

La composition chimique du laitier est un facteur qui détermine son emploi. Elle peut varier dans de larges limites suivant la nature du minerai, la nature et la qualité des fondants, du combustible et du procédé employé. Exception faite pour quelques fabrications spéciales, le laitier de haut-fourneau doit 92% de sa composition chimique aux quatre oxydes CaO - MgO SiO₂ et Al₂O₃. La présente dans le système ternaire CaO-SiO₂- Al₂O₃ la position du laitier par rapport à d'autres matériaux tels que ciment, pouzzolanes et verres industriels [Menadi SOUAD 2011].

c) Hydraulité du Laitier Vitrifié :

Contrairement au ciment portland, qui est stable dans l'eau et s'hydrate par simple addition d'eau, le laitier vitrifié n'est soluble que dans une eau alcalinisée. Il a donc besoin, pour faire prise, d'un agent d'addition appelé activant ou activateur. Lorsque le laitier est simplement mélangé à l'eau, une couche pseudo morphique, peu pénétrable se forme sur la surface du laitier et inhibe de ce fait la pénétration de l'eau au sein du grain et la dissolution des ions.

Il est alors nécessaire d'ajouter un activateur pour permettre l'hydratation du grain de laitier

[MehamedNacerGuettache 2002].

En plus de son pouvoir pouzzolanique, le laitier avec une telle granularité (surface spécifique double du ciment), assurera la densification de la matrice : ces particules peuvent s'insérer entre les grains de ciment.

I.2.3.2 La fumée de silice :

La fumée de silice est un coproduit de la fabrication du silicium et de ses alliages. Les températures de travail très élevées (1500 à 3000 °C) au cours de l'élaboration du Silicium, provoquent d'importants dégagement de fumée qui sont captés en surface afin de protéger l'environnement. Suivant la composition des alliages, les produits secondaires ajoutés aux ingrédients principaux et les méthodes de fabrication les propriétés des fumées de silice sont assez diverses.

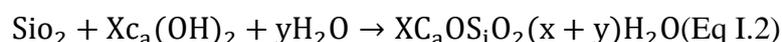
D'un point de vue chimique la fumée de silice est essentiellement composée de silice (plus de 90 %). De point de vue structural, elle est essentiellement composée de silice vitreuse. Et du point de vue morphologique, les particules de fumée de silice se présentent sous forme de sphères ayant des diamètres compris entre 0,1 µm et 1 ou 2 µm. la dimension moyenne de ces sphères est 100 fois plus faible que celle d'une particule de ciment moyen.

La densité de la fumée de silice est d'environ 2,2, une valeur usuelle pour la silice vitreuse. la surface spécifique de la fumée de silice ne peut pas être mesurée de la même façon que celle du ciment portland à cause de son extrême finesse : elle doit être déterminée par adsorption d'azote dans la documentation en trouve les valeurs entre 15000 et 25000 m²/kg, par contre 1500 m²/kg pour un ciment portland.

Ces caractéristiques très particulières (très forte teneur en silice, état amorphe, extrême finesse) ont fait de la fumée de silice une pouzzolane très réactive.

Les effets bénéfiques de la fumée de silice sur la microstructure et les propriétés mécaniques du béton sont dus essentiellement à la rapidité à laquelle la réaction pouzzolanique se développe, mais aussi à un effet physique particulier aux particules de fumée de silice qui est l'effet filler. En outre, la fumée de silice à un effet non négligeable sur la germination des grains de portlandite $Ca(OH)_2$.

Les fumées de silice réagissent pouzzolaniquement avec la chaux libérée par l'hydratation du ciment pour former des silicates de calcium hydratée (C-S-H), selon la réaction pouzzolanes suivantes :



Cet effet réduit la taille des pores, d'où une diminution de la porosité qui améliore les propriétés mécaniques du ciment.

Les fumées de silice grâce à leur morphologie offrent en outre l'avantage du béton frais. Elles n'interfèrent pas sur l'arrangement géométrique des grains de ciment dans la suspension, les grains de silice peuvent venir se placer dans les espaces entre les grains de ciment sans modifier la disposition géométrique.

Mais en pratique, pour que ces deux effets (effet fillers et effet pouzzolanique) puissent se développer, il est nécessaire d'ajouter un fluidifiant au mélange.

L'ajout de fumée de silice entraîne une amélioration des résistances mécaniques en compression. Le dosage optimal en fumée de silice pour l'obtention de hautes résistances se situerait aux alentours de 10% de fumée de silice par rapport au poids de ciment.

Les particules de fumée de silice peuvent avoir un effet fluidifiant sur les bétons ayant un très faible rapport E/C. Cet effet n'est pas bien expliqué par les chercheurs : certains voient que l'action des petites sphères de fumée de silice est comme celle des billes d'un roulement, d'autres pensent que les particules de fumée de silice déplacent une certaine quantité d'eau que l'on retrouverait au sein des grains de ciment flocculé. La combinaison de ces deux modes d'action de la fumée de silice entraîne la formation d'une microstructure très dense et d'une très bonne adhérence entre les granulats et la pâte de ciment hydratée [LAKHAL RIDHA 2011].

I.2.3.3 Cendres volante :

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 compositions de phase, ils peuvent être classés en quelques grandes familles, parmi ces grandes familles on trouve : les cendres silicoalumineuses, les cendres silico-calciques et les cendres sulfocalciques qui ont 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.

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, elles peuvent contenir des sphères creuses, comme elles peuvent contenir seulement des particules angulaires leurs dimensions pouvant descendre jusqu'à 0,15 μm , dans certains cas. L'étendue granulaire des cendres volantes varie de 0,5 μm à 4 μm selon la nature du produit, la masse volumique moyenne est d'environ 1,35 m^2/g .

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 efficacités quand elles sont utilisées comme ajouts dans les BHP [LAKHAL RIDHA 2011].

I.2.3.4 Fillers :

Produits obtenus par broyage fin ou pulvérisation de certaines roches (calcaire, basalte, laitiers, kieselguhr, bentonite, cendres volantes...) naturelles ou non, agissant principalement, grâce à une granulométrie appropriée, par leurs propriétés physiques sur certaines qualités du ciment (accroissement de maniabilité, diminution de perméabilité et de capillarité, réduction de la fissurabilité...) les fillers sont inertes s'ils n'ont aucune action chimique sur les ciments en présence d'eau ; ils sont actifs s'ils ont, même pareillement, des propriétés hydrauliques ou Pouzzolaniques en présence de ciment et d'eau [LAKHAL RIDHA 2011].

I.2.4 L'Eau :

Le mélange sec des granulats et du liant ne peut se transformer en béton que par addition d'eau. La quantité d'eau que l'on ajoute au mélange sec s'appelle l'eau de gâchage.

La quantité d'eau de gâchage introduite dans le béton a une influence prépondérante sur la résistance.

C'est une eau incorporée au mélange liant et granulats afin d'enclencher sa prise et conférer au béton sa plasticité, donc son ouvrabilité. La qualité de l'eau de gâchage doit répondre à la norme.

Toutefois, la qualité de l'eau joue le rôle primordial sur la qualité finale, les impuretés contenues dans l'eau peuvent influencer la prise du ciment ou la résistance du béton, elles peuvent aussi provoquer des taches à la surface du béton ou même favoriser la corrosion des armatures, pour ces raisons, la qualité de l'eau de gâchage ou celle utilisée pour le mûrissement doit être contrôlée, une distinction doit être faite entre la qualité de l'eau de gâchage et les eaux agressives susceptibles d'attaquer le béton, certaines impuretés trouvées dans l'eau qui sont agressives pour le béton durci peuvent le protéger lorsqu'elles se retrouvent dans l'eau de gâchage.

L'eau de gâchage ne devrait pas contenir de quantité excessive de matières organiques ou inorganiques, cependant, il n'existe pas de norme en ce qui concerne les limites autorisées. En effet, à ce jour, puisque les limites supérieures ne sont pas vraiment définies, une restriction sur les qualités de substances admises pourrait avoir des conséquences économiques très coûteuses.

Dans la plus part des projets, la seule spécification, quant à la qualité de l'eau, est qu'elle doit être potable, l'influence de ces matières inorganiques sur le béton est certainement négligeable, généralement, la qualité de l'eau potable est suffisante pour la fabrication du béton, mais il existe quelques exceptions, par exemple dans certaines régions, l'eau potable est salée et peut contenir une quantité excessive de chlorures, de même, certaines eaux minérales peuvent contenir des quantités non négligeables de carbonates ou de

bicarbonates alcalins, ce qui peut favoriser la réaction alcali-silice.

I.2.5 Adjuvants superplastifiants :

L'eau de gâchage remplit deux fonctions principales : une fonction chimique d'hydratation des particules anhydres du ciment et une fonction physique qui consiste à donner au béton les propriétés rhéologiques nécessaires à sa mise en place à l'état frais. L'idéal serait de formuler des bétons avec assez d'eau pour, à la fois, développer la résistance optimale du ciment et conférer au béton frais une maniabilité appropriée. Or, les particules de ciment présentent de nombreuses charges électriques ou superficielles non saturées. Au contact de l'eau, les particules de ciment flocculent [Kreijger 1980 ; Paillière 1982 ; Legrand 1982]. En flocculant, elles retiennent une certaine quantité d'eau qui n'est plus disponible pour assurer l'ouvrabilité désirée du béton. En l'absence d'adjuvants réducteurs d'eau, il est donc nécessaire d'utiliser davantage d'eau que nécessaire pour hydrater le ciment et obtenir une bonne maniabilité. Cependant, ce surplus d'eau crée de la porosité à l'intérieur de la pâte de ciment qui affecte les propriétés mécaniques et de durabilité du matériau béton.

L'utilisation d'adjuvants chimiques capables de diminuer la tendance de flocculation des particules de ciment est la solution pour parvenir à réduire le rapport E/L tout en gardant une maniabilité convenable du béton à l'état frais. Il s'agit d'adjuvants réducteurs d'eau ou superplastifiants hauts réducteurs d'eau.

De par leur fort pouvoir dispersant [Hewelt et Rixom 1977, Hattori 1979, Meyer 1979], les superplastifiants rendent possible la confection de bétons fluides avec des rapports E/L inférieur à 0,30. La taille et le volume des pores sont ainsi réduits, rendant les pâtes de ciments plus denses, ce qui améliore considérablement la résistance à la compression et la durabilité du béton.

En revanche, une attention particulière doit être apportée à la compatibilité ciment-superplastifiant, car les différents ciments Portland ne se comportent pas de la même façon avec tous les supers plastifiants.

I.3 Influence du rapport E/L :

Le rapport « eau/liant équivalent » « E/L », défini comme étant le rapport entre la masse de la teneur en eau efficace E et la teneur en liant équivalent L dans le béton frais, est un facteur fondamental dans la fabrication de BHP. Le terme « liant équivalent » utilisé dans les formulations BHP désigne la somme de la quantité de ciment et de la quantité d'additions minérales pondérée d'un coefficient de prise en compte de l'addition considérée k traduisant son degré d'activité comparativement à celle du ciment.

$$L_{eq} = C + kA \quad (\text{Eq I.2})$$

Avec :

C : la quantité de ciment par mètre cube de béton (en kg/m^3) ;

A : la quantité d'addition par mètre cube de béton (en kg/m^3) ;

K : est le coefficient de prise en compte de l'addition considérée (à titre d'exemple, $k = 2$ dans le cas où l'addition incorporée est la fumée de silice).

Pour atteindre les performances requises pour pouvoir qualifier un béton de HP, le rapport E/L doit être réduit en utilisant, d'une part, davantage de ciment tout en réduisant la quantité d'eau de gâchage (grâce à l'utilisation de superplastifiants), et d'autre part, en remplaçant chaque fois que cela est possible, une partie du ciment par un volume égal d'additions minérales. Un faible E/L permet non seulement la réduction de la porosité de la pâte de ciment hydraté, mais aussi la fabrication de produits d'hydratations de haute densité, qui sont la clef de la fabrication de bétons plus résistants et durables. Le tableau (I-1) donne la variation de résistance du béton à la compression en fonction du rapport E/L.

Tableau I.1 : Résistance à la compression de BHP en fonction du rapport Eau/liant

E/L	Variation de la résistance à la compression maximale (en MPa)
0.4 – 0.35	50 à 75
0.35 – 0.3	75 à 100
0.3 – 0.25	100 à 125
0.25 – 0.2	Plus de 125

I.4 Microstructure des BHP :

Le BHP, comme tous les bétons, est avant tout un matériau hétérogène, constitué de deux phases principales : une phase liante que constitue la pâte de ciment durcie (matrice cimentaire) et une phase granulaire (granulats). La pâte de ciment durcie assure la fonction de « colle » responsable de l'adhérence des phases granulaires, conférant la rigidité au matériau (Phase liante). Cette pâte est polyphasique : phase solide, phase liquide et phase gazeuse. La phase solide est constituée des hydrates de ciment (grains hydratés) et d'anhydres (grains nonhydratés). Elle contient principalement des silicates de calcium hydratés C-S-H, issus des réactions d'hydratation entre les constituants du ciment Portland et l'eau. La phase liquide correspond à l'eau interstitielle et la phase gazeuse aux vides remplis d'air et/ou de vapeur d'eau.

Dans cette partie, nous allons passer en revue les principales caractéristiques de la phase liante des matériaux cimentaires dont la connaissance est nécessaire à la compréhension, les constituants du ciment Portland, les produits de leur hydratation, leur microstructure, leurs principales caractéristiques chimiques et physiques.

I.4.1 Composition et hydratation d'un ciment Portland :

Le ciment Portland est un mélange de clinker 95% et de sulfate de calcium 5%. Le clinker est obtenu par cuisson à 1420°C d'un mélange finement broyé et homogénéisé de calcaire (80%) et d'argile (20%). Le clinker est composé de 4 constituants principaux :

- a) **Silicate tricalcique Ca_3SiO_5 ou alite (C_3S dans la notation des cimentiers) :** le C_3S est le constituant majeur du clinker, sa proportion massique est de l'ordre de 60-65%. En substance, l'hydratation du C_3S au contact avec l'eau passe par 4 périodes :
- **Période initiale :** durant cette période de courte durée, les grains C_3S réagissent immédiatement pour former des silicates de calcium hydratés C-S-H.
 - **Période dormante :** la solution s'enrichit en ions calcium et hydroxyde non consommés par la réaction précédente et devient sursaturée par rapport à l'hydroxyde de calcium qui précipite sous forme de portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$.
 - **Période de prise :** lors de cette période, les réactions d'hydratation s'accroissent. La précipitation de la portlandite produit un effet de « pompe à calcium » qui augmente la cinétique de la réaction de formation des C-S-H.
 - **Période de durcissement :** elle est caractérisée par un ralentissement des réactions dû à la couche d'hydrates importante qui enrobe les grains de C_3S diminuant par-là la diffusion de l'eau et la vitesse d'hydratation du cœur des grains.
- b) **Silicate bicalcique Ca_2SiO_4 ou bélite (C_2S dans la notation des cimentiers) :** la proportion massique du C_2S contenu dans le clinker est environ de 10 à 20%. L'hydratation du C_2S est semblable à celle du C_3S mais se distingue par une cinétique plus lente et aussi une teneur en portlandite plus faible. La réaction d'hydratation du C_2S est moins exothermique que celle du C_3S .
- c) **Aluminate tricalcique $\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$ ou célite (C_3A dans la notation des cimentiers) :** sa proportion dans le clinker varie d'un minerai à l'autre entre 8 à 12%. L'hydratation des aluminates de calcium au contact de l'eau se produit de façon similaire à celle des silicates de calcium, selon les mêmes processus de dissolution et d'hydrolyse, mais avec un dégagement de chaleur plus important. En l'absence de sulfate de calcium (gypse), une rigidification se produit par formation du C_3AH_6 . C'est afin d'éviter une prise rapide de la

pâte que l'on ajoute du sulfate de calcium au clinker sous forme de gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) de plâtre ou hémihydrate ($\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$) ou d'anhydrite (CaSO_4).

- d) **Alumino-ferrite tétracalcique** $\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_7 \cdot 10\text{Fe}_2\text{O}_3$ (**C₄AF** la notation des cimentiers) : avec une proportion de 8 à 10%, ils s'hydratent de façon analogue à celle du C₃A avec une vitesse ralentie, un faible dégagement de chaleur et des hydrates formés contenant de l'oxyde de fer Fe_2O_3 .
- e)

I.4.2 Principaux hydrates de la pâte de ciment durcie :

Nous présentons les principaux hydrates issus de l'hydratation du clinker portland qui composent à 90% la pâte de ciment durcie.

I.4.2.1 Silicate de calcium hydraté C-S-H :

Ils constituent 70% en masse de la phase liante de la pâte de ciment durcie. Ces composés amorphes nanocristallins confèrent à la pâte de ciment durcie ses principales propriétés, notamment les caractéristiques mécaniques. Leur structure est lamellaire en feuillet.

I.4.2.2 Portlandite :

La portlandite est la dénomination minéralogique de l'hydroxyde de calcium cristallisé $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Sa proportion massique est d'environ 20%. Elle représente la phase la plus soluble de la pâte de ciment hydratée. La portlandite cristallise sous forme de cristaux hexagonaux.

I.4.3 Particularité de l'hydratation des BHP :

Étant donné que les BHP sont formulés à partir des mêmes ciments que les bétons usuels (bétons ordinaires BO), les réactions chimiques, processus d'hydratation et hydrates formés, sont par conséquent analogues. La différence réside dans le volume ainsi que dans la compacité des hydrates produits : produits internes de haute densité (High Density HD) ou externes de faible densité (Low Density LD). La nature de ces derniers est étroitement liée au rapport E/L [Tennis et Jennings 2000]. En effet, en réduisant le rapport E/L (cas des BHP) de la pâte de ciment, les particules de ciment se rapprochent les unes des autres laissant ainsi moins d'espace pour les produits externes [Mehta et Monteiro 1993]. En conséquence, la principale caractéristique des gels de C-S-H issus d'un faible ratio E/L réside dans leur compacité et une plus grande proportion de gels HD que dans le cas de gels issus d'un ratio E/L grand.

I.4.4 Porosité de la pâte de ciment :

La porosité d'un béton, caractérisée par sa taille et son interconnexion, est un paramètre important dont la durabilité en termes d'attaques d'agents agressifs mais aussi les déformations différées (retrait et fluage) sont tributaires. La structure poreuse régit la difficulté de mouvement de l'eau. Dans une pâte de ciment, on constate deux types de porosité :

- Une porosité capillaire constituée de pores de gros diamètres supérieurs à 100 nm issus de vides vestiges de l'eau capillaire qui ne participe pas à l'hydratation ;
- Une porosité des hydrates (pores de très faibles diamètres, de l'ordre du nanomètre).

En présence de cendres volantes ou de laitier, la plus grande taille des pores est augmentée aux très jeunes âges, mais à plus long terme, leur effet se traduit par une diminution de la taille des plus gros pores. En effet, les réactions pouzzolaniques entraînent la formation de C-S-H secondaires qui réduisent la porosité, ce qui est favorable vis-à-vis de la durabilité [Feldman 1983]. Pour ce qui est de la fumée de silice, son effet sur la porosité des bétons est bénéfique notamment sur l'auréole de transition à l'interface pâte-granulat [Persson 1998].

I.4.5 Influence de l'auréole de transition :

Au voisinage des granulats (sable et gravillons), il existe une variation locale de la teneur en eau. Dans cette zone-là, l'arrangement des grains de ciment est perturbé par les surfaces des granulats et la pâte se trouve confinée dans des espaces réduits. Cette zone, d'une épaisseur de l'ordre de quelques dizaines de micromètres pour les BHP contre environ 50 μm à 100 μm dans les BO avec $E/L = 0,5$ à $0,7$ est dénommée, auréole de transition ou ITZ (Interfacial Transition Zone) [Maso 1980 ; Ollivier 1995]. Elle se distingue du reste de la pâte par une porosité plus grossière et de larges cristaux.

Il résulte de cet accroissement local de porosité une moindre résistance lorsque le béton est soumis à des sollicitations mécaniques. Les fissures s'amorcent ainsi de façon préférentielle au niveau de l'interface. Pour pallier à cette fragilité observée dans les BO et pouvoir atteindre des hautes performances, un renforcement de cette zone doit être apporté [Aïtcin 1989 ; Baalbaki et al. 1991, 1992 ; Ezeldin et Aïtcin 1991]. L'incorporation de fumée de silice et la réduction du rapport E/L réduisent sa porosité mais aussi son épaisseur, et finalement sa fragilité. Aïtcin (2003) considère même cette zone comme inexistante dans certains BHP. Ce phénomène s'explique par la densification de la structure du matériau apportée par l'ajout de la fumée de silice. En outre, la nature pétrographique ainsi que la forme des granulats sont deux facteurs déterminants sur la qualité de l'interface pâte-granulats. En effet, les granulats calcaires réactifs en contact avec la pâte de ciment, contrairement à ceux neutres de type quartz, forment les plus fortes liaisons avec la pâte

de ciment, rendant ainsi le matériau plus résistant, est de meilleure qualité lorsqu'ils sont concassés ou semi-concassés [Malier 1992].

I.5 Les voies d'obtention des hautes performances :

Les progrès dans la compréhension scientifique des mécanismes de prise et de durcissement, les recherches sur l'optimisation des empilements granulaires et les mécanismes de défloculation ont permis de bouleverser les connaissances sur la rhéologie des bétons frais et la durabilité des bétons durcis. Elles ont montré les effets néfastes pour la résistance et la durabilité, des excès d'eau non hydratée mais nécessaire à la maniabilité lors de la mise en œuvre.

Dans la perspective d'améliorer les propriétés constructives du béton, il était donc nécessaire d'explorer les voies visant à réduire ce dosage en eau. Deux voies sont généralement associées pour optimiser la formulation d'un BHP :

I.5.1 Défloculation des grains de ciments et réduction de la teneur en eau :

Cette défloculation est obtenue par l'emploi de produits organiques (formaldéhyde et mélamine sulfonate, formaldéhyde et naphthalène sulfonate), ces superplastifiants s'opposent à la floculation des grains de ciment en suspension dans l'eau, ce qui augmente leur réactivité, facteur de résistance à court terme.

Ils permettent une réduction sensible de l'eau de gâchage (une partie de l'eau n'est plus piégée dans les floes de ciment) tout en garantissant une ouvrabilité satisfaisante, une amélioration de la fluidité et une diminution très importante de la porosité du béton à l'état durci.

I.5.2 Optimisation du squelette et de l'empilement granulaire :

Les performances des BHP peuvent encore être augmentées par l'optimisation du mélange granulaire grâce à l'ajout de particules ultrafines (fumées de silice, laitier, filler calcaires, etc.). Elles ont une action sur la granulométrie du mélange, en comblant les micros vides intergranulaires et en densifiant l'interface pâte de ciment-granulat. Elles augmentent la compacité du mélange et améliorent sa rhéologie à l'état frais. Cette optimisation du squelette granulaire permet aussi de réduire la teneur en eau.

Tableau I.2 : Les deux voies d'obtention des BHP

Les deux voies d'obtention	
Réduire la floculation des grains de ciment	Etendre le spectre du mélange granulaire
<p>Super plastifiants :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Formaldéhyde et mélamine sulfonâtes - Formaldéhyde et naphthalène sulfonâtes. 	<p>Ajouts cimentaires :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Fumées de silice ; - Filler calcaires ; - Laitier. - Etc.

Notons que la première voie peut être utilisée seule et conduit déjà à des gains de propriétés constructives, d'ouvrabilité et durabilité intéressantes. La seconde voie, évidemment, implique le recours simultané à la première, tant il est sur inutile de compléter le spectre du mélange granulaire en direction des éléments très fins si l'on n'a pas, avant tout, réduit la floculation.

L'application de ces principes permet, d'obtenir des bétons à hautes performances qualifiés, en termes de résistance caractéristique à la compression, par des valeurs comprises entre 60 et 80 MPa.

I.6 Propriétés physico-chimiques et mécaniques des BHP :

Les diverses propriétés des BHP découlent de leur faible porosité. Le béton frais présente une bonne ouvrabilité liée aux superplastifiants entrant dans sa composition.

Les BHP sont des bétons fluides avec un E/C très bas (0,30 à 0,4). Les valeurs d'affaissement au cône sont supérieures à 15 cm dans la plupart des cas.

Pour le béton durci, la propriété fondamentale est sa faible porosité. Un béton courant présente une porosité de 10 à 12 %, pour un béton HP, elle est inférieure à 5 %.

La durabilité est améliorée du fait de l'abaissement de la porosité et de la perméabilité. Les bétons HP présentent généralement une résistance au gel améliorée. L'ensemble des résistances mécaniques (compression, traction) est augmenté, alors que les déformations sous charges instantanées et surtout sous charges permanentes sont diminuées.

I.6.1 La résistance à la compression / et à la traction :

Les bétons normaux ont généralement un rapport eau / ciment compris entre 0.5 et 0.6 tandis que les bétons à hautes performances ont un rapport eau / ciment de l'ordre de 0.3, lorsque ce rapport diminue, la résistance à la compression du béton augmente, cette résistance est une caractéristique souvent utilisée pour classer les bétons HP.

Tableau I.3 : Résistance caractéristique à la compression des différents bétons

Classe	Résistance caractéristique à la compression (f_c) à 28 jours MPa
Bétons ordinaires.....	20 à 50
Bétons à hautes performances –BHP...	60 à 100
Bétons à très hautes performances BTHP	100 à 150
Bétons exceptionnels.....	> à 150

Les gains de résistance se manifestent dès le jeune âge, un béton à 60 MPa à 28 jours peut dépasser 15 MPa à 24 heures et 40 MPa à 7 jours. Le gain est aussi important en termes de résistance en traction ou au cisaillement. (La résistance à la traction du béton est généralement liée à la résistance à la compression).

Les BHP offrent des performances mécaniques élevées à long terme, ces performances, qui découlent en particulier de sa faible porosité, se traduisent par :

- Une meilleure adhérence acier/béton ;
- Un fluage inférieur à celui des bétons ordinaires ;
- Une augmentation du module d'élasticité ;
- Une diminution des sections de béton ;
- Une résistance importante aux agents agressifs ;
- Un faible risque de corrosion des armatures ;
- Une forte résistance aux cycles de gel/dégel.

I.6.2 Module d'élasticité :

Le module d'élasticité du béton est essentiellement déterminé par les propriétés des granulats et de la matrice de mortier. Au fur et à mesure que la matrice se consolide et se rigidifie, le béton présentera également une rigidité accrue. Le module d'élasticité du béton à hautes performances est dès lors toujours lié à la résistance à la compression (tableau I.4) et de même que pour les bétons usuels, le module de déformation, instantané au jour j , peut être déduit de la résistance caractéristique selon la formule retenue par les règles BAEL :

$$E_{ij} = 11000f_{cj}^{1/3} \text{ (Eq I.3)}$$

Le module de déformation des BHP est supérieur à celui des bétons traditionnels.

Tableau I.4 : Caractéristique de résistance et de déformation suivant la norme EN1992

f_{cj} Résistance caractéristique en compression du cylindre [MPa]	Classe de résistance								BHP			
	20	25	30	40	45	50	55	60	70	80	90	
E_c Module d'élasticité	30	31	33	35	36	37	38	39	41	42	44	

I.6.3 Retrait :

Au cours du temps, même en l'absence de charges, une pièce en béton subit à un raccourcissement qu'on appelle le retrait. Cette contraction volumique additionne un retrait de séchage dû à une évaporation de l'eau libre contenue dans le béton et un retrait endogène. La valeur de retrait de séchage est fonction croissante des paramètres suivants :

- Teneur en eau du béton ;
- Dosage en ciment, et en général, teneur en éléments fins, qui toutes choses égales par ailleurs, sont liés à la quantité d'eau de gâchage nécessaire à une bonne mise en œuvre ;
- Sécheresse de l'atmosphère (une atmosphère sèche provoque une évaporation rapide et une partie d'eau n'a pas le temps de se combiner avec le ciment). On limite la dessiccation des bétons en procédant à la « crue » (arrosage des bétons pendant leur durcissement) ;
- Minceur des pièces (plus une pièce est mince, plus l'évaporation de l'eau est rapide).

Le retrait endogène apparaît surtout avec les bétons présentant un rapport eau/ciment (ou E/C) faible et une teneur élevée en fines (ciment et/ou additions de fines minérales). Dans ces conditions, le ciment prélève de telles quantités d'eau lors de l'hydratation du béton jeune que des pores remplis d'air se forment rapidement. Ce phénomène d'autodessiccation (dessiccation interne) entraîne des pressions capillaires qui conduisent à un retrait rapide dans toute la masse du béton.

Le retrait endogène diffère du retrait de séchage du point de vue du mécanisme de diminution de l'humidité du béton. La différence essentielle réside dans le fait que la perte d'eau est due à l'évaporation dans le cas du retrait de séchage et à la réaction d'hydratation dans le cas du retrait endogène. Etant donné que le retrait endogène est provoqué par une dessiccation interne, il augmente lorsque le rapport eau/ciment (E/C) diminue, l'eau étant alors rapidement consommée par la réaction d'hydratation. [CSTC,2004].

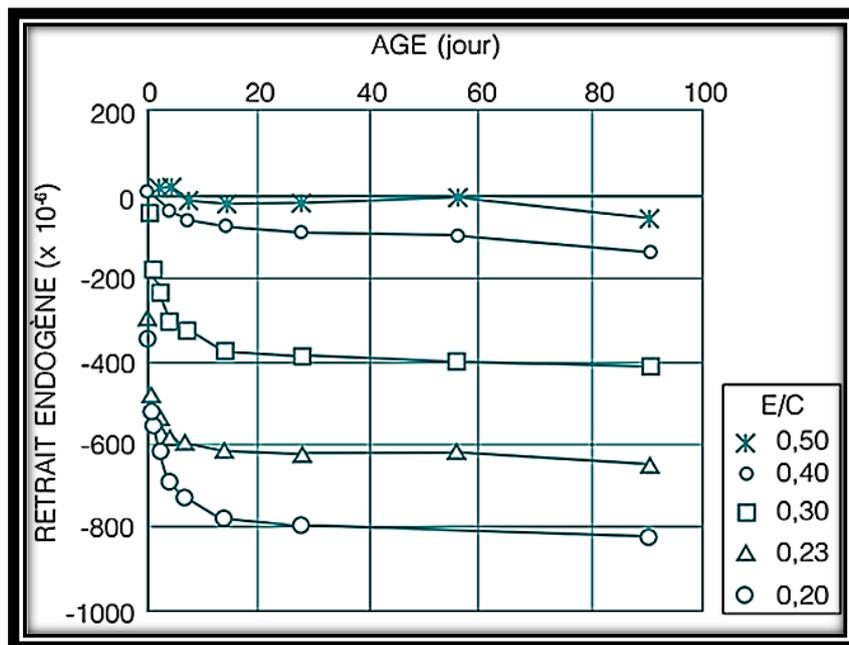


Figure I.1: Evolution du retrait endogène en fonction du rapport E/C
(1000×10^{-6} équivaut à 1 mm/m)

Etant donné que les bétons HP sont caractérisés par un faible rapport E/C et une teneur élevée en fines, les effets mécaniques du retrait endogène apparaissent comme prépondérants vis-à-vis des effets du retrait de séchage (tableau I.6). En l'absence de cure adéquate, le retrait endogène d'un béton ordinaire reste très faible (0,05 à 0,1 mm/m) alors que celui des BHP peut varier de 0,5 à 1 mm/m selon la teneur en ciment et le rapport E/C (figure I.12).

Tableau 1.5 : Comparaison entre le retrait des bétons ordinaires et celui des BHP

Types de bétons	Rapport E/C	Retrait de séchage	Retrait endogène
Bétons ordinaires	≈ 0.5	Elevé	Peu ou pas de tout
BHP	< 0.4	Faible	Elevé

I.6.4 Fluage :

Le fluage du béton à hautes performances c'est-à-dire la déformation croissante sous l'effet d'une contrainte constante est plus faible qu'un fluage observé pour un béton traditionnel. L'âge du béton au moment de la sollicitation est également extrêmement important pour le BHP. Lorsque la charge est exercée sur un béton jeune, la déformation par fluage sera plus importante que dans le cas d'un béton plus âgé. Il en va de même en ce qui concerne le béton conventionnel. Le fluage est d'autant plus faible que la résistance en compression est plus élevée.

Il convient de conserver à l'esprit que les contraintes observées dans le BHP sont nettement

supérieures à celles inhérentes au béton conventionnel. Les déformations immédiates peuvent dès lors devenir aussi importantes en fonction, bien évidemment, de la résistance à la flexion, dans le cas d'une poutre par exemple. Il va sans dire que ce phénomène est encore renforcé à long terme par les effets de l'utilisation d'un coefficient de retrait. En cas de constructions en BHP, la limitation des déformations et des flèches peut devenir le facteur déterminant du projet, plutôt que la portance proprement dite. Ce faisant, le matériau ne peut pas toujours être utilisé de manière optimale. Le coefficient de fluage de l'ordre de 2 pour les bétons usuels, est compris entre 1 et 1,5 pour un béton à 60 MPa.

I.6.5 Durabilité :

Étant donné la structure plus dense des pores du béton de hautes performances, ce matériau affiche un meilleur comportement face aux mécanismes d'agression. La plupart des processus de dégradation sont en effet causés par l'entrée de substances agressives, telles que des chlorures, du dioxyde de carbone, des acides, ... Si la pénétration de ces substances dans le béton est entravée, comme dans le cas du BHP, les processus de dégradation y afférant ne pourront bien évidemment se produire que bien plus tard.

Quoi qu'il en soit, il convient toujours de veiller à la pureté des éléments constitutifs du béton, afin d'éviter toute agression par des mécanismes internes (présence de sulfates, d'alcalis, de granulats réactifs, ...). Toutefois, la durée d'utilisation d'une construction est en grande partie également déterminée par les conditions d'exécution. [G.DeSchutter,2007].

I.6.6 Résistance au feu :

Même si la durabilité du BHP est en règle générale nettement supérieure à celle du béton conventionnel, la résistance au feu est cependant un élément sur lequel il convient d'attirer l'attention. En raison de la structure très dense des pores, la pression de vapeur, qui apparaît à l'intérieur du béton à des températures excédant 100 °C, peut difficilement être réduite. La vapeur ne peut en effet pas être rapidement évacuée à l'extérieur, en raison de la structure très dense du matériau. Par rapport au béton conventionnel, la résistance du béton à haute résistance diminuera dès lors plus rapidement si la température est supérieure à 100 °C [G.DeSchutter,2007].

I.6.7 Résistance aux agents agressifs :

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

I.6.8 Tenue aux attaques gel / dégel :

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

La faible perméabilité des BHP et le faible rapport E/C favorisent une résistance plus importante aux risques d'écaillage en présence de sels de déverglaçage.

Il est possible de formuler des BHP qui résistent bien aux cycles gel/dégel et à l'écaillage sans ajouts d'entraîneur d'air. Lorsque le béton doit résister à un gel sévère (forte saturation d'eau), l'utilisation d'un entraîneur d'air est généralement nécessaire si le E/C est supérieur à 0,32.

I.6.9 Carbonatation :

De nombreuses études [LES EXPERTS CIMBETON, 2009] ont démontré que la durabilité des BHP vis-à-vis de la carbonatation est très nettement supérieure à celle d'un béton traditionnel. En effet, le réseau poreux, peu connecté limite la diffusion du gaz carbonique au sein de la matrice cimentaire. La faible porosité initiale favorise le colmatage des pores lié à la formation des cristaux de calcite. La progression de la carbonatation en profondeur est réduite, ce qui assure une meilleure protection des armatures.

I.6.10 Adhérence acier-béton :

La grande résistance mécanique du BHP et sa microstructure interne permettent de mobiliser une liaison supérieure entre les armatures en acier et le BHP et donc d'améliorer les qualités d'adhérence, ce qui permet une réduction des longueurs d'ancrage et de scellement. [LES EXPERTS CIMBETON, 2009]

I.6.11 Réduction des flèches et des déformations des structures :

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

I.6.12 Propriétés thermiques :

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

I.7 Principaux domaines d'applications :

Sur le plan environnemental, les BHP s'insèrent complètement dans la démarche visant à utiliser encore mieux les ressources en énergie et en matières premières.

Sur le plan architectural également, le BHP est assorti d'un certain nombre de nouvelles possibilités. C'est ainsi que le BHP permet la réalisation de constructions plus élancées. Cet atout est d'ores et déjà matérialisé dans la réalisation d'ouvrages d'art (ponts), même si ce béton pourrait tout aussi bien être utilisé pour la construction de bâtiments. A l'heure actuelle, les avantages du BHP se concrétisent principalement dans l'obtention d'un espace intérieur le plus utile possible. Nous pourrions cependant aussi songer à un nouvel aspect de l'enveloppe de la construction, avec un regain d'attention porté aux éléments architecturaux tels que les arêtes, les arcs, les voûtes, ...

La façade d'un bâtiment pourrait en outre être redéfinie par l'utilisation potentielle de modules de dimensions supérieures. Alors que ces dimensions sont à l'heure actuelle généralement de 6 mètres, elles pourraient être portées à 7 ou à 8 mètres, grâce au BHP. Cette augmentation pourrait faciliter l'avènement d'une autre conception de façade et donc d'un aménagement intérieur modifié, davantage en phase avec les normes internationales actuelles.

Un autre avantage du BHP par rapport au béton conventionnel est l'aspect visuel des surfaces de béton, tant coulées sur place que pré-fabriquées. L'apparition de petites bulles d'air à la surface est souvent très limitée. La surface présente généralement une bonne texture, notamment grâce à la haute teneur en fines du béton.

I.7.1 Structures coulées en place :

La formulation et la fabrication de bétons dont la résistance caractéristique à 28 jours atteint 60 MPa est aujourd'hui de pratique courante et n'est plus du domaine expérimental. De nombreux ouvrages ont été exécutés en BHP ces dernières années.

Les centrales à béton sont équipées de automatismes, des process de fabrication, des procédés de dosages et des procédures de contrôle rigoureuses assurant la reproductibilité des caractéristiques et la maîtrise de la fabrication des BHP.

Le malaxage doit généralement être prolongé par rapport à celui d'un béton courant. Le BHP requiert un niveau de qualité de fabrication important compte tenu de la sensibilité de son comportement aux variations de proportion des constituants, en particulier du dosage en eau.

I.7.2 Produits préfabriqués en béton :

Le BHP est utilisé dans l'industrie du béton depuis de nombreuses années pour la réalisation de multiples éléments préfabriqués en usine. L'industrie des produits préfabriqués en béton a su, depuis son origine, produire des bétons à hautes performances grâce à ses techniques spécifiques et ses conditions industrielles de production. Elle dispose de moyens et de techniques bien adaptés pour produire des éléments avec des performances mécaniques et une durabilité encore améliorée en particulier grâce à l'association d'outils et de méthodes de production performants avec les

progrès réalisés ces dernières années dans l'optimisation des matériaux tels que les BHP.

Le développement des BHP présente un grand intérêt pour l'industrie du béton. Ces matériaux permettent de proposer des produits nouveaux encore plus performants (allègements et réductions de sections) et d'envisager l'accès à de nouveaux marchés grâce à l'amélioration des performances.

Parmi les plus usuels, on peut citer les poutres et les poutrelles précontraintes pour plancher qui grâce au BHP ont leur section diminuée de 30 %, ainsi que les dalles alvéolées, qui pour une épaisseur n'excédant pas 25 cm permettent des portées de l'ordre de 15 m, ainsi que les tuyaux d'assainissement.

Les BHP permettent de précontraindre les produits à des contraintes plus élevées et donc d'optimiser les sections. Ils permettent aussi, pour la plupart des produits, de diminuer la durée des cycles de fabrication en autorisant des décoffrages rapides et des mises en précontrainte accélérée et de concevoir des éléments plus légers donc plus faciles à mettre en œuvre ou à poids équivalent de portées plus importantes. La diminution des déformations différées (retrait et fluage) est aussi un avantage déterminant en préfabrication. Ils autorisent la réalisation de produits élancés offrant aux architectes de nouvelles possibilités de création. Les usines de produits préfabriqués en béton utilisent régulièrement pour la fabrication de nombreux produits, des BHP dont la résistance à la compression dépasse 60 MPa et pouvant atteindre jusqu'à 100 MPa.

La réduction des sections, consécutive aux meilleures caractéristiques mécaniques du matériau, permet de diminuer le poids des éléments et par suite les coûts de manutention, de transport et de mise en place.

I.8 Réalité des bétons HP :

Les grandes résistances à court terme permettent un décoffrage rapide ainsi que des mises en précontraintes rapides. Ainsi les BHP sont utilisés pour des ouvrages : précontraints, préfabriqués, coulés en place...

Ces propriétés élevées au jeune âge conduisent à préconiser l'utilisation de ce BHP pour les ouvrages soumis à de fortes sollicitations mécaniques (bâtiments de grande hauteur, ponts, réservoirs, centrales nucléaires, etc). La résistance en milieu agressif conduit à les préconiser pour les travaux en milieu marin ou agressif. Enfin lorsque le béton doit être pompé sur une grande hauteur, le BHP est recommandé du fait de sa grande manœuvrabilité.

I.8.1 Les ouvrages d'art :

- **Pont de l'Iroise (en France)**, comporte une travée centrale de 400m pour une longueur totale de 800m, c'est record mondial pour un pont haubané à nappe centrale. Les 104 haubans répartis en quatre nappes mesurent de 37 à 240m et sont ancrés à deux pylônes de

115m de hauteur réalisée en B60

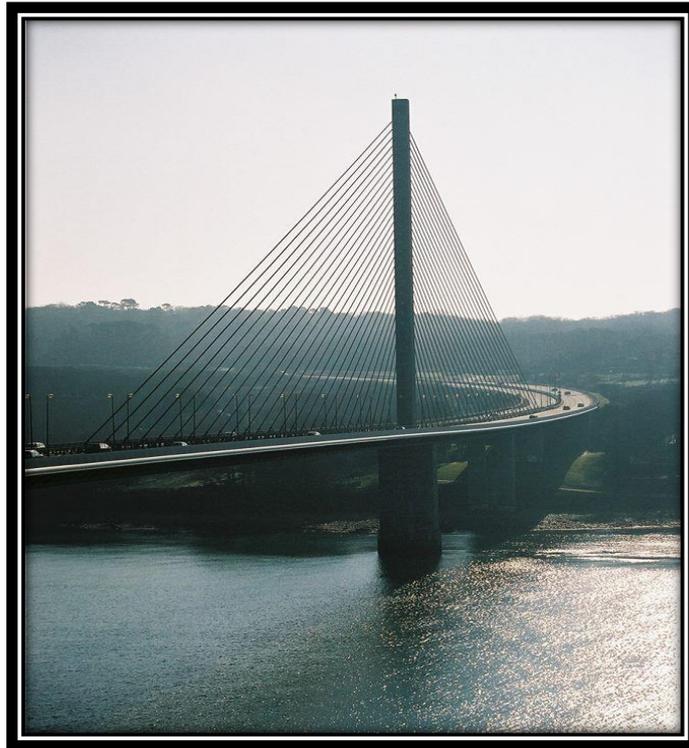


Figure I.2 : Pont de l'Iroise

- **Pont Rion-Antirion (Grèce)**, d'une longueur totale de 2 883 m.

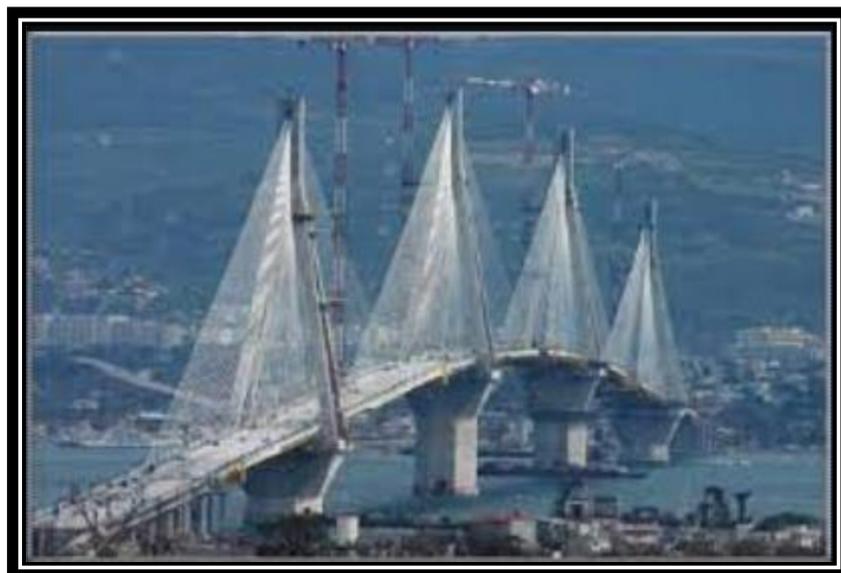


Figure I.3 : Pont Rion-Antirion

- **Le pont de l'île Rousski (en russe)**, L'ouvrage est d'une longueur de 1 872 m. Le pont autoroutier, à 2×2 voies, est constitué de pylônes d'une hauteur de 320 m sur lesquels sont

reliés 168 haubans et de 103 caissons d'acier orthotropes qui constituent le tablier.

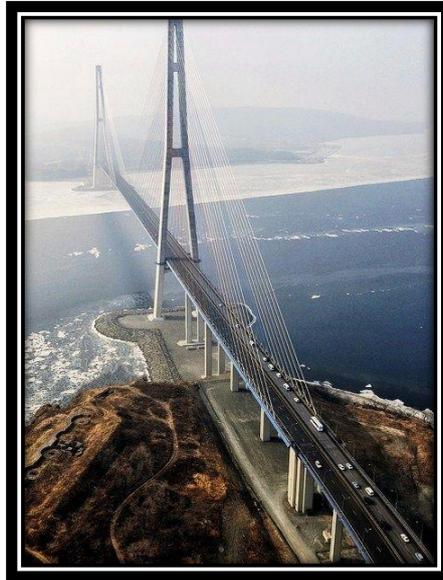


Figure I.4: Pont de l'île Rousski

- **Le pont de Normandie (en France)**, est un ouvrage d'art exceptionnel, avec sa travée centrale de 856 m et ses pylônes de 214 m de hauteur. Les voussoirs des rampes d'accès ont été fabriqués avec du BHP de résistance 60 MPa.



Figure I.5 : Pont de Normandie

I.8.2 Le bâtiment :

- **La Grande Arche (France)**, est un monument situé à l'ouest de Paris. Le béton utilisé pour couler la partie supérieure de la Grande Arche présente des résistances supérieures à 65

MPa, et un slump de 22 à 25 cm. il a apporté à la fois la résistance exceptionnelle souhaitée et l'ouvrabilité rendue indispensable par un pompage sur une hauteur de plus de 100 m.



Figure I.6 : Arche de la Défense (France)

- **Tour Khalifa (à Dubaï)**, pèse plus de 500 000 tonnes, une structure en béton à haute performance de 830 m de hauteur, plus de 330 000 m³ de BHP a été nécessaire à sa construction. Des ingénieurs ont mis au point un béton qui mélange vingt-cinq ingrédients.



Figure I.7 : Burj Khalifa

- **Aéroport international de Rabat-Salé, (Maroc)**



Figure I.8 : la façade de l'aéroport

- **Les NorthGalaxy Towers (Belgique),** deux gratte-ciels de Bruxelles.

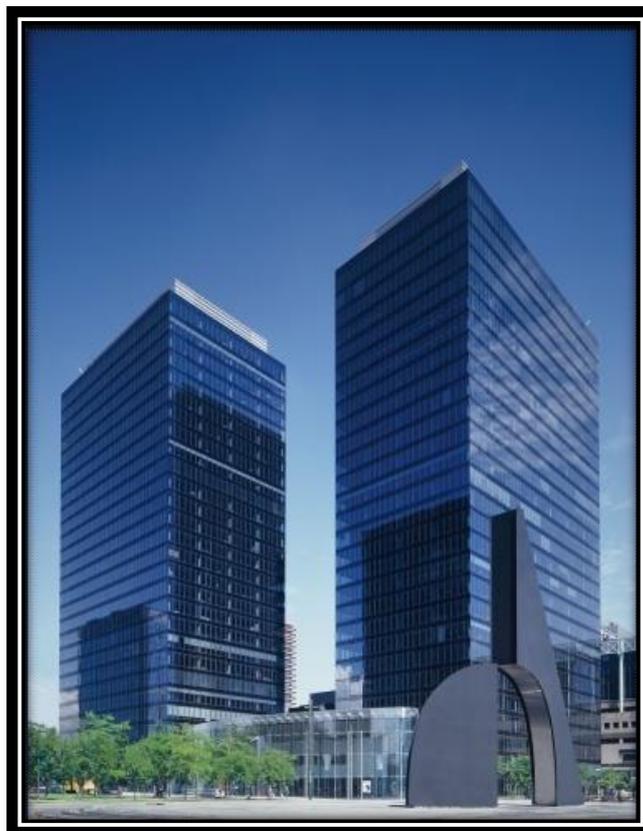


Figure I.9: North Galaxy Towers (Belgique)

I.8.3 Les BHP en Algérie :

Le Béton à Hautes Performances (BHP) est de plus en plus utilisé dans les pays industrialisés mais n'est pas très connu dans notre pays.

L'Algérie connaît depuis une décennie un développement intense et soutenu des secteurs du bâtiment et de la construction. Que ce soient pour les grands projets de l'Etat (1 million de logements sociaux, équipements socio-éducatifs, administratifs, ...) ou les grands projets immobiliers (résidentiels, tertiaires) et touristiques initiés par les promoteurs privés et publics.

Les exigences et normes internationales en matière de la performance des matériaux de construction n'est pas encore suffisamment intégrées aux processus de conception et de construction, malgré les dégâts subis lors du séisme de Boumerdes en 2003. Les constructeurs utilisent toujours des bétons traditionnels avec des résistances d'environ 30 MPa, et qui ne dépassent les 40 MPa dans les meilleures conditions. Ceci conduit à de grandes pressions sur les ressources (aciers d'armature, ciment, gravier ...) et des impacts importants sur la durabilité des constructions. Afin de répondre aux exigences d'une construction moderne et durable, l'Algérie doit obligatoirement utiliser les technologies innovantes dans le domaine d'élaboration des matériaux et bétons de construction. Parmi les bétons innovants on trouve les BHP, dont l'utilisation a une double finalité : améliorer la résistance mécanique et la durabilité d'une part et économiser la consommation des matériaux (gravier) de construction en réduisant les sections des éléments constructifs et en limitant les taux de ferrailage. Malgré que ces nouveaux bétons soient largement utilisés à travers le monde depuis plus de deux décennies. Leurs utilisations en Algérie, restent très limitées ou inexistantes.

I.9 Conclusion :

Les bétons à hautes performances sont des bétons qui développent dès le jeune âge des résistances élevées et permettent de réaliser des structures soumises à des contraintes élevées tels que les ouvrages d'art. La gamme de résistance de ces bétons se situe à 28 jours entre 50 et 90 MPa. L'emploi de bétons à hautes performances dans les structures d'ouvrages d'art reste pourtant indissociable du renforcement par des armatures d'aciers.

Alliés à la précontrainte, ces bétons permettent de concevoir et de réaliser des pièces d'ouvrage d'art très élancées, fines, légères et encore plus durables que les bétons ordinaires. La réduction considérable de l'épaisseur des structures permet un gain économique important par rapport aux bétons ordinaires du fait de la restriction des matières. De plus, ces bétons présentent une très bonne qualité d'adhérence avec les armatures d'acier qui est une condition nécessaire au transfert des efforts internes. Ces bétons développent aussi des résistances accrues vis-à-vis de la fissuration, permettant ainsi de mieux répondre aux différents états limites et déformabilités.

L'utilisation des bétons à hautes performances est considérée comme un outil d'application de la durabilité et de la résistance des structures contre les conditions environnementales.

Les BHP sont des bétons qui répondent à toutes les exigences de la performance mécanique et de l'homogénéisation qui nécessitent des matériaux spéciaux.

CHAPITRE II

Les granulats recyclés

II.1 Introduction

L'augmentation des déchets provenant de la construction et de la démolition, ainsi que l'extraction étendue des ressources naturelles nécessaires à la production des matériaux de construction. L'idée de recycler les bétons est apparue dans le but principal de préserver l'environnement. En effet, la réutilisation des bétons en tant que granulats dans des nouvelles compositions de béton a permis de réduire les dépenses sur la gestion des déchets de déconstructions pour but :[Benamrane Toufik Amine 2015].

- des diminutions importantes d'émissions de gaz (CO₂) ;
- la réduction de la consommation énergétique ;
- la protection des ressources naturelles dont l'accès devient de plus en plus rare ;
- la valorisation de ces matériaux pour limiter et éliminer les mises en décharge.

II.2 Intérêt du recyclage dans le génie civil

Actuellement, la plupart des granulats utilisés sur le marché sont des granulats naturels issus de carrières ou de l'extraction des lits des fleuves ou des fonds marins. Ces produits offrent l'avantage d'une qualité relativement constante et d'un approvisionnement continu. En France, le secteur de la démolition produit annuellement 20 à 25 millions de tonnes de gravats [GDCBFNB, 1994]. Tous les gravats de démolition ne peuvent être utilisés afin de produire des granulats de recyclage. Ainsi, en France le potentiel de matériaux recyclables est seulement de 10 à 15 millions de tonnes . En 2001, la quantité réelle issue du recyclage n'était cependant que de 5 millions de tonnes [UNPG, 2001]. Face aux 400 millions de tonnes de granulats naturels produits en 2001 [GDCBFNB, 1994], le granulat recyclé de déchets de démolition ne peut pas être considéré à ce jour comme un matériau de remplacement qui permettrait d'éviter ou de limiter de façon significative l'exploitation des gisements naturels. SelonCharlot [Charlot, 1993] en France, les déchets de démolition sont issus des friches industrielles (40 %), des logements (35 %) et des travaux publics (25 %). Ces déchets sont composés de 50 % de maçonnerie, 30 % de béton, 5 % de bitume et 15 % de matériaux autres (bois, métal, papier, plastique, etc.). Le Recyclage des déchets dans une utilisation comme granulats pour les routes ou la construction permet :

- Une économie de la ressource naturelle ;
- Une réduction du transport des matériaux, donc une réduction de la consommation d'énergie et des émissions de gaz à effet de serre ;
- Une mise en œuvre rapide minimisant la gêne pour les habitants ;
- La réduction des quantités de matériaux mis en décharge. Au niveau environnemental, le recyclage complet du béton contribue à minimiser l'impact CO₂ du fait que :
- Pour les grandes agglomérations, l'utilisation des granulats recyclés permettra de

diminuer une partie du CO₂ attribuée au transport de granulats ;

- Le béton concassé est susceptible de piéger le CO₂ en se carbonatant ;
- La récupération des fines potentiellement utilisables, après traitement, dans la production d'un nouveau ciment ou autre liant hydraulique, a un impact sur la réduction de la production de CO₂ des cimenteries. [Thai-Hoa V, 2009]

II.3 Sources de déchets utilisés en génie civil

Le terme « déchet » est un : « résidus, matériaux, substances ou débris rejetés à la suite d'un processus de production, de fabrication et d'utilisation ». En génie civil deux principales sources de production de déchets qu'on rencontre généralement par la suite :

II.3.1 Déchets de construction et de démolition

Sont lourds et volumineux, généralement classés parmi les déchets industriels. Produisent dans la construction tel que : béton, briques, pierre de taille, bois...etc., ces tas sont plus ou moins composite suivant la nature et l'âge des ouvrages .

II.3.2 Déchets de sous-produits de l'industrie

L'utilisation des déchets industriels, a une importance pratique et économique immédiate, car de nombreux produits secondaires et déchets résiduels peuvent remplacer des matières premières naturelles. Parmi les sous-produits utilisés tel que (les laitiers de haut fourneau, cendre volante, terre cuite...etc.)

II.4 Classifications des déchets dans le génie civil

II.4.1 Déchets inertes

Sont les plus stables, ils ne subissent aucune modification physique, chimique ou biologique. Exemple : (brique, tuiles et céramique, granulats non pollués).

II.4.2 Déchets banals

Sont non inertes et non dangereux générés par les activités du commerce, de l'industrie. Comme (cartons, papiers, plastiques, plâtre...etc.).

II.4.3 Déchets dangereux

Sont présentent un caractère polluant ou toxique et nécessitent d'être éliminés dans une filière spécifique. Exemple : (pots de peinture, tubes de colle, néons...etc.).

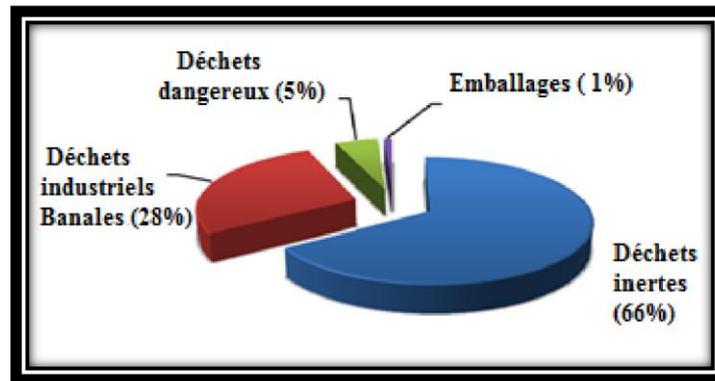


Figure II.1 : Représentation en chiffres des déchets [Ait Mohamed Amer Adam, 2017].

II.5 Descriptions du granulat recyclé

Un granulat provenant du recyclage de débris de démolition en opposition aux « granulats naturels » provenant de carrières ou de sablières. Sont formés du granulat d’origine et de mortier attaché à celui-ci (Figure II.2). Ceux-ci doivent donc être considérés comme un système composé de deux phases distinctes. La teneur en mortier résiduel attaché au granulat d’origine a un grand impact sur les propriétés du granulat recyclé [Ait Mohamed Amer Adam, 2017]

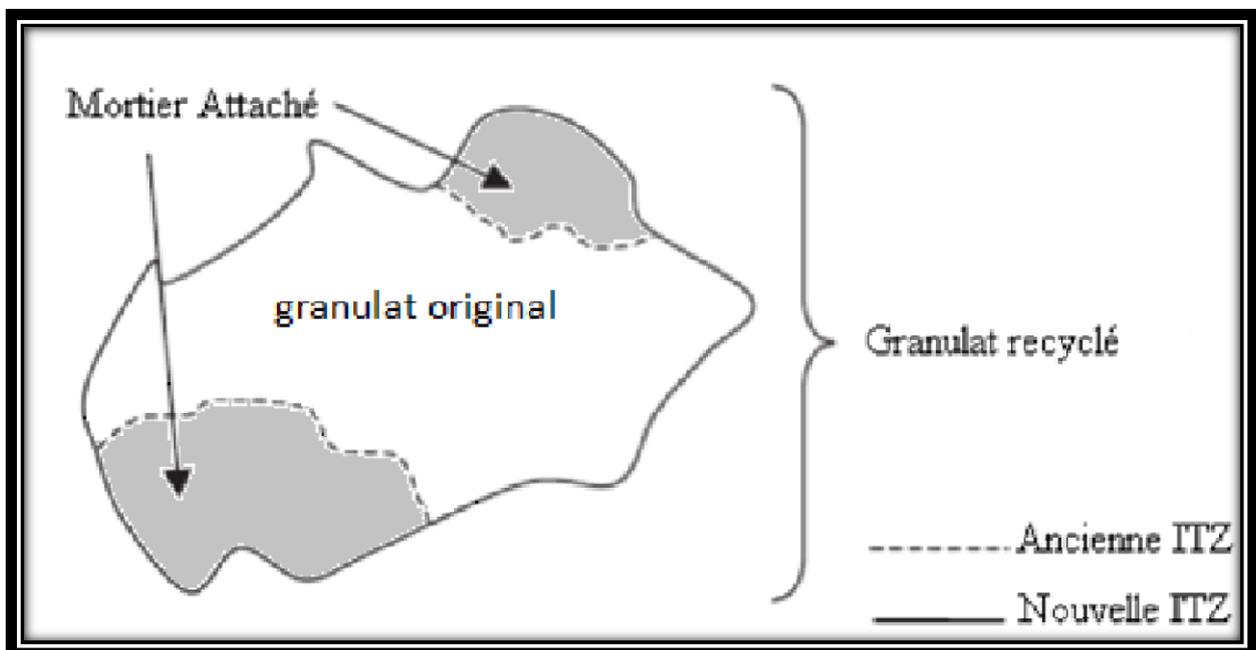


Figure II.2 : Schématisation d’un granulat recyclé [Ait Mohamed Amer Adam, 2017]

II.6 Les types des granulats recyclés

En règle générale, on distingue quatre classes principales de granulats recyclés (Figure II.3) [Hannequart & E. Schamp, 2010].

- Granulats de débris de béton ;
- Granulats de débris de maçonneries ;
- Granulats de débris hydrocarbonés ;
- Granulats de débris mixtes.



Figure II.3 : Différents types des granulats recyclés [Hannequart& E. Schamp, 2010]

II.7 Élaboration des granulats de béton recyclé

Les granulats de béton recyclé (GBR) produits industriellement proviennent généralement d'ouvrages démolis. Ils contiennent de ce fait une large variété de bétons de composition et de propriétés différentes associés à une plus ou moins grande proportion de corps étrangers (par exemple, de la brique en terre cuite, des enrobés bitumineux, du verre, du plâtre, etc.). Il est relativement facile de séparer les constituants tels le plastique, le bois, le métal, le papier et les matériaux de couverture. C'est moins évident pour la céramique, les enrobés et la pierre. Ces constituants sont presque toujours présents dans les différents granulats recyclés, indiquant qu'ils sont mal éliminés en pratique. La plupart des GBR contiennent donc une variété de composants minéraux (pierre, mortier, brique, plâtre... et autres matériaux de médiocre qualité). Pour pouvoir valoriser au mieux les GBR, il est alors nécessaire d'améliorer leur uniformité et de réduire au maximum les contaminants. Toutefois, le niveau d'homogénéité et de pureté requis dépend directement de leur réutilisation. En effet, dans les sous-couches des chaussées, les GBR peuvent se substituer aux granulats naturels même s'ils contiennent des fragments de briques en quantité

importante. En revanche, pour être réutilisés dans de nouveaux bétons, la présence de mortier adhérent aux granulats naturels, de débris de briques et d'autres éléments tels le verre ou le bois sont des contaminants qui altèrent la qualité du béton et en augmentent la variabilité.

C'est pourquoi la composition des GBR destinés à être recyclés dans le béton a été précisée par les normes. Ainsi, ils doivent contenir au moins 90 ou 95 % de béton ou de granulats naturels, et avoir un taux de contaminant généralement inférieur à 1 % de la masse totale du produit. Afin d'éviter tout problème d'expansion différée et d'altération de la microstructure des nouveaux bétons [Nixon, 1978], la teneur admissible en gypse est aussi, généralement, très limitée. Enfin, jusqu'ici, la plupart des applications ne permettent que l'utilisation des gravillons de GBR, car les caractéristiques requises sont difficilement atteintes avec les sables de GBR.

Actuellement, si l'on veut éviter le mélange des différents matériaux, la démolition doit se faire de façon très sélective voire, dans certains cas, manuellement. Comme ces pratiques sont exceptionnelles, il en résulte que la plupart des GBR sont de mauvaise qualité, en témoigne leur réutilisation marginale dans les bétons de structure. Étant donné les seuils de composition exigés et les difficultés à éliminer certains constituants, le recours à des systèmes de séparation efficaces devient alors une nécessité. Ces systèmes comprennent le tri automatisé et l'élimination des phases de moindre qualité. À ce stade, les similitudes avec les technologies déployées dans l'industrie minérale sont évidentes. Leur transfert potentiel vers le recyclage des DCD ouvre la voie d'une réutilisation plus rationnelle des GBR, dans des conditions plus respectueuses de l'environnement.

II.7.1 Propriétés du béton à base des granulats recyclés à l'état frais

- a) **Ouvrabilité** : L'utilisation des granulats recyclés diminue l'affaissement du béton par rapport à un béton de granulats naturels pour un même rapport E/C. Cette baisse d'affaissement serait due à la grande absorption et l'angularité des granulats recyclés. En effet, on observe une augmentation de 3,1% à 9,4 % de la demande en eau du béton lors de l'utilisation des granulats recyclés, pour garantir un même affaissement. Ceci a été attribué aux granulats recyclés ayant une surface plus rugueuse et une forme plus anguleuse, créant ainsi plus de friction interne dans le béton.
- b) **La masse volumique et la teneur en air** : La masse volumique apparente du béton frais à base de granulats naturels est dans la plage de 2400 kg/m³, alors que le béton à base de granulats recyclés est nettement plus léger, 2150 kg/m³, quel que soit le type de ciment. Et la teneur en air du béton de granulats recyclés est légèrement supérieure (4% à 5,5%) par rapport au béton à base des granulats 100% naturels. [Rao A, 2005]

II.7.2 Propriétés du béton à base des granulats recyclés à l'état durci

- a) **Perméabilité** : Elle est augmentée avec le taux de remplacement du granulat. Cette augmentation est principalement due à l'absorption d'eau des granulats recyclés. Cette augmentation n'a cependant pas été observée pour un taux de remplacement de 20% selon certains travaux.
- b) **Porosité** : Généralement corrélée à leur capacité d'absorption et le volume de pores et la distribution. Du fait de la présence de mortier attaché aux granulats, la structure des bétons recyclés est plus poreuse qu'un béton ordinaire. Les valeurs de porosité obtenues dans la littérature vont de 14% à 20,1%.
- c) **Résistance à la compression** : En général, c'est entre 5% à 30% de diminution dans la résistance à la compression du béton fait de gros agrégats recyclés, en fonction de la qualité du béton et la composition du mélange. [Rao A, 2005] a trouvé la résistance du béton à base de granulat recyclé et le béton de référence à comparable avec un remplacement à 100%, à condition que le rapport E/C est supérieur à 0,55. Poon CS., Shui ZH., Lam L., Kou SC [Poon CS., Shui ZH., Lam L., Kou SC, 2004] ont également observé que des granulats recyclés ont une forme plus anguleuse et une texture de surface rugueuse par rapport aux granulats naturels qui peuvent conduire à une meilleure liaison et résistance. [Corinaldesi V, Moriconi][Corinaldesi V, Moriconi, 2009] ont étudié l'effet des fumées de silice sur l'amélioration de résistance à la compression du BGR. Ils ont observé que la force peut être améliorée pour égaler ou voire dépasser celle du béton de granulats normaux en ajoutant des fumées de silice dans le mélange.
- d) **Résistance à la traction et à la flexion** : La résistance à la traction des bétons recyclés présente des résultats légèrement différents les uns des autres. Si toutes indiquent une perte de résistance pour le béton recyclé par rapport au béton standard, certaines ont montré une réduction de 15 à 20% à un taux de remplacement de 100% et d'autres une perte de moins de 10% pour un essai réalisé à 28 jours.
- e) **Module d'élasticité** : Le module d'élasticité représenté par la pente de la section linéaire de la courbe contrainte déformation. Les facteurs les plus importants affectant le module d'élasticité sont la teneur en mortier résiduel, le rapport E/C et la teneur en air entraînée. Le module d'élasticité d'un GBR fabriqué à partir de fins et gros granulats est d'environ 25% à 40% de moins que celui du béton ordinaire, tandis que pour un béton fait avec de gros granulats seulement, il est d'environ 10% à 33% de moins, avec une variation en fonction du rapport E/C et du taux de remplacement des granulats. Cette perte de module d'élasticité

semble principalement liée à la grande porosité des bétons recyclés.

II.7.3 Propriétés liées à la durabilité

- a) **Retrait** : Le retrait est une mesure du changement volumétrique du béton libre de chargement extérieur. Le béton se dilate avec l'accroissement de la teneur en eau et se contracte avec la perte d'humidité. D'après les études les propriétés de retrait endogène et de séchage du béton Contenant des granulats de béton recyclé, il indique que le taux de retrait est élevé aux jeunes âges, puis ralentit avec le temps. Les facteurs de remplacement des granulats de béton recyclé par des granulats naturel supérieur à 30% provoquent une augmentation rapide dans les valeurs de retrait de séchage et indiquée une déformation moyenne de 0.007 mm/m par contre un taux de remplacement supérieur à 60% indique une déformation de l'ordre 0.05 mm/m.
- b) **Fluage** : Ravindrarajah RS, Tam TC [Ravindrarajah RS, Tam TC, 1985] ont montré que le fluage du GBR est d'environ 30% à 60% plus élevé que celui du béton ordinaire. Donc le fluage du béton est proportionnel à la teneur en pâte ou de mortier dans le béton.

II.8 Conclusion

Cette partie présente un aperçu détaillé sur les granulats recyclés. Elle expose d'abord leur définition, leurs sources, leurs classifications ainsi que leur développement, ce chapitre présente aussi une description du béton à base des granulats recyclés, ses propriétés à l'état frais et durci.

CHAPITRE III
Caractérisation des
matériaux utilisés
et formulation
des BHP et BHPR

III.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présenterons les caractéristiques des matériaux utilisés et les essais effectués au sein du laboratoire de département de Génie Civil pour la confection des bétons à hautes performances à base de laitier. Il sera aussi présenté, le travail de sélection des constituants ainsi que leur utilisation, dans le but d'obtenir les meilleurs résultats en matière de résistance. Il sera étudié par ailleurs, l'effet des taux de remplacement des graviers recyclés (25%, 50%, 75%) sur les caractéristiques de BHPL.

L'objectif général de cette étude est d'évaluer le comportement mécanique des diverses formulations :

- Évaluer le comportement mécanique (Résistance) BHP et BHPR recyclés avec différents taux de remplacement ;
- Faire une comparaison du comportement mécanique (compression) des bétons à hautes performances avec fumée de silice et à base de laitier.

Dans ce chapitre trois parties successives seront présentées :

- Première partie caractéristique des matériaux utilisés ;
- Deuxième Partie les essais des matériaux utilisés ;
- Troisième partie préparation de formulation du béton.

III.2 Matériaux utilisés:

Les propriétés d'usage des bétons à hautes performances sont des sujets d'étude dans différents points du monde, et un certain nombre de travaux portant sur les caractéristiques physico-mécaniques de ces bétons ont été publiés.

- **Notons que pour obtenir un BHP, il faut :**
 - Une sélection de granulats résistants et une granularité permettant d'obtenir une compacité optimale du béton et une meilleure adhérence avec la pâte de ciment ;
 - Le choix d'un ciment portland avec moins de C_3A , composée à vide d'eau ;
 - L'utilisation d'un rapport E/C au-dessous de 0,4 (quantité d'eau réduite au strict minimum) ;
 - L'utilisation des superplastifiants pour compenser la perte de maniabilité.

III.2.1 Ciment :**III.2.1.1 Les propriétés de ciment :**

Le ciment utilisé dans la confection des différents bétons est conforme aux normes NF P 15-301 et ENV 197-1. C'est un ciment portland composé de classe **CEM I 42,5 N-LH SR5**, fabriqué à **20 Km de GUELLET SIDI SAÂD, EL-BEIDHA, Wilaya de LAGHOUT**



Figure (III. 1) ciment EL ESSES

- La masse volumique apparente :

L'essai consiste à remplir en matériau sec (ciment) un récipient vide de volume (V) du matériau sec (ciment) sans le tasser et le peser ensuite (M), pour en déduire la masse volumique. Cet essai a été réalisé selon la norme NF EN 1097-3.

$$M_{v_{app}} = \frac{M}{V} \cdot 1000 \quad (\text{kg/m}^3) \quad \text{Eq (III. 1)}$$

M : La masse sèche du matériau, en (g).

V : représente le volume du récipient, en (ml).



Figure (III.2) : Détermination de la masse volumique

Chapitre III:

Utilisés et formulation des BHP et BHPR

- La masse volumique absolue :

Il s'agit de mesurer la masse, par unité de volume de matière pleine sans aucun vide entre les grains, on a appliqué la méthode de l'éprouvette graduée selon la norme NF P 18-558. L'essai consiste à verser une quantité connue de la poudre dans un liquide inerte (mazoute), la différence de volume rapportée à la masse du matériau donne la masse volumique selon la formule suivante.

$$M_{v_{app}} = \frac{M}{(V_2 - V_1)} \cdot 1000 \quad (\text{kg/m}^3) \quad \text{Eq (III. 2)}$$

M : La masse sèche du matériau, en (g).

V1 et V2 : la lecture sur l'éprouvette graduée avant et après l'introduction du ciment, en (ml).



Figure (III.3): Détermination de masse volumique absolue

- La porosité :

La porosité est déduite à partir des masses volumiques, qui est définie par la formule suivante:

$$P = \left[1 - \left(\frac{M_{v_{app}}}{M_{v_{abs}}} \right) \right] \cdot 100 \quad (\%) \quad \text{Eq (III. 3)}$$

III.2.1.2 Les données de ciment :

La composition chimique et minéralogique du **CEM I 42,5 N-LH SR5** utilisé pour la confection des bétons sont résumés dans les tableaux (III.1) Erreur ! Source du renvoi introuvable. et (III 2), qui sont élaborés à la base de la fiche technique fournie par le laboratoire de l'usine "AMODA", en Annexe 03.

Tableau (III. 1) Composition chimique du ciment CEM I 42,5 N-LH SR5 utilisé

Éléments	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	Cl	PAF (NA235)	CaOL	Résidus insolubles
Teneur %	21.45	5	5	64	1.25	0.4	0.05	2	<0.1	3.5	0.9	<5

Tableau (III. 2) Composition minéralogique du ciment CEM I 42,5 N-LH SR5 utilisé.

Éléments	C3S	C2S	C3A	C4AF
%	59	16	4.5	12

III.2.2 Les granulats (Sable) :

On a utilisé un sable d'ELGEULTA (région de Tiaret).



Figure (III.4) : Echantillon de sable

III.2.2.1 Les caractéristiques physiques:

Figure (III.5) : Détermination des masses volumiques et spécifiques

III.2.2.2 Equivalent de sable:

On en déduit l'équation de l'équivalent de sable qui, par convention :

$$E_s = 100 \left(\frac{h_2}{h_1} \right) E_q \quad (\text{III. 4})$$

-hauteur h_1 : sable propre + éléments fins ;

-hauteur h_2 : sable propre seulement.

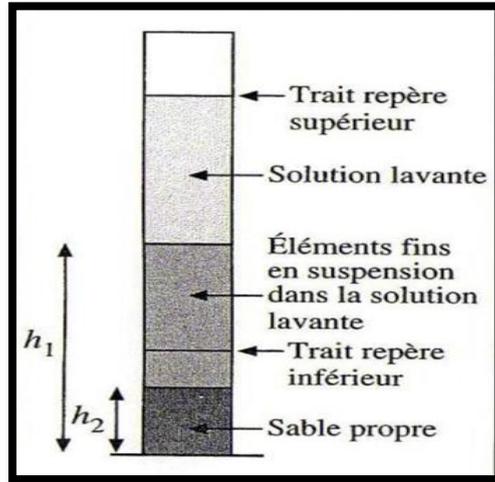


Figure (III.6) : Equivalent de sable

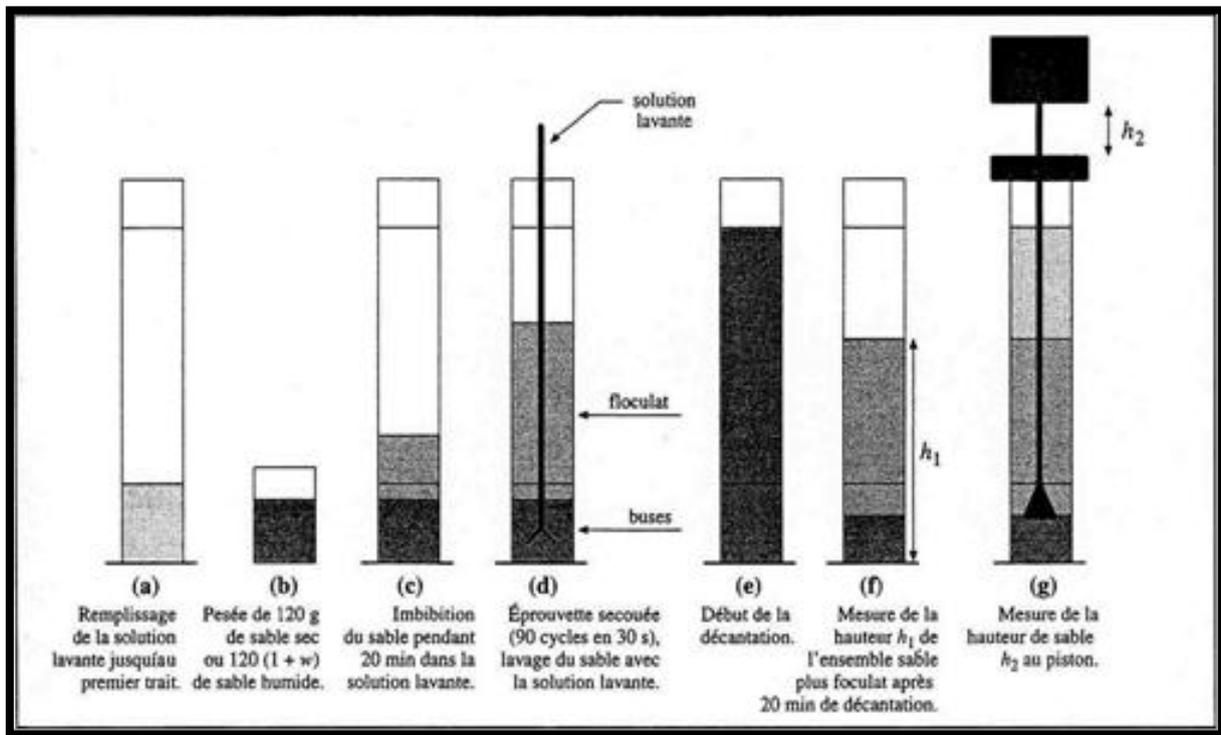


Figure (III.7) : Processus de l'essai d'équivalent de sable

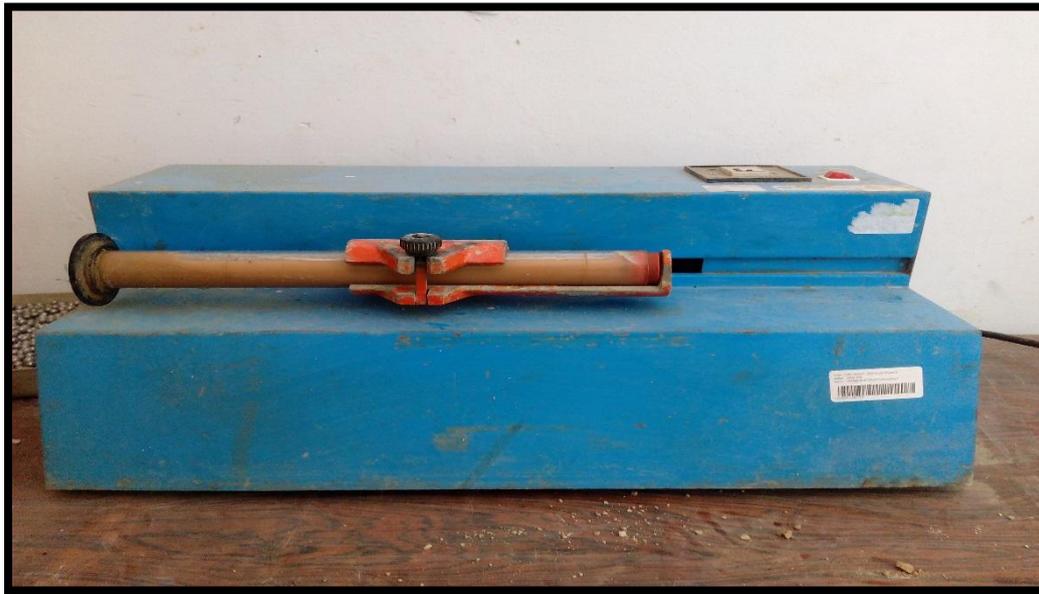


Figure (III.8) :Machine d'agitation (mouvement rectiligne horizontale)



Figure (III.9) :Essai d'équivalent de sable (juste après agitation)



Figure (III.10):

Les trois éprouvettes pour l'essai de l'équivalent de sable (E_s) (phase de repos (20 mn))

III.2.2.3 Analyse granulométrique :

L'analyse granulométrique permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles de grains constituant les échantillons. Elle s'applique à tous les granulats de dimension nominale inférieure ou égale à 63 mm, à l'exclusion des fillers.

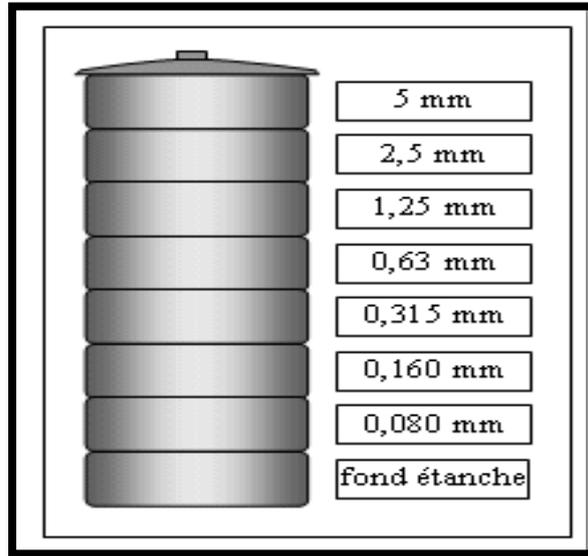


Figure (III.11) : Colonne des tamis



Figure (III.12) : Essai d'analyse granulométrique

III.2.2.4 Modules de finesse : [NF P 18-540]

Les sables sont caractérisés par le module de finesse (MF). Le module de finesse d'un granulat est égal au 1/100e de la somme des refus cumulés exprimés en pourcentages, sur différents tamis de la série suivante :

0.16-0.315-0.63- 1.25- 2.5- 5.

Le module de finesse surtout utilisé pour les sables permet de caractériser leur granularité par une seule valeur. Celle-ci dépend surtout de la teneur en grains fins du sable. Plus le module de finesse est faible, plus le sable est fin. Un module de finesse élevée caractérise un sable grossier.

III.2.3 Granulat(gravier) :

Le gravier utilisé de classes (3/8, 8/15 mm)de la carrière Rechiga(région de Tiaret).

III.2.3.1 La masse volumique du gravier 3/8 et 8/15 :

Le volume absolu est mesuré en immergeant complètement l'échantillon dans le récipient gradué, en effet l'augmentation du volume de l'eau est intégralement produite par le volume des grains de gravier.

La masse de la variation de hauteur d'eau correspond donc au volume absolu du gravier.



Figure (III.13) : Essai de la masse volumique du gravier 3/8 et 8/15



Figure (III.14) : Détermination de la masse volumique de gravier

III.2.3.2 La masse volumique et spécifique du gravier 3/8 et 8/15

En remplissant, en laissant tomber du gravier d'une dizaine de centimètre et sans le tasser dans

Chapitre III:**Utilisés et formulation des BHP et BHPR**

un récipient de 1 litres, le volume apparent de l'échantillon de gravier vaut 1 litres. Le récipient doit être arasé avec un réglé par mouvement de va et vient.

La pesée de cet échantillon sur une balance tarée à la masse du récipient indique la masse de gravier correspondant à cet échantillon.



Figure (III.15): Détermination de la masse spécifique de gravier

III.2.3.3 Mesure du coefficient d'aplatissement : [NF P18-561]

- Exécution de l'essai
- Tamisage sur tamis à mailles carrées :

Procéder au tamisage de l'échantillon par voie sèche sur les tamis en se conformant aux prescriptions de la norme P 18-560.

Recueillir les différentes fractions d/D ; peser chaque classe granulaire avec une précision relative de 0,1 %.

- Tamisage sur grilles à fentes :

Tamiser chaque classe granulaire obtenue par l'opération précédente sur une grille dont l'écartement E entre les barres est défini par le tableau de correspondance ci-dessous :

Tableau (III. 3) Dimensions en millimètres

Classe granulaire d/D	Écartement E
> 50	31.5
40 – 50	25
31.5 – 40	20
20 – 25	16
16 – 20	12.5
12.5 – 16	10
10 – 12.5	8
8 – 10	6.3
6.3 - 8	5

Le tamisage sur les grilles se fait manuellement.

Peser avec une précision relative de 0,1 % le passant sur la grille correspondante à chaque classe granulaire d/D.

- Expression des résultats

Les résultats sont portés sur des feuilles d'essai dont un exemple est donné en annexe A. Les notations suivantes sont utilisées :

M_g = Masse de chaque classe granulaire d/D, en grammes.

$M = \sum M_g$ (ce chiffre peut être légèrement inférieur à M_0 mais ne doit pas s'en écarter de plus de 2 %).

M_e = Masse des éléments de chaque classe granulaire d/D passant sur la grille correspondante, définie par tableaux.

Le coefficient d'aplatissement de chaque classe granulaire est donné par :

$$A_i = \frac{M_e}{M_g} \cdot 100$$

Le coefficient d'aplatissement global A est donné par :

$$A = \frac{\sum M_e}{M} \cdot 100 \text{ Eq(III. 5)}$$

III.2.3.4 Coefficient d'absorption : [P18-554] [P18-555]

Le taux d'absorption d'eau est déterminé selon les normes [NF P 18-554] et [NF P 18-555].

Il est déterminé selon la formule suivante:

$$A_b = \frac{(M_a - M_s)}{M_s} \cdot 100 \text{ (%) Eq(III. 6)}$$

M_a en (g): la masse du l'échantillon immergé pendant 24h dans l'eau après avoir épongé soigneusement avec un chiffon absorbant l'eau à la surface des granulats ou plus connue sous le nom SSS (Saturé à Surface Sèche).

M_s en (g): la masse de l'échantillon séché à 105°C.

L'observation à l'oeil nu de la morphologie des différents granulats utilisés (Figure III.16) relève que l'ensemble des granulats utilisés sont des granulats concassés de forme plus au moins anguleuse variable d'un type à l'autre. La forme des granulats est caractérisée par les coefficients volumétriques et d'aplatissement. On peut observer aussi que les granulats naturels sont très compacts avec un minimum de pores



Figure (III.16) l'échantillon imbibé dans l'eau 24h

III.2.3.5 Mesure de la propreté superficielle : [NF P18-591]

Elle est caractérisée par la teneur d'éléments fins indésirables, hydrophiles ou non. Ce sont soit des fines d'argile, soit des fines issues du concassage ou du broyage des roches. La propreté des graviers est déterminée à partir de l'essai de propreté superficielle NFP18-591, l'essai est effectué par lavage d'une quantité de gravier ($200D < M < 600D$) sur le tamis 0,5 mm et en déduire la différence de masse après séchage. Elle est déterminée d'après la formule suivante :

$$P = \frac{(M_s - m')}{M_s} \cdot 100 \text{ (%) Eq(III. 7)}$$

M_s en (g) : la masse du dernier échantillon immergé pendant 24h dans l'eau après avoir épongé soigneusement avec un chiffon absorbant.

m' en (g) : la masse de l'échantillon séché à 105°C.

III.2.3.6 Essais Los Angeles : (P18-573)

La résistance à la fragmentation (au choc) est déterminée par l'essai Los-Angeles selon la norme NF P 18-573, l'essai consiste à mesurer la masse (m) d'éléments inférieurs à 1,6mm, produits par la fragmentation du matériau testé et que l'on soumet aux chocs de boulets normalisés, dans le cylindre de la machine Los-Angeles en 500 rotations à une vitesse régulière.

L'essai Los-Angeles est pratiqué sur deux fractions 6,3-10 et 10-14 mm et le nombre de boulets est 9 et 11, d'une masse totale 3 960 et 4 840 grammes respectivement. Les matériaux sont lavés, tamisés et séchés à l'étuve à 105°C, jusqu'à masse constante. Le coefficient Los-Angeles est déterminé par la formule :

$$L_A = \left(\frac{M}{m} \right) * 100 \text{ Eq(III. 8)}$$

m : représente le passant du matériau au tamis 1,6 mm après essai en (g).

M : la masse initiale en (g), $M = 5000 \pm 5$ g.

III.2.3.7 Essai d'usure Micro-Deval : [P18-572]

La résistance à l'usure est déterminée selon l'essai Micro-Deval en présence d'eau, selon la norme NF P 18-572, deux fractions 4-6,3 et 6,3-10 mm ont été testés pour chaque type de granulats avec une charge abrasive de 2000 ± 5 et 4000 ± 5 g respectivement.

Le coefficient Micro-Deval est déterminé par la formule suivante :

$$M_{DE} = \left(\frac{M-m'}{m} \right) \cdot 100 = \left(\frac{M}{m} \right) \cdot 100 \quad \text{Eq (III. 9)}$$

m : représente la masse sèche de la fraction du matériau passant après l'essai au tamis de 1,6 mm, en (g)
 m' : représente la masse sèche du refus au tamis 1,6 mm, en (g).



Figure (III. 17) Essai Micro-Deval

M : la masse initiale sèche de l'échantillon en (g), $M = 500 \pm 2$ g.

III.2.3.8 Essai au bleu de méthylène : (P18-592)

L'essai consiste à mesurer par dosage la quantité de bleu de méthylène qui peut être adsorbée par le matériau mis en suspension dans l'eau. Cette quantité est rapportée par proportionnalité directe à la fraction 0/50 mm du sol. La valeur de bleu du sol est directement liée à la surface spécifique des particules constituant le sol ou le matériau rocheux.

Le dosage s'effectue en ajoutant successivement différentes quantités de bleu de méthylène et en contrôlant l'adsorption après chaque ajout. Pour ce faire on prélève une goutte de la suspension que l'on dépose sur un papier filtre ce qui provoque la création d'une tache.

L'adsorption maximale est atteinte lorsqu'une auréole bleu clair persistante apparaît à la périphérie de la tache.

$$VBS = \left(\frac{V}{q}\right) \quad \text{Eq (III. 3)}$$

V : Volume de bleu négatif en ml.

q : La masse qui est passé d'un tamis de 0,08 mm (échantillons de 300 g) .



Figure (III. 18) Essai au bleu de méthylène

III.2.3.9 Essai de carbonatation accélérée : (XP P18-458)

Cette opération est réalisée à l'aide d'un appareil (calcimètre) son mode opératoire consiste tout d'abord à régler le zéro dans le grand tube en verre gradué puis pesés 0.5g du sol ,introduire dans un flacon en verre , ajouter 10 ml de (HCL10%) boucher le flacon avec le tube de calcimètre ce dernier possède un bouchon en caoutchouc à l'une de ses extrémités à ce moment on prend note du niveau d'eau dans le grand tube gradué (A) ,(V) puis agiter bien le contenu du flacon .ensuite il faut régler l'appareil de telle façon à avoir au même niveau l'eau qui contient le grand flacon en verre (B) et le tube en verre gradué (A) , une fois cette tâche faite, lire sur le tube en verre gradué (A) le niveau d'eau (V2),d'où le volume finale à retenir sera ($V=V2-V1$) .

III.2.4 L'eau de gâchage :

L'eau de gâchageutilisée pour la confection des différents mélanges provient du réseau public dedistributiond'eau potable de la ville de Tiaret.

III.2.5 Super plastifiants :

Les super plastifiantsont les plus importants des adjuvants dans le sensoùilsdonnentaccès à des catégoriesparticulières de béton, comme les bétons à hautes performances, les bétonsfluides et les bétonsautoplaçants. On les utiliseoit pour fluidifier un mélange, soit pour conserver une certain

Chapitre III:**Utilisés et formulation des BHP et BHPR**

maniabilité, tout en diminuant la quantité d'eau. Dans notre étude, nous l'utilisons pour garder une maniabilité à peu près constante pour tous les mélanges.

La société granitex (Alger) met sur le marché des adjuvants fluidifiants, et plastifiant (appartiennent à la famille des super plastifiants qui sont généralement utilisés dans la fabrication de B.H.P).



Figure (III.19) :Super plastifiants MEDAFLOW

Tableau (III. 4) Caractéristiques des adjuvants utilisés (MEDAFLOW RE 25)

Aspect	Liquide
Couleur	Brun clair
Densité (t/m ³)	1,06 + 0,01
PH	7
Teneur en ions chlorures	<0,1 g/l
Extrait sec	25%
Dosage recommandé par rapport du poids de ciment	1.0 à 2.5%

III2.6. Le Laitier :

L'addition minérale est un constituant de base dans la formulation des BHP. Une addition minérale a été utilisée dans notre étude, il s'agit du laitier de haut fourneau.

Le laitier utilisé est un sous-produit de la fabrication de la fonte, de l'usine d'El-hadjar Annaba, Algérie. C'est un sable de granulométrie 0/3 mm, laitier granulé refroidi au jet d'eau, vitrifié c'est-à-dire amorphe. Le tableau (III.6) donne sa composition chimique. Il est réduit en poudre jusqu'à obtenir une grande surface spécifique par rapport au ciment.

Le laitier d'El-Hadjar a l'avantage d'être plutôt acide (le rapport CaO/SiO₂ varie dans les limites de 0.95 – 1.04), il est relativement stable.

Tableau (III.5) Composition chimique du laitier

Éléments	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	RI	PAF
%	39,77	41,69	7,05	1,41	5,49	0,15	0,44	0,10	0,12	0,11



Figure (III.20): Le Laitier



III.4 Formulation du béton:

Après une caractérisation des différents constituants, nous présenterons dans cette partie la procédure et la méthode de formulation choisie pour déterminer la composition optimale des Bétons à Hautes Performances (BHP, BHPR) de notre étude. Trois tests expérimentaux sont utilisés pour ajuster et corriger la maniabilité et la compacité des formulations choisies. Les résultats de ces tests seront exploités pour décrire l'effet de l'ajout des superplastifiants et des additions minérales sur les propriétés des BHP à l'état frais.

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

La méthode de Faury est utilisée pour déterminer les pourcentages des fractions granulaires et la méthode des coulis pour déterminer le dosage de différents constituants.

On entend ici par le béton témoin un béton proche de ceux qu'on emploie habituellement, les proportions du squelette granulaire de référence et du béton témoin seront les mêmes. Par contre, les formulations différentes au niveau de la pâte (ciment, laitier) la quantité de laitier ajouté est de 10 % du poids de ciment dans le mélange du béton.

La formulation des bétons à hautes performances (BHP) est une opération plus complexe que celle des bétons classiques, car le nombre de paramètres à gérer est plus élevé (jusqu'à trois constituants supplémentaires). Le point critique consiste souvent à « marier » un ciment et un adjuvant superplastifiant, de façon à ce qu'ils conduisent à un mélange fluide (bien que de faible teneur en eau), et cependant un temps suffisant pour permettre une mise en oeuvre aisée du béton.

La méthode de formulation développée par F. DE LARRARD [F. DE LARRARD 1998] permet de formuler un BHP, il a proposé d'élaborer une méthode rapide et relativement légère, permettant :

- pour chaque adjuvant, la détermination de la dose de saturation, au-delà de laquelle le produit n'a plus d'effet fluidifiant supplémentaire ;
- la comparaison de l'efficacité initiale des différents adjuvants ;
- la détection du risque de perte rapide d'ouvrabilité pour un couple et un dosage de superplastifiants donnés.

- **Composition du coulis:**

Le béton de départ est formulé avec des quantités et qualités de liant(s) susceptibles de fournir la résistance recherchée, un squelette granulaire optimisé, une large dose de superplastifiant (par exemple, 1,5 % d'extrait sec par rapport au poids de ciment) et un dosage en eau ajusté pour donner la consistance recherchée (affaissement au cône d'Abrams généralement supérieur à 20 cm). La formulation du coulis est déduite de celle du béton en enlevant tous les éléments supérieurs à 2 mm, ainsi que l'eau qu'ils absorbent. On prépare 1,5 l de coulis.

- **Fabrication du coulis**

On travaille avec du sable sec et on parcourt les étapes suivantes.

- Mettre dans le bol du malaxeur la fumée de silice, puis un poids égal d'eau ;
- Malaxer à petite vitesse pendant 30 secondes ;
- Introduire dans le bol le reste de l'eau avec un tiers de la dose d'adjuvant ;
- Malaxer à petite vitesse pendant 15 secondes ;
- Verser le ciment (et les éventuelles additions minérales autres que la fumée de silice) et déclencher le chronomètre (t_0) ;
- Malaxer à petite vitesse pendant 30 secondes ;
- Verser le sable pendant les 30 s suivantes en laissant le malaxeur tourner à petite vitesse ;
- Malaxer à grande vitesse pendant 30 secondes ;
- Arrêter le malaxage pendant 30 s et racler le bol à l'aide de la spatule caoutchouc pendant les quinze premières secondes de l'arrêt ;
- Introduire les deux tiers restant de l'adjuvant ;
- Reprendre le malaxage à petite vitesse pendant 15 s, puis à grande vitesse pendant 1 min 45 secondes.

▪ Mesure du temps d'écoulement au cône de Marsh

- Choisir la buse de diamètre 12,5 millimètres ;
- Dès la fin du cycle de malaxage, verser 1 l de coulis dans le cône (le niveau du litre sera marqué dans le cône après étalonnage avec de l'eau) ;
- S'assurer, avant chaque mesure, que les parois internes du cône sont humides (après rinçage à l'eau, le cône est posé à l'envers sur la paillasse pendant environ 20 secondes).
- la première mesure de l'écoulement (retrait du bouchon de la buse) se fait à $t_0 + 5$ min. On mesure le temps d'écoulement des 500 premiers millilitres, puis la température du coulis.



Figure (III.21) : Ecoulement au cône de Marsh et préparation des coulis

Tableau (III.6) : Détermination de la dose de saturation

Dosage en superplastifiant en %	1	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0
Temps d'écoulement en (S)	86	74	66	58	57	54	50	47	46	45	45

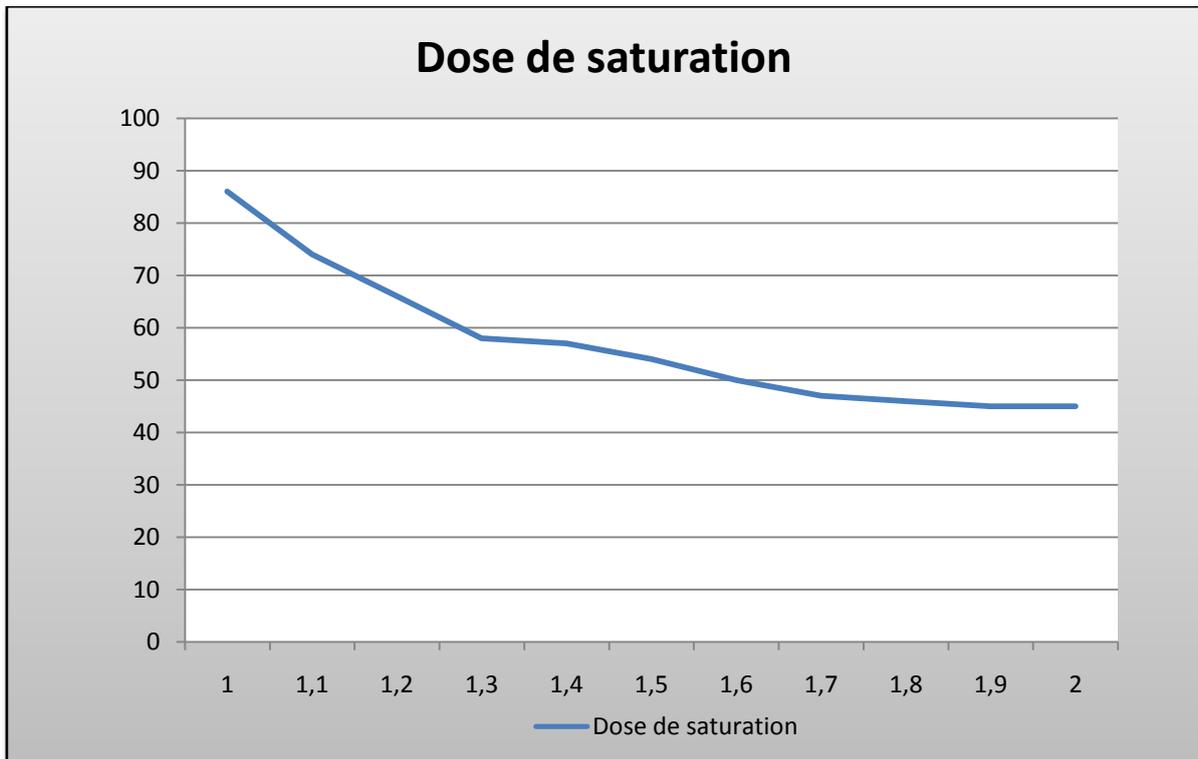


Figure (III.22) : Courbe de la dose de saturation

Tableau (III.7) : Composition d'un m³ béton BHPL et BHPLR(en kg)

Composant	Ciment (Kg)	laitier (Kg)	L'eau (L)	Superplastifiant (Kg)	Sable 0/4 (Kg)	Gravier 3/8(N,R) (Kg)	Gravier 8/15(N,R) (Kg)	E/L %
(BHPL, BHPLR)	450	45	159	6	566	564	767	0,32

- Désignation des bétons utilisés

BHPL: Béton à haute performance à base de laitier ;

BHPLR: Béton à haute performance à base de laitier recyclé.

Les bétons à hautes performances recyclés ont été confectionnés à partir des granulats recyclés de béton déjà préparé au laboratoire de Génie Civil du département, différents échantillons écrasés. On a utilisé les mêmes matériaux, ciment et sable, et on a remplacé les granulats naturels par des granulats recyclés avec substitution de 25%, 50% et 75 %.

L'élaboration des granulats recyclés est passée par plusieurs étapes : Fragmentation des blocs du béton de démolition (éprouvettes cylindriques et prismatiques de béton déjà compressés) et à l'aide d'un marteau, on a brisé les fragments du béton à des dimensions adaptées. On a procédé ensuite à l'aide des tamis, à séparer les différentes classes granulaires 3/8 et 8/15

III.4.1 Fabrication des échantillons :

Les bétons ont été confectionnés dans un malaxeur à axe vertical de capacité 50 litres permettant de couler une gâchée de 6 éprouvettes cylindriques.



Figure (III.23) :Introduction des constituants dans le malaxeur du béton

La durée totale de malaxage est de 5min.

- Humidification de la bétonnière et le matériel utilisé pour l'essai de maniabilité,



Figure (III.24) : Malaxage à sec des ingrédients du béton

- Introduction dans la cuve de la bétonnière des composants solides du plus grossier au plus fin : gravillon, sable, ciment et additions minérales ;
- Malaxage à sec pendant 1 minute ;
- Introduction d'une partie d'eau et malaxage pendant 1 minute30 secondes ;
- Introduction de la partie d'eau qui reste mélange avec le superplastifiant ;
- Malaxage humide pendant 2 minutes ;
- Vérification des propriétés d'ouvrabilité du BHP formulé à travers un test d'affaissement.



Figure (III.25) : Echantillon de béton réalisé

A la fin du malaxage, Le compactage est effectué sur une table vibrante pour une durée totale d'une minute.

Pour chaque gâchée et juste après le malaxage, on procède à la mesure de la maniabilité, caractérisée par l'affaissement au cône d'Abrams, de la masse volumique du béton frais. La quantité de superplastifiant est ajustée afin de maintenir l'affaissement au cône d'Abrams entre 17 et 21 cm.



Figure (III.26) :Mesure de l'affaissement du béton



Figure (III.27) :Moulage des éprouvettes cylindriques



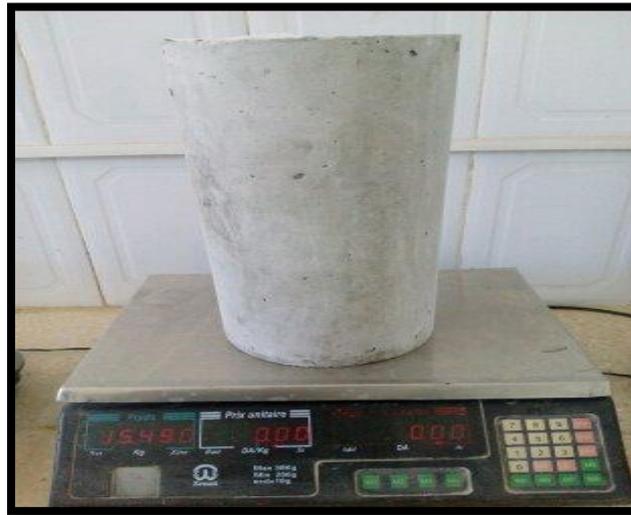
Figure (III.28):Préparation des éprouvettes Cylindriques

III.5 Démoulage et conservation des éprouvettes:

Le démoulage des éprouvettes est effectué après $24 \text{ h} \pm 1$ en suite la conservation se fait à une température de $20 \text{ °C} \pm 2 \text{ °C}$, dans l'eau, d'humidité relative supérieure ou égale à 95%.



Figure(III.29) : Démoulage des éprouvettes cylindriques et prismatiques



Figure(III.30) : Pesée des éprouvettes



Figure (III.31) : Conservation des éprouvettes cylindriques et prismatiques dans l'eau à 20 °C

III.6 Surfaçage des éprouvettes:

L'essai de compression est effectué sur des éprouvettes cylindriques dont les extrémités ont été préalablement rectifiées. En effet, si les éprouvettes étaient placées telles quelles sur les plateaux de la presse, on ne serait pas assuré de la planéité des surfaces au contact et de leur perpendicularité aux génératrices de l'éprouvettes. La rectification consiste donc à rendre ces surfaces planes et perpendiculaires aux génératrices de l'éprouvette.

Pour parvenir à ce résultat plusieurs méthodes peuvent être employées ; on a utilisé le surfaçage à l'aide de : disque néoprène (produite disponible au laboratoire).

III.7 Essai sur béton durci :

Sont les essais qui permettent de vérifier, en laboratoire, les qualités des bétons, notamment

leur résistance en compression simple et à la traction par flexion.

III.7.1 Détermination de la résistance à la compression (f_{cj}) :

- Objectif de l'essai :

L'essai a pour but de connaître la résistance à la compression du béton des éprouvettes cylindriques.

- Principe de l'essai:

L'éprouvette étudiée est soumise à une charge croissante jusqu'à la rupture. La contrainte de rupture à la compression est le rapport entre la charge de rupture et la section transversale de l'éprouvette.

L'écrasement s'effectue aux âges suivants : 7, 14, 28 et 56 jours.

- Équipement nécessaire :

Une machine d'essai qui est une presse de force et de dimension appropriée à l'éprouvette à tester.

Un moyen pour rectifier les extrémités des éprouvettes (surfaçage à l'aide du disque néoprène)

- Préparation et positionnement des éprouvettes :

Essuyer toute humidité excessive de la surface de l'éprouvette avant de la positionner dans la machine d'essai.

Tous les plateaux de la machine d'essai doivent être essuyés et toutes particules ou corps étrangers retirés des surfaces de l'éprouvette qui seront en contact avec eux.

Enlever tout appareillage, autre que les plateaux auxiliaires ou éléments d'espacement, entre l'éprouvette et les plateaux de la machine d'essai.

Positionner les éprouvettes de façon que le chargement s'effectue perpendiculairement au sens de coulage.

Centrer l'éprouvette sur le plateau inférieur avec une précision de ± 1 % du diamètre .

Si les plateaux auxiliaires sont utilisés, les aligner avec la face supérieure et la face inférieure de l'éprouvette.

La mise en charge : Sélectionner une vitesse constante de chargement dans la plage 0,2 MPa/s ($N/mm^2 \cdot s$) à 1,0 MPa/s ($N/mm^2 \cdot s$). Appliquer la charge sans choc et l'accroître de façon continue à la vitesse constante sélectionnée ± 10 % jusqu'à la rupture de l'éprouvette.



Figure (III.32) : Chargements des éprouvettes cylindriques 16x32 cm (Essai de compression)



Figure(III.33):Rupture des éprouvettes cylindriques BHPL



Figure (III.34):Rupture des éprouvettes cylindriques à 28 jours Béton à haute performance BHPLR

III.7.2 Détermination de la résistance à la traction par flexion:

La résistance à la traction est mesurée par la méthode de traction par flexion conformément à la norme NF P 18-407. L'essai s'effectue sur une machine de flexion sollicitant l'écrasement d'éprouvettes prismatiques (10 x10 x40) cm³ à une flexion directe à raison de trois éprouvettes pour chaque type de béton.



Figure (III.34) : Chargement des éprouvettes prismatiques pour l'essai de traction



Figure (III.35) : Rupture des éprouvettes prismatiques (Béton HPL)

III.8 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté en détail tous les éléments de l'analyse expérimentale, en commençant par les caractérisations de différents constituants; la formulation des bétons, la confection des éprouvettes, le mode opératoire et les différents essais mécaniques considérés dans ce travail. Les différents résultats obtenus à l'issue des tests effectués sont présentés et illustrés dans le chapitre suivant (Chap 4).

Chapitre IV

Analyse des Résultats

IV.1 Introduction:

Dans le présent chapitre, on présente les différents résultats expérimentaux relatifs aux essais effectués sur le BHPL et le BHPLR conformément aux modes opératoires mentionnés au chapitre précédent, une analyse et une discussion des résultats sera faite à la base des résultats obtenus.

IV.2 Les granulats :**IV.2.1 Analysegranulométrique par tamisage**

L'essai d'analyse granulométrique permet essentiellement de déterminer et répartir la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles des grains d'un échantillon.

Le but de l'essai se matérialise par :

- Le dimensionnement des particules qui varie entre 10-6mm à 100 mm.
- La classification utilisée pour caractériser les grains de différentes dimensions.
- L'établissement de la courbe granulométrique qui donne des informations très précises sur les granulats étudiés.

IV.2.1.1 Sable naturel :

Tableau (IV. 1) Résultats de tamisage de sable

Ouverture des tamis (mm)	Masse des Refus Mi(g)	Masse des Refus cumulés Mc (g)	Pourcentage des refus cumulés $Pr=(Mc/M) 100$	Pourcentage des tamisais cumulés $Pt=100-P$
500				
5	1	1	0.20	99.80
4	2	4	0.80	99.20
2.5	22	25	5.00	95.00
2	11	38	7.60	92.40
1.25	21	57	11.40	88.60
0.63	64	131	26.20	73.80
0.315	252	382	76.40	23.60
0.16	109	481	96.20	3.80
0.125	11	492	98.40	1.60
0.08	3	496	99.20	0.80
0.063	1	497	99.40	0.60
fond	3	500	100.0	0.00

IV.2.1.2 Graviernaturel :

Tableau (IV. 2) Résultats de tamisage degravier Naturel

Gravier naturel 3/8

Gravier naturel 8/15

Ouverture des tamis (mm)	Masse des Refus cumuls Mi(g)	Masse des Refus cumuls Mc (g)	Pourcentage des refus cumulés Pr=(Mc/M) 100	Pourcentage des tamisas cumulés Pt=100-P	Ouverture des tamis (mm)	Masse des Refus cumuls Mi(g)	Masse des Refus cumuls Mc (g)	Pourcentage des refus cumulés Pr=(Mc/M) 100	Pourcentage des tamisas cumulés Pt=100-P
1600					3000				
10	0	0	0.00	100.00	20	0	0	0	100
8	21	21	1.31	98.69	16	24	24	0.80	99.20
6.3	278	299	18.69	81.31	12.5	397	421	14.03	85.97
5	437	736	46.00	54.00	10	1012	1433	47.77	52.23
4	447	1183	73.94	26.06	8	849	2282	76.07	23.93
2	394	1577	98.56	1.44	6.3	501	2783	92.77	7.23
1	18	1595	99.69	0.31	5	148	2931	97.70	2.30
0.5	4	1599	99.94	0.06	4	64	2995	99.83	0.17
fond	1	1600	100.00	0.00	2	4	2999	99.97	0.03
					fond	1	3000	100.00	0.00

IV.2.1.3 Gravierrecycle(laitier)

Tableau (IV. 3) Résultats de tamisage deGravier recyclé (béton à base de laitier)

Gravier naturel 3/8

Gravier naturel 8/15

Ouverture des tamis (mm)	Masse des Refus cumulés Mc (g)	Pourcentage des refus cumulés Pr=(Mc/M) 100	Pourcentage des tamisas cumulés Pt=100-P	Ouverture des tamis (mm)	Masse des Refus cumulés Mc (g)	Pourcentage des refus cumulés Pr=(Mc/M) 100	Pourcentage des tamisas cumulés Pt=100-P
1600				3000			
10	0	0.00	100.00	20	0	0	100
8	17	0.94	99.06	16	13	0.37	99.63
6.3	607	38.06	61.94	12.5	275	9.20	90.80
5	1150	72.06	27.94	10	909	30.37	69.63
4	1416	88.31	11.69	8	1865	62.20	37.80
2	1590	99.56	0.44	6.3	1905	96.87	3.13
1	1596	99.88	0.13	5	2969	98.90	1.10
0.5	1599	99.94	0.06	4	2998	99.93	0.07
fond	1600	100.00	0.00	2	2999	99.97	0.03
				fond	3000	100.00	0.00

IV.2.2 Courbes granulométriques

IV.2.2.1 Sable naturel et Gravier naturel :

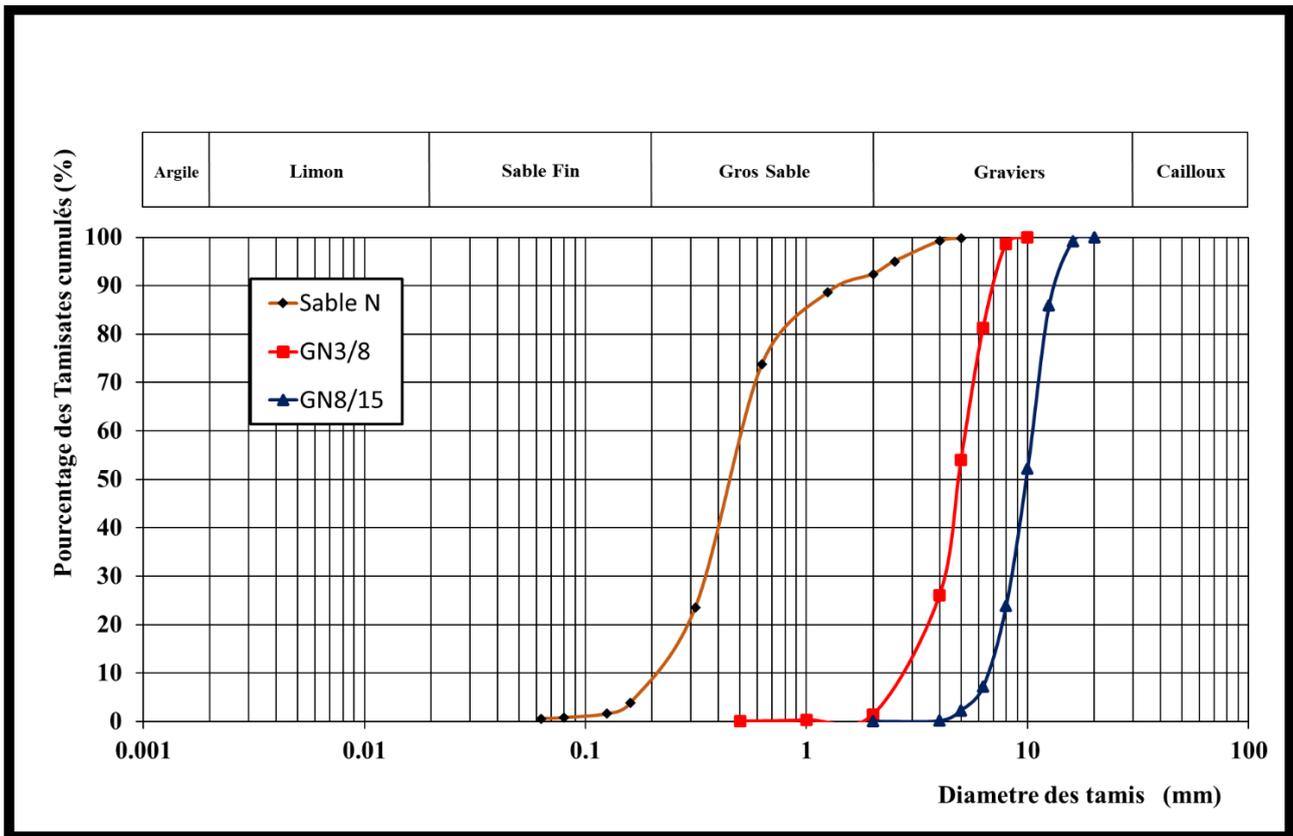


Figure (IV. 1) Courbes granulométriques de sable (0/4) et graviers (3/8 et 8/15)

IV.2.2.2 Graviers recyclés (béton à base de laitier) :

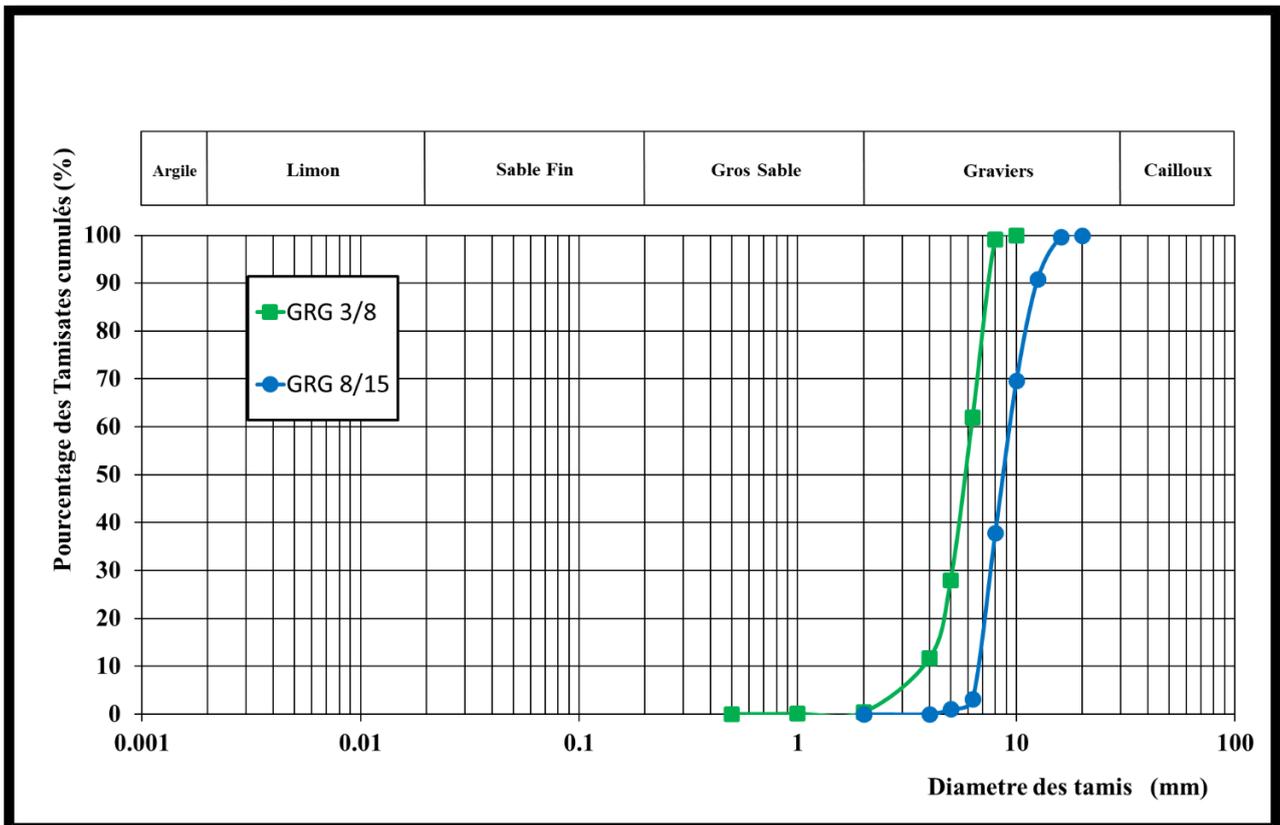


Figure (IV. 2) Courbes granulométriques de graviers recyclé (3/8 et 8/15) (béton à base de laitier)

Les résultats de l'analyse granulométriques apportent les renseignements suivants :

- Les gravillons des deux fractions (3/8 - 8/15) des différents granulats utilisés, que ce soit naturels ou recyclés, ont des distributions granulométriques relativement comparables.
- Les fractions granulaires utilisées dans cette étude donnent un squelette granulaire continu avec un maximum de compacité.

IV.2.3 Caractéristique

IV.2.3.1 Le Coefficient d'Aplatissement (A)

Tableau (IV. 4) Résultats de Coefficient d'Aplatissement (A)

Échantillon	Coefficient d'aplatissement
Gravier naturel 8/15	4%
Gravier recyclé Laitier 8/15	8%

D'après le résultat obtenu la valeur de CA de gravier 8/15 naturel et recyclé est inférieure à 12%, on conclue que le matériau angulaire cette caractéristique est indispensable pour les agrégats sachant que la spécification de CA ($CA \leq 30\%$).

IV.2.3.2 Essai Los-Angeles (LA)

Tableau (IV. 5) Résultats de Essai Los-Angeles (LA)

	Classe	L.A (%)
Granulats Naturel	(3/8)	27
	(8/15)	26
Granulats Recyclé (Laitier)	(3/8)	39
	(8/15)	35

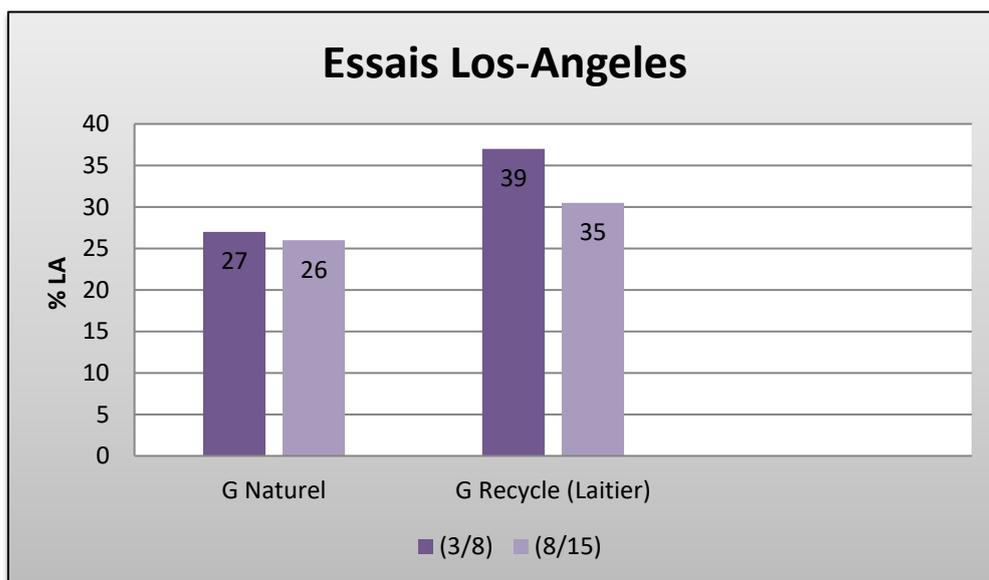


Figure (IV. 3) Résultats d'Essai Los-Angeles (LA)

L'essai de los Angeles montre que les granulats naturels sont mécaniquement plus résistants que les granulats recyclés.

IV.2.3.3 Essai Micro-Deval (MDE)

Tableau (IV. 6) Résultats de Essai Micro-Deval (MDE)

	Classe	MDE
Granulats Naturel	(3/8)	4
	(8/15)	12
Granulats Recyclé Laitier	(3/8)	17
	(8/15)	25

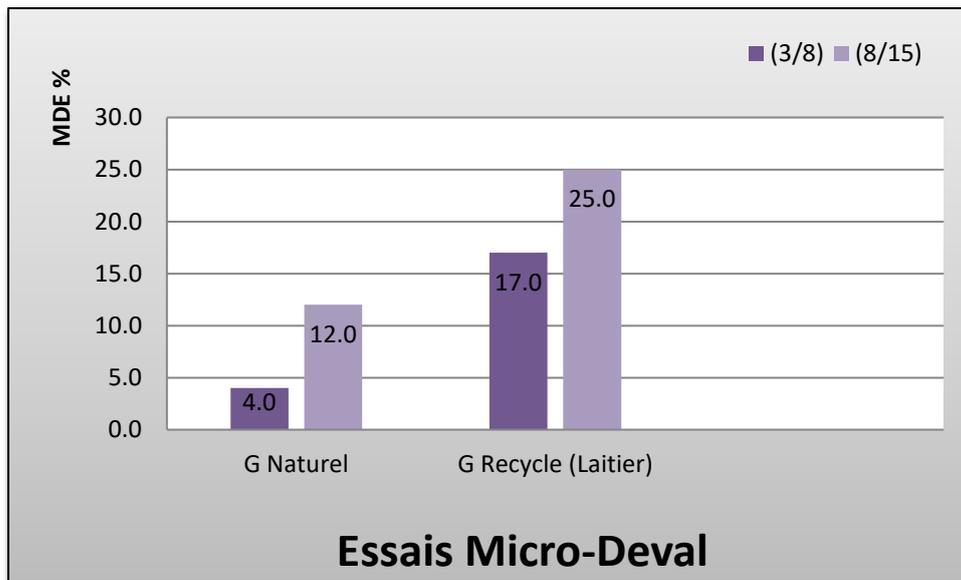


Figure (IV. 4) Résultats de Essai Micro-Deval (MDE)

IV.2.3.4 Masse volumique apparente (Mvapp)

Tableau (IV. 7) Résultats de Masse volumique apparente (Mvapp)

	Classe	Mv app Kg/m ³
Granulats Naturel	(0/5)	1390
	(3/8)	1470
	(8/15)	1480
Granulats Recyclé Laitier	(3/8)	1210
	(8/15)	1230

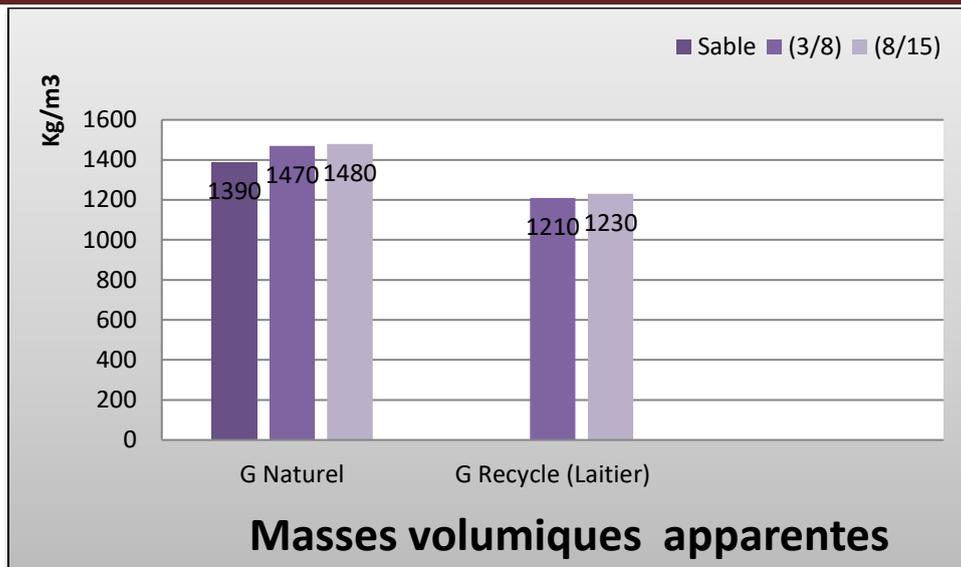


Figure (IV. 5) Résultats de Masse volumique apparente (Mvapp)

Les masses volumiques des granulats recyclés que ce soit apparentes (Mv app) sont sensiblement inférieures à celles des granulats naturels. Ceci peut être expliqué par l’existence de la pâte cimentaire collée aux granulats recyclés qui est poreuse d’une part et la nature (densité intrinsèque)des roches sources de ces granulatsd’autre part.

IV.2.3.5 Masse volumique absolue (Mvabs)

Tableau (IV. 8) Masse volumique absolue (Mvabs)

	Classe	Mv abs Kg/m ³
Granulats Naturel	(0/5)	2538
	(3/8)	2800
	(8/15)	2770
Granulats Recyclé Laitier	(3/8)	2490
	(8/15)	2505

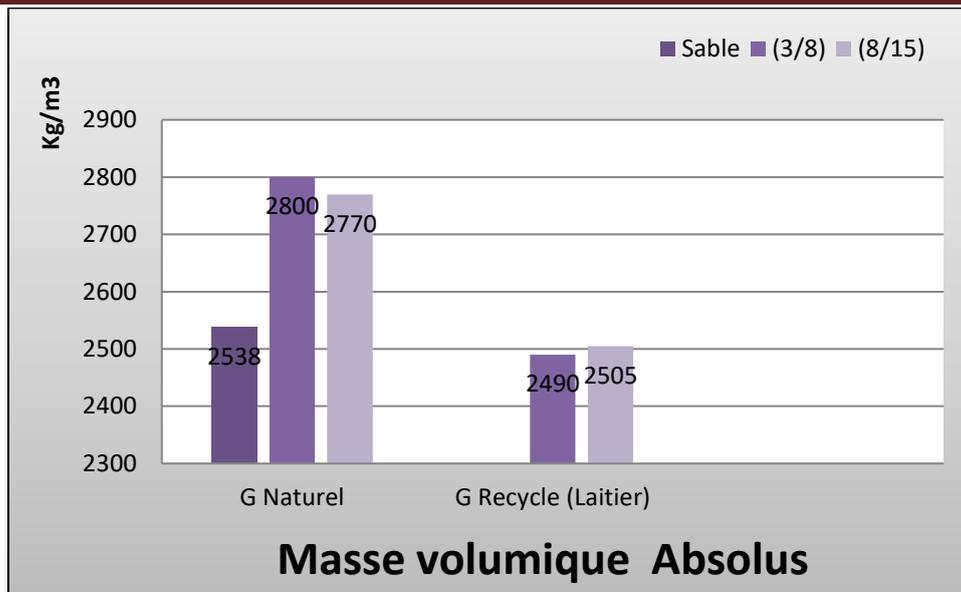


Figure (IV. 6) Masse volumique absolue (Mvabs)

Les masses volumiques des granulats recyclés que ce soit apparentes ou absolues (Mv app) (Mvabs) sont sensiblement inférieures à celles des granulats naturels. Ceci peut être expliqué par l’existence de la pâte cimentaire collée aux granulats recyclés qui est poreuse.

D’après les resultants trouver on remarque que la masse volumique absolue du gravier naturel entre de (2770 et 2800 kg/m³) et graviers recyclés entre de (2440 et 2560 kg/m³) ce qui indique que les gravier naturels sont plus dense (densité élevée) par rapport aux graviers recyclés.

IV.2.2.6 Taux d’absorption d’eau (Ab %)

Tableau (IV. 9) Taux d’absorption d’eau (Ab %)

	Classe	Absorption (%)
Granulats Naturel	(3/8)	1
	(8/15)	0.8
Granulats Recyclé Laitier	(3/8)	4.5
	(8/15)	4.4

On remarque que le taux d’absorption des granulats naturels est plus important que les granulats naturels, cela est dû à la mauvaise compacité par rapport aux granulats naturels.

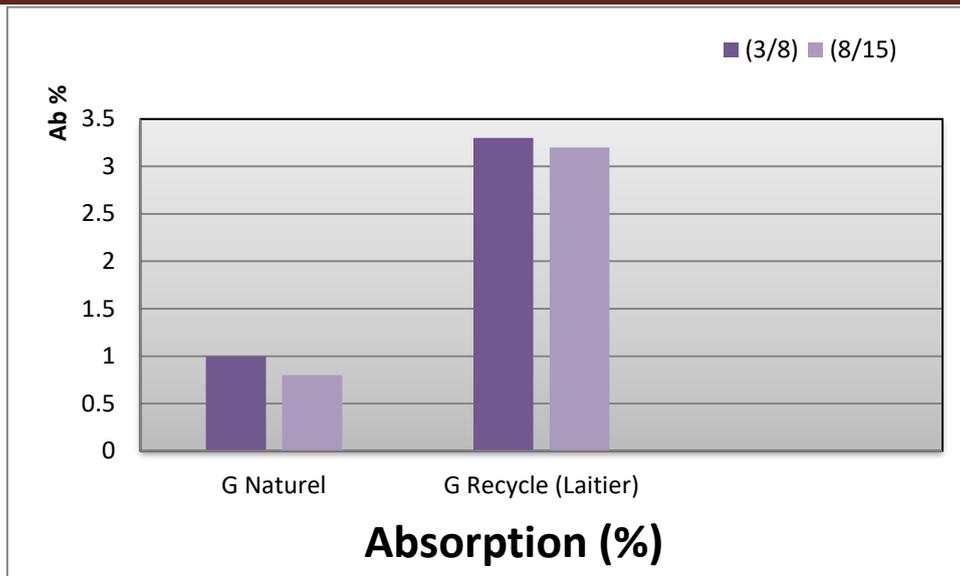


Figure (IV. 7) d'absorption d'eau (Ab %)

IV.2.2.7 La propreté des sables (ES, VB)

Tableau (IV. 10) Équivalent de sable avant de se laver

	Ech 1	Ech2
Mesurer h1	19.4	19.7
Mesurer h2	8.7	9.1
Mesurer h'2	9.3	9.4
ES (PISTON)= $100 \cdot h^2/h1$	44.8	46.2
Es moyen (PISTON)	45.5	
ES (VISUEL)= $100 \cdot h^2/h1$	47.9	47.7
Esmoyen (VISUEL)	47.8	

Tableau (IV. 11) Équivalent de sable après lavage

	Ech 1	Ech2
Mesurer h1	11.9	11.4
Mesurer h2	9.5	9
Mesurer h'2	9.7	9.7
ES (PISTON)= $100 \cdot h^2/h1$	79.8	78.9
Es moyen (PISTON)	79.4	
ES (VISUEL)= $100 \cdot h^2/h1$	81.5	85.1
Esmoyen (VISUEL)	83.3	

IV.2.2.8 Résultats d’essai de carbonate

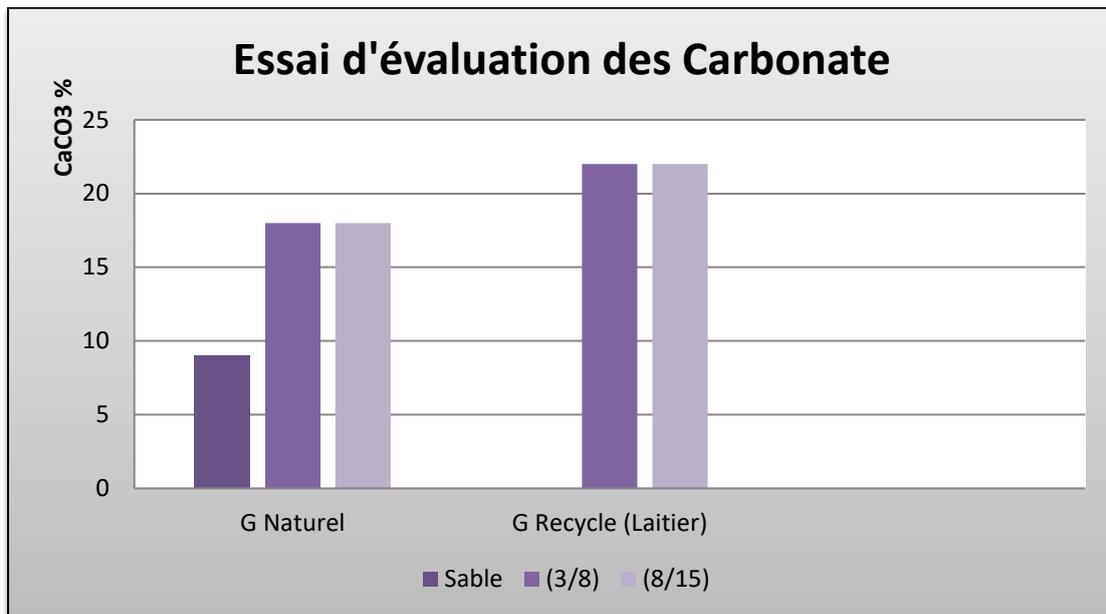


Figure (IV. 8) Résultats d’essai de carbonate

IV.3 Analyse des résultats de caractérisation :

IV.3.1 l’état frais : Les résultats de l’essai (affaissement au cône d’Abrams) de caractérisation des bétons à l’état frais sont récapitulés dans le Tableau (IV-12).

Tableau(IV.12) : Caractéristiques des bétons à l’état frais.

Identification	Type de béton	Béton à haute performance à base de laitier	Béton à haute performance recyclé à base de laitier
Caractéristique à l’état frais	Affaissement (cm)	17	18.5

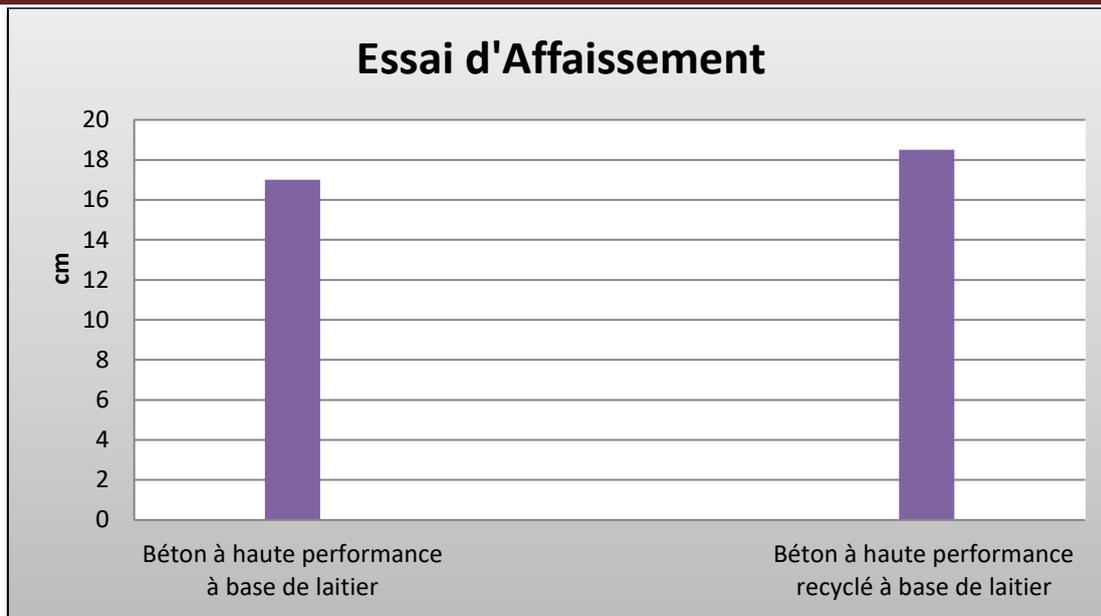


Figure (IV. 9) Affaissement des bétons

Par leur nature poreuse et absorbante, les granulats recyclés affectent la maniabilité des BHPLR en comparaison avec celle des BHPL avec granulats naturels plus compact et moins poreux.

L'ensemble des mélanges des BHP présentent des bétons très plastiques ou fluides avec des valeurs d'affaissements entre 170 mm à 180.5 mm.

IV.3.2 L'état durci :

IV.3.2.1 Résistance en compression :

L'ensemble des résultats des résistances en compression f_{cj} aux différentes échéances est présenté dans le Tableau IV-13.

Tableau (IV.13) : Récapitulatif des valeurs des résistances en compression aux différentes échéances des bétons (BHPL).

Types de béton	Ages (jours)	Charges (KN)	Charge s moy (KN)	Sections des éprouvettes (cm ³)	Contraintes (MPa)	Contraintes moy (MPa)
BHPL	à 7	574,273	792,682	6430,72	28,56	39,423
		1081,189			53,77	
		722,597			35,939	
	à 14	814,275	1088,148	6430,72	40,499	54,120
		972,76			48,381	
		1477,41			73,481	
	à 28	1333,62	858,468	6430,72	55,584	58,728
		783,28			58,22	
		458,504			62,38	
	à 56	1057,269	994,988	6430,72	71,330	67,703
		1110,265			63,957	
		817,432			67,804	

Toutes les valeurs données sont des moyennes arithmétiques, cependant on remarque que la dispersion des résultats obtenus est particulièrement moyenne.

Les résultats indiquent que la résistance en compression augmente lorsque le rapport E/L diminue. Cependant, on constate que le comportement global à 56 jours du BHPL est meilleur.

La Figure (IV.10) Présente les évolutions des résistances en compression en fonction du temps (7, 21 28 et 56 jours).

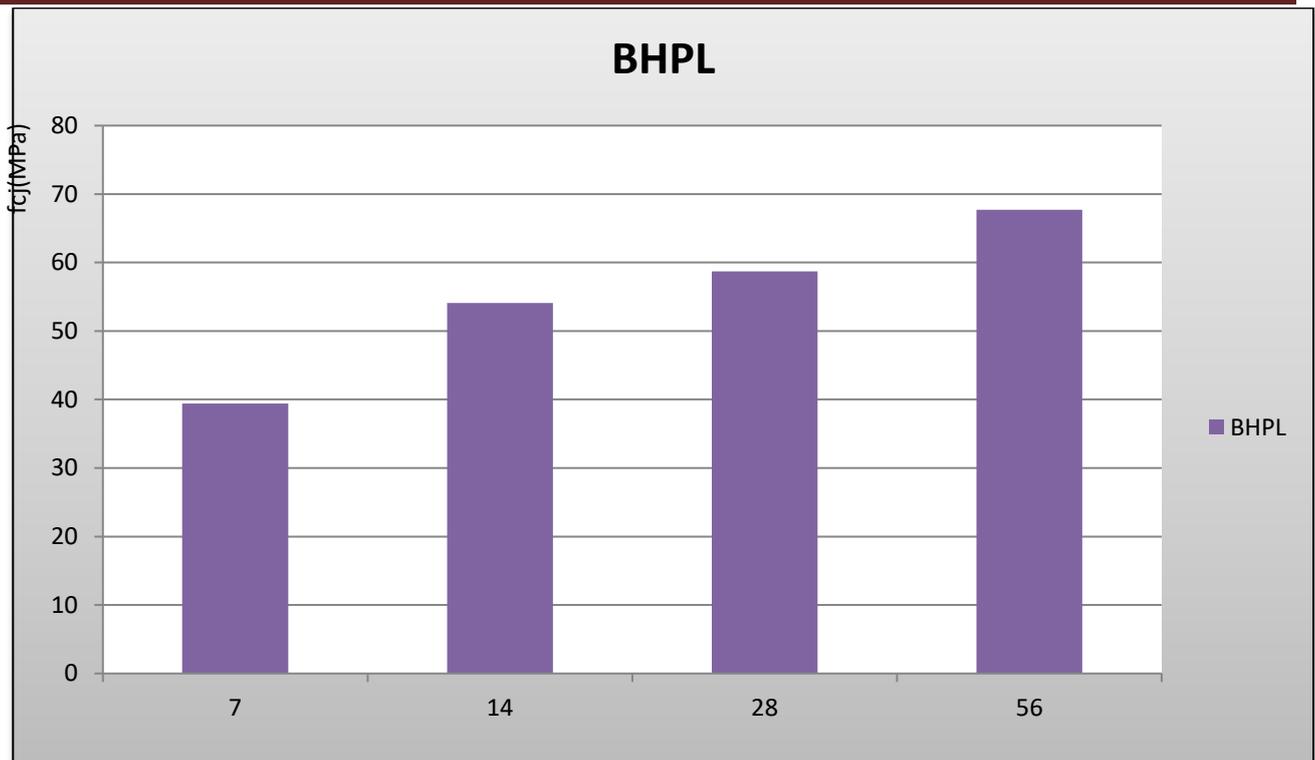


Figure (IV.10) : Histogramme d'évolution des résistances à la compression en fonction du temps

L'analyse des résistances en compression montre des valeurs supérieures pour le BHPL (à base des laitiers).

▪ **Les résistances élevées du béton HP sont liées :**

A l'utilisation du superplastifiant GRANITEX dans la formulation du béton à hautes performances qui peut avoir une influence bénéfique sur la résistance mécanique.

A la présence d'une quantité d'ajout (Laitier) comme addition dans le BHP, ce qui peut également avoir une action positive sur la compacité (réduire le volume des vides entre les granulats) et par conséquent sur la résistance mécanique.

On peut ajouter des courbes pour mieux illustrer cette évolution :

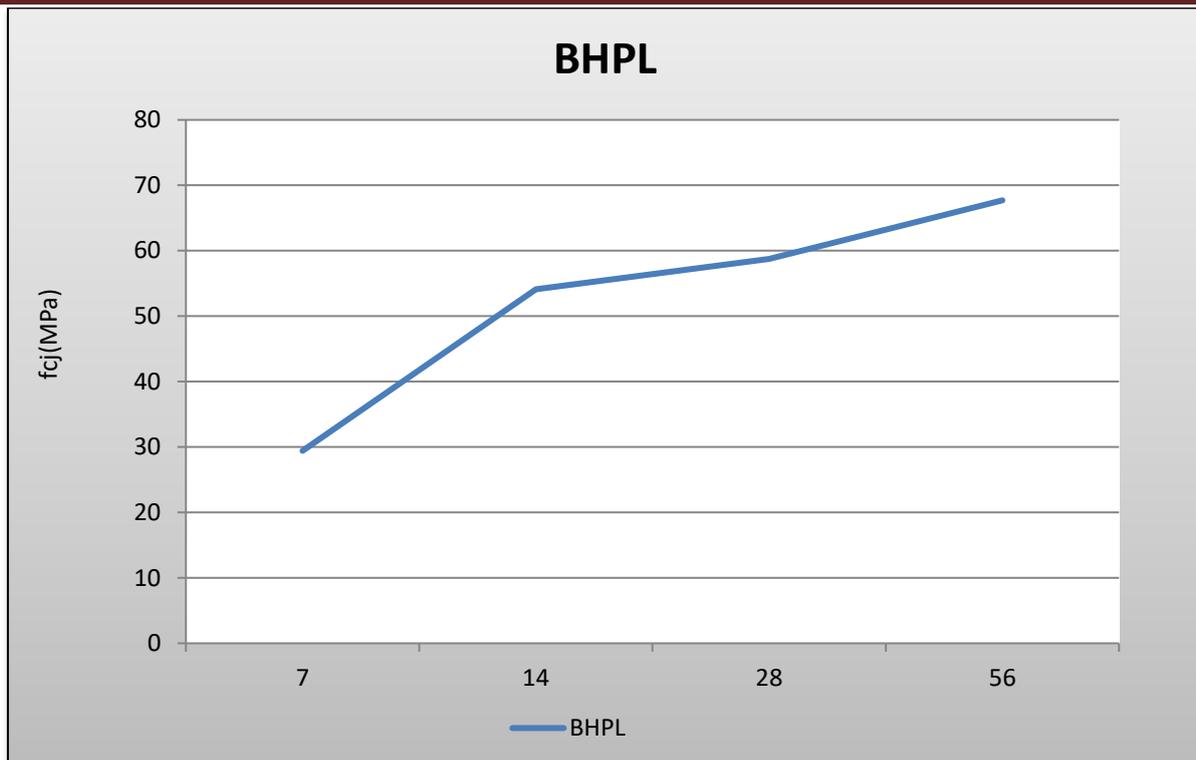


Figure (IV.11) : Evolution de la résistance à la compression des bétons en fonction du temps

On voit nettement une augmentation remarquable de la résistance du BHPL

La figure (IV.11) montre que les résistances en compression des BHP augmentent avec le temps, dû à l'hydratation du ciment et de l'accumulation de produits d'hydratation qui comble certains des espaces interstitiels disponibles dans la matrice cimentaire de béton, résultant une amélioration des performances mécaniques.

On voit nettement une augmentation remarquable de la résistance du BHPL

IV.3.2.2 Résistance en traction par flexion :

Les résultats des essais de traction effectués à 7, 21, 28.56 jours sont consignés de la manière suivante dans le tableau (IV.14).

Tableau (IV.14) : Résultats de la résistance en traction des bétons

Types de béton	Age (jours)	Charge (KN)	Charge moyenne (KN)	Contrainte (MPa)	ftjmoy (MPa)
BHPL	7	14,31	14,366	1,432	1,439
		14,22		1,457	
		14,57		1,429	
	14	15,288	14,451	1,529	1,445
		13,405		1,340	
		14,662		1,466	
	28	10,490	13,102	1,210	1,463
		16,713		1,671	
		12,105		1,510	
	56	16,933	15,066	1,693	1,502
		14,48		1,434	
		13,786		1,378	

En analysant les données du tableau (IV.14), on constate que, la résistance à la traction par flexion croit avec celle de la résistance à la compression mais elle ne s'améliore pas dans les mêmes propositions. En général, elle a tendance à augmenter quand le rapport E/L diminue, elle a aussi tendance à augmenter avec l'âge du béton, donc la résistance à la traction est une caractéristique importante du matériau, même si elle n'est pas prise directement en compte dans les calculs.

La Figure (IV.12) présente les évolutions des résistances en traction en fonction du temps (7, 21, 28 et 56 jours).

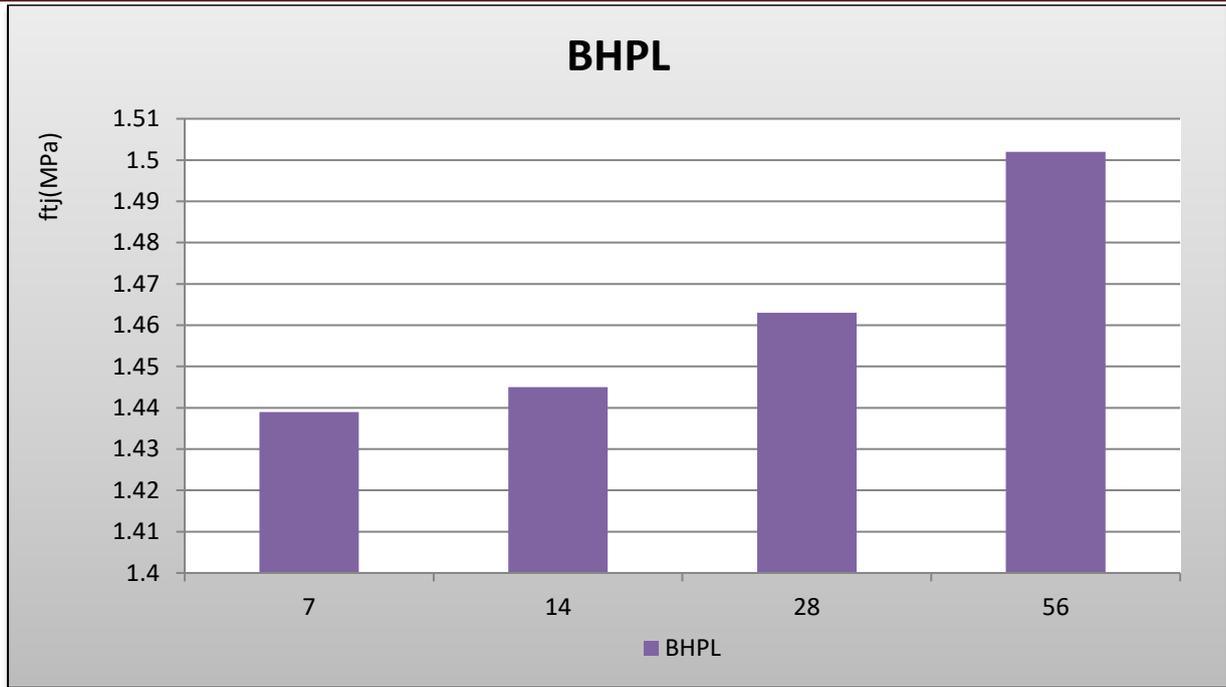


Figure (IV.12) : Evolutions des résistances en traction par flexion en fonction du temps

On s’aperçoit à la vue des accroissements obtenus (7,14,28 et 56 jours), le BHPL présente également en traction des valeurs supérieures.

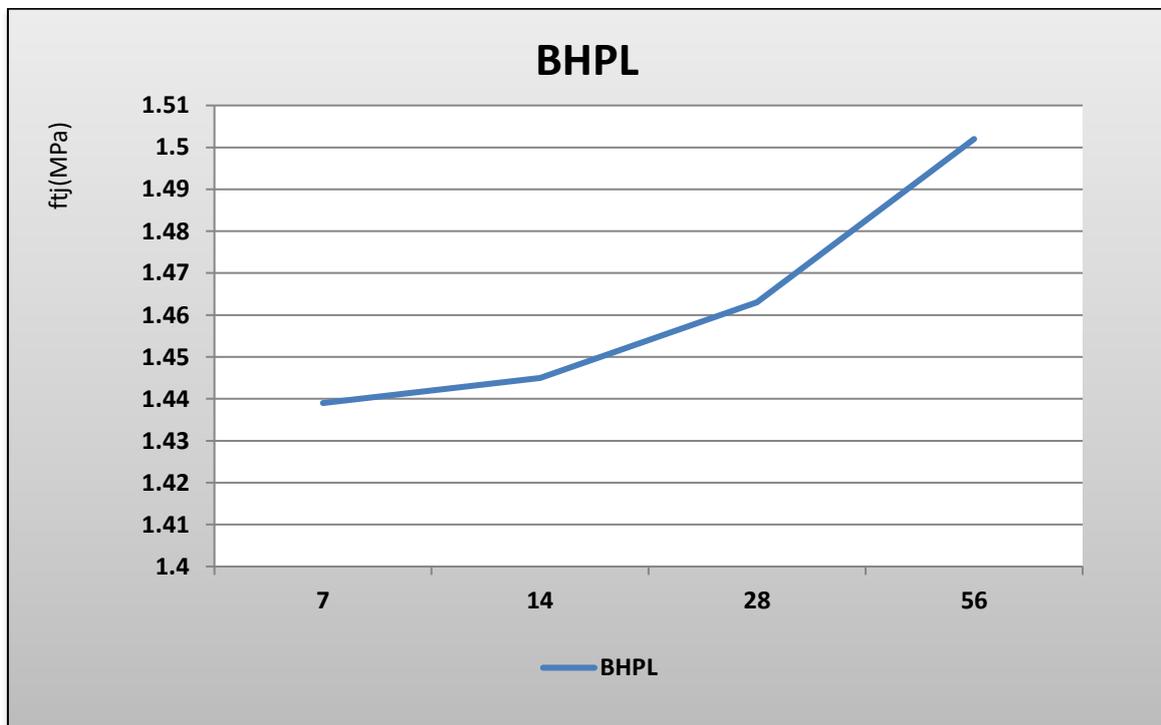


Figure (IV.13) : La résistance en traction pour bétons en fonction du temps

Tableau (IV15) : Récapitulatif des valeurs des résistances en compression aux différentes échéances des bétons (BHPLR 25%GN+75%GR).

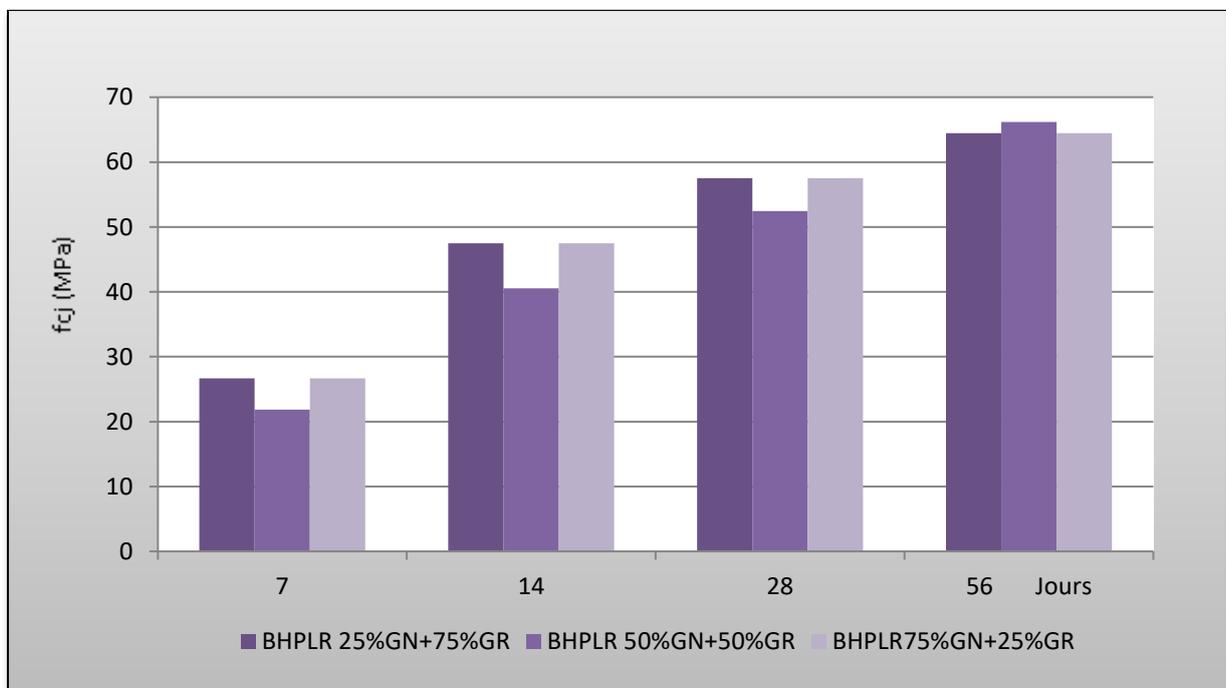
Types de béton	Ages (jours)	Sections des éprouvettes (mm ²)	Contraintes (MPa)	Contraintes moy (MPa)
BHPLR 25%GN+75%GR	à 7	20106 ,193	7,781	26,666
			39,148	
			18,649	
	à14	20106 ,193	35,798	47,462
			40,254	
			45,508	
	à 28	20106 ,193	60,346	57,501
			54,458	
			42,469	
	à56	20106 ,193	62,415	64,430
			66,697	
			69,345	

Tableau (IV.16) : Récapitulatif des valeurs des résistances en compression aux différentes échéances des bétons (BHPLR 50%GN+50%GR).

Types de béton	Ages (jours)	Sections des éprouvettes (mm ²)	Contraintes (MPa)	Contraintes moy (MPa)
BHPLR 50%GN+50%GR	à 7	20106 ,193	20,430	21,860
			25,770	
			34,330	
	à14	20106 ,193	42,235	40,520
			45,241	
			47,451	
	à 28	20106 ,193	49,330	52,430
			51,745	
			53,741	
	à56	20106 ,193	72,341	66,160
			73,684	
			75,387	

Tableau (IV.17) : Récapitulatif des valeurs des résistances en compression aux différentes échéances des bétons (BHPLR75%GN+25%GR).

Types de béton	Agés (jours)	Sections des éprouvettes (mm ²)	Contraintes (MPa)	Contraintes moy (MPa)
BHPLR 75%GN+25%GR	à 7	20106 ,193	12,237	26,666
			42,022	
			25,739	
	à14	20106 ,193	40,499	47,462
			48,381	
			53,508	
	à 28	20106 ,193	66,258	57,501
			58,234	
			48,013	
	à56	20106,193	73,600	64,430
			60,332	
			59,360	



Figure(IV.14) : Histogramme des valeurs des résistances en compression aux différentes échéances des bétons

Les résultats de l'essai de comprissions sur éprouvette en béton à base de granulat recyclé (béton démolé) sont présentées dans les tableaux (IV.15, IV.16 et IV.15).

La résistance à la compression des bétons diminue lorsque le pourcentage en granulats recyclés augmente. En effet, il a été montré que le rapport Eau/ciment est le facteur le plus important qui conditionne la résistance à la compression d'un béton, ainsi que la qualité du béton. L'adhérence entre le mortier et le gros granulat influence considérablement la résistance à la compression, ce qui traduit la diminution de la résistance du béton à base de granulats recyclés.

Tableau (IV.18) : Récapitulatif des valeurs des résistances en Traction aux différentes échéances des bétons (BHPLR25%GN+75%GR).

Types de béton	Agés (jours)	Sections des éprouvettes (mm ²)	Contraintes (MPa)	Contraintes moy (MPa)
BHPLR 25%GN+75%GR	à 7	20106 ,193	0,925	0,820
			0,834	
			0,700	
	à 14	20106 ,193	1,025	1,340
			1,345	
			1,641	
	à 28	20106 ,193	1,693	1,740
			1,741	
			1,766	
	à 56	20106 ,193	1,741	1,800
			1,788	
			1,870	

Tableau (IV.19) : Récapitulatif des valeurs des résistances en Traction aux différentes échéances des bétons (BHPLR 50%GN+50%GR).

Types de béton	Ages (jours)	Sections des éprouvettes (mm ²)	Contraintes (MPa)	Contraintes moy (MPa)
BHPLR 50%GN+50%GR	à 7	20106 ,193	1,232	1,130
			1,102	
			1,040	
	à14	20106 ,193	1,365	1,480
			1,410	
			1,658	
	à 28	20106 ,193	1,741	1,850
			1,847	
			1,961	
	à56	20106 ,193	1,814	1,870
			1,870	
			1,910	

Tableau (IV.20) : Récapitulatif des valeurs des résistances en Traction aux différentes échéances des bétons (BHPLR 75%GN+25%GR).

Types de béton	Ages (jours)	Sections des éprouvettes (mm ²)	Contraintes (MPa)	Contraintes moy (MPa)
BHPLR 75%GN+25%GR	à 7	20106 ,193	0,704	0,750
			0,743	
			0,801	
	à14	20106 ,193	0,932	0,940
			0,957	
			0,929	
	à 28	20106 ,193	1,810	1,530
			1,871	
			0,910	
	à56	20106,193	1,693	1,710
			1,634	
			1,778	

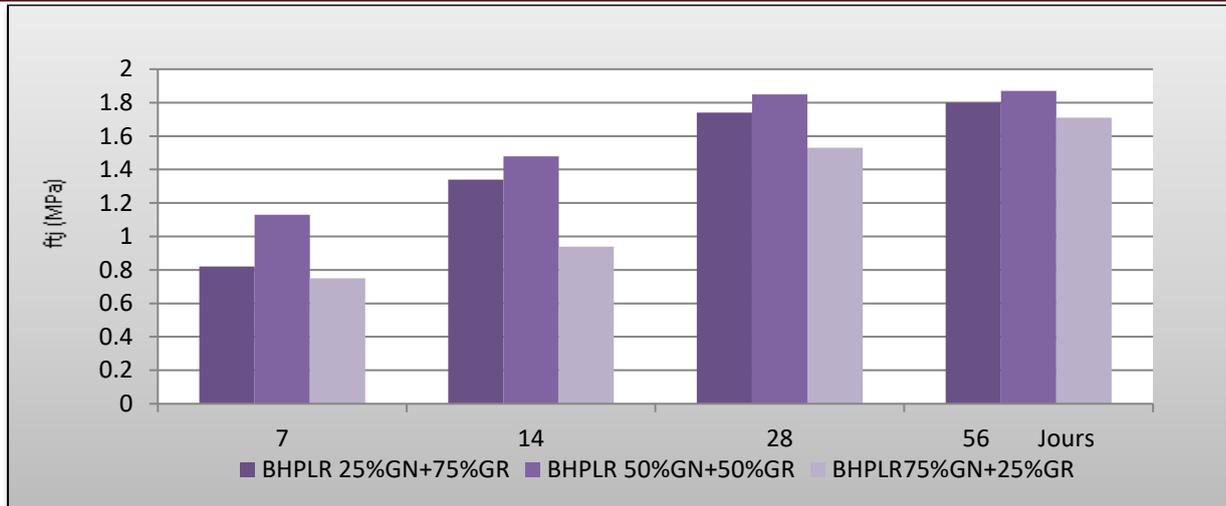


Figure (IV.15) : Récapitulatif des valeurs des résistances en Traction aux différentes échéances des bétons

Les résultats de l’essai de traction sur prisme en béton à base de granulat recyclé (béton démolé) sont présentés dans les tableaux (IV.18,IV.19 et IV.20).

La résistance à la traction des bétons augmente lorsque le pourcentage en granulats recyclés augmente. En effet, il a été montré que le rapport Eau/L est le facteur le plus important qui conditionne la résistance à la traction d’un béton, ainsi que la qualité du béton.

Dans le tableau (IV.21)on vous propose de présenter les résultats des résistances en compression des bétons à hautes performances à base de fumée de silice condensée, de Cendre volante,Laitier à haut fourneau et Fillers calcaires réalisés par Chahidi Elouzani pour faire une comparaison avec nos résultats.

Tableau (IV.21) : Comparaison des résultats expérimentaux des bétons à hautes performance

BHP à base de	Age (jours)	Résistance moyenne à la compression MPa
Fumée de silice condensée [ChahidiElouzani]	7	33
	21	54.83
	28	60
Cendre volante [ChahidiElouzani]	7	41.1
	21	55.27
	28	63.04
Laitier à haut fourneau [ChahidiElouzani]	7	40,50
	21	56,87
	28	59,98
Fillers calcaires [ChahidiElouzani]	7	44.5
	21	51.97
	28	58.56

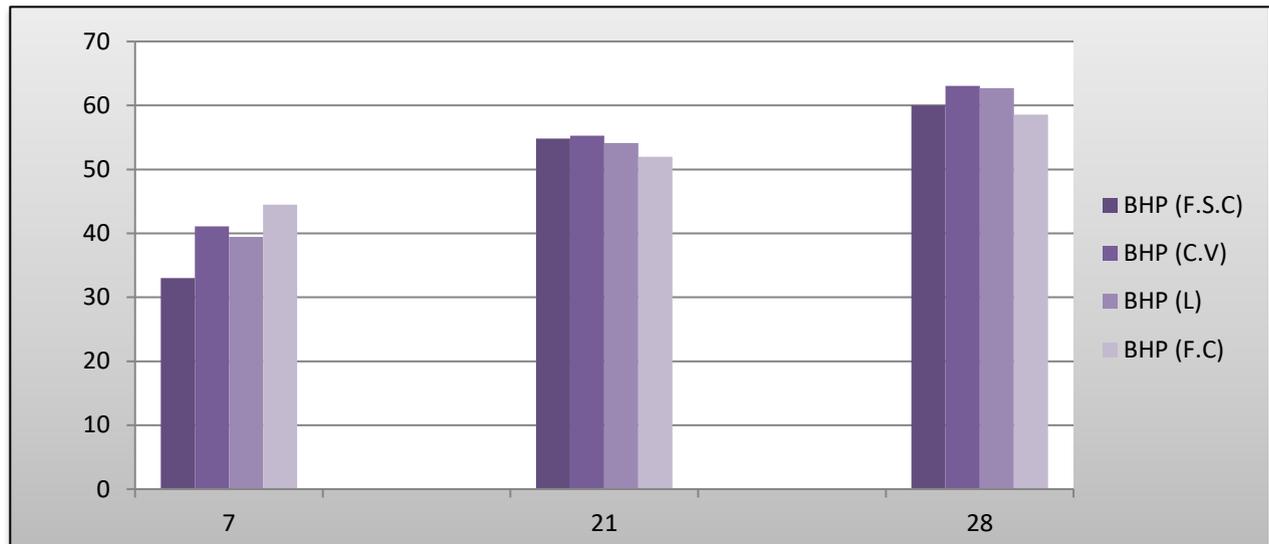


Figure (IV.16) : Développement de la résistance à la compression de béton HP contenant des additions minérales

La figure (IV.15), représente l'influence des additions minérales sur la résistance à la compression exercée par l'adjonction de 10 % en masse (par rapport à la teneur en ciment), respectivement de filler de calcaire, de cendre volante, de laitier de haut fourneau et de fumée de silice. On voit nettement qu'elle peut atteindre les 59,98MPa à 28 jours (laitier) en comparaison avec nos résultats (58,728 MPa)

IV.4 Conclusion

Cette étude nous a permis de mener une caractérisation physico-mécanique des différents matériaux utilisés, de choisir les méthodes de formulation appropriées et de voir l'influence de la nature des granulats et des additions minérales sur les propriétés du béton à l'état frais, l'influence des différents taux de substitution de granulats et d'additions minérales sur les propriétés physiques et le comportement mécanique des BHPL. A l'issue de cette étude les constatations suivantes peuvent être dégagées :

- D'après les résultats de la caractérisation des constituants entrant dans la formulation des BHP d'étude, on peut conclure que les matériaux utilisés répondent aux exigences normatives.
- La méthode de formulation choisie est une combinaison de deux approches de formulation.
- La maniabilité des BHP est très affectée par la nature des granulats.
- On peut constater que l'introduction des granulats recyclés en substitution aux granulats naturels influence considérablement les propriétés des BHPL à l'état durci. Cela est dû à la densité plus élevée de ces granulats naturels.

Cette étude expérimentale a touché une composition différente de BHPL et un BHPLR (à base de granulats recyclés). Les résultats trouvés permettent de mettre en évidence que les bétons de granulats recyclés présentent des performances systématiquement supérieures.

Conclusions générales

CONCLUSIONS GÉNÉRALES

Le granulat recyclé est le granulat résultant de la transformation de matériaux inorganiques antérieurement utilisés en construction. Dans cette catégorie se rangent des granulats, comme le béton concassé, résoudre le manque de granulats naturels, et de réduire les déchets mis en décharge.

En Algérie, la quantité de déchets solides générée annuellement de déchets de construction ou de démolition est générée mais rarement recyclée.

Le béton fabriqué avec des granulats provenant du recyclage, présente généralement de bonnes qualités de maniabilité, durabilité et de résistance selon les résultats obtenues. La résistance en compression varie selon la résistance du béton initial et le rapport eau/ liant du nouveau béton. On peut l'accroître en utilisant une teneur plus élevée et en remplaçant une partie des granulats recyclés dans le béton par des granulats naturels. Le béton neuf aura aussi une masse volumique plus faible. Comme pour toute nouvelle source de granulats, il faut contrôler, la granulométrie et les autres propriétés des granulats recyclés.

Le travail expérimental présenté dans ce mémoire est une contribution à l'élaboration et à l'amélioration des performances des bétons à hautes performances (recyclés) à base de matériaux et sous-produits locaux sous forme de granulats recyclés et d'additions minérales. L'incorporation de ces sous-produits présente des intérêts technico-économiques et environnementaux. La substitution des granulats naturels traditionnellement utilisée dans les bétons à hautes performances par les granulats recyclés doit non seulement satisfaire les critères d'ouvrabilité et de performance mécanique, mais présente également des avantages pour la durabilité. Le programme expérimental réalisé dans le cadre de cette étude a permis de comprendre et d'apporter des éléments de réponse aux questions posées qui ont constitué les objectifs du présent travail.

Cette étude a mis en évidence dans quelle mesure l'utilisation de granulats recyclés influence les propriétés physiques et mécaniques des bétons HP selon le rapport E/L de la matrice. L'influence de la qualité du granulat recyclé a également été analysée, en comparant des bétons réalisés avec des granulats recyclés de laboratoire et des granulats naturels. Tous les mélanges de béton à hautes performances à base des granulats recyclés BHPLR présentent des résistances mécaniques à la compression et à la traction par flexion plus faibles que les mélanges de BHPL à base des granulats naturels. Néanmoins les mélanges de béton à base de 25% et 75% des granulats recyclés présentent des résistances mécaniques proches à celle de béton HP à base des granulats naturels.

La perte des résistances mécaniques est de l'ordre de 13% à 30% au maximum. Donc on peut conclure que ces formulations peuvent être utilisées pour la construction des structures.

BIBLIOGRAPHIE

[**Dr.ir.G.De Schutter UGent ir.arch.J.Apers 2007**]. Dr.ir.G.De Schutter UGent ir.arch.J.Apers « Le béton à hautes performances, Dossier Ciment, Vol.40 », (juillet 2007), 1 – 12.

[**LES EXPERTS DE CIMBETON. 2009**] LES EXPERTS DE CIMBETON « Les bétons : formulation, fabrication et mise en œuvre, fiches techniques, Tome 2, 50 – 107 », 2009.

[**W. Ladaoui 2010**]. W. Ladaoui « Etude expérimentale du comportement thermos-Hydro-mécanique à long terme des BHP destinés aux ouvrages de stockage des déchets radioactifs. Thèse de DOCTORAT, spécialité Génie Civil, université de TOULOUSE » (décembre 2010).

[**Yves MALIER 1992**]. Yves MALIER « L'utilisation du BHP dans une approche "système" de la construction » 1992, p. 3 - 5

[**PREMIUM Engineering**]. Les bétons hautes performances –BHP, 1- 6.

https://fr.wikipedia.org/wiki/B%C3%A9ton_hautes_performances

<https://lepaveblog.com/2017/01/08/habiter-a-grande-hauteur-le-pari-fou-de-la-burj-khalifa-a-dubai/>

[**P.-C.Aïtcin 1998**] P.-C.Aïtcin « High-Performance Concrete, 140 -156» 1998.

<https://ubi.academia.edu/imedbeghoura>

[**Hermann,Kurt. 2017**] Hermann,Kurt « Bulletin du ciment, les ajouts : les fillers, 2 – 6 » 2017.

[**S.Caré, R. Linder, V. Baroghel-Bouny, F. de Larred, Y. Charonnat 2000**]. S.Caré, R. Linder, V. Baroghel-Bouny, F. de Larred, Y. Charonnat « Effet des additions minérales sur les propriétés d'usage des bétons plan d'expérience et analyse statistique » Février 2000.

<http://www.cstc.be/homepage/index.cfm?cat=publications&sub=bbricontact&pag=Contact19&art=262>

[**Jean FESTA, Georges DREUX 1998**]. Jean FESTA, « Georges DREUX Nouveau guide du béton et de ses constituants. 205 – 285 » 1998.

<http://www.wikitp.fr/essais-mateacuteriaux-granulaires/essai-los-angeles>

[**K. Mechabek et S. KHattab** 2014]. K. Mechabek et S. KHattab « Etude expérimentale du comportement mécanique d'un béton à hautes performances avec l'ajout de la fumée de silice, spécialité Génie Civil, université de IBN khaldoun de Tiaret » 2014.

[MehamedNacerGuettache2002] MehamedNacerGuettache. «Contribution à la valorisation des laitiers de haut fourneauD'EL Hadjar dans le domaine de la construction – Caracterisation des matériaux élaborés», Université Mentouri- Constantine thèse de doctorat, 28/04/2002.

[NF P 18-5061992] NF P 18-506 (mars 1992)Additions pour béton hydraulique –Laitier vitrifié moulu de haut fourneau.

[Menadi SOUAD 2011] Menadi SOUAD. « Valorisation du laitier siderurgique de complexe D'EL HADJAR étudedu comportement mécanique du béton de laitier »; Université de Annaba, Thèse de Magistère.,2011

[LAKHAL RIDHA 2011] LAKHAL RIDHA. « Élaboration des bétons à hautes performances a base des sous-produit locaux »; Université de Annaba, Thèse deMagister, 2011.

[MehamedNacerGuettache2002] MehamedNacerGuettache. «Contribution à la valorisation des laitiers de haut fourneauD'EL Hadjar dans le domaine de la construction – Caracterisation des matériaux élaborés», Université Mentouri- Constantine thèse de doctorat, 28/04/2002.

[NF P 18-5061992] NF P 18-506 (mars 1992)Additions pour béton hydraulique –Laitier vitrifié moulu de haut fourneau.

[Menadi SOUAD 2011] Menadi SOUAD. « Valorisation du laitier siderurgique de complexe D'EL HADJAR étudedu comportement mécanique du béton de laitier »; Université de Annaba, Thèse de Magistère.,2011

[LAKHAL RIDHA 2011] LAKHAL RIDHA. « Élaboration des bétons à hautes performances a base des sous-produit locaux »; Université de Annaba, Thèse deMagister, 2011.

[Hannequart& E. Schamp, 2010] Hannequart& E. Schamp, « l'utilisation de granulatsissus du recyclage », Matriciel 4ème édition, Bruxelles, Décembre 2010

[BenamraneToufik Amine2015] BenamraneToufik Amine, « caractérisation aux moyens des essais non destructifs (NDT) et essai direct (ED)d'un béton recycléadjuvanté à base des matériauxlocaux », mémoire master, Juin2015.

[GDCBFNB, 1994]Guide des déchets de chantier de bâtiment Fédération Nationale du

Bâtiment, Direction de l'habitat et de la Construction, Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie-septembre 1994. Cité dans (Raphaël, 2003).

[UNPG, 2001]. Union Nationale des Producteurs de Granulats. Le marché des granulats. Cité dans (Raphaël, 2003).

[Charlot, 1993] Charlot-Valdieu C. (1993). Les déchets de démolition ou de chantier, état des lieux Observatoire Technique de l'Europe du Bâtiment-CSTB. Cité dans (Raphaël, 2003). [36] [Thai-Hoa V, 2009] Thai-Hoa V (2009). Caractérisation de la phase solide et transferts de gaz dans les milieux poreux saturés. Etude expérimentale et modélisation appliquées à la diffusion de l'hydrogène dans les matériaux cimentaires. Spécialité Génie Civil. Université Toulouse. Pp.24-25.

[Ait Mohamed Amer Adam, 2017] Ait Mohamed Amer Adam, « valorisation des matériaux de démolition dans la construction », thèse de doctorat, université Hassiba Ben Bouali à Chalef, février 2017.

[Rao A, 2005] Rao A., « Experimental Investigation on Use of Recycled Aggregates and concrete ». Thesis submitted to the Department of Civil Engineering, Indian Institute of technology Kanpur; 2005.

[Poon CS., Shui ZH., Lam L., Kou SC, 2004] Poon CS., Shui ZH., Lam L., Kou SC., « Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of hardened concrete », Cement and Concrete Research, vol. 34, n°1, 2004, p. 31-36.

[Corinaldesi V, Moriconi, 2009] Corinaldesi V, Moriconi G, Influence of mineral additions on the performance of 100 % recycled aggregate concrete. Construction and Building Materials, 2009; 23(8):2869-2876.

[Ravindrarajah RS, Tam TC, 1985] Ravindrarajah RS, Tam TC, Properties of concrete made with crushed concrete as coarse aggregate. Magazine of concrete research, 1985; 37(130):29-38

[BOUFEDAH BADISSI Ahmed 2011] BOUFEDAH BADISSI Ahmed. « Influence de la granularité (classe granulaire 4/22.4) sur les caractéristiques des granulats et sur les propriétés des bétons ordinaires»; Université MENTOURI CONSTANTINE, mémoire de Magister, 2011.

[Mehamed Nacer Guettache 2002] Mehamed Nacer Guettache. « Contribution à la valorisation des laitiers de haut fourneau D'EL Hadjar dans le domaine de la construction – Caractérisation des matériaux élaborés », Université Mentouri- Constantine thèse de

doctorat, 28/04/2002.

[NF P 18-5061992] NF P 18-506 (mars 1992) Additions pour béton hydraulique –Laitier vitrifié moulu de haut fourneau.

[Menadi SOUAD 2011] Menadi SOUAD. « Valorisation du laitier sidérurgique de complexe D'EL HADJAR étude du comportement mécanique du béton de laitier »; Université de Annaba, mémoire de Magistère., 2011

[LAKHAL RIDHA 2011] LAKHAL RIDHA. « Élaboration des bétons à hautes performances à base des sous-produits locaux »; Université de Annaba, mémoire de Magistère, 2011.

[Hannequart & E. Schamp, 2010] Hannequart & E. Schamp, « l'utilisation de granulats issus du recyclage », Matriciel 4^{ème} édition, Bruxelles, Décembre 2010

[Benamrane Toufik Amine 2015] Benamrane Toufik Amine, « caractérisation aux moyens des essais non destructifs (NDT) et essai direct (ED) d'un béton recyclé adjuvanté à base des matériaux locaux », mémoire master, Juin 2015.

[GDCBFNB, 1994] Guide des déchets de chantier de bâtiment Fédération Nationale du Bâtiment, Direction de l'habitat et de la Construction, Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie-septembre 1994. Cité dans (Raphaël, 2003).

[UNPG, 2001]. Union Nationale des Producteurs de Granulats. Le marché des granulats. Cité dans (Raphaël, 2003).

[Charlot, 1993] Charlot-Valdieu C. (1993). Les déchets de démolition ou de chantier, état des lieux Observatoire Technique de l'Europe du Bâtiment-CSTB. Cité dans (Raphaël, 2003). [36] [Thai-Hoa V, 2009] Thai-Hoa V (2009). Caractérisation de la phase solide et transferts de gaz dans les milieux poreux saturés. Etude expérimentale et modélisation appliquées à la diffusion de l'hydrogène dans les matériaux cimentaires. Spécialité Génie Civil. Université Toulouse. Pp.24-25.

[Ait Mohamed Amer Adam, 2017] Ait Mohamed Amer Adam, « valorisation des matériaux de démolition dans la construction », thèse doctorat, université Hassiba Ben Bouali à Chalef, février 2017.

[Rao A, 2005] Rao A., « Experimental Investigation on Use of Recycled Aggregates and concrete ». Thesis submitted to the Department of Civil Engineering, Indian Institute of technology Kanpur; 2005.

[Poon CS., Shui ZH., Lam L., Kou SC, 2004] Poon CS., Shui ZH., Lam L., Kou SC., « Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and

compressive strength of hardened concrete », *Cement and Concrete Research*, vol. 34, n°1, 2004, p. 31-36.

[Corinaldesi V, Moriconi, 2009] Corinaldesi V, MoriconiG, Influence of mineral additions on the performance of 100 % recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*,2009; 23(8):2869-2876.

[Ravindrarajah RS, Tam TC, 1985] Ravindrarajah RS, Tam TC, Properties of concrete made with crushed concrete as coarse aggregate. *Magazine of concrete research*,1985; 37(130):29-