

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ IBN KHALDOUN DE TIARET



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 : Structures

Présenté par :

BEN HAOUARI MEHAMED

BEN ZENINA FETHI

Sujet du mémoire

**Effet de la maturation des granulats recyclés sur les
propriétés mécaniques d'un béton à hautes
performances (résistance)**

Mr. H. BEKKI

Président

Melle. Z. RENNAK

Rapporteur

Mr. B. SERBAH

Examineur

Mm. A. DRAOUI

Examineur

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciements

Le premier remerciement c'est pour le DIEU qui nous a permis d'être dans cette situation et d'avoir cette formation.

Un grand merci pour « Mme, RENNAK ZOHRA » qui a encadré ce travail, pour sa disponibilité, ainsi que son soutiens tout au long de la réalisation de ce projet.

Merci, chers parents, source d'énergie dans la vie, base de nos réussites et appui dans tous les temps.

Nous remercions les membres de jury et responsable de laboratoire matériaux de construction.

Merci à tous les enseignants du département de génie civil

Et tous nos amis de spécialités « structures ».

Dédicace

*Nous dédions ce mémoire
A nos chers parents nos mères et nos pères
pour leur patience, leur amour, leur soutien
et leurs encouragements.*

A nos frères.

A nos amis et nos camarades.

*Sans oublier tous les professeurs du
primaire ou de l'enseignement supérieur*

A gray scroll graphic with a vertical strip on the left side and rounded corners. The word "RESUME" is centered on the scroll in a bold, black, serif font.

RESUME

Résumé

Le granulat est considéré comme constituant essentiel dans la composition des bétons. Les granulats recyclés issus de déchets de démolition ont un aspect très important, d'une part préserver l'environnement et d'autre part protéger les ressources naturelles telles que les roches massives et les gisements alluvionnaires. Donc les granulats recyclés présentent un intérêt d'ordre économique et environnemental. Certes, une meilleure compréhension sur ce type de matériau est nécessaire pour promouvoir leur utilisation dans le secteur de construction. Dans ce contexte, cette recherche vise à étudier l'effet de la teneur en granulat recyclé GR et de leur maturité (temps écoulé entre la coulée et le concassage du béton parent à partir duquel le GR est obtenu) sur les propriétés mécaniques du béton à haute performance BHP.

À cette fin, cinq mélanges ont été fabriqués avec 0%, 25%, et 75% de GR de différentes échéances, 7 jours (GRP précoce) et 12 mois (GRM mature). Les propriétés mécaniques de tous les mélanges ont été déterminés. L'augmentation de la teneur en GRP précoce par rapport au GRM mature diminue le comportement mécanique du béton à haute performance recyclé BHPR. Il a été possible de comparer une situation commerciale, en utilisant le GRM mature, et une situation qui ne se produit que dans les travaux de recherche, comme c'est le cas de l'utilisation de GRP précoce. Cette étude montre l'importance de prendre en compte dans la recherche la maturité de GR afin de fournir des conclusions fiables et précises du comportement du béton commercial produit avec le GR.

Mots clés : Maturité de GR, Granulats recyclé, Béton à hautes performances, Propriétés mécaniques.

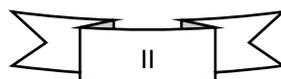


Abstract

Aggregate is considered to be an essential component of concrete composition. Recycled aggregates from demolition waste have a very important aspect, on the one hand preserving the environment and on the other hand protecting natural resources such as massive rocks and alluvial deposits. So recycled aggregates are of economic and environmental interest. Certainly, a better understanding of this type of material is necessary to promote their use in the construction sector. In this context, this research aims to study the effect of the RA recycled aggregate content and their maturity (time elapsed between casting and crushing of parent concrete from which the RA is obtained) on the mechanical properties of high-performance concrete HPC.

For this purpose, five mixtures were manufactured with 0%, 25%, and 75% RA of different maturities, 7 days (early EAR) and 12 months (mature MAR). The mechanical properties of all mixtures were determined. The increase in early EAR compared to mature MAR decreases the mechanical behaviour of recycled high-performance concrete RHPC. It has been possible to compare a business situation, using mature MAR, with a situation that only occurs in research, as is the case with early use of EAR. This study shows the importance of taking AR maturity into account in research in order to provide reliable and accurate conclusions about the behaviour of commercial concrete produced with AR.

Keywords: Maturity of AR, recycled aggregates, high performance concrete, mechanical properties.



ملخص:

يعتبر الحصى عنصراً أساسياً في تكوين الخرسانة. للحصى المعاد تدويرها من نفايات الهدم جانب هام جداً، من ناحية الحفاظ على البيئة ومن ناحية حماية الموارد الطبيعية مثل الصخور الضخمة والرواسب الطينية. لذا فإن للحصى المعاد تدويرها ذات أهمية اقتصادية وبيئية. ومن المؤكد أن تحسين فهم هذا النوع من المواد ضروري لتعزيز استخدامها في قطاع التشييد. في هذا السياق، يهدف هذا البحث إلى دراسة تأثير نسب الحصى المعاد تدويره من الحصى المدور ح م ونضجه (الوقت المنقضي بين صب وسحق الخرسانة الأم التي يتم الحصول عليها من الحصى المعاد تدويره) على الخصائص الميكانيكية للخرسانة عالية الأداء خ ع أ.

لهذا الغرض، تم صنع خمسة مخاليط بنسبة 0% ، 25% و 75% من الحصى المدور في آجال مختلفة، 7 أيام (الحصى المبكر) و 12 شهراً (الحصى الناضج). تم تحديد الخصائص الميكانيكية لجميع المخاليط. أدت الزيادة في نسب الحصى المبكر مقارنة بالحصى الناضج إلى تقليل السلوك الميكانيكي للخرسانة عالية الأداء المعاد تدويرها. كان من الممكن مقارنة الوضع التجاري، باستخدام الحصى الناضج، والحالة التي تحدث فقط في البحث في المختبر، مثل استخدام الحصى المبكر. تُظهر هذه الدراسة أهمية النظر في نضج الحصى المعاد تدويره في البحث لتقديم استنتاجات موثوقة ودقيقة حول سلوك الخرسانة التجارية المنتجة بالحصى المعاد تدويره.

الكلمات الرئيسية: نضج الحصى المعاد تدويره، الحصى المعاد تدويره، الخرسانة عالية الأداء، الخصائص الميكانيكية



TABLE DES MATIERE

Table de matière

Résumé.....	I
Abstract.....	II
:ملخص	III
Introduction générale	1
CHAPITRE 1.....	1
GRANULATS RECYCLES	1
1 .1 Introduction	3
1.2 DÉFINITIONS	4
1.3 Sources De Déchets Utilises En Génie Civil.....	4
1.3.1 Déchets de construction et de démolition	4
1.3.1.2 Les déchets de béton.....	5
1.3.1.3 Les déchets mixtes	6
1.4 Réglementations applicables aux Déchets de Construction et de Démolition.....	7
1.5 Démolition/déconstruction	8
1.5.1 Techniques de démolition [7].....	8
1.5.3 Techniques de démolition à l'aide d'outils portés [18], [19]	9
1.5.4 Démolition par dynamitage [18], [19].....	9
1.6 Composition et propriétés chimiques des GR.....	10
1.6.1 Paramètres influençant la teneur en PCD ou en MA	12
1.6.2 Caractéristiques minéralogiques et chimiques des GR.....	12
1.7 Propriétés physiques des GR	13
1.7.1 Masse volumique et absorption d'eau des GR.....	13
1.7.3 Caractéristiques sur pâtes de ciment	15
1.7.4 Masse volumique à l'état frais.....	15
1.7.5 Analyse comparative des bétons de GBR	15
1.7.6 Résistance à la compression.....	16
1.7.7 Résistance à la traction par flexion et par fendage :	17
CHAPITRE 2.....	21
BETONS HAUTS PERFORMANCES	21
2.1 Introduction	21
2.2 Historique.....	21
2.3 Définition des BHP.....	23

2.4 Les constituants d'un BHP.....	24
2.4.1 Le ciment.....	24
2.4.2 Les granulats.....	25
2.4.3 Sable.....	27
2.4.4 Les ajouts minéraux.....	27
B) Composition chimique du laitier.....	29
<i>Les avantages de la fumée de silice.....</i>	<i>30</i>
2.4.4.4 Fillers.....	31
2.4.5 L'Eau.....	32
2.4.6 Les adjuvants.....	32
2.6 Avantages des BHP.....	33
2.7 Caractéristiques critiques des BHP [36].....	34
2.8 Différents classes de BHP :.....	34
2.9 Principaux domaines d'applications des BHP [22].....	35
2.10 Propriétés des BHP.....	35
Masse volumique.....	35
2.10.2 Propriétés mécaniques.....	35
Résistance en compression.....	35
2.11 Autres propriétés des BHP.....	36
2.11.1 Module d'élasticité :.....	36
2.11.5 Résistance aux agents agressifs :.....	37
2.11.6 Migration des ions chlorure :.....	37
2.11.7 Tenue aux attaques gel/dégel :.....	37
2.11.8 Carbonatation :.....	37
2.12 Les BHP spéciaux :.....	37
2.13 Formulation des BHP :.....	38
2.14 Conclusion.....	38
Références.....	40
CHAPITRE 3.....	43
PROTOCOLE DES ESSAIS.....	43
3.1 INTRODUCTION.....	43
3.2 Les Matériaux Utilisés.....	43
3.2.1 Les granulats :.....	43
3.2.2 Le Ciment :.....	45
3.2.3 Le laitier :.....	46
3.2.4 l'adjuvant (superplastifiant) :.....	46
3.3 Les essais sur les matériaux utilisés :.....	47
3.3.1 Analyses physiques :.....	47
3.3.1.5 Absorption d'eau NF P18-591 :.....	55
3.3.2 Les Analyses mécaniques :.....	56
3.4 Fabrication des bétons à hauts performances BHP, BHPR.....	59

3.4.1 Formulations des bétons BHP, BHPR	59
<i>Optimisation de la formulation</i>	59
3.4.2 Malaxage de béton :	61
3.4.4 Affaissement au cône d'Abrams	63
3.4.5 Vibration :	64
3.4.6 Démoulage et conservation des éprouvettes NF P 18-404 :.....	65
3.4.8 Essai d'écrasement :	67
3.5 Conclusion :.....	71
CHAPITRE 4	72
Interprétation des résultats	72
4.2 Résultats des essais	72
4.2.1 Résultats physiques	72
4.2.1.1 Equivalent de sable	72
4.2.1.3 Masse volumique :.....	75
4.2.1.4 Absorbation d'eau :.....	77
4.2.2 Résultats mécaniques	78
4.2.3 La masse volumique (densité) de béton a l'état durci	82
4.2.4 Résultats des essais de compression et traction par flexion :.....	89
Conclusion générale	100
Annexe	101

Liste des Figures		
Figure (1.1) :	Constitution d'un granulats recyclé	4
Figure (1.2) :	Les déchets de béton	6
Figure (1.3) :	Déchets mixtes	6
Figure (1.4) :	Les déchets hydrocarbonés	7
Figure (1.5) :	Représentation en chiffres des déchets	7
Figure (1.6)	Tri durant une déconstruction sélective	8
Figure (1.7):	Démolition à l'aide d'une tenaille:	10
Figure (1.8) :	Démolition par dynamitage	10
Figure (1.9) :	Analyse d'image des bétons de GBR C45	16
Figure (1.10) :	classification mécanique des granulats issus de Déchets de Construction et de Démolition (béton, maçonnerie ou mixte)	17
Figure (2.1) :	Ponts en bétons à hautes performances (BHP)	23
Figure (2.2) :	Ciment pour BHP	25
Figure (2.3) :	Granulats naturels	27
Figure (2.4) :	Sable pour BHP	27
Figure (3.1) :	Granulats utilisés	43
Figure (3.2) :	Préparation de gravier (lavage, séchage)	44
Figure (3.3) :	Préparation de granulats recyclés (concassage de béton)	45
Figure (3.4) :	Ciment utilisé (AL ESSES)	46
Figure(3.5) :	Laitier utilisé	46
Figure (3.6) :	Adjuvant super plastifiant MEDAFLOW RE 25	47
Fuguer (3.7) :	Définition de l'essai d'équivalent de sable	48
Figure (3.8) :	Procédure d'essai d'équivalent de sable	50
Fuguer (3.9) :	Essai d'analyse granulométrique de sable et gravier (nature, recyclé)	51
Figure (3.10) :	Détermination des masses volumiques apparentes de sable, gravier (naturel, recyclé)	53
Figure (3.11) :	Détermination de la masse volumique apparente de ciment	53
Figure (3.12) :	Détermination de la masse volumique apparente de laitier	55
Figure (3.13) :	Détermination des masses volumiques absolues de sable, gravier (naturel, recyclé)	55
Figure (3.14) :	Essai d'Absorption d'eau	56
Figure(3.15) :	Essais Los Angeles	57
Figure (3.16) :	La machine pour essai de compression et affichage de la	58

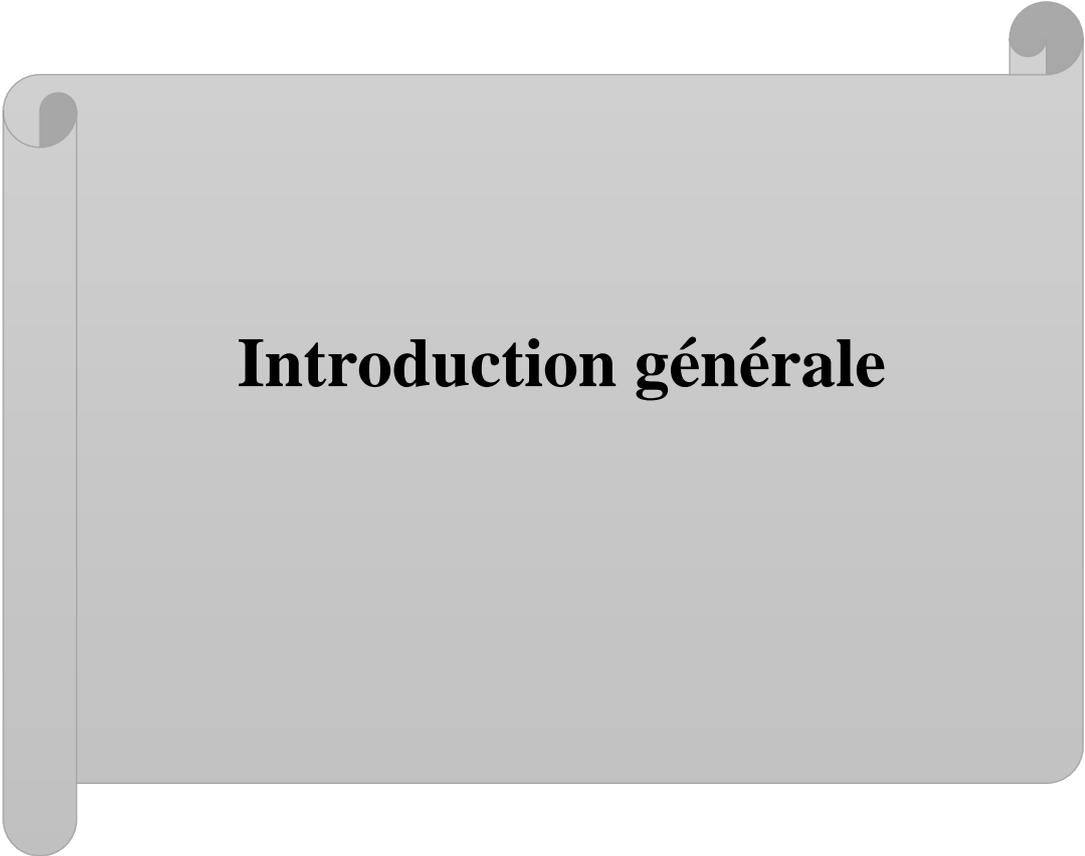
	résistance	
Figure (3.17) :	machine de traction par flexion (trois points)	59
Figure (3.18) :	Eprouvettes utilisées	62
Figure (3.19) :	Malaxage du béton	63
Figure (3.20) :	Affaissement au cône d'Abrams	64
Figure (3.21) :	Vibration de béton	65
Figure (3.22) :	Démoulage des éprouvettes cylindriques et prismatiques la conservation se fait à une température de 20 °C ± 2 °C, dans l'eau.	65
Figure (3.23) :	Conservation des éprouvettes cylindriques, prismatiques et cubiques	66
Figure (3.24) :	Essais de compression éprouvettes cylindriques (16x32) cm² des bétons BHP et BHPR	67
Figure (3.25) :	Essais de compression des éprouvettes cubiques (10x10x10)cm³ des bétons BHP et BHPR	68
Figure (3.26) :	Essai de traction par flexion Ep prismatique (10x10x40) cm³ (trois points)	69
Figure (3.27) :	Type des bétons (BHPN, BHPR 25%, BHPR 75%)	70
Figure (4.1) :	Analyse granulométrique des granulats (naturel et recyclé)	74
Figure (4.2) :	Masses volumiques apparentes des constituants utilisés	76
Figure (4.3) :	Masses volumiques absolue des constituants utilisés	77
Figure (4.4) :	Taux d'absorption d'eau	78
Figure (4.5) :	Résultats d'essai Los Angles	78
Figure (4.6) :	Détermination de la consistance en fonction de l'affaissement	80
Figure (4.7) :	Détermination de la masse volumique de béton à l'état frais	82
Figure (4.8) :	Variation de la densité moyenne des BHPN, BHPRP et BHPRM en fonction des temps pour éprouvettes cylindrique	88
Figure (4.9)	Variation de la densité moyenne des BHPN, BHPRP et BHPRM en fonction des temps pour éprouvettes cubique	88
Figure (4.10)	Variation de la densité moyenne des BHPN, BHPRP et BHPRM en fonction des temps pour éprouvettes prismatique	89
Figure (4.11) :	Variation de la résistance à la compression en fonction de l'âge du béton (BHPN, BHPRP et BHPRM) MPa	95
Figure (4.12) :	Variation de la résistance à la compression en fonction de l'âge du béton (BHPN, BHPRP et BHPRM) MPa	96
Figure (4.13) :	Variation de la résistance à la traction par flexion en fonction de l'âge du béton (BHPN, BHPRP et BHPRM) MPa	98

Liste des tableaux		
Tableau 2.1	: Les différentes classes de BHP	34
Tableau 2.2	: Résistance à la compression et module d'élasticité des BHP[93	35
Tableau 3.1	Conception du mélange kg/m³	61
Tableau 4.1	Détermination de l'essai d'Equivalent de sable naturel (0/5)	72
Tableau 4.2	l'analyse granulométrique d'un sable (0/5)	73
Tableau 4.3	Analyse granulométrique du gravier naturel (3/8, 8/15).	73
Tableau 4.4	Analyse granulométrique du gravier recyclé (3/8, 8/15).	74
Tableau 4.5	Masses volumiques apparentes des constituants utilisés	75
Tableau 4.6	Masses volumiques absolues des constituants utilisés	76
Tableau 4.7	Taux d'absorption d'eau	77
Tableau 4.8	Résultats d'essai Los Angles	78
Tableau 4.9	: Valeurs de l'affaissement du béton à différent pourcentage en fonction de temps de recyclage (précoce à 7 jours, mûré à 12 mois).	79
Tableau 4.10	Détermination de la masse volumique des bétons à l'état frais	81
Tableau 4.11	: Résultats obtenus pour la détermination de la masse volumique des BHPN, BHPRP et BHPRM à 7j	83
Tableau 4.12	: Résultats obtenus pour la détermination de la masse volumique des BHPN, BHPRP et BHPRM à 28j	84
Tableau 4.13	: Résultats obtenus pour la détermination de la masse volumique des BHPN, BHPRP et BHPRM à 56 j	85
Tableau 4.14	: Résultats obtenus pour la détermination de la masse volumique des BHPN, BHPRP et BHPRM à 91 j	86
Tableau 4.15	Densité moyenne des BHPN, BHPRP et BHPRM Densité moyenne des BHPN, BHPRP et BHPR	87
Tableau 4.16	: Résultats obtenus pour la détermination de la résistance à la compression et en traction par flexion des BHPN, BHPRP et BHPRM à 7j	91
Tableau 4.17	: Résultats obtenus pour la détermination de la résistance à la compression et en traction par flexion des BHPN, BHPRP et BHPRM à 28j	92
Tableau 4.18	: Résultats obtenus pour la détermination de la résistance à la compression et en traction par flexion des BHPN, BHPRP et BHPRM à 56 j	93
Tableau 4.19	: Résultats obtenus pour la détermination de la résistance à la compression et en traction par flexion des BHPN, BHPRP et BHPRM à 91	94
Tableau 4.20	: Résultats obtenus des résistances moyennes en compression sur cylindrique des BHPN, BHPRP et BHPRM (MPa)	95
Tableau 4.21	: Résultats obtenus des résistances moyennes en compression sur cubique	96

	des BHPN, BHPRP et BHPRM (MPa)	
Tableau 4.22	Résultats obtenus des résistances moyennes en traction par flexion sur prismes des BHPN, BHPRP et BHPRM (MPa)	97

Liste des abréviations et notations

GN	Granulats Naturels
GRP	Granulats Recycles Précoce
GRM	Granulats Recycles Mature
BHP	Béton A Hauteur Performances
BHPN	Béton A Hauteur Performances Naturels
BHPRP	Béton A Hauteur Performances Recycles A (7jour) Pré cos
BHPRM	Béton A Hauteur Performances Recycles A (12 Mois) Mature
LA	Los Angeles



Introduction générale

Introduction générale

Les granulats sont considérés comme des éléments essentiels dans la composition du béton à hautes performances ou des bétons de dernière génération. Une grande importance dans l'utilisation des granulats recyclés du point de vue environnement car d'un côté elle permet de récupérer les matériaux résultants de la démolition des constructions due aux catastrophes naturelles ou la démolition du vieux bâti et d'un autre côté ; leurs réutilisations permettent de protéger la nature de l'exploitation excessive de la réserve des granulats naturels [1].

Par ailleurs, l'accroissement de la population sur la planète et l'augmentation générale du niveau de vie moyen des habitants entraînent une augmentation de la production des biens de consommation, engendrant parallèlement un flux de déchets de plus en plus important. L'accumulation de ces déchets, dont la durée de vie peut atteindre plusieurs milliers d'années, pose de grands problèmes à nos sociétés de consommation car ces derniers polluent l'environnement et occasionnellement créent des dégâts dans les milieux vivants. Ces déchets de construction ne cessent de croître au fil des années, à l'inverse des ressources naturelles telles que les roches massives et les gisements alluvionnaires. [2]

En fait, les déchets provenant des chantiers de déconstruction et de démolition sont nécessaires à la production des matériaux de construction. En effet, la réutilisation de ces déchets en tant que granulats dans des nouvelles compositions de béton a permis de réduire les dépenses sur la gestion des déchets déconstructions, les ressources naturelles deviennent plus rares avec une baisse de la production des granulats naturels et comme but principal de préserver l'environnement [4]. L'idée du remplacement des granulats naturels par des granulats recyclés paraît donc intéressante dans le contexte de la construction durable, d'autant plus que le taux de recyclage atteint plus de 40 %, essentiellement dans les constructions en génie civil [5].

La réutilisation et la valorisation de débris de démolition sont un enjeu très important pour l'industrie de la construction, particulièrement en Algérie où un grand nombre d'infrastructures arrivent à la fin de leur cycle de vie. Un autre enjeu important auquel est confrontée l'industrie de la construction est la diminution des sources de granulats naturels près des grands centres urbains.

Dans le cas spécifique du béton, ces dernières années, l'utilisation de différents liants alternatifs comme substituts au ciment [4], ainsi que l'utilisation d'agrégats recyclés (GR) à partir d'éléments en béton rejetés concassés [5] ont été étudiées en détail. Il a même été démontré que la performance de GR est adaptée à la production de bétons non conventionnels, tels que le béton autocompacte, dans lequel sa grande fluidité à l'état fraîche empêche les vibrations pendant le déplacement [6], ou le béton à haute performance (BHP), caractérisé à la fois par sa haute résistance et ses propriétés de durabilité optimales [7].

Les propriétés mécaniques élevées du BHP sont obtenues en augmentant la teneur en ciment, un faible rapport eau-ciment (E / C) et un emballage correct des agrégats [8]. De plus, l'utilisation de quantités appropriées d'ajouts minéraux (par exemple, cendres volantes ou fumées de silice) en complément du ciment Portland ordinaire permet d'améliorer encore plus les performances à l'état durci de ce type de béton [9]. L'objectif final de cette conception est

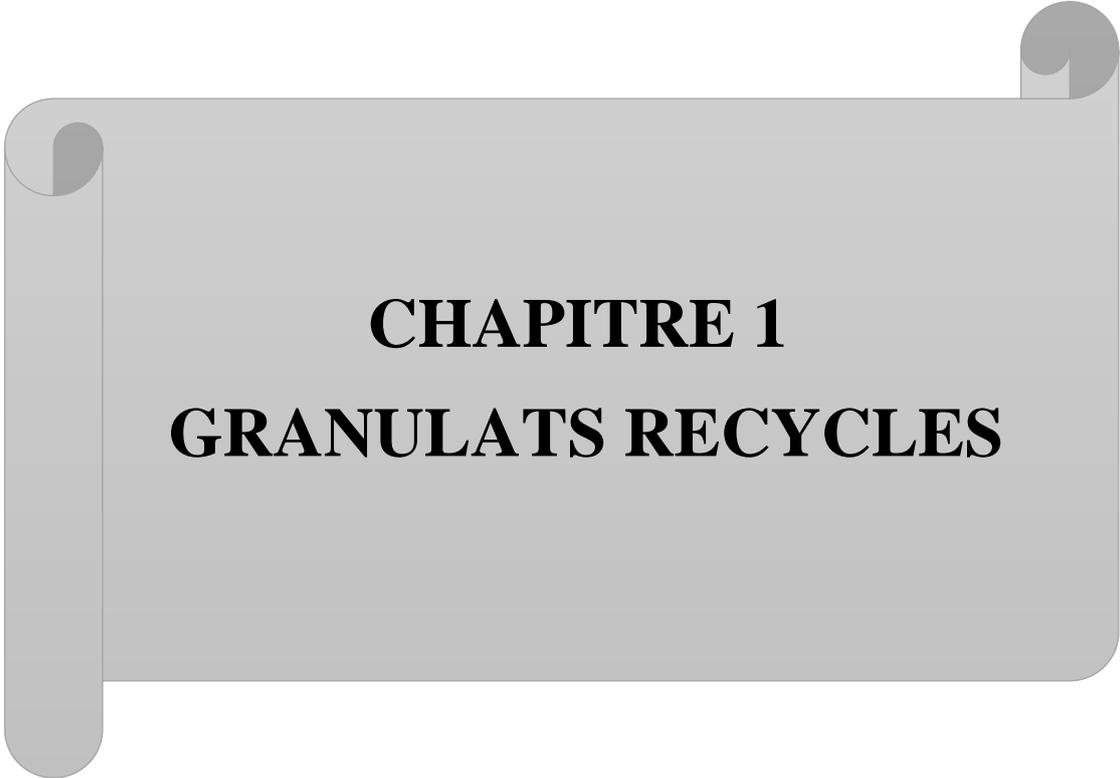
d'obtenir une microstructure dense qui maximise à la fois la résistance et la durabilité du béton [10]. Néanmoins, tous ces aspects entraînent une réduction génétique de la maniabilité du BHP, un problème qui peut être résolu par l'ajout de superplastifiants [11]. Certains ajouts minéraux permettent également d'équilibrer le comportement frais et durci de ce type de béton [12].

Cette étude consiste à proposer l'effet de la maturité de GR sur les propriétés mécaniques afin d'analyser cette dernière, cinq mélanges de BHP avec des teneurs en GR de 0%, 25% et 75% (remplacement des gravier naturel GN) ont été coulés. Ces ratios de remplacement ont permis d'évaluer l'effet de l'ajout de petites et de grandes quantités de GR. En outre, deux échéances différentes (temps entre la coulée et le concassage du béton parent BP), 7 jours et 12 mois. Ainsi, l'effet de GR de maturité très différente sur les performances du béton à haute performance recyclé BHPR est analysé.

Cette étude va donc être présentée en deux grandes parties :

La première partie (I) constitue une revue bibliographique sur les granulats recyclés, les performances mécaniques des bétons à base de granulats recyclés et les propriétés mécaniques des bétons à hautes performances.

La deuxième partie (II) concerne le Protocole expérimental réalisé afin d'atteindre les objectifs visés, notamment les différentes propriétés des granulats recyclés et les formulations des BHP aux granulats recyclés optimisées et l'effet de la maturité de GR. Les procédures d'essais utilisées sont également décrites. L'analyse des résultats expérimentaux, à savoir une discussion de l'influence de taux de remplacement des granulats naturels par les granulats recyclés sur le comportement des BHP et BHPR à l'état frais et durci est également présentée.



CHAPITRE 1
GRANULATS RECYCLES

1.1 Introduction

Le béton est le matériau de construction le plus important sur la planète, en termes de volume et de chiffre d'affaires. Son succès provient, entre autres raisons, de son extraordinaire polyvalence et de sa disponibilité pratiquement partout sur terre, en tant que matériau essentiellement local. Toutefois, en ce siècle, l'Humanité se trouve confrontée à son défi le plus difficile de son histoire : comment conserver la viabilité de la planète pour les générations futures, avec une population approchant les dix milliards d'habitants et une pénurie croissante des ressources non renouvelables.

Le recyclage du béton dans le béton doit donc être développé, pour au moins quatre raisons principales :

- bien que les ressources minérales naturelles qui servent à produire le béton soient quasi-inépuisables, calcaire, argiles et roches dures, l'ouverture de nouvelles carrières à distance raisonnable des villes est devenue un réel défi dans de nombreux pays. En effet, dans la compétition pour l'utilisation des sols, entre terrains résidentiels, agricoles et industriels, la troisième catégorie perd souvent la bataille, la mise en décharge des Déchets de Construction et de Démolition (DCD) est de plus en plus prohibée par les politiques publiques, comme en Europe depuis le début du Millénaire [1] ;
- il existe une pression sociale pour réduire les distances de transport des matériaux depuis les sites de production jusqu'aux sites d'utilisation, afin de limiter les émissions de CO₂ et l'impact du trafic des camions sur la population. Comme les matériaux de démolition sont principalement générés dans les villes, là où de nouveaux chantiers de construction ont besoin d'être alimentés, l'utilisation de DCD dans une nouvelle construction a alors un double avantage, en réduisant à l'échelle de la zone urbaine les transports générés à la fois par l'évacuation et par l'approvisionnement des matériaux ;
- enfin, le béton doit rattraper les autres matériaux (acier, enrobés bitumineux, etc.) pour lesquels les procédés et les circuits de recyclage existent depuis des années. Ce n'est pas ici l'endroit pour analyser le cycle de vie du béton recyclé en tant que matériau de construction, par rapport à d'autres solutions. Notons simplement que, même si la solution « béton » a de nombreux avantages, sa capacité à incorporer ses propres déchets constitue un aspect important selon la plupart des méthodes d'évaluation environnementale.

L'utilisation de granulats recyclés (GR) provenant de la déconstruction dans de nouvelles structures en béton peut permettre de valoriser ces déchets. En France, le projet national RECYBETON impliquant 43 partenaires pour un budget de 4,8 M d'euros et le projet ANR ECOREB s'intéressent à lever les verrous technologiques concernant ce type de granulats afin de mieux maîtriser leur utilisation et de les introduire encore d'avantage dans le contexte normatif. Plusieurs travaux ont été réalisés pour étudier l'utilisation des GR en remplacement partiel ou total des granulats naturels (GN) dans la fabrication de nouveaux bétons[2]. La faible densité et le taux d'absorption d'eau élevé des GR sont les facteurs influençant le plus les propriétés des bétons de GR. De nombreux auteurs attribuent ces différences aux

propriétés du mortier d'origine contenu dans les granulats recyclés[3]. D'autres études montrent que le béton à base de GR grossiers découlant du recyclage peut avoir des propriétés mécaniques similaires à celles des bétons classiques [4].

1.2 DÉFINITIONS

Le granulat recyclé est défini comme un agrégat produit par le concassage de matériaux inorganiques ou minéraux précédemment utilisés dans la construction.

Le granulat recyclé est défini comme un granulat provenant du recyclage de débris de démolition en opposition aux « granulats naturels » provenant de carrières ou de sablières. Il est composé de deux matériaux de natures différentes, le mortier attaché et le granulat d'origine [5]. La valorisation aboutit à la formation des granulats dits recyclés. Leur préparation s'effectue dans des stations de recyclage (Fig.1.1), mobiles ou fixes, où les déchets d'éléments en béton subissent une série d'opérations [6]. Les opérations de recyclage peuvent varier en fonction de la composition initiale des déchets et des exigences du produit final [7]. En fait, Les procédés de recyclage sont donc intimement liés à la qualité et à la composition des granulats recyclés [6].

Les granulats de béton recyclé (GBR) doivent être de bonne qualité pour pouvoir être incorporés dans le béton. Il faut notamment qu'ils présentent une teneur élevée en béton et en matériaux rocheux, sans être trop contaminés par du plâtre, du bois, du plastique... Pour atteindre cet objectif, il est nécessaire de mettre en œuvre un procédé de démolition adéquat permettant de trier les différentes natures de matériaux rencontrés. Une déconstruction est alors toujours préférée à une démolition sans tri préalable.

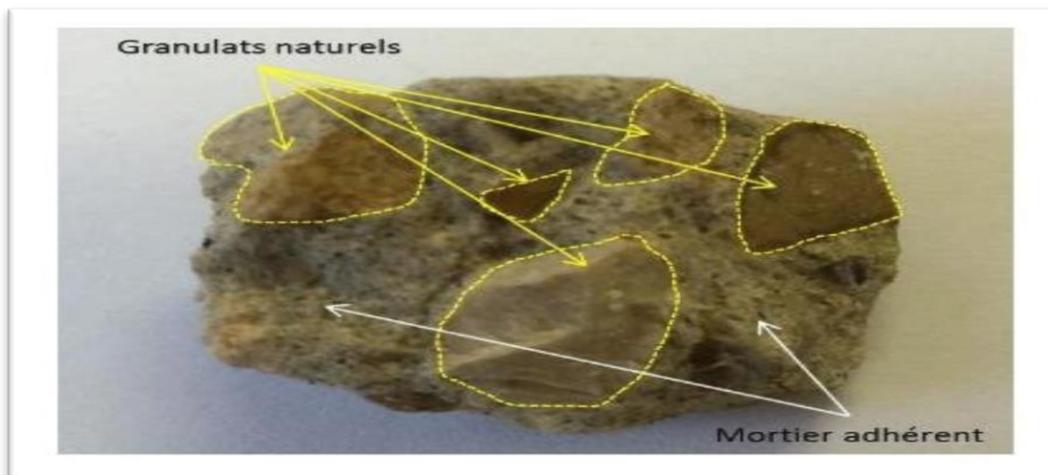


Figure (1.1) : Constitution d'un granulat recyclé [8]

1.3 Sources De Déchets Utilises 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 :

1.3.1 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 [9].

Les déchets de construction et de démolition peuvent être classés en :

- 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.) [9]
- déchets non dangereux, eux-mêmes divisés en « déchets inertes » et « déchets non inertes non dangereux ».

Les déchets inertes sont principalement constitués de déchets d'origine minérale tels le béton, la tuile, la brique, le verre et aussi certains enrobés bitumineux.

Ces déchets sont parfois mélangés entre eux ou légèrement contaminés par du plâtre, des plastiques, du bois etc. Ils proviennent principalement du gros œuvre des bâtiments et sont récupérés lors de la démolition des ouvrages.

Pour servir de granulats recyclés, ces déchets de démolition doivent contenir un maximum de béton et de matériaux rocheux. Les déchets dangereux doivent être séparés des déchets inertes. Il s'agit par exemple de produits bitumineux à base de goudron de houille, de matériaux de construction contenant de l'amiante, de bétons contaminés des centrales nucléaires, etc.

1.3.1.1 Déchets inertes :

Sont les plus stables, ils ne subissent aucune modification physique, chimique ou biologique. Exemple : (brique, tuiles et céramique, granulats non pollués) [9].

La fraction minérale des déchets de construction et de déconstruction est considérée comme déchet inerte. On l'appelle aussi « déchet de classe 3 » dans la législation wallonne. Il semble important de définir cette notion de « déchets inertes ». Au sens du Décret du 27 juin 1996 [10] les déchets inertes sont les déchets qui, de par leurs caractéristiques physicochimiques, ne peuvent à aucun moment altérer les fonctions du sol, de l'air ou des eaux ni

porter atteinte à l'environnement ou à la santé de l'homme. Ces déchets proviennent principalement de la dé- construction de voiries et de bâtiments. La composition de ces déchets est évolutive en fonction de l'époque de la construction des ouvrages. En effet, il y a toujours un laps de temps de plusieurs dizaines d'années entre la construction et la déconstruction/rénovation d'un bâtiment ou d'une voirie. Un ouvrage plus récent sera souvent d'une conception plus « composite », ce qui ne sera pas sans conséquences sur les moyens à mettre en œuvre pour en recycler les éléments[11]

Les déchets inertes valorisables sont communément séparés en trois grandes sortes :

1.3.1.2 Les déchets de béton

Proviennent de la démolition de bâtiments ou d'infrastructures de génie civil (bétons ou bétons armés). Le béton est un mélange inerte de sable, gravillon, d'eau et de ciment[11]



Figure (1.2) : Les déchets de béton [11]

1.3.1.3 Les déchets mixtes

Proviennent de la déconstruction/rénovation de bâtiments publics ou privés (briques/blocs/tuiles ...). Ces déchets représentent en tonnage la fraction la plus importante produite en Wallonie. Ils sont typiquement constitués d'un mélange de différents déchets de construction (briques, blocs en béton, tuiles, faïences, céramiques, etc.). Ces déchets sont caractéristiques des collectes sélectives réalisées auprès des particuliers/grand public [12]



Figure (1.3) : Déchets mixtes [12]

1.3.1.4 Les déchets hydrocarbonés

Proviennent essentiellement de la démolition sélective des voiries et de la déconstruction de parkings et autres surfaces asphaltées. En fonction de la technique utilisée on les trouvera sous forme de plaques ou de fraisât. Ce fraisât est obtenu par raclage mécanique des revêtements [13]



Figure (1.4) : Les déchets hydrocarbonés[13]

1.3.2 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.) [9]

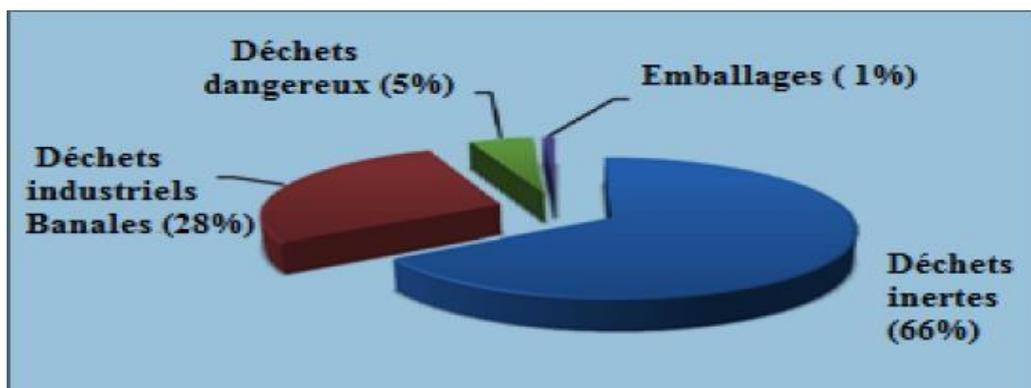


Figure (1.5) : Représentation en chiffres des déchets [5].

1.4 Réglementations applicables aux Déchets de Construction et de Démolition

Selon [6], de nombreux outils et règlements de gestion des déchets et des activités liées au développement durable sont apparus ces dernières années, notamment en Chine, au Japon, aux États-Unis, au Brésil et dans la plupart des pays européens.

À partir de 2011, la Commission Européenne a financé des études sur la définition de la politique communautaire en matière de gestion durable des ressources. Les Déchets de Construction et de Démolition (DCD) ont été identifiés comme objectif prioritaire, en raison des grandes quantités générées et du fort potentiel de réutilisation et de recyclage de ces matériaux. Pour cette raison, la seconde Directive-Cadre sur les Déchets a demandé que tous les États Membres mettent en œuvre les dispositions qui s'imposent pour atteindre, en 2020,

un objectif minimal de 70 % (en masse) pour la récupération, le recyclage et la réutilisation des DCD et autres matériaux.[14]

1.5 Démolition/déconstruction

La déconstruction est un processus de démolition sélectif permettant un tri efficace des différents matériaux. De ce fait, elle a un coût plus élevé que la démolition classique. Ce surcoût est directement lié à l'augmentation de la



Figure (1.6) Tri durant une déconstruction sélective [15]

Durée du processus de démolition, au nombre d'opérations à effectuer pour faire le tri des différents matériaux, et au nombre d'ouvriers nécessaires.

Mais, dans la plupart des cas, ce surcoût n'est pas un réel obstacle, vu son bénéfice environnemental, et aussi parce que la démolition des bâtiments de plus de 1 000 m² oblige maintenant à un inventaire des différents types de déchets, ainsi qu'à la désignation des installations locales pouvant accueillir les matériaux recyclés. Enfin, le traitement des déchets triés est beaucoup plus économique que celui des matériaux mélangés. La présence d'installations locales de récupération et de transformation des différents types de déchets encourage alors à un meilleur tri, et favorise donc ainsi l'option de la déconstruction [16] Par conséquent, si le secteur du recyclage du béton se développe et se structure, alors l'option de la déconstruction et du tri sera de plus en plus privilégiée, et la qualité des granulats recyclés n'en sera qu'améliorée.

1.5.1 Techniques de démolition [7]

Différents facteurs influencent le choix de la technique ou de la combinaison des techniques utilisées sur un chantier de démolition :

- la surface de travail disponible ;
- l'existence de réglementations locales ou nationales obligeant le tri des déchets ;
- l'existence de prescriptions environnementales (imposées par le Maître de l'Ouvrage) ;
- l'emplacement du chantier de démolition ;
- le volume de démolition ; • le temps alloué pour réaliser la démolition.

Les techniques décrites ci-après ne peuvent être mises en oeuvre que par des entreprises qualifiées, ayant compétences pour appliquer les mesures de sécurité adéquates envers les travailleurs et le voisinage.

1. 5.2 Technique de démolition à l'aide d'outils à main [17]

Ces techniques sont principalement utilisées pour les démolitions de petits volumes, et pour les travaux préparatoires avant la démolition d'ouvrages plus grands. Lorsqu'il s'agit de travaux préparatoires, les polluants sont supprimés (amiante, plomb, etc.). Différents outils sont utilisés tels que maillets, pioches et marteaux qui peuvent être électriques, pneumatiques ou hydrauliques. Ce type de démolition est lente et coûteuse, mais elle permet un bon tri si elle est bien faite.

1.5.3 Techniques de démolition à l'aide d'outils portés [18], [19]

Par rapport aux outils à main, ces techniques présentent l'intérêt d'être beaucoup plus efficaces et beaucoup plus puissantes. Différents outils tels que pinces, cisailles, boulets,

BRH sont portés par un engin mécanique. La sélection de l'outil dépend du type de bâtiment (taille, matériaux de la structure, etc.). Le coût d'utilisation de ces outils (coût unitaire par tonne de matériaux démolis) est inférieur à celui des outils à main. Lorsque l'immeuble est très élevé, des mini-engins peuvent être utilisés pour déconstruire les étages supérieurs, avant que les engins de démolition adaptés, travaillant depuis le sol, n'interviennent.

1.5.4 Démolition par dynamitage [18], [19]

Le dynamitage est un processus de démolition très efficace, qui fragilise ou produit l'effondrement de la structure du bâtiment. Selon le type du bâtiment, différentes techniques de dynamitage peuvent être utilisées. Elles peuvent aussi être utilisées dans les différentes parties d'un bâtiment pour avoir une démolition sélective. Avant le dynamitage, le bâtiment doit être nettoyé et les matériaux récupérés sont triés, afin d'obtenir une bonne qualité de déchets



Figure (1.7) : Démolition à l'aide d'une tenaille [19]



Figure (1.8) : Démolition par dynamitage [18]

Le béton recyclé inertes pouvant être recyclés. Cette étape est primordiale, car si le tri n'a pas été fait avant le foudroyage, tous les déchets seront mélangés. Ces techniques nécessitent également une expertise et une bonne connaissance en matière de structure des bâtiments. Elle est généralement utilisée pour les bâtiments où les techniques de démolition classiques ne peuvent être appliquées en raison de la taille du bâtiment, du niveau de risque ou du manque d'efficacité des techniques classiques.

1.6 Composition et propriétés chimiques des GR

Lorsque le béton est concassé, une partie de la pâte de ciment reste attachée aux grains d'origine. Cette pâte de ciment adhérente est généralement beaucoup plus poreuse que les granulats naturels utilisés pour fabriquer le béton. Par conséquent, la qualité et le volume de

PCD résiduelle sont très souvent à l'origine des moins bonnes propriétés des GBR, comparativement à celles des granulats naturels : plus faible masse volumique, plus forte absorption d'eau, coefficient Los Angeles plus élevé, plus forte teneur en sulfates, etc.

Connaître la teneur en PCD dans un GBR est alors nécessaire pour évaluer sa qualité. Plusieurs méthodes ont été tentées pour réaliser cette quantification mais, vu la difficulté, elles n'ont pas réellement abouti. Des méthodes expérimentales se sont alors intéressées à la mesure de la teneur en mortier adhérent (MA). Le mortier adhérent est a priori plus facile à quantifier expérimentalement que la PCD, mais sa définition est plus ambiguë. Tout d'abord, elle dépend étroitement de la taille maximale choisie pour séparer mortier et béton (généralement 4 à 5 mm). Ensuite, le MA peut ne pas contenir que du mortier issu du béton d'origine, mais également des fragments du gravillon naturel libérés lors du concassage. Par conséquent, le MA dépend beaucoup de la méthode expérimentale utilisée pour sa détermination.

Plusieurs procédés sont proposés dans la littérature pour mesurer en laboratoire la teneur en PCD ou en MA. Elles reposent sur des méthodes thermomécaniques, chimiques ou visuelles, voire sur la combinaison de plusieurs d'entre elles.

Les méthodes thermomécaniques cherchent à séparer le MA des gravillons en favorisant le développement de fissures entre les deux phases. Par exemple [20] ont proposé une méthode thermique particulière où les GBR sont tout d'abord immergés dans l'eau pendant 2 heures pour quasi-saturer le mortier adhérent, puis chauffés à 500 °C pendant 2 heures, et immergés

une nouvelle fois dans l'eau froide. Le traitement thermique à 500 °C génère de la vapeur d'eau à l'intérieur du MA saturé, et le refroidissement brusque des granulats induit des contraintes et des fissures à l'interface entre mortier et granulat. Ces deux étapes permettent ensuite une séparation plus facile des deux matériaux. La faible quantité de mortier qui, généralement, Le béton recyclé Les Collections De L'ifsttar 60 restes encore attachée aux granulats est enlevée avec un maillet en caoutchouc.

L'échantillon est alors tamisé à 4 mm pour récupérer le gravillon sans mortier.

La teneur en MA est calculée à partir de la perte de masse entre le gravillon de GBR d'origine et le gravillon propre obtenu.

Les méthodes chimiques sont basées sur la dissolution sélective de la pâte de ciment adhérente. Une solution d'acide chlorhydrique permet de dissoudre efficacement la PCD. Ces méthodes ont été utilisées dans plusieurs études [21], où elles ont permis de mesurer la teneur en PCD et la teneur en MA. Elles ne sont toutefois pas adaptées pour des GBR à base de granulats calcaires, qui sont eux aussi dissous dans l'acide chlorhydrique.

La teneur en ciment dans la PCD peut également être évaluée en s'intéressant à des traceurs propres au ciment, tels SiO₂, Al₂O₃ et Fe₂O₃ [22] Les GBR sont tout d'abord broyés jusqu'à 315 µm puis immergés dans une solution d'acide nitrique diluée (1/50). Après filtration, la solution est analysée et la teneur en PCD est déterminée à partir du rapport entre la masse de SiO₂ par gramme de GBR et la fraction massique de SiO₂ contenue dans le ciment.

Cette méthode ne peut toutefois être utilisée que si la composition chimique du ciment d'origine est connue.[22] ont proposé une combinaison de méthodes chimiques et thermomécaniques, basée sur des cycles de gel-dégel appliqués à des GBR préalablement plongés dans une solution de sulfate de sodium. Les GBR sont d'abord séchés à 105 °C, pesés et immergés 24 h dans une solution à 26 % (en poids) de sulfate de sodium. Les GBR subissent ensuite cinq cycles de gel-dégel dans une enceinte (16 h à - 17 °C et 8 h à + 80 °C). La solution de sulfate de sodium est alors éliminée par lavage de l'échantillon à l'eau du robinet sur un tamis de 4,75 mm et le refus est séché à 105 °C, puis pesé. La teneur résiduelle en MA est obtenue à partir de la différence de masse avant et après les cycles de gel dégel, divisée par la masse de l'échantillon sec.

Plusieurs auteurs [22], [23] ont proposé de déterminer la teneur en MA des gravillons de

GBR par observation d'une section polie d'un béton fabriqué avec les gravillons de GBR et un nouveau ciment coloré. Le ciment coloré permet une identification fiable des particules et donc une séparation visuelle aisée entre le granulat naturel et le mortier adhérent. La quantification de la surface de mortier est ensuite effectuée par une méthode linéaire transversale (similaire à celle décrite dans [24] pour la mesure de la teneur en air dans le béton durci), ou par analyse d'images. La teneur en MA par rapport à la masse de départ est alors déterminée par des équations analytiques [25] Les teneurs en MA trouvées dans la littérature, mesurées par dissolution acide, par la méthode du ciment coloré ou par traitement thermique, ont été comparées par [26]. Les valeurs varient sur une large plage, selon le GBR étudié et la méthode utilisée. Elles se situent entre 25 et 70 % pour le procédé par dissolution acide, entre

25 et 65 % pour les mesures sur béton coloré et entre 40 et 55 % pour les méthodes thermiques.

1.6.1 Paramètres influençant la teneur en PCD ou en MA

La teneur et les propriétés de la PCD dépendent de la composition du béton d'origine. Une plus forte proportion de ciment et d'eau dans la formule du béton se traduira par une plus grande teneur en PCD dans les GBR. Cependant, la PCD n'est pas distribuée de façon homogène au sein des différentes classes granulaires concassées. En effet, plusieurs études ont montré que le taux de MA diminue quand la dimension des granulats augmente [27]; de [26] et [28]. En outre, la distribution de la PCD selon les classes granulaires de GBR est largement influencée par le procédé de concassage [29] ont étudié l'influence de la méthode de concassage sur la teneur en MA des gravillons de GBR. En effectuant un concassage primaire avec un concasseur à mâchoires ou à percussion, la teneur en MA de GBR issus de bétons de bonne, moyenne et moindre qualité (fraction 5/20 mm) est de 52,3 %, 55 % et 52,3 % respectivement. En réalisant un second concassage (concassage secondaire) avec différents types de concasseurs, la teneur en MA passe à 30,2 %, 32,4 %, 32,3 % respectivement. Par conséquent, les concassages successifs diminuent la teneur en MA des gravillons de GBR, mais augmentent concomitamment la quantité de fines de GR.

1.6.2 Caractéristiques minéralogiques et chimiques des GR

Peu de travaux fournissent des données précises et exhaustives sur les caractéristiques chimiques et minéralogiques des GBR. Quelques études se sont intéressées au rôle du mortier adhérent (MA) vis-à-vis des propriétés générales des GBR, physiques et mécaniques. Comparé aux GN, ces études [30] ont montré que le MA augmente la porosité, et diminue la masse volumique réelle, qu'il est le siège de l'apparition de microfissures pendant le concassage du béton, et qu'il présente une adhérence plus faible au niveau de l'auréole de transition (AT). D'un point de vue chimique, le MA recèle une teneur non négligeable en alcalins et en sulfates [31]. À cet égard, [23] ont établi des corrélations entre la teneur en MA des GBR et leur teneur en chlorures et en sulfates solubles.

Dans les études concernant les propriétés des bétons incorporant des matériaux recyclés, les GBR sont le plus souvent caractérisés au regard de classifications spécifiques. Par exemple, la RILEM [32] et le BRE (Building Research Establishment) [23] définissent trois types de GBR qui tiennent compte de leurs teneurs en différents constituants, tels que les moellons de maçonnerie, les granulats naturels et recyclés, les gravats de briques et de bétons.

Aujourd'hui, la classification en vigueur est celle de la norme européenne EN 933-11 [23] qui définit cinq catégories de contaminants, en plus du béton (phase principale). Elle permet ainsi de décrire et de quantifier la teneur en chaque contaminant, et donc aussi de définir un degré de « pureté » du GBR.

L'impact de ces catégories de contaminants sur les propriétés du béton frais et durci a été évalué dans de nombreuses études [23]

Par ailleurs, les différentes normes et directives concernant les exigences

chimiques des GBR pour leur réutilisation dans le béton [23] sont centrées sur des propriétés spécifiques, telles la teneur totale en chlorures et en sulfates solubles (dans l'eau ou dans l'acide), ou la présence de matières organiques. Dans le cadre du projet DREAM [23], une

technique simplifiée a été proposée pour déterminer rapidement la quantité de sulfates solubles issus de déchets de démolition, tels les GBR, afin de statuer sur leur potentielle réutilisation.

Néanmoins, la connaissance d'autres caractéristiques chimiques et minéralogiques des GBR est aussi nécessaire, afin de prévenir certaines pathologies, comme la réaction alcali-silice (détection au microscope optique des phases silicatées instables), et pour comprendre les mécanismes associés (voir dans cet ouvrage les chapitres dédiés à l'alcali réaction et à la réaction sulfatique interne). [23] ont réalisé au microscope pétrographique, sur plaques minces, l'étude détaillée de différents GBR. [23] ont caractérisé trois gravillons de GBR (classe granulaire 4/16 mm) provenant de la région de Londres selon d'autres méthodes d'étude : ainsi, l'analyse par fluorescence X des éléments principaux montre que l'origine du

GR a peu d'importance ; la diffraction des rayons X (minéralogie) indique la présence de calcite, de quartz et d'autres minéraux en proportionnalité directe avec la teneur en GN des bétons d'origine. Les GBR obtenus par concassage de bétons expérimentaux durcis 28 jours [23] présentent des diffractogrammes similaires, avec prédominance de quartz et de calcite.

Les granulats naturels sont repérés par les pics correspondant à leurs minéraux spécifiques (feldspath K-Na, etc.). Le ciment hydraté est repéré par la présence de gypse, d'ettringite et de portlandite résiduels. Cette étude, comme celles de [23] montre finalement que les plus petites classes granulaires contiennent la plus forte teneur en MA, avec peu de GN. Les GBR étudiés dans le cadre du Projet National

RECYBETON ont été entièrement caractérisés, notamment sous l'angle chimique et minéralogique.

1.7 Propriétés physiques des GR

1.7.1 Masse volumique et absorption d'eau des GR

Les propriétés physiques, comme la masse volumique réelle et le coefficient d'absorption d'eau (A_b), sont des propriétés très importantes pour la réutilisation des GBR dans le béton. La masse volumique réelle correspond au rapport entre la masse sèche d'un échantillon de granulat (séché à l'étuve) et le volume qu'il occupe dans l'eau, y compris le volume de tous les pores accessible et inaccessible à l'eau. L'absorption d'eau correspond au rapport entre la masse d'eau absorbée par un échantillon de granulat après immersion dans l'eau et sa masse sèche. En règle générale, les GBR ont une absorption d'eau supérieure et une masse volumique réelle inférieure que celles des granulats naturels, en raison de la présence de la PCD. La mesure de A_b est particulièrement importante car elle détermine la quantité d'eau efficace (E_{eff}) dans le béton, cette quantité se référant à l'eau présente dans la pâte fraîche de ciment, à l'exclusion de l'eau absorbée par les granulats. Jusqu'à présent, il n'existe pas de norme particulière pour mesurer la masse volumique réelle et l'absorption d'eau des GBR. Les normes dédiées aux granulats naturels, telles [23] (pour les gravillons), [33] (pour les sables) sont donc aussi utilisées pour les GBR. Les méthodes sont basées sur le même principe : le granulat est tout d'abord immergé 24 h dans l'eau, puis le coefficient d'absorption d'eau (A_{b24}) est déterminé en mesurant la teneur en eau à l'état Saturé Surface Sèche (SSS). À ce stade, les pores accessibles à l'eau sont supposés saturés d'eau, la surface

des grains étant sèche (seul un mince film d'eau adsorbée persiste). L'état SSS des gravillons est obtenu en essuyant les grains un à un avec un chiffon sec ou des feuilles de papier absorbant jusqu'à ce que l'eau ne soit plus visible en surface. L'état SSS des sables est atteint en séchant progressivement l'échantillon sous un flux d'air chaud et il est repéré à l'aide d'un essai d'affaissement en admettant que lorsque la surface des grains devient sèche, la cohésion liée aux forces capillaires disparaît.

Les propriétés physiques des GBR varient dans une large fourchette selon l'origine et la taille du GBR (sable ou gravillon). À partir de plus de 230 articles sur les GBR, [34] ont constaté que la masse volumique réelle et Ab_{24} suivaient une distribution normale. La masse volumique réelle moyenne de tous les résultats recueillis est $2\,327\text{ kg/m}^3$ pour les gravillons et $2\,065\text{ kg/m}^3$ pour les sables de GBR. Pour Ab_{24} , les valeurs sont 4,7 % pour les gravillons et 9,5 % pour les sables.

Les protocoles utilisés pour les granulats naturels ne sont pas réellement adaptés pour les

GBR. [35] Signalent que l'immersion des GBR peut entraîner un détachement partiel de la PCD. De même, le séchage à l'étuve à 105 °C pour obtenir la masse sèche peut éliminer une partie de l'eau liée aux hydrates de la PCD. Ils ont alors proposé une méthode spécifique pour les GBR, appelée Évaluation de l'Absorption d'Eau en Temps réel (EAET ou RAWA en anglais). Ici, la masse sèche est tout d'abord obtenue après 24 h à l'étuve à $75 \pm 5\text{ °C}$. Les granulats sont ensuite placés dans un pycnomètre entièrement rempli d'eau distillée et l'eau absorbée est enregistré à différents intervalles de temps. Cette méthode permet non seulement d'éviter les inconvénients mentionnés précédemment, mais elle donne aussi la cinétique d'absorption du GBR. Une autre méthode, utilisant la pesée hydrostatique, a également été proposée par [36] pour évaluer la cinétique d'absorption d'eau des granulats. Cette méthode est basée sur l'étude de la variation de masse d'un échantillon immergé dans l'eau. Les deux approches ont montré que, contrairement aux granulats naturels testés, l'absorption d'eau des

GBR n'est pas toujours achevée après 24 h d'immersion dans l'eau. Dans certains cas, jusqu'à 120 h sont nécessaires pour atteindre un équilibre stable. De plus, ils ont montré que la vitesse initiale d'absorption d'eau diminuait progressivement avec le temps. [37] ont indiqué que, par exemple, 80 % de l'absorption d'eau des GBR était satisfaite après 5 h d'immersion. Cependant, ces méthodes ne permettent pas de déterminer précisément l'absorption d'eau au tout début de l'expérience, car l'air entourant au départ les grains doit être éliminé, ce qui est particulièrement difficile pour les sables de GR

1.7.2 Influence de la carbonatation sur les propriétés des GBR

Selon la durée et les conditions de stockage des GBR après concassage, la PCD adhérente peut être plus ou moins carbonatée. En effet, le concassage augmente significativement la surface spécifique du béton, ce qui accélère le processus de carbonatation. La carbonatation de la portlandite et des CSH conduit à la formation de produits plus volumineux, qui peuvent colmater la porosité de la PCD et changer les propriétés physiques du GBR.

S. Braymand, S. Roux, F. Schuppli, et H. M. Mendoza [38] ont montré que le taux d'absorption du CO_2 est plus faible pour les grains de tailles inférieures à 2 mm, et ayant

un taux de saturation en eau liquide inférieur à 0,4. La carbonatation affecte donc de façon significative les propriétés de GBR fins. G. Corvec, P. Turcry, A. Aît-Mokhtar, R. Artoni, et R. Patrick,[39] ont observé que la carbonatation améliore sensiblement les propriétés physiques des sables de GBR, avec une diminution de l'absorption d'eau, une augmentation de la masse volumique réelle et une légère diminution de la valeur à l'essai d'écrasement. La valeur à l'essai d'écrasement est définie comme le pourcentage de perte de masse d'une classe granulaire donnée après chargement à 25 kN [40].

T. Pernin, L. Robbiano, H. Ranaivomanana, A. Ben-Fraj, F. Geffray, G. Pham, X. Guillot, P. Rougeau, et O. Amiri,[41] ont observé des résultats similaires pour l'absorption d'eau et la masse volumique réelle sur des GBR de laboratoire carbonatés ou non carbonatés.

Il a également montré que la carbonatation pouvait changer significativement la mesure de la teneur en PCD adhérente. En effet, la carbonatation réduit largement la fraction soluble dans l'acide salicylique et conduit au contraire à une augmentation de la perte de masse des GBR entre 105 et 600 °C. Ce dernier résultat est dû au fait que certaines phases carbonatées de la pâte de ciment commencent à se décomposer vers 500 °C [42].

1.7.3 Caractéristiques sur pâtes de ciment

L'incorporation de fines de GBR dans le ciment entraîne un léger raidissement de la pâte, qui a été compensé par un supplément d'eau, pour garder la consistance normale. Ainsi, la valeur de la demande en eau a augmenté de 8 % entre les ciments CEM II/A-LL et CEM II/B-GBR.

Ce comportement s'explique a priori par la présence de l'ancienne pâte de ciment microporeuse au sein des fines de GBR [43]. Le temps de prise augmente avec le taux d'incorporation des fines de GBR, et donc avec la diminution concomitante du taux de clinker. Pour le CEM II/A, l'ajout des fines de GBR n'affecte pas le temps de prise, tant initial que final. Pour le CEM II/B, l'augmentation de la teneur en fines de GBR, de 16 % (avec 9 % de calcaire) à 25 %, retarde le temps de prise initial de 30 minutes, mais n'affecte pas le temps de fin de prise.

1.7.4 Masse volumique à l'état frais

L'évolution de la masse volumique du béton frais en fonction du pourcentage de substitution en GBR est illustrée. Elle diminue lorsque le taux de substitution du sable et des gravillons naturels par le sable et les gravillons de GBR augmente, en raison de la masse volumique plus faible des GBR. Le sable de GBR a une masse volumique plus faible que les gravillons de GBR : 2,18 kg/l pour le sable et 2,3 kg/l pour les gravillons. La diminution de la masse volumique est donc plus importante lorsque le sable est substitué. Par conséquent, les GBR pourraient être utilisés là où des bétons plus légers sont nécessaires

1.7.5 Analyse comparative des bétons de GBR

L'effet du rapport e/c sur les profils de porosité et de phases anhydres des bétons de GBR est présenté dans la figure 1.8 . La réduction du rapport e/c améliore le profil de porosité ; le contraste de porosité entre l'interface à la pâte massive est plus élevé pour les rapports e/c 0,43 et 0,41, avec une valeur de 2,55 et 2,7 respectivement. Le profil de porosité se stabilise à environ 50-60 µm de l'interface. La teneur en phases anhydres dépend du rapport e/c de la nouvelle pâte et de l'eau «reléguée » par le GBR. Les teneurs en phases anhydres augmentent

lorsque la classe de résistance du béton diminue, selon des tendances variables. Pour les bétons de rapport e/c 0,66 et 0,41, le profil correspondant reste stable sur une distance allant jusqu'à 100 μm de l'interface, alors qu'il varie soudainement pour les bétons de rapport e/c 0,43 et 0,63, à une distance de 40 μm à 60 μm de l'interface

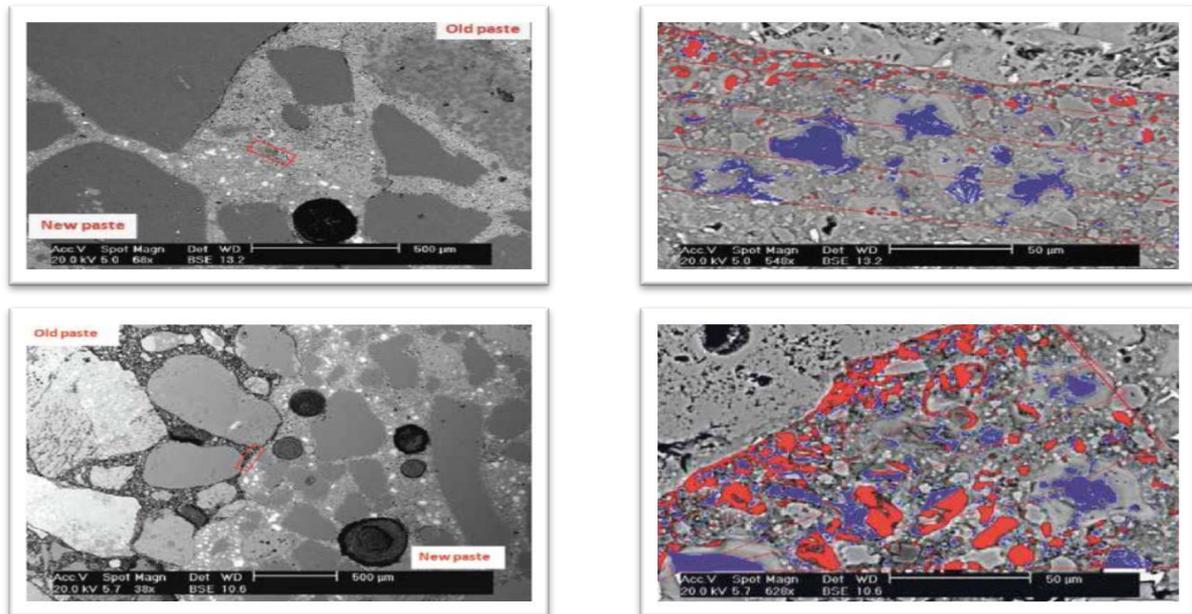


Figure (1.9) : Analyse d'image des bétons de GBR C45 [44]

1.7.6 Résistance à la compression

De nombreux articles décrivant l'influence de l'incorporation des granulats de béton recyclé (GBR) sur la résistance à la compression des bétons sont disponibles dans la littérature.

Pourtant, il est difficile d'en tirer des conclusions univoques, pour différentes raisons :

- les bétons de GBR sont toujours comparés à des bétons de référence à base de granulats naturels, mais le choix du granulat naturel peut relativiser l'influence du GBR. En d'autres termes, le même GBR aura un impact différent si le granulat naturel qu'il remplace possède d'excellentes ou de moyennes qualités mécaniques ;
- différentes stratégies sont adoptées pour comparer le béton avec différents taux de recyclage : elles considèrent soit le même rapport eau totale/ciment (E_{tot}/C), soit le même rapport eau efficace/ciment (E_{eff}/C), soit encore la même maniabilité ce qui mène à différents rapports E_{eff}/C ;
- enfin, l'influence du GBR, de même que celle du granulat naturel, dépend de sa forme, de sa taille, de ses propriétés mécaniques, etc.

Une importante compilation de 236 articles a récemment été publiée [45] Elle s'intéresse aux facteurs affectant les différentes propriétés des GBR issus des Déchets de Construction et de Démolition (DCD) destinés à la production de bétons. Parmi ces articles, 119 dédiés plus spécifiquement à la résistance à la compression ont été analysés de façon plus approfondie.

Sur la base d'une démarche statistique, les auteurs ont d'abord développé une classification des GBR basée sur l'absorption d'eau et la masse volumique après séchage à l'étuve les

gravillons de GBR sont principalement classés dans les zones A et B du diagramme, tandis que les sables de GBR sont plutôt classés dans les zones B et C du diagramme [45], en raison de leur teneur en pâte de ciment plus élevée

1.7.7 Résistance à la traction par flexion et par fendage :

Les études réalisées concernant la résistance en traction des bétons recyclés présentent des résultats légèrement différents les uns des autres. Si toutes indiquent une perte de résistance pour le béton recyclé par rapport au béton standard, certains ont obtenu 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 [46]. Ces auteurs ont également constaté que l'utilisation de divers adjuvants, tels que la fumée de silice par exemple, permet d'améliorer les performances du béton recyclé.

De la même manière que pour la résistance à la compression, J. M. V. Gómez Soberón [47] a constaté que sur le long terme (5 ans), le gain de performance en traction d'un béton recyclé est clairement meilleur que celui d'un béton naturel.

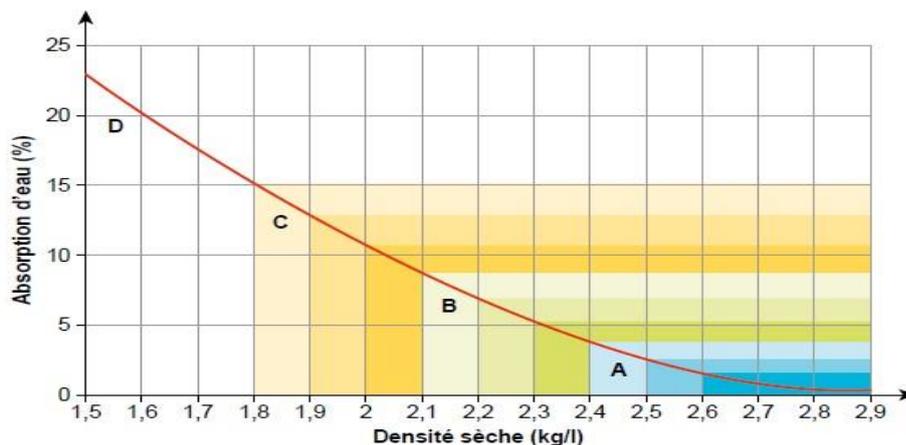


Figure (1.10) : Classification mécanique des granulats issus de Déchets de Construction et de Démolition (béton, maçonnerie ou mixte), [45]

1.8 Conclusion

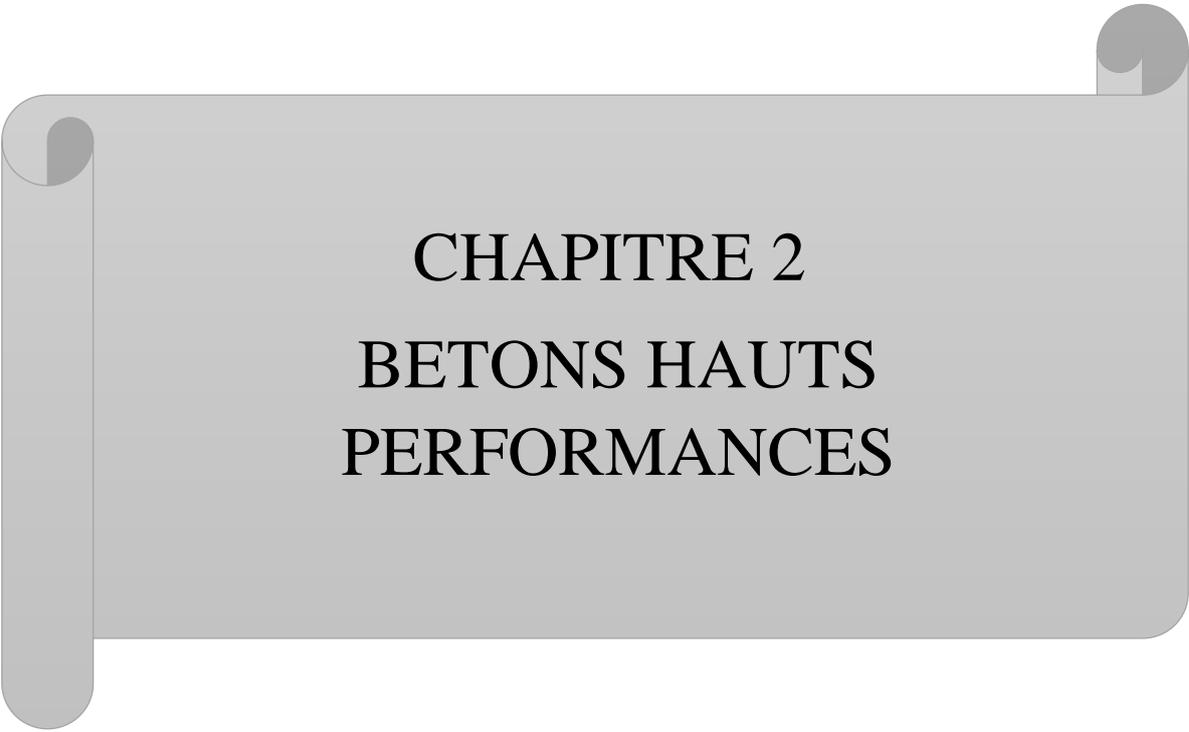
Cette partie présente un aperçu détaillé sur les granulats recyclés. Elle expose d'abord leur définition, leurs sources, leurs classifications ainsi que leur développement, ce chapitre fait une mémoire sur la description du béton à base des granulats recyclés, ses propriétés à l'état frais et durci.

Références

- [1] R. Bayard, C. De Brauer, G. Ducom, P. Naquin, B. Sarrazin, F. Achour, M. Rouez, and J. D. A. Morais, "Influence du prétraitement mécanique et biologique des ordures ménagères résiduelles sur leurs caractéristiques bio-physico-chimiques," *Techniques Sciences Méthodes*, pp. 93-106, 2007.
- [2] G. Main, "Social Web Counter, le tableau de bord du Web temps réel," 2010.
- [3] C. Thomas, J. Setién, J. Polanco, P. Alaejos, and M. S. De Juan, "Durability of recycled aggregate concrete," *Construction and building materials*, vol. 40, pp. 1054-1065, 2013.
- [4] L. Evangelista and J. De Brito, "Concrete with fine recycled aggregates: a review," *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, vol. 18, pp. 129-172, 2014.
- [5] Y. Hou, "Contribution au développement de la valorisation des déchets inertes du BTP: Étude de la carbonatation des granulats recyclés compactés," Université de La Rochelle, 2021.
- [6] L. Mongeard, "De la démolition à la production de graves recyclées: analyse des logiques de proximité d'une filière dans l'agglomération lyonnaise," *Flux*, pp. 64-79, 2017.
- [7] H. Bhatt, "Building Demolition Technique," in *International Conference on Intelligent Emerging Methods of Artificial Intelligence & Cloud Computing: Proceedings of IEMAICLOUD 2021, 2022*, pp. 291-298.
- [8] S. Braymand and J. Grangeorge, "Mise au point d'une méthode expérimentale de mesure de la conductivité thermique: application aux bétons de granulats recyclés," in *Actes du colloque Matériaux*, 2010.
- [9] B. Abderezzak, "valorisation des déchets de briques dans la réalisation des ouvrages en béton," *Magister en génie civil Filière: Aménagement Hydraulique et Génie*, 2006.
- [10] M. Tennich, M. B. Ouezdou, and A. Kallel, "Béton autoplaçant à base des déchets de marbreries et de carrelage," *Journées Nationales de Béton*, vol. 17, pp. 56-61, 2013.
- [11] C. Laneyrie, "Valorisation des déchets de chantiers du BTP: comportement à haute température des béton des granulats recyclés," Université de Cergy Pontoise, 2014.
- [12] S. Delvoie, Z. Zhao, F. Michel, and L. Courard, "Utilisation des sables et granulats recyclés dans le béton préfabriqué: comparaison des exigences réglementaires et techniques en Europe," in *Conférence Internationale Francophone NoMaD 2018*, 2018.
- [13] K. Dongo, B. Koné, I. Tiembré, J. Biémi, M. Tanner, J. Zinsstag, and G. Cissé, "Exposition environnementale à des déchets contenant du mercaptan, des hydrocarbures aromatiques et de l'hydrogène sulfuré (Abidjan)," *Environnement, Risques & Santé*, vol. 8, p. 519, 2009.
- [14] E. Queheille, "Optimisation multi-objectif d'une stratégie de déconstruction de bâtiments," *Academic Journal of Civil Engineering*, vol. 37, pp. 36-43, 2019.
- [15] W. GASDI and F. Z. KARMOUZI, "ÉTUDE EXPÉRIEMENTALE POUR LA DÉTERMINATION DE LA RESISTANCE D'UN BÉTON RECYCLÉ," FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES DÉPARTEMENT GÉNIE CIVIL, 2020.
- [16] A. Coelho, "Conventional demolition versus deconstruction techniques in managing construction and demolition waste (CDW)," in *Handbook of recycled concrete and demolition waste*, ed: Elsevier, 2013, pp. 141-185.
- [17] J. Cubaud, A. Ahmadi-Hachemi, and M. Murat, "Procédés de destruction des ouvrages en béton armé," *Matériaux et Construction*, vol. 10, pp. 127-138, 1977.
- [18] J. Bénazet, "Techniques des démolitions à l'explosif," *Techniques de l'Ingénieur*, 1997.
- [19] S. Decreuse, N. Comte, and C. Raillon, "Demolition techniques and obtained materials," in *Concrete Recycling*, ed: CRC Press, 2019, pp. 7-14.

- [20] S. Braymand, "Influence de l'utilisation de granulats recyclés sur les propriétés rhéologiques et physiques des bétons," in *Actes du colloque Matériaux*, 2010.
- [21] A. Iizuka, M. Nakagawa, K. Kumagai, A. Yamasaki, and Y. Yanagisawa, "Chemical extraction and mechanical crushing method for fine aggregate recycling from waste concrete," *Journal of chemical engineering of Japan*, vol. 43, pp. 906-912, 2010.
- [22] R. Maillot, *Mémento technique des granulats*: Presses des MINES, 2001.
- [23] S. Rémond, J. Mechling, E. Garcia-Diaz, R. Lavaud, R. Trauchessec, and B. Cazaciu, "Caractérisation des granulats de béton recyclé," ed: Ifsttar, 2018.
- [24] K. Y. Kim, T. S. Yun, J. Choo, D. H. Kang, and H. S. Shin, "Determination of air-void parameters of hardened cement-based materials using X-ray computed tomography," *Construction and building materials*, vol. 37, pp. 93-101, 2012.
- [25] Y. OTMANINE and M. GUENDOUZ, "L'effet du traitement thermique sur le comportement d'un béton de sable fluide à base des matériaux recyclés," 2018.
- [26] M. S. De Juan and P. A. Gutiérrez, "Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate," *Construction and building materials*, vol. 23, pp. 872-877, 2009.
- [27] M. Etxeberria, E. Vázquez, A. Marí, and M. Barra, "Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete," *Cement and concrete research*, vol. 37, pp. 735-742, 2007.
- [28] I. B. Topcu and S. Şengel, "Properties of concretes produced with waste concrete aggregate," *Cement and concrete research*, vol. 34, pp. 1307-1312, 2004.
- [29] T. BOUDINA, "Etude de l'influence de la granulométrie et de la nature des granulats recyclés sur les propriétés physico-mécaniques et la durabilité des bétons par la méthode des plans d'expériences," Faculté des Sciences et de la technologie, 2022.
- [30] H. K. A. Al-Bayati, P. K. Das, S. L. Tighe, and H. Baaj, "Evaluation of various treatment methods for enhancing the physical and morphological properties of coarse recycled concrete aggregate," *Construction and building materials*, vol. 112, pp. 284-298, 2016.
- [31] G. Sánchez and Á. Camacho Guizado, "Guerras, memoria e historia," *Revista de Estudios Sociales*, 2004.
- [32] T. Rilem, "RILEM recommendations for the testing and use of constructions materials," *RC*, vol. 6, pp. 218-220, 1994.
- [33] S. Iffat, "Relation between density and compressive strength of hardened concrete," *Concrete Research Letters*, vol. 6, pp. 182-189, 2015.
- [34] J.-M. Mechling, A. Lecomte, and K. Meriaux, "Mesure de l'absorption d'eau des additions minérales des bétons par évaporométrie: Measurement of the absorption of water of the mineral admixtures in concrete by evaporometry," *Materials and Structures*, vol. 36, pp. 3239, 2003.
- [35] A. Z. Bendimerad, "Comportements au jeune âge et différé des bétons recyclés: influence de la saturation initiale en eau et du taux de substitution," Ecole Centrale de Nantes, 2016.
- [36] A. D. Tegger, "Determining the water absorption of recycled aggregates utilizing hydrostatic weighing approach," *Construction and building materials*, vol. 27, pp. 112-116, 2012.
- [37] S. Omary, E. Ghorbel, and W. George, "Influence de l'incorporation des granulats recyclés de démolition sur les propriétés physiques et mécaniques des bétons fluides," in *Rencontres Universitaires de Génie Civil*, 2015.
- [38] S. Braymand, S. Roux, F. Schlupp, and H. M. Mendoza, "Carbonatation accélérée de granulats de béton recyclé—Évolution des propriétés selon leur classe granulaire," *Academic Journal of Civil Engineering*, vol. 40, pp. 76-79, 2022.

- [39] G. Corvec, P. Turcry, A. Aît-Mokhtar, R. Artoni, and R. Patrick, "Influence de la température sur la carbonatation des granulats de béton recyclés," in *NOMAD 2022-4e conférence internationale francophone Nouveaux Matériaux et Durabilité*, 2022.
- [40] Y. Zhao, B. Xu, and J. Chang, "Addition of pre-wetted lightweight aggregate and steel/polypropylene fibers in high-performance concrete to mitigate autogenous shrinkage," *Structural Concrete*, vol. 21, pp. 1134-1143, 2020.
- [41] T. Pernin, L. Robbiano, H. Ranaivomanana, A. Ben-Fraj, F. Geffray, G. Pham, X. Guillot, P. Rougeau, and O. Amiri, "Projet National FastCarb—Production de bétons contenant des granulats de béton recyclés carbonatés," *Academic Journal of Civil Engineering*, vol. 40, pp. 93-104, 2022.
- [42] M. Thiery, V. Baroghel-Bouny, N. Bourneton, G. Villain, and C. Stéfani, "Modélisation du séchage des bétons: analyse des différents modes de transfert hydrique," *Revue européenne de génie civil*, vol. 11, pp. 541-577, 2007.
- [43] C. J. F. d. Lima, "Sustentabilidade de concretos com misturas binárias de pozolanas e resíduos de demolição de concreto com ênfase na avaliação e custo do ciclo de vida," 2018.
- [44] A. SAID, "Etude du comportement d'un béton compacté au Rouleau (BCR) à base des granulats recyclés," 2018.
- [45] Y. Bozorgnia, N. A. Abrahamson, L. A. Atik, T. D. Ancheta, G. M. Atkinson, J. W. Baker, A. Baltay, D. M. Boore, K. W. Campbell, and B. S.-J. Chiou, "NGA-West2 research project," *Earthquake Spectra*, vol. 30, pp. 973-987, 2014.
- [46] A. Ajdukiewicz and A. Kliszczewicz, "Influence of recycled aggregates on mechanical properties of HS/HPC," *Cement and concrete composites*, vol. 24, pp. 269-279, 2002.
- [47] J. M. V. Gómez Soberón, "Creep of concrete with substitution of normal aggregate by recycled concrete aggregate," 2002.



CHAPITRE 2
BETONS HAUTS
PERFORMANCES

2.1 Introduction

Depuis longtemps, l'industrie et les concepteurs du béton sont contents de prescrire et de mettre sur le marché un béton universel dont la résistance en compression variant entre 15 et 25 MPa. Ces bétons leur étaient bien connus, ils étaient économiques, compétitifs et permettaient de construire des structures de façon sécuritaire. Depuis la découverte du béton armé, les études ont été axées sur la recherche de méthodes permettant de renforcer cette résistance. Des progrès considérables ont été enregistrés dans ce domaine au cours de ces dernières décennies. Dans les années 1970, la limite a été portée à 7 MPa, alors qu'en 99, la notion de béton à haute résistance était réservée à un béton d'une résistance à la compression comprise entre 8 et 50 MPa. Et cette évolution n'est pas terminée, des résistances à la compression supérieures à 50 MPa ont été réalisées lors de constructions récentes[1]. Dans ce chapitre, on présente une revue générale en ce qui concerne l'historique et les propriétés principales des bétons à haute performances, notamment les ciments, les granulats, les ajouts minéraux (fumée de silice et laitier), et les adjuvants (superplastifiants).

2.2 Historique

Le béton est devenu, grâce à des progrès scientifiques qui ont mobilisé les principales disciplines de la science des matériaux, d'une extraordinaire diversité. Il est toujours le matériau de construction le plus simple à fabriquer et à mettre en œuvre, avec des matières premières courantes et un matériel rudimentaire, il est aussi capable, aujourd'hui, grâce à une technologie de formulation sophistiquée, d'approcher les performances mécaniques de l'acier, de présenter une résistance exceptionnelle aux attaques physiques et chimiques, d'offrir aux architectes une qualité de surface et des possibilités architectoniques encore plus étendues [2] Le béton est un des matériaux les plus importants dans tous les domaines de la construction. Ceci s'explique par les faits suivants :

- Possibilité de varier les propriétés du béton ;
- Facilité de traitement mécanique des mélanges de béton ;
- Possibilité de mécanisation totale des travaux ;
- Qualité économique du béton.

Les caractéristiques les plus importantes des bétons sont la résistance mécanique et la durabilité. Selon ces caractéristiques et ses propriétés, les bétons se différencient entre eux. Il y a les bétons ordinaires (courant) et les bétons spéciaux (les bétons de granulats légers, les bétons cellulaires, les bétons réfractaires, les bétons à hautes performances...etc.) qui chacun a une propriété spéciale. Actuellement, après une sélection de matériaux et l'utilisation des superplastifiants, on arrive à fabriquer de bons bétons maniables, et très résistants à coût raisonnable. Au début des années 1960 dans la région Chicago, les bétons à hautes résistances ont, en quelque sorte, vu le jour et ont commencé à être utilisés en quantité non négligeable dans plusieurs structures majeures [3] En 1962, un béton de 40MPa est mis en place lors de la construction de l'édifice 1000 en Lake Shore Plaza. En 1965, c'est un béton de 50MPa qui est coulé lors de la construction de l'édifice en Lake Point. En 1972, la résistance à la compression maximale du béton atteint 60MPa lors de la construction de

Mid-Continental Plaza Building. En 1976, un béton de 75MPa est utilisé pour construire deux colonnes instrumentées dans le River Plaza Projet. En 1986, un béton de 100MPa été utilisé dans des projets spéciaux à CHICAGO. En

1988-1989, un béton de 120MPa été utilisé dans la réalisation du Tow-Union Square Building aux USA. Selon Pierre Claude Aïtcin [4] , il est possible de fabriquer des bétons de chantier de 150MPa , à condition de pouvoir disposer d'un ciment spécialement conçu à cet effet , de fumée de silice , de granulats particulièrement performants et d'un superplastifiant amélioré qui n'entraîne pas d'air piégé lorsqu'il utilise un très fort dosage. Avec quelques ciments Portlands très peu réactifs additionnés de fumée de silice et quelques fluidifiants particulièrement efficaces couplés à des granulats particulièrement performants qu'il est possible de réduire le rapport (E/C) entre 0.20 et 0.25 de bétons à hautes performances ayant un affaissement de 200mm lors de leurs livraisons en chantier. La résistance moyenne en compression de tels bétons peut atteindre 150MPa[4]

Les premiers ciments utilisés pour fabriquer des bétons à hautes résistance étaient des ciments de Type I ou de Type II ASTM ou des ciments qualifiés comme Type II modifiés. De façon à minimiser les problèmes de perte d'affaissement, les producteurs de béton substituaient déjà une certaine qualité de ciment Portland par une cendre volante de haute qualité. La demande en eau de béton était ainsi réduite quelque peu et le contrôle de la perte d'affaissement plus aisé, permettant ainsi de diminuer encore un tout petit peu le rapport eau /liant. , ce qui de toute façon permettait de compenser dans une certaine mesure les pertes de résistance à court terme causées par la substitution du ciment par cendre volante[4]

Mehta et Aïtcin [4] ont déclaré que le terme BHP devrait être appliqué aux mélanges des bétons possédants les trois caractéristiques suivantes : haute maniabilité, de haute résistance, et durabilité élevé. L'utilisation des ultrafines dans la fabrication des BHP est devenu alternative indispensable pour l'amélioration de la microstructure et la résistance mécanique, ainsi que la durabilité de ces bétons.

L'utilisation des ultrafines (fumée de silice, laitier granulé, cendre volante..., etc.) dans la fabrication des BHP est devenue choix indispensable pour l'amélioration de la microstructure et de la résistance mécanique, ainsi que la durabilité de ces bétons.

Bien que la première utilisation de ce produit de la fabrication du silicium et du Ferro silicium remonte à 1952 [5], ce n'est que vers la fin des années 1970 la fumée de silice a commencé à être utilisée en Scandinavie comme ajout cimentaire dans le béton. Au début des années 1980, la fumée de silice a commencé à être utilisée en Amérique du Nord [6]et ailleurs en Europe et dans le monde. Les fumées de silices condensées sont des sphères de petites dimensions (granularités entre 0.02 et 1 μ m, diamètre moyen d'environ 0.4 μ m) comparées à celles des grains de ciment (granularité entre 1 et 80 μ m, diamètre moyen d'environ 15 μ m). En raison de son extrême finesse et sa haute teneur en silice, la fumée de silice est un matériau pouzzolanique très efficace. Il est utilisé dans le béton pour améliorer ses propriétés (améliore la résistance à la compression, la force de liaison, réduit la perméabilité); et contribue donc à protéger l'acier d'armature contre la corrosion [7]

2.3 Définition des BHP

Par convention on appelle béton à haute performance (BHP), un béton dont la résistance mécanique moyenne à la compression à l'âge de 28 jours est supérieure à 50MPa sur cylindre et un rapport (Eau efficace/liant équivalent) inférieur à 0,4. Le BHP contient les constituants suivants : des granulats ordinaires, du ciment portland ordinaire, de la fumée de silice, parfois d'autres ajouts minéraux comme les laitiers et des adjuvants (fluidifiants) [1]. Les Bétons à Hautes Performances (BHP), sont des matériaux à très haute compacité et haute résistance, elle est de l'ordre plus de 100 MPa pour les bétons à très hautes performances, voire plus (150 à 200 MPa) pour des bétons fibrés à ultra hautes performances BFUP.

Hautes performances signifient aussi facilité de mise en œuvre et souplesse d'adaptation aux contraintes d'exécution des ouvrages. Les BHP ont une porosité extrêmement réduite, plus résistants aux agents agressifs et, de façon générale, présentent une durabilité accrue. Ils présentent une structure très dense, une faible porosité et une très bonne résistance à la pénétration d'agents agressifs [8]

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 et meilleures.

Pour parvenir à réduire la porosité d'une pâte de ciment hydratée dans les BHP, 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).



Figure (2.1) : Ponts en bétons à hautes performances (BHP)

2.4 Les constituants d'un BHP

Les bétons à haute performance sont constitués de liant, d'agrégats, d'eau et de super plastifiant. Le liant peut être un ciment seul ou un ciment plus un ajout cimentaire comme la fumée de silice, pouzzolane ou le laitier.

Lorsque l'on choisit les matériaux pour fabriquer un BHP, certains choix sont plus critiques que d'autres. Ainsi, on commencera par considérer la sélection du ciment portland même dans le cas où d'autres ajouts cimentaires sont utilisés en conjonction avec le ciment portland. La sélection se poursuit par celle du super plastifiant puisque l'expérience démontre que l'on doit d'abord optimiser la combinaison ciment- super plastifiant.[9]

Dans certaines régions, à l'heure actuelle, la performance des granulats constitue le facteur qui limite la résistance à la compression des BHP, par exemple à Sherbrooke en utilisant les granulats locaux il est impossible de fabriquer un béton de plus de 100 MPa. Dans ces cas, pour des raisons économiques, la résistance à la compression du béton peut ne pas toujours être augmentée autant qu'on le désire. [10]

2.4.1 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. À 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) [11]. 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 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 ; [12]
- **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 ; [13]

- **La teneur et morphologie du C_3A :** pour la formulation des BHP, l'utilisation d'un ciment contenant une faible teneur en C_3A 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 [14]. 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 surfaciques externes en raison de la limitation du risque de formation d'ettringite secondaire.

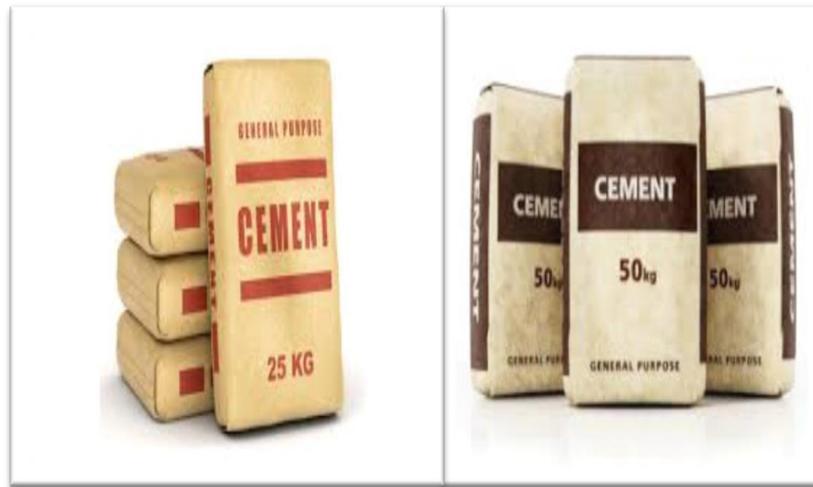


Figure (2.2) : Ciment pour BHP

2.4.2 Les granulats

Les granulats occupent environ 70 % du volume du matériau et, à ce titre interviennent directement sur les propriétés du béton à l'état frais comme à l'état durci. Ils semblent même plus sollicités dans les BHP que dans les bétons classiques [15]. D'une manière générale, les qualités demandées aux granulats pour l'obtention des BHP concernent essentiellement la forme et l'état de surface, la porosité, la granularité, les propriétés mécaniques et la nature minéralogique.

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 (Interracial Transition Zone) et sur les risques de développement de l'alcali-réaction semble avérée mais aussi sur les déformations différées du béton [16]. 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 proche 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 [17].

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 12mm [18].

S. Amziane et P. Baudeau,[19] ont 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 S. ZITOUNI,[20], 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 granulats de 65 à 75% entraîne une diminution du fluage de 10 % [21]. Quant à la forme, l'utilisation de granulats concassés ou semi-concassés permet d'obtenir des meilleurs comportements mécaniques comparativement aux formes roulées[18].

La forme intervient directement sur la compacité propre du béton. La rugosité de la surface favorise l'imbrication de la pâte de ciment.

Les granulats concassés à coefficient de forme élevé sont préférés aux granulats roulés lisses (adhérence plus élevée). Le coefficient de forme est le rapport du volume effectif du granulats sur le volume de la sphère circonscrite. Plus il sera élevé, meilleure sera la compacité. En outre, les formes très anguleuses sont très néfastes quant à l'obtention des bonnes résistances, elles poinçonnent la matrice lors d'une sollicitation.[23]

En effet, lorsque le béton est soumis à une sollicitation de compression, on peut assimiler les granulats à des plateaux de compression d'une presse et, la matrice se trouve donc poinçonnée [22].

Les granulats lisses favorisent la détérioration rapide de la liaison granulats – pâte très haute performance [23].

- **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), (Bolomey1935), (Caquot 1937), (Faury1953).



Figure (2.3) : Granulats naturels

2.4.3 Sable

Pour assurer le dosage en eau restreint du BHP, il est recommandé d'utiliser un sable propre. De même, le sable présentera de préférence une granularité continue et de haute régularité ainsi qu'une faible teneur en fines[24].

Le sable utilisé pour fabriquer des bétons à hautes performances doit avoir un module de finesse élevé. Il a été constaté qu'avec un module de finesse d'environ 3, le béton a une meilleure ouvrabilité et de meilleures résistances en compression simple. Un module de finesse inférieure à 2.5 rend le béton collant et donne des résistances moins bonnes[25].



Figure (2.4) : Sable pour BHP

2.4.4 Les ajouts minéraux

2.4.4.1 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 granulat 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) [26].

A) Laitier vitrifié 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 [27], 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 [28]

C) Hydraulicité du Laitier Vitriifié

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 inhibé 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[29]

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.

2.4.4.2 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 on trouve les valeurs entre 15000 et 25000 m²/kg, par contre 1500 m²/kg pour un ciment portland.[11]

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 a un effet non négligeable sur la germination des grains de portlandite $(OH)_2$ [11].

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 [10].

Les avantages de la fumée de silice

- A)** Bétons à l'état frais [30] Réduction de :
- La ségrégation ;
 - La chaleur d'hydratation ;
 - L'exsudation. Amélioration de :
 - L'adhésion ;
 - La cohésion.
- B)** Bétons à l'état durci
- Amélioration des résistances mécaniques ;
 - Amélioration significative de :

- La résistance aux attaques chimiques, aux sulfates, aux chlorures ;
- La corrosion des armatures ;
- La résistance aux cycles de gel/dégel.

Réduction significative de :

- Porosité et perméabilité ;
- Carbonatation ;
- Résistance à l'abrasion. Prévention du risque :
- D'alcali-réaction
- Homogénéisation de la teinte des parements.

La fumée de silice est un produit minéral amorphe obtenu essentiellement lors de la fabrication du silicium et de ses alliages. Le silicium est obtenu par réduction du quartz en présence de carbone à 2 000 °C dans des fours à arc électrique. Les fumées contiennent du monoxyde gazeux (SiO) qui s'oxyde et se condense en particules vitrifiées amorphes extrêmement fines. Ces particules sont lisses et sphériques (100 000 billes de fumées recouvrent entièrement un grain de ciment). Leur couleur est le plus souvent gris clair.

2.4.4.3 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 en trouve : les cendres silico alumineuses, les cendres silicocalciques et les cendres sulfocalcique 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.[34]

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 0,5µm à 4 µm selon la nature du produit, la masse volumique moyenne est d'environ 1,35m2/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. [31]

2.4.4.4 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 granulite 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. [32]

2.4.5 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 [41].

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 murissement 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 [41].

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.

2.4.6 Les adjuvants

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 [26]. 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

d'avantage 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 floculation 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 [33], les super plastifiants 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 super plastifiants.

2.4.6.1 La sélection d'un super plastifiant pour les BHP

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

2.5 Microstructure des BHP :

X. LI, M. ONOFREI, Z. LI, G. BALLIVY, et K. KHAYAT [37] ont étudié les propriétés micro structurelles des échantillons de béton à haute performance (BHP) analysées par microscopie électronique à balayage (MEB) et diffraction X, suite aux tests thermo-hydrauliques et thermomécaniques. Les relations entre le comportement en matière d'ingénierie du matériau (propriétés mécaniques et de transfert) et les microstructures de BHP ont été ensuite évaluées. Le mécanisme de rupture du BHP sous des conditions thermomécaniques a aussi été abordé dans [37]. Un niveau de porosité plus faible, une plus grande concentration en silicate de calcium hydrate (C-H-S) et une concentration plus faible de l'hydroxyde de calcium (CH) à la fois dans la pâte de ciment et dans la zone de transition ont joué une influence positive sur les propriétés mécaniques et de transfert des BHP. Ils ont conclu que en élevant la température à 200 degrés C°, l'évaporation de l'eau a conduit à une augmentation de la porosité capillaire de même qu'à une réduction des forces de cohésion entre les couches de H-S-C, engendrant une dégradation des propriétés mécaniques et de transfert du béton. Les microfissures sous l'effet des conditions thermomécaniques se sont avérées être la cause principale de dégradation mécanique du BHP. [34]

2.6 Avantages des BHP

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

- La maniabilité est accrue sans risque de ségrégation lors de la mise en œuvre ;

- La durabilité des structures est améliorée par la forte compacité du béton avec une perméabilité à l'air et à l'eau réduite, une résistance aux agressions, et une meilleure résistance ;
- La conception des structures plus minces grâce à l'augmentation des caractéristiques mécaniques (compression, traction, module d'élasticité) tant au jeune âge qu'à terme, Cependant les propriétés améliorées des bétons à hautes performances ne peuvent être obtenues que grâce à plusieurs dispositions simultanées comme :
- Les granulats qui doivent être de bonne qualité, la résistance du béton pouvant être limitée par celle des granulats eux-mêmes ;
- L'emploi d'adjuvants spécifiques, notamment des super plastifiants réducteurs d'eau ainsi que des ajouts minéraux tels que la cendre volante, le laitier du haut fourneau, la fumée de silice.... etc.,
- L'emploi de ciments de classe élevée à des dosages compris entre 400 et 550 kg/m³. L'utilisation du béton à hautes performances progresse constamment dans le domaine de construction et le nombre d'édifices en béton à hautes performances ne cesse d'augmenter car les concepteurs et les maîtres d'œuvre réalisent la valeur et la durabilité de ce béton. [35]

2.7 Caractéristiques critiques des BHP [36]

- Facilité de mise en place ;
- Consolidation sans ségrégation ;
- Résistance au jeune âge ;
- Résistance à long terme et propriétés mécaniques ;
- Perméabilité ;
- Chaleur d'hydratation ;
- Stabilité volumétrique ;
- Durabilité.

2.8 Différents classes de BHP :

La division des BHP en cinq classes n'est pas aussi arbitraire qu'elle peut le paraître à première vue, mais elle dérive plutôt de l'état actuel des connaissances. Les BHP sont divisés en cinq grandes catégories correspondant chacun à une plage de résistance de 25 MPA. [10]

Tableau 2.1: Les différentes classes de BHP

Résistance à compression	50	75	100	125	150
Classes des BHP	Classes I	Classes II	Classes III	Classes VI	Classes V

2.9 Principaux domaines d'applications des BHP [22]

- Ponts routiers ;
- Tunnels et travaux souterrains ;
- Préfabrication ; Ouvrage en site maritime ;
- Les chaussées rigides.

2.10 Propriétés des BHP

2.10.1 Propriétés physico-chimiques

Les diverses propriétés des BHP découlent de leur faible porosité :

Masse volumique

La masse volumique d'un BHP frais est légèrement supérieure à celle d'un béton usuel fait avec les mêmes matériaux. La masse volumique d'un BHP sans air entraîné est souvent voisine de 2500 kg/m³ et de 2400 kg/m³ pour un BHP à air entraîné. Ce qui représente approximativement 50 à 100 kg/m³ de plus que la masse volumique des bétons usuels [4].

2.10.2 Propriétés mécaniques

Les BHP présentent des résistances en compression importantes aux jeunes âges, compte tenu de la rapidité de la cinétique de montée en résistance, et très élevées à long terme (avec une montée en résistance se poursuivant au-delà de 28 jours). Un BHP de 60 MPA à 28 jours peut offrir des résistances mécaniques de 15 MPA à 24 heures, voire davantage, et 40 MPA à 7 jours. Le gain est aussi important en termes de résistance en traction ou au cisaillement. [37]

Résistance en compression

C'est la propriété d'usage la plus importante, c'est aussi celle dont l'amélioration est plus spectaculaire des bétons dont la résistance à la compression dépassait 200 MPA [38].

Le tableau 2.2 présente les résistances à la compression et module d'élasticité des bétons confectionnés avec différents types de granulats et des mortiers, en fonction du rapport E/L [39]

Tableau 2.2 : Résistance à la compression et module d'élasticité des BHP [93].

Rapport E/L		Résistance à la compression (MPa)			Module d'élasticité (GPa)		
		0.50	0.27	0.22	0.50	0.27	0.22
Béton de calcaire	28j	56.2	92.1	117.2	33	42	48
	90j	69.4	111.2	126.5	36	44	52
Béton de granite	28j	59.5	100.3	127.4	32	42	45
	90j	64	118.3	134.5	34	43	47
Béton de quartz	28j	53.4	93.4	103.3	33	45	42
	90j	58.5	113.4	118.6	34	47	52
Béton de grés	28j	57.2	113.3	118.6	21	30	31
	90j	64	127.6	121.2	22	31	35
Mortier	28j	45.1	88.6	104.6	30	39	42

A l'issue du tableau 1, on constate que :

- Au jeune âge, les résistances mécaniques des BHP sont généralement plus hautes car leur cinétique de durcissement est plus rapide en raison des dosages élevés en ciment et des faibles rapport E/C ; [36]
- La résistance à la compression des bétons augmentent lorsque le rapport E/L diminue (0.5 à 0.22) ;
- La résistance à la compression semble continuer à se développer après 28 jours même si c'est à un taux de gain de résistance faible. Le gain de résistance a atteint 15% à 20% à 90 jours.

Résistance en traction

Si la résistance à la compression des BHP peut être doublée voir triplée, celle de la traction (f_t) reste très faiblement améliorée. Il a été constaté qu'une diminution du rapport f_t/f_c lorsque la résistance à la compression de béton (f_c) augmente. En effet, pour le béton ordinaire (C30/37) le rapport f_t/f_c variant de 1/10 à 1/12, alors qu'un BHP (C80/95) aura un rapport de 1/15 [40], [41], [93] .

Pedeches [42] a proposé également la relation suivante pour des résistances en compression comprises entre 30 et 130 MPa

$$f_t = 5,5 + 0,027 f_c \quad (\text{Eq 2.2})$$

Par ailleurs, la variation de la résistance à la flexion a la même tendance que celle à la compression.

Pour sa part, Pedeches [42] a montré que la résistance en traction par flexion à 28 jours avec un BHP à la fumée de silice varie entre 5 et 9 MPa.

2.11 Autres propriétés des BHP

2.11.1 Module d'élasticité :

Le module d'élasticité des BHP est supérieur à celui des bétons ordinaires environ de 45 MPa.

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. [43]

Le lien du E_c avec f_c s'est avéré fortement dépendant du type de granulat, utilisé comme squelette granulaire pour la confection du béton.

Le module d'élasticité du béton augmente lorsque la résistance à la compression augmente, mais l'augmentation de ce module d'élasticité est progressivement lente par rapport à l'augmentation de la résistance en compression.

Pour le béton à hautes performances, il a été constaté que son module E_c n'est pas le triple ni même le double de celui du béton ordinaire pendant que sa résistance à la compression passe de 30 à 40 MPa à plus de 100 MPa facilement.

Les résultats présentés au tableau 2.2 montrent que le module E_C du béton n'augmente pas dans les mêmes proportions que la résistance à la compression. Une augmentation de l'ordre de 10-20% [44], [54], [46],[47].

2.11.2 Le retrait :

Le retrait total du BHP est globalement identique à celui d'un béton traditionnel mais avec une cinétique différente (il se produit plus tôt et se développe principalement pendant les premiers jours après le coulage). Le retrait de dessiccation à l'état durci est plus faible compte tenu du faible dosage en eau.

Compte tenu de la finesse de la microstructure et de la forte réduction du rapport E/C, est d'un coefficient plus élevé (150 à 250 x 10⁻⁶) pour un BHP que pour un béton traditionnel (60 x 10⁻⁶). Le retrait d'autodissociations est d'autant plus précoce et élevé que le rapport E/C est faible. [48]

2.11.3 Fluage :

Les BHP présentent un fluage (déformation différée sous chargement permanent) plus faible que les bétons traditionnels.

2.11.4 Imperméabilité :

Leur faible porosité capillaire confère aux BHP une très faible perméabilité

2.11.5 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.).

2.11.6 Migration des ions chlorure :

La résistance des BHP à la migration des ions chlorures est supérieure à celle des bétons courants, grâce à sa microstructure plus dense.

2.11.7 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.

2.11.8 Carbonatation :

De nombreuses études ont démontré que la durabilité des BHP vis-à-vis de la carbonatation est très nettement supérieure à celle d'un béton traditionnel. [48]

2.12 Les BHP spéciaux :

- Les BHP à air entraîné ;
- Les BHP légers ;
- Les BHP lourds ;
- Les BHP renforcés de fibres ;

- Les BHP confinés ;
- Les BHP compactés au rouleau.

Il est certain que dans le future, d'autre BHP spécieux seront développés pour remplir des besoins technologiques particuliers. Il y'a que l'imagination des ingénieurs et le cout qui vont déterminer jusqu'à quel point on pourra développer de nouvelles utilisations de BHP spécieux [37, 42]

2.13 Formulation des BHP :

La formulation des BHP est une opération plus complexe que celle des bétons ordinaires. 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 teneur en eau faible). Ainsi il sera nécessaire de connaître pour chaque adjuvant la dose de saturation, au-delà de laquelle le produit n'a plus d'effet fluidifiant supplémentaire. La composition des bétons à hautes performances varie en fonction des propriétés visées du béton frais et durci (autoplaçant, élément en béton de parement, etc.) [49]. En effet, le choix de ciment est évidemment crucial dans la fabrication d'un béton à haute performance, d'un point de vue résistance, et d'un point de vue rhéologique de la pâte de ciment avec un faible rapport E/C. En outre, la façon pratique pour l'étude du comportement rhéologique d'un ciment vis-à-vis d'un superplastifiant se fait par "la méthode des coulis". Elle permet de caractériser les interactions ciment-superplastifiant, et d'optimiser le choix et le dosage en superplastifiant pour chaque ciment [50],[51]. Cette partie est détaillée dans le chapitre 3 de ce manuscrit.

L'étude du passage d'un béton ordinaire à un BHP à base de granulats recyclés nécessite une bonne connaissance des paramètres de formulation tels que les granulats recyclés et la fraction volumétrique du squelette granulaire et le rapport Granulats/Sable. En fait, il n'existe pas de méthode universelle précise pour la formulation de ces nouveaux bétons.[42]

2.14 Conclusion

Depuis longtemps, la relation entre la composition du béton et ces propriétés rhéologiques et mécaniques a intéressé les chercheurs. Ces dernières décennies, les travaux de recherche ont orienté vers les effets néfastes des excès de l'eau de gâchage, pour la résistance et la durabilité des bétons ainsi que la recherche d'un mélange de très haute compacité, lors de la composition du béton, ces deux voies de recherche sont abouties à des résultats très intéressants, et à la découverte des nouveaux bétons qui ont des performances très élevées et surtout au niveau de la résistance et de la durabilité, ce sont les Bétons à Hautes Performances (BHP) et à très Hautes Performances (BTHP).

Par ailleurs, le BHP peut également être une solution alternative pour les constructions réalisées habituellement en béton conventionnel car il présente des avantages et des performances très intéressantes par rapport au béton traditionnel tel que :

- Durabilité améliorée face aux agressions physico-chimiques,
- Une fluidité très élevée à l'état frais ;
- Résistance accrue au jeune âge ;
- Une résistance finale accrue après durcissement ; □ Un module d'élasticité supérieur.

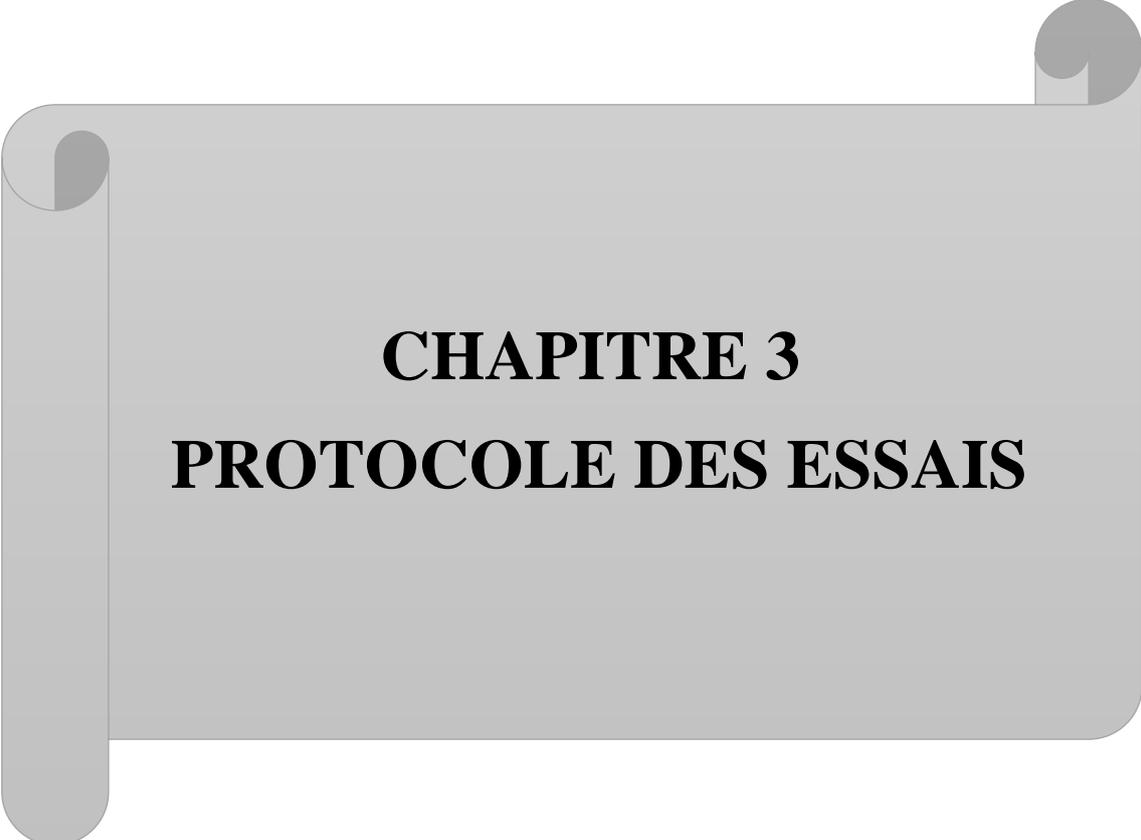
Le recours judicieux au BHP exige de toute évidence une collaboration très étroite entre le propriétaire, l'architecte, l'ingénieur, l'entrepreneur, la centrale à béton et le laboratoire de recherche.

Références

- [1] N. Tebbal and Z. Rahmouni, "Etude paramétrique de l'effet du dosage en super plastifiant sur la performance d'un béton à haute performance," *INVACO2: Séminaire International, Innovation & valorisation en génie civil & matériaux de construction*, 2011.
- [2] P. ACKER and V. MICHAUD-POUPARDIN, "Limiter la fissuration: Conditions indispensables à la durabilité des structures en béton," *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, France*, 2002.
- [3] T. De Larrard, "Variabilité des propriétés du béton: caractérisation expérimentale et modélisation probabiliste de la lixiviation," *École normale supérieure de Cachan-ENS Cachan*, 2010.
- [4] P.-C. Aïtcin, *Bétons haute performance*, 2001.
- [5] P. Kumar Mehta and P.-C. Aïtcin, "Principles underlying production of highperformance concrete," *Cement, concrete and aggregates*, vol. 12, pp. 70-78, 1990.
- [6] H. Ouanani, "Caractérisation d'un béton routier À base Des matériaux locaux," 2016.
- [7] P. K. Mehta, D. Pirtz, and M. Polivka, "Properties of alite cements," *Cement and concrete research*, vol. 9, pp. 439-450, 1979.
- [8] L. GHERAIBIA, "Etude des caractéristiques mécaniques du béton avec l'ajout des fibres," 2022.
- [9] H. A. Ghassouli Nawel, "COMPORTEMENT MECANIQUE DES POUTRES EN BHP ARMEES LONGITUDINALEMENT," 2020.
- [10] M. Saric-Coric and P.-C. Aïtcin, "Bétons à haute performance à base de ciments composés contenant du laitier et de la fumée de silice," *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 30, pp. 414-428, 2003.
- [11] V. Baroghel-Bouny and P.-C. Aïtcin, *PRO 17: International RILEM Workshop on Shrinkage of Concrete-'Shrinkage 2000'* vol. 17: RILEM publications, 2001.
- [12] W. Ladaoui, "Etude expérimentale du comportement Thermo-Hydro-Mécanique à long terme des BHP destinés aux ouvrages de stockage des déchets radioactifs," Toulouse 3, 2010.
- [13] G. Camps, "Etude des interactions chemo-mécaniques pour la simulation du cycle de vie d'un élément de stockage en béton," Toulouse 3, 2008.
- [14] G. Arliguie and J. Grandet, "Etude de l'hydratation du ciment en presence de zinc influence de la teneur en gypse," *Cement and concrete research*, vol. 20, pp. 346354, 1990.
- [15] G. Arquie and C. Tourenq, *Granulats*, 1990.
- [16] A. Makani, "Influence de la nature minéralogique des granulats sur le comportement mécanique différé des bétons," Toulouse, INSA, 2011.
- [17] C. Gonilho Pereira, R. Fanguero, S. Jalali, M. Araujo, and P. Marques, "Braided reinforced composite rods for the internal reinforcement of concrete," *Mechanics of composite materials*, vol. 44, pp. 221-230, 2008.
- [18] S. Amziane and P. BAUDEAU, "Influence de la concentration et de la dimension des granulats vis-à-vis de la poussée du béton frais sur une paroi coffrante," *MATERIALS AND STRUCTURES/MATERIAUX ET CONSTRUCTIONS*, vol. 33, 2000.
- [19] S. Amziane and P. Baudeau, "Influence de la concentration et de la dimension des granulats vis-à-vis de la poussée du béton frais sur une paroi coffrante."
- [20] S. ZITOUNI, "Effet de la granulométrie (grosseur et fraction granulaire) des granulats concassés sur les caractéristiques du béton," Université de M'sila, 2016.
- [21] J.-P. Sellin, J.-F. Barthélémy, G. BONDONET, and J.-M. TORRENTI, "Déformations différées des structures en béton: Le pont de Savines," *Bulletin Ouvrages d'Art du Cerema*, 2016.

- [22] A. M. Neville, *Properties of concrete* vol. 4: Longman London, 1995.
- [23] H. AKCHICHE, "Contribution à la modélisation du retrait et du fluage des bétons et mortiers renforcés par des fibres de palmier dattier en régions désertiques," 2007.
- [24] B. Messaoud, "Etude rhéologique et caractérisation mécanique par différentes méthodes d'un BHP avec sable préparé," Faculté des Sciences et Technologies, 2018.
- [25] F. Z. Berrah and A. Boudchicha, "Utilisation des adjuvants super-plastifiants pour l'amélioration des propriétés rhéologiques et mécaniques des bétons," 2013.
- [26] M. DJILLAILI, "Détermination de la résistance en compression d'un béton à hautes performances recyclé à base de laitier (El Hadjar Annaba)," FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES DÉPARTEMENT GÉNIE CIVIL, 2021.
- [27] M. Behim, M. Beddar, and P. Clastres, "Reactivity of granulated blast furnace slag," *Slovak Journal of Civil Engineering*, vol. 21, pp. 7-14, 2013.
- [28] R. Chaid, L. Molez, M. S. Mansour, and A. Talah, "Comportement des BHP de laitier soumis aux cycles immersion-séchage," *Journal of Materials and Engineering Structures*, vol. 3, pp. 23-33, 2016.
- [29] S. Dehar, S. Aboulhacene, Z. Tella, and R. ZAIDI, "Nouvelles technologies de traitement de l'eau," UNIVERSITE AHMED DRAIA-ADRAR, 2022.
- [30] D. Beaupre, "Rheology of high performance concrete," University of British Columbia, 1994.
- [31] F. Ayrinhac, "Valorisation des cendres volantes de chaudière à lit fluidisé circulant dans la filière du génie civil," INSA de Toulouse, 2005.
- [32] R. Chaid, A. Bali, R. Jauberthie, and M. Abadlia, "Apport des fillers calcaires à la durabilité des BHP en milieu sulfatique," *Matériaux & Techniques*, vol. 94, pp. 199-207, 2006.
- [33] N. Tebbal, "Effet de la nature des granulats sur les propriétés physico-mécaniques et durabilité d'un béton à haute performance," Université de M'sila, 2017.
- [34] X. LI, M. ONOFREI, Z. LI, G. BALLIVY, and K. KHAYAT, "Propriétés microstructurelles d'un BHP sous différentes conditions thermo-mécaniques et thermohydrauliques," *MATERIALS AND STRUCTURES/MATERIAUX ET CONSTRUCTIONS*, vol. 32, 1999.
- [35] P.-C. A t cin, "Cements of esterda and toda concrete of tomorro ," *Cement and concrete research*, vol. 30, pp. 1349-1359, 2000.
- [36] V. Baroghel-Bouny, "Caractérisation microstructurale et hydrique des pâtes de ciment et des bétons ordinaires et à très hautes performances," Citeseer, 1994.
- [37] T. Hadjira, "Confection d'un BHP avec des granulats mixtes (concassé et roulé)," UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF-M'SILA, 2017.
- [38] F. De Larrard and Y. Malier, "PROPRIETES CONSTRUCTIVES DES BETONS A TRES HAUTES PERFORMANCES-DE LA MICRO A LA MACROSTRUCTURE," in *Annales de l'Institut technique du bâtiment et des travaux publics*, 1989.
- [39] V. Mathias and F. de Larrard, "Prévision des résistances en compression des bétons au laitier," *Revue française de génie civil*, vol. 6, pp. 545-562, 2002.
- [40] M. HAMRAT, "Béton a hautes performances: formulation, propriétés rhéologiques et mécaniques," Mohamed CHEMROUK, 1994.
- [41] H. Gaher, "Analyse de la résistance à la traction indirecte et du retrait des bétons à hautes performances," Alger, 2004.
- [42] J.-M. PEDECHES, "Béton de hautes et très hautes performances: propriétés mécaniques et retrait: aide à la formulation," in *Annales de l'Institut technique du bâtiment et des travaux publics*, 1994, pp. 1-43.
- [43] B. M. SABAH and M. BOUZIDI, "Déformabilité et module d'élasticité des bétons à hautes performances."

- [44] P. Pimienta, "Evolution des caractéristiques des BHP soumis à des températures élevées. Résistance en compression et modules d'élasticité," *Cahiers du Centre scientifique et technique du bâtiment*, 2001.
- [45] D. Polid, "Analiza svojstava agregata lokalnih proizvođača," Universit of Rijeka. Faculty of Civil Engineering in Rijeka, 2018.
- [46] F. De Larrard, "Structures granulaires et formulation des bétons," 2000.
- [47] T. Sedran, F. de LARRARD, and D. Angot, "Prévision de la compacité des mélanges granulaires par le modèle de suspension solide-I-Fondements théoriques et étalonnage du modèle," *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, 1994.
- [48] S. Tremblay, *Methodes de formulation de betons compactes au rouleau et effet des agents entraineur d'air sur la maniabilite*: Universite Laval, 1998.
- [49] F. De Larrard and R. Le Roy, "Relation entre formulation et quelques propriétés mécaniques des bétons à hautes performances," *Materials and Structures*, vol. 25, pp. 464-475, 1992.
- [50] P. Aïtcin, "Bétons Haute Performance, éditions Eyrolles," ed: Paris, 2001.
- [51] D. BENAMARA, "Formulation et étude d'un béton à haute performance (BHP)," Université Mohamed Khider–Biskra, 2011.



CHAPITRE 3
PROTOCOLE DES ESSAIS

3.1 INTRODUCTION

Dans cette partie, nous abordons les différents essais effectués pour la formulation du béton à hautes performances recyclés et du béton à hautes performances témoin, ainsi que les essais réalisés sur le béton confectionné pour évaluer ses propriétés à l'état frais et durci. On peut distinguer :

- Des essais d'identification des matériaux utilisés (ciment, sable et gravier) ;
- Des essais mécaniques de compression et de traction sur le béton durci dans le but de valoriser essentiellement la performance de notre BHPR à base de laitier.

L'objet de ce chapitre est la présentation des matériaux utilisés pour la confection des différents mélanges des bétons étudiés et la méthodologie adoptée dans cette recherche expérimentale. Nous avons utilisé des matériaux locaux, leurs caractéristiques sont étudiées expérimentalement au laboratoire de département de génie civil à l'université IBN KHALDOUN DE TIARET. Nous avons analysé les caractéristiques des granulats recyclés et des granulats naturels entrant dans la composition des bétons.

Cette étude vise à analyser l'effet de la teneur en granulat recyclé GR et de leur maturité (temps écoulé entre la coulée et le concassage du béton parent à partir duquel le granulat recyclé GR est obtenue) sur les propriétés mécaniques du BHP et BHPR. À cette fin, cinq mélanges ont été fabriqués avec 0%, 25%, et 75% de GR de différentes échéances, 7 jours (GR précoce) et 12 mois (GR mature). Les résistances mécaniques (en compression, et en traction par flexion) de tous les mélanges ont été déterminées.

3.2 Les Matériaux Utilisés

D'après le chapitre précédent on a pu identifier les critères nécessaires que doivent comporter les matériaux utilisés pour réaliser un béton qui acquit les performances souhaitées.

Il est bien connu que le béton est un matériau composite, ses propriétés à l'état frais et à l'état durci comme la résistance à la compression dépendent de la nature, la qualité et le dosage de ses composants, c'est pour cela qu'il est nécessaire de bien les caractériser. Les matériaux utilisés dans cette étude expérimentale sont des matériaux locaux et naturels. Tous les bétons sont réalisés avec les mêmes matériaux et qui sont respectivement :

3.2.1 Les granulats :

Dans cette étude, on a utilisé trois types de granulats



a – sable 0/5 b - graviers naturel (3/8 , 8/15) c - graviers recyclés (3/8, 8/15)

Figure (3.1) : Granulats utilisés

- **Sable naturel** : GUELTET SIDI SAÂD. De la Wilaya de Laghouat.

Le sable a de nombreuses applications en tant que matériau granulaire, dont la principale est la fabrication du béton. C'est une ressource non renouvelable.

- **Granulats naturels** (concassés) (graviers (3/8,8/15), OULED BOUGHADOU, Tiaret.

Contrairement aux sables, les graviers présentant des classes granulaires relativement grossières. Ainsi, le principe de séparation des agrégats des éléments fins ne se fera pas par sédimentation mais par lavage.

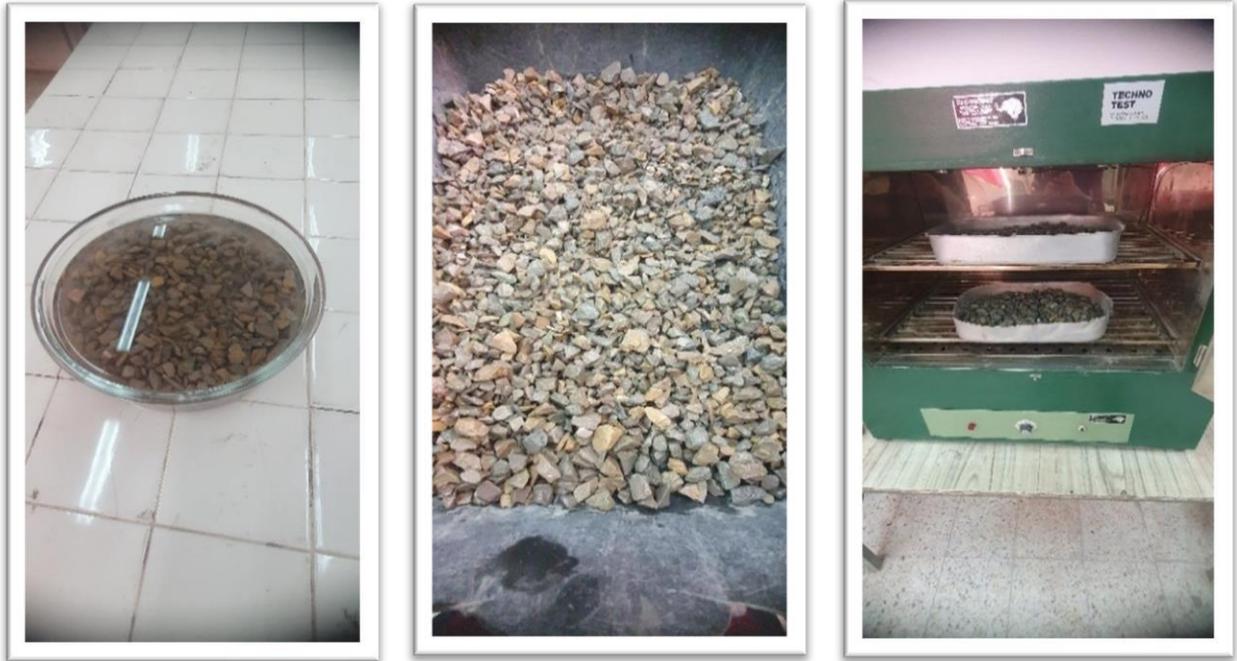


Figure (3.2) : Préparation de gravier (lavage, séchage)

- **Granulats recyclé** (3/8, 8/15)

Tout d'abord, le béton parent (BP) a été fabriqué avec 100% de granulat naturel selon la composition indiquée dans le tableau 3.1. Le BP avait une résistance à la compression de 38,09 MPa à 7 jours et de 44,80 MPa à 28 jours. De plus, sa résistance à la traction par flexion sur 28 jours était de 3,32 MPa. Par la suite, le granulat recyclé a été obtenue en écrasant le BP dans un concasseur à mâchoires. Les fractions grossières (3/15 mm) et fines ont été séparées par tamisage ultérieur. De cette façon, la proportion d'agrégats est restée constante dans tous les mélanges.

Le BP a été broyé à deux âges différents : après une période de durcissement à l'air de 7 jours (GR précoce, étiqueté GRP), et après une période de durcissement à l'air de 12 mois (GR mature, étiqueté GRM).



Figure (3.3) : Préparation de granulats recyclés (concassage de béton)

3.2.2 Le 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 la carrière de GUELTET SIDI SAÂD, EL-BEIDHA, 20 Km de la Wilaya de LAGHOUT

(voir annexe 4).



Figure (3.4) : Ciment utilisé (AL ESSES)

3.2.3 Le laitier :

Le laitier utilisé est un sous-produit de la fabrication de la fonte, de l'usine d'El-Hadjar Annaba, Algérie, c'est une poudre de surface Spécifique Blaine de 8 500 cm² /g. Les principaux composants chimiques de ce type de laitier sont la chaux, la silice, l'alumine et la magnésie qui représentent 95 à 97% de la composition totale du laitier (voir annexe 5)



Figure (3.5) : Laitier utilisé

3.2.4 l'adjuvant (superplastifiant) :

L'adjuvant utilisé est un superplastifiant sous forme de liquide, selon EN 934-2 (voir annexe 6). Les principales propriétés physiques et chimiques sont données par le fabricant (société GRANITEX d'Alger).

Ces composés sont souvent organiques, conçus spécifiquement pour des applications concrètes, et sont disponibles dans le commerce sous forme de solutions aqueuses. Il vise à améliorer certaines propriétés du matériau tel que l'augmentation de la viscosité du béton.



Figure (3.6) : Adjuvant super plastifiant MEDAFLOW RE 25

3.2.5 L'eau de gâchage :

L'eau de gâchage utilisée dans notre étude est une eau potable de robinet.

3.3 Les essais sur les matériaux utilisés :

Les matériaux prélevés ont été soumis aux essais d'identification dans le laboratoire de génie Civil de l'Université ibn Khaldoun Tiaret, selon un programme d'essais réalisé conformément aux normes. Les essais effectués sur les matériaux sont :

3.3.1 Analyses physiques :

3.3.1.1 Equivalent de sable NF P18-598 :

Il permet de mesurer la propreté de la quantité d'éléments fins contenus dans le matériau sans aucune distinction de nature. L'équivalent de sable est le rapport conventionnel volumétrique entre les grains fins et les autres, il permet donc de caractériser l'importance des fines par une valeur numérique, plus l'équivalent de sable est élevé, moins le matériau contient des éléments fins nuisibles. Il s'effectue sur les fractions inférieures à 5 mm. Pour

calculer l'équivalent de sable il existe deux types d'essais : visuel ou au piston qui décrit de manière détaillée le mode opératoire concernant cet essai.

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

$$E_s = 100 \left(\frac{h_2}{h_1} \right) \quad \text{Eq (3.1)}$$

Hauteur h_1 : sable propre + éléments fins;

Hauteur h_2 : sable propre seulement.

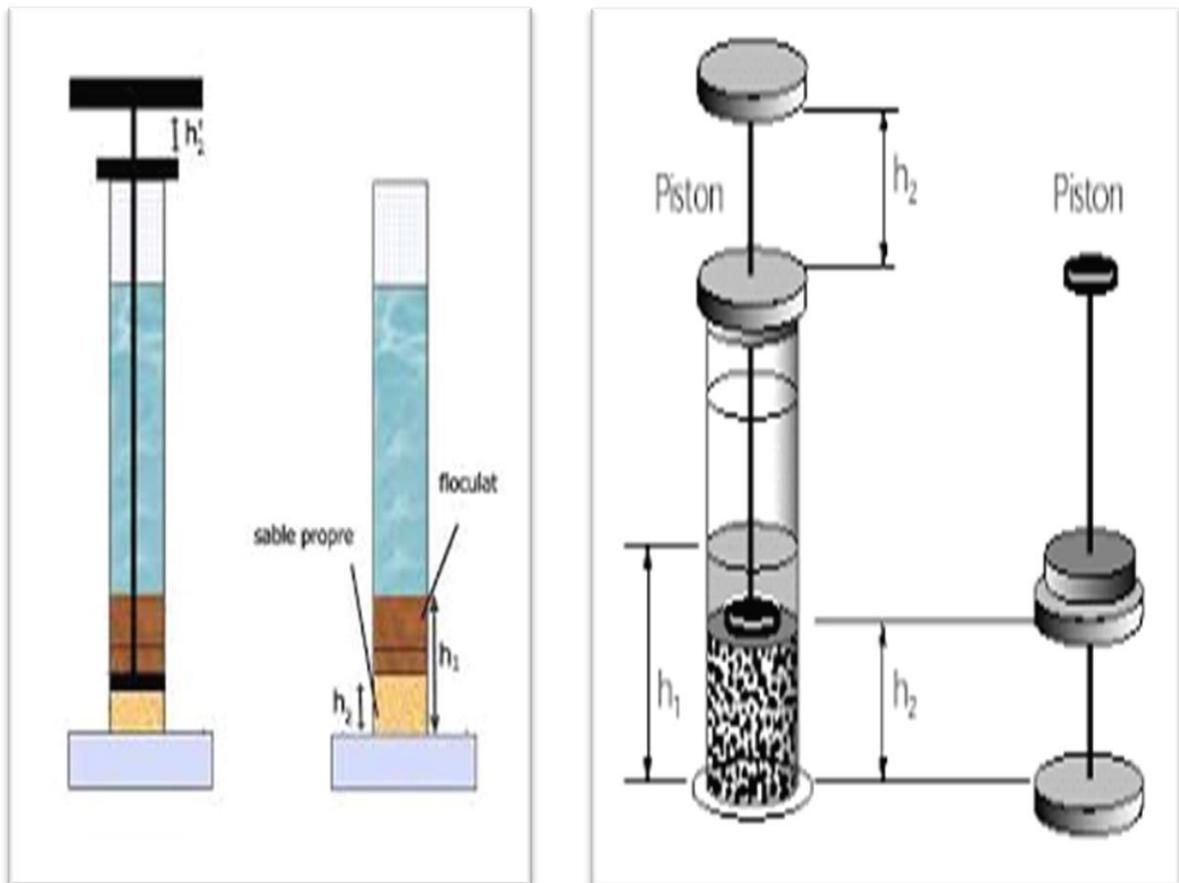


Figure (3.7) : Définition de l'essai d'équivalent de sable

Nous avons suivi les instructions décrites dans la norme NF P18598.





Figure (3.8) : Procédure d'essai d'équivalent de sable

3.3.1.2 Analyse granulométrique NF P18-560 :

C'est un ensemble des opérations aboutissant à la séparation selon leur grosseur des éléments constituant l'échantillon. En employant des tamis à mailles carrées afin d'obtenir une représentation de la répartition de la masse des particules à l'état sec en fonction de leur dimension.

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.

L'essai consiste à classer les différents grains constituant l'échantillon en utilisant une série de tamis, emboîtés les uns sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. Le matériau étudié est placé en partie supérieure des tamis et les classements des grains s'obtiennent par vibration de la colonne de tamis selon la figure (3.9).

La colonne de tamis pour le sable naturel : 5 – 2.5 – 1.25 – 0.63 – 0.315 – 0.125 – 0.08 - fond.

Et pour les graviers (naturel et recyclé) (3/8, 8/15) : 16 – 12.5 – 10 – 8 – 6.63 – 4 – 3.15 – fond.

Les masses des différents refus cumulés R_i sont rapportées à la masse totale calculée de l'échantillon pour essai sec M_s et les pourcentages de refus cumulés ainsi obtenus :

$$\% \text{ Refus cumulé} = \left(\frac{R_i}{M_s} \right) \cdot 100$$

Eq (3. 2)

Les pourcentages des tamisâtes correspondants sont :

$$\% \text{ tamisât cumulés} = \left(100 \cdot \frac{R_i}{R_s} - 100 \right)$$

Eq (3. 3)



Fuguer (3.9) : Essai d'analyse granulométrique de sable et gravier (nature, recyclé)

3.3.1.3 Module de finesse NF P 18-540 :

Les sables doivent présenter une granulométrie telle que les éléments fins ne soient ni en excès, ni en trop faible proportion. S'il y a trop de grains fins, il sera nécessaire d'augmenter le dosage en eau du béton tandis que si le sable est trop gros, la plasticité du mélange sera insuffisante et rendra la mise en place difficile. Le caractère plus ou moins fin d'un sable peut être quantifié par le calcul du module de finesse (Mf). Celui-ci est égal au centième de la somme des refus cumulés, exprimés en pourcentage. Ce paramètre est en

particulier utilisé pour caractériser la finesse des sables à bétons. Plus le module de finesse est faible, plus le sable est fin, et un module de finesse élevée caractérise un sable grossier.

$$M_f = Mf = \frac{1}{100} \sum \text{refus cumulé en \% des tamis } 5 - 0.1 \quad \text{Eq (3.4)}$$

3.3.1.4 Masse volumique NF P 18-554 et NF P 18-555 :

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

• Masse volumique apparente :

La masse volumique réelle est définie comme le quotient de la masse sèche de l'échantillon par le volume occupé par la matière solide, y compris les vides contenus dans les grains (volume réel), Elle est obtenue par la pesée d'un récipient d'un litre, rempli de sable.

La masse volumique apparente est déterminée par la formule :

$$M_v \text{ app} = \frac{M_2 - M_1}{V} \quad \text{Eq (3.5)}$$

Avec :

M1 : Le poids du récipient vide ;

M2 : Le poids du récipient avec le matériau ;

V : le volume du récipient. (V=1litre=1000 cm³).



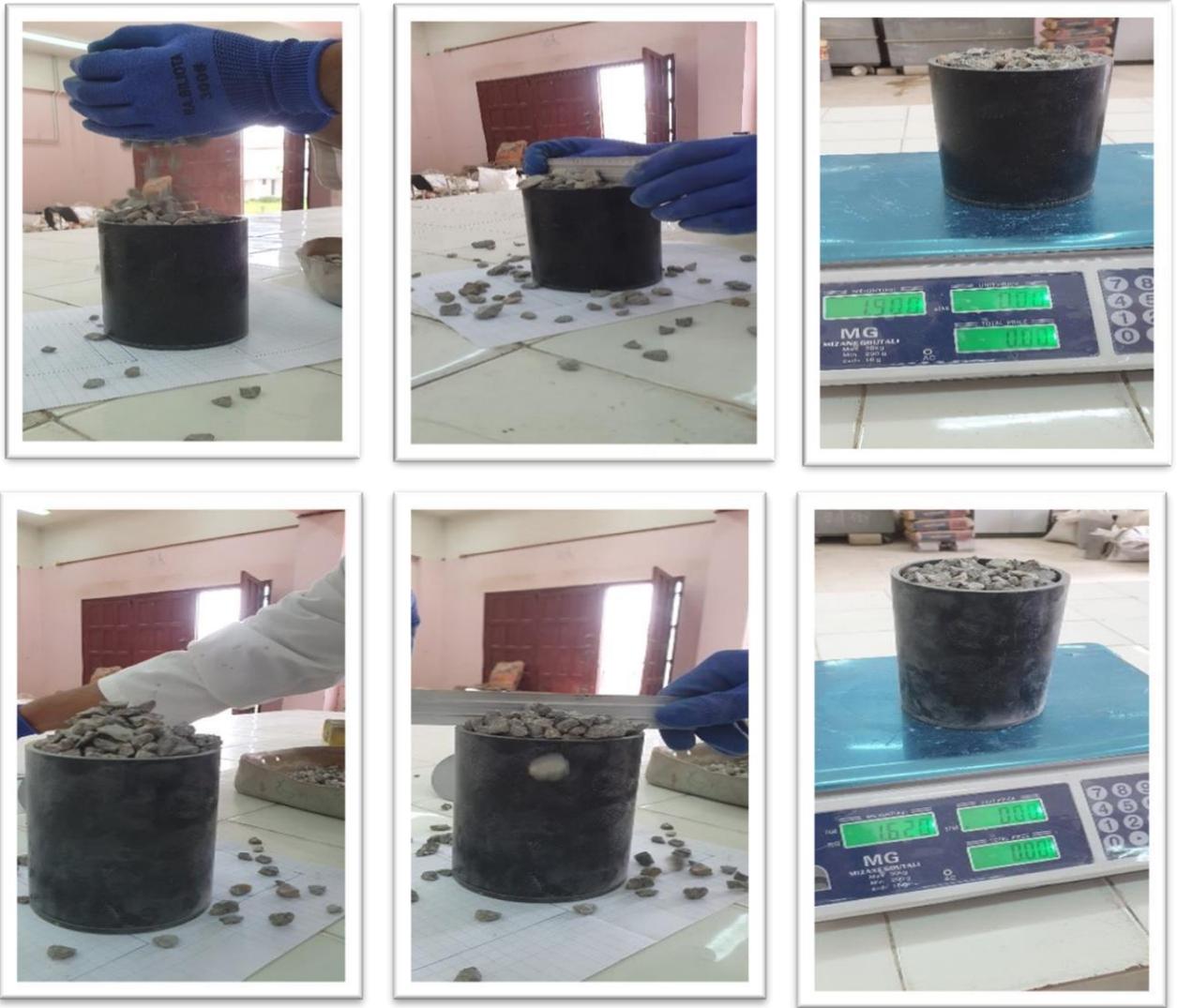


Figure (3.10) : Détermination des masses volumiques apparentes de sable, gravier (naturel, recyclé)



Figure (3.11) : Détermination de la masse volumique apparente de ciment



Figure (3.12) : Détermination de la masse volumique apparente de laitier

• La masse volumique absolue :

On détermine la masse volumique absolue du sable à l'aide du récipient de capacité 1000 ml. On prend trois (03) échantillons de masse 300g. On place l'échantillon dans le récipient de capacité 1000 ml et on y verse 300ml d'eau préparé préalablement dans deuxième récipient gradué, puis on malaxe soigneusement le contenu pour chasser l'air qui y existe. Après cette opération, on détermine le volume final occupé par le mélange granulas- eau soit (V) ce volume. Sachant que le volume (V1) d'eau versé est 300 ml, il serait facile de déterminer le volume occupé par le sable seul. Volume de granulas :

$V1 = V - 300$ (ml) La masse volumique absolue du granulas est déterminée par la formule :

$$\rho_{abc} = \frac{M}{V} \quad \text{Eq (3.6)}$$





Figure (3.13) : Détermination des masses volumiques absolues de sable, gravier (naturel, recyclé)

3.3.1.5 Absorption d'eau NF P18-591 :

L'absorption d'eau et la porosité sont deux caractéristiques des granulats recyclés de béton lié. Elles sont également dues à la présence de résidus de mortier. Cependant, les granulats naturels ont généralement une absorption d'eau faible en raison de leur porosité faible, mais le mortier attaché aux GR a une plus grande porosité qui lui permet de retenir plus d'eau.

En fait, la détermination de l'absorption d'eau et la connaissance de l'état de saturation initial des granulats sont nécessaires pour la formulation et la fabrication du béton ou mortier.

Nous avons mis 3Kg de granulas recyclés dans un seau d'eau et laissé 24H, puis nous avons éliminé l'excès d'eau avec du papier absorbant, et on a pesé l'échantillon.



Figure (3.14) : Essai d'Absorption d'eau

3.3.2 Les Analyses mécaniques :

3.3.2.1 Essais Los Angeles P18-573 :

Cet essai permet de savoir la dureté d'un matériau en calculant un coefficient de los Angeles et mesurant la résistance à la fragmentation par chocs des éléments d'un échantillon de granulats grasse à une charge de boulets. L'essai consiste à mesurer la masse m d'éléments inférieurs à 1.6mm, produits par la fragmentation du matériau testé (diamètres compris entre 4 et 50 mm) et que l'on soumet aux chocs de boulets normalisée, dans le cylindre de la machine los Angeles en 500 rotations et M la masse du matériau soumis à l'essai.

Dans notre expérience, nous avons mis 5Kg de gravier naturel (3/8, 8/15) ainsi que du gravier recyclé (3/8, 8/15) :



Figure (3.15) : Essais Los Angeles

3.3.2.2 Essai de compression et de traction par flexion :

- **Compression :**

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

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, 28 et 56 jours.



Figure (3.16) : La machine pour essai de compression et affichage de la résistance

• **Traction par flexion (trois points) :**

La résistance à la traction est mesurée par la méthode de traction par flexion conformément.

L'essai s'effectue sur une machine de flexion sollicitant l'écrasement d'éprouvettes prismatiques à une flexion directe à raison de trois éprouvettes pour chaque type de béton.



Figure (3.17) : machine de traction par flexion (trois points)

3.4 Fabrication des bétons à hauts performances BHP, BHPR

Dans ce programme expérimental, trois types de moules ont été utilisés, des éprouvettes de forme cylindrique (16x32) cm², cubique (10x10x10) cm³ et prismatique (10x10x40) cm³.

3.4.1 Formulations des bétons BHP, BHPR

Ce n'est pas avec n'importe quel granulats, n'importe quel ciment et n'importe quel adjuvant qu'on peut fabriquer un béton à haute performance. Cependant, et à travers les littératures existantes, un cheminement est tracé dans ce qui suit afin de nous aider à l'élaboration de ce matériau.

3.4.1.1 Principes de formulation des BHP, BHPR

La recherche des hautes performances passe par la réduction de la porosité du béton durci, c'est-à-dire de son pourcentage de vide. On cherchera donc, pour formuler un BHP, à diminuer la porosité de la matrice cimentaire et à optimiser le squelette granulaire [63].

Optimisation de la formulation

La résistance du béton est liée à sa porosité et à la distribution des pores capillaires. L'optimisation de la formulation d'un BHP consiste donc à :

- Diminuer la porosité :(pourcentage de vide) de la matrice cimentaire ;
- Optimiser le squelette granulaire :(granulométrie adaptée et ajouts d'éléments fins).

Pour diminuer la porosité, il faut :

- **Réduire le rapport E/C** : de l'ordre de 0,3 à 0,4 ;
- **Fluidifier le mélange en dé flocculant** : "en cassant les grumeaux" les grains ; de ciments à l'aide de superplastifiants (l'emploi de superplastifiants permet une réduction de la teneur en eau du mélange à consistance égale). Pour optimiser le squelette granulaire, il faut :
- **Introduire des ultrafines** : qui comblent les micros vides inter granulaires, et améliorent la fluidité à l'état frais ;
- **Adapter chaque classe granulaire** : (3 niveaux de taille de grains) afin d'obtenir un mélange à très haute compacité (granulométrie comprenant des éléments fins pour remplir les espaces entre les plus gros granulats) ;
- **Déterminer la distribution de taille des grains** : la forme et la résistance des grains les mieux adaptés [63].

3.4.1.2 Les étapes de la formulation

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

Détermination d'une formule théorique prévisionnelle

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

Optimisation du mélange en laboratoire

- Validation de la compatibilité ciment /adjuvant ;
- Ajustement de la quantité de pâte et de l'adjuvantation ;
- Vérification du comportement rhéologique du béton frais ;
- Analyse de la sensibilité de la formule aux variations des dosages des divers constituants ;
- Analyse de la sensibilité de la formule aux conditions climatiques possibles lors de la mise en œuvre (température).

La fabrication d'un béton à hautes performances (BHP) recommande de matériaux de qualité citée en chapitre 2 à condition que le rapport E/C soit compris entre 0.3 et 0.4. Selon la méthode de De Larrard [50], deux voies sont généralement associées pour optimiser la formulation d'un BHP.

A. Défloculation des grains de ciments et une réduction de la teneur en eau. En effet, l'emploi des superplastifiants permet une réduction de la teneur en eau du mélange à consistance égale et certes, les rapports E/C sont de l'ordre de 0,35 au lieu de 0,45 à 0,50 pour un béton ordinaire. Les 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 également une réduction sensible de l'eau de gâchage 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.

B. Optimisation du squelette et de l'empilement granulaire Chaque classe granulaire est adaptée afin d'obtenir un mélange à très haute compacité. En fait, les éléments fins remplissant les espaces entre les plus gros granulats). Les performances des BHP peuvent encore être augmentées par l'optimisation du mélange granulaire grâce à l'ajout de particules ultrafines, le plus souvent à caractère pouzzolanique. Elles ont une action sur la granulométrie du mélange, en comblant les micros vides intergranulaires et en densifiant l'interface pâte de ciment granulat. Les ultrafines les plus utilisées sont les fumées de silice qui présentent également une réactivité avec la chaux libre, liée à leur caractère pouzzolanique ce qui réduit la teneur en eau, et par conséquent l'augmentation des résistances mécaniques.

A l'issue de ce qui précède, la formulation est récapitulée dans le Tableau 3.1. Une quantité optimale de laitier, soit 12 % par rapport à la masse du ciment, permet d'utiliser 450 kg/m³ de ciment pour atteindre une résistance qui dépasse les 50MPa. La réduction de la quantité d'eau est obtenue par l'ajout d'un superplastifiant dosé à 1,4 % par rapport à la masse du ciment, ceci a permis de rendre le mélange fluide. A cet effet, cinq types de bétons ont été confectionnés (7jours et 12 mois), un béton à hautes performances à base de granulats naturels (BHPGN), un béton à hautes performances avec 25% de granulats naturels et 75% de granulats recyclés (BHPGRP75), et un béton à hautes performances avec 75% de granulats naturels et 25% de granulats recyclés (BHGRM25) (concassage après 7 jours) , et un béton à hautes performances avec 25% de granulats naturels et 75% de granulats recyclés (BHGRM75), et un béton à hautes performances avec 75% de granulats naturels et 25% de granulats recyclés (BHGRPM25) (concassage après 12 mois), en tenant compte de la teneur en eau absorbée par les granulats recyclés.

Tableaux 3.1 : Conception du mélange kg/m³

Ciment (kg)	Laitier 12% (kg)	Sable naturel (kg)	Gravier (3/8,8/15)		Eau (L)	E/C	E/L	Adjuvant 1.4% (L)	
			GN (kg)	GR (kg)					
450	54	759	1044	25%	75%	166	0.36	0.33	6.3
				261	783				

3.4.2 Malaxage de béton :

L'objectif du malaxage est de répartir dans l'espace de façon homogène, par l'action des outils des brassages, les éléments des constituants mis en présence dans le malaxeur. La maîtrise de dosage des différents constituants est nécessaire pour maintenir la constance et l'homogénéité du béton fabriqué.

Les matériaux utilisés pour produire du béton à haute performance ont été mélangés dans un malaxeur vertical d'une capacité de 50 litres, ou nous avons placé une quantité qui a permis la production de 5 éprouvettes, deux cylindres, deux prismatique et un cube.



a-Ep cylindriques 16x32cm² b- Ep cubiques 10x10x10 cm³ c-Ep prismatique 10x10x40 cm³



Figure (3.18) : Epreuves utilisées

Etape de malaxage

La séquence de malaxage retenue est la suivante :

- Préparer les moules nécessaires pour les différents essais, vérifier leur nombre et qu'ils sont bien graissés afin de faciliter par suite le décoffrage ;
- Vérifier que tout le matériel est à disposition et quels matériaux sont bien séchés ;
- Préparer la quantité d'eau nécessaire pour la gâchée ;
- Pour la confection du BHP le superplastifiant est ajouté à la première moitié de l'eau de gâchage ;
- Verser les constituants dans la cuve : d'abord les gravillons, puis le sable , le ciment et à la fin l'ajout laitier ;

- Mettre le malaxeur en marche pour homogénéiser le mélange sec pendant 3 à 5 minutes ;
- Ajouter l'eau pendant le malaxeur en marche ;
- Laisser le malaxeur en marche et ajouter progressivement la première moitié d'eau de gâchage (celle qui contient l'adjuvant) et mélange, introduire ensuite la partie restante d'eau ;
- Malaxer pendant 2 min.



Figure (3.19) : Malaxage du béton

3.4.4 Affaissement au cône d'Abrams.

Cet essai consiste à mesurer la hauteur d'affaissement d'un volume tronconique de béton frais. Ce dernier est compacté dans un moule ayant la forme d'un tronc de cône. Lorsque le cône est soulevé verticalement, l'affaissement du béton permet de mesurer sa consistance.

Le contrôle de l'ouvrabilité est effectué grâce à l'essai d'affaissement au cône d'Abrams.



Figure (3.20) : Affaissement au cône d'Abrams

3.4.5 Vibration :

La vibration est la méthode de compactage la plus répandue, le degré de compactage d'un béton frais par vibration dépend de la fréquence et de l'amplitude des oscillations, ainsi que de la durée de vibration.

- Le mélange préparé est mis en place par coulage et vibration dans 3 étapes et 3 couches à chaque fois frappe 25 frapes avec le même rythme à fin d'homogénéiser la forme de l'échantillon. On place les moules sur la table vibrante pendant 20s.
- Les éprouvettes sont maintenues à l'air libre au laboratoire pendant 24h puis décoffrées et marquer par peinture et conserver dans l'eau.



Figure (3.21) : Vibration de béton

3.4.6 Démoulage et conservation des éprouvettes NF P 18-404 :

Le démoulage des éprouvettes doit être effectué après $24 \text{ h} \pm 1 \text{ h}$ dans un local maintenu à la température de $20 \text{ °C} \pm 2 \text{ °C}$. Et inscrire directement sur les moules le numéro d'ordre d'éprouvette.



Figure (3.22) : Démoulage des éprouvettes cylindriques et prismatiques la conservation se fait à une température de $20 \text{ °C} \pm 2 \text{ °C}$, dans l'eau.



Figure (3.23) : Conservation des éprouvettes cylindriques, prismatiques et cubiques

3.4.8 Essai d'écrasement :

• Résistance en Compression :

La résistance en compression des bétons est mesurée sur des éprouvettes cylindrique 16x32 cm² et cubiques 10x10x10 cm³. L'effort est appliqué par une presse hydraulique. La contrainte de rupture est donnée directement par la machine d'essai.

Les éprouvettes cylindriques (au nombre de deux par essai), préalablement immergées sont sorties de l'eau, puis asséchées. Ensuite, les éprouvettes une fois rectifiées, sont alors centrées chacune sur la presse de chargement. Chaque éprouvette est soumise à une charge croissante effectuée à la vitesse de 0,5 MPa/s.

En désignant par P, la charge maximale qui provoque la rupture et S la section, la résistance par compression est déterminée par la relation suivante :

$$f_c = \frac{P}{S} \quad \text{Eq (3.7)}$$

Avec :

f_c : Résistance par compression en Méga Pascal (MPa).

P' : Charge en Newton (N).

S : Section en mm²



Figure (3.24) : Essais de compression éprouvettes cylindriques (16x32) cm² des bétons BHP et BHPR.



Figure (3.25) : Essais de compression des éprouvettes cubiques (10x10x10) cm³ des bétons BHP et BHPR

• **Traction par flexion (trois points) :**

Des éprouvettes prismatiques normalisées, de dimensions 10x10x40 cm³, ont été utilisés pour la détermination de la résistance à la traction.

Cet essai permet de déterminer la résistance à la traction par flexion du béton étudié. C'est l'essai le plus couramment utilisé. Il consiste à rompre en flexion une éprouvette prismatique de côté a et de longueur $4a$, pour une charge totale P ,

La résistance en flexion est donnée par l'équation suivante :

$$f_{cj} = \frac{3 \cdot P \cdot L}{2 \cdot a^2} \quad \text{Eq (3.8)}$$

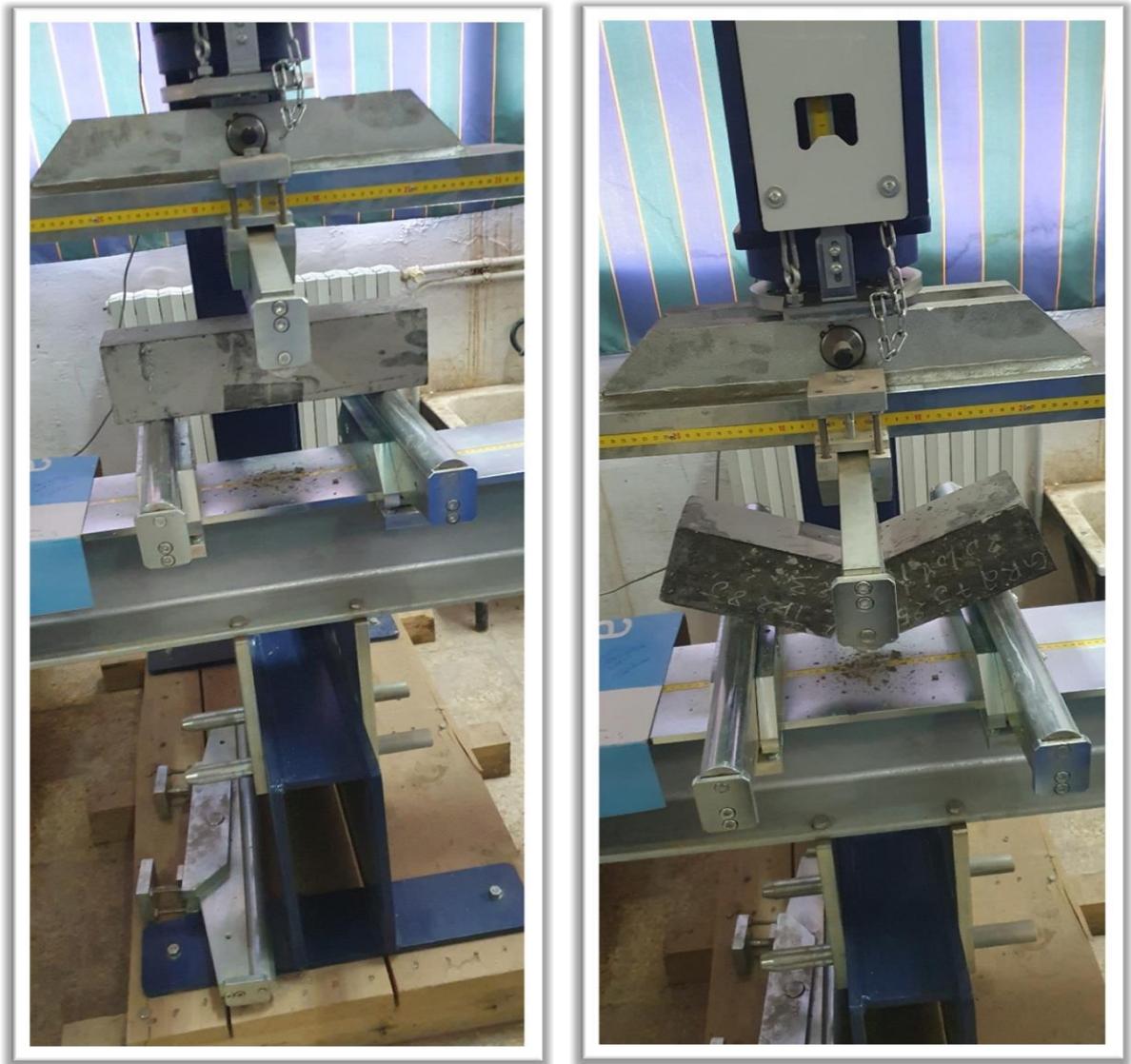


Figure (3.26) : Essai de traction par flexion Ep prismatique (10x10x40) cm³ (trois points)



a-PHPN 100%



b-BHPR 25%



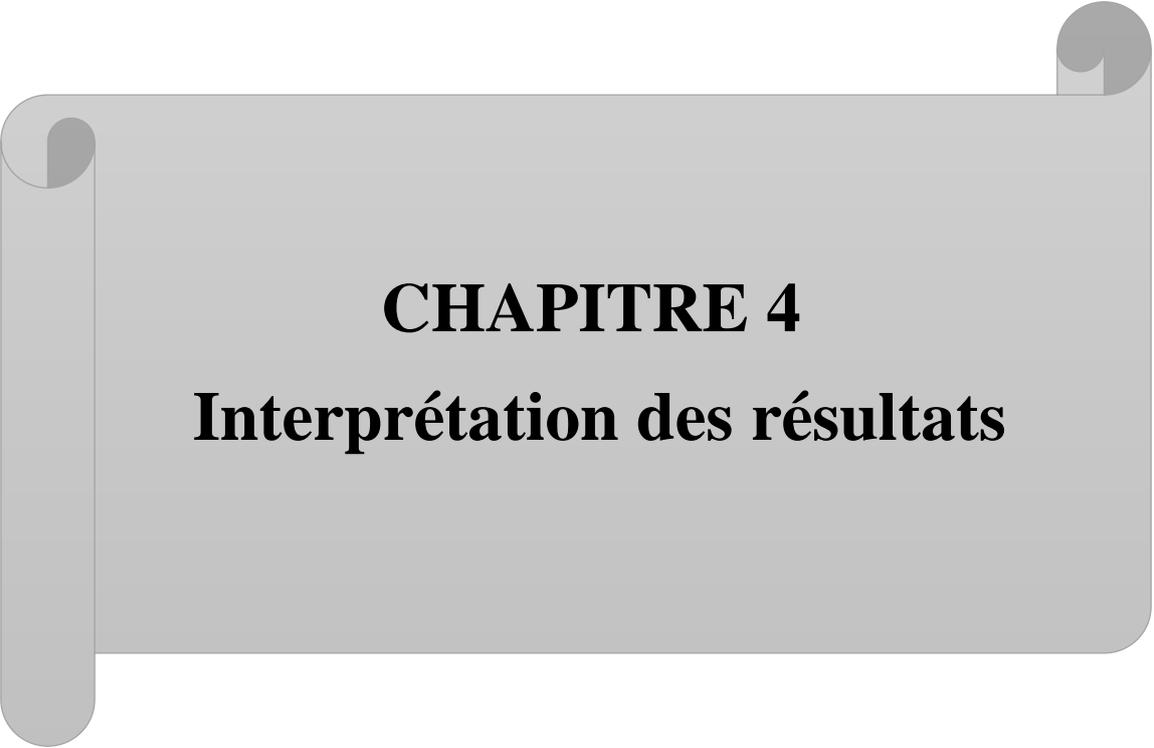
c-BHPR 75%



Figure (3.27) : Type des bétons (BHPN, BHPR 25%, BHPR 75%)

3.5 Conclusion :

Ce chapitre présente les caractéristiques des matériaux de bases utilisés pour la confection des différents types de béton de notre projet expérimental. On a présenté les différents essais pour caractériser les matières premières utilisées ainsi que la méthode de formulation et les dosages de différents constituants du béton. Ensuite étudié les comportements des bétons frais et évalué les performances des bétons durcis, cette partie d'étude expérimentale consiste à valoriser les agrégats recyclés. Les résultats des essais effectués sur le béton à l'état frais et durci sont présentés et discutés dans le chapitre suivant (chapitre 4).



CHAPITRE 4
Interprétation des résultats

4.1 INTRODUCTION

Après chaque essai réalisé, des résultats et des constats sont tirés et exploités afin d'obtenir des réponses à plusieurs de nos questions.

L'objet de ce chapitre est de présenter et commenter les résultats des essais sur les constituants et les différents bétons testés dans le chapitre 3 à savoir :

- Les résultats physiques (Equivalent de sable, Analyse Granulométrique, Module de Finesse, Masses Volumiques et Absorption d'Eau) ;
- Les résultats mécaniques (Essais Los Angeles, Essai de Compression et de Traction par Flexion).

4.2 Résultats des essais

4.2.1 Résultats physiques

4.2.1.1 Equivalent de sable

D'une façon générale la propreté des granulats doit être toujours vérifiée, l'utilisation de granulats pollués provoquant une baisse des résistances mécaniques et une augmentation de retrait sans oublier un dosage en eau dans le béton plus important avec des incidences sur ses caractéristiques.

Tableau (4.1) : Détermination de l'essai d'Equivalent de sable naturel (0/5)

N° D'essais	H1 (Cm)	H'2 (Cm)	E _{SV} (%)	H2 (Cm)	E _{SP} (%)
1	11.1	8.4	75.6	9.1	81.98
2	10.4	8.6	82.6	9	86.53
3	10.9	8.5	77.9	9.4	86.24
			E _{SV} = 78.7%		E _{SP} = 84.9%

En comparant les résultats obtenus avec le tableau (4.1) cité en (annexe 1), on conclut que notre sable est propre à faible pourcentage de fines argileux convient parfaitement pour des bétons de haute qualité.

4.2.1.2 Analyse Granulométrique :

L'analyse granulométrique a pour but de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différents grains constituant l'échantillon.

- **Sable :**

Les résultats des analyses granulométriques de sable étudié sont regroupés dans le tableau (4.2) suivant :

Tableau (4.2) : l'analyse granulométrique d'un sable (0/5)

Tamis (mm)	Refus de partie	Refus cumulés	Refus cumulés (Tamisât (%)
5	0	0	0	100
2.5	10	10	1	99
1.25	20	30	3	97
0.630	130	160	16	84
0.315	280	440	44	56
0.160	470	910	91	9
0.080	80	990	99	1
Fond	10	1000	100	0

- **Module de finesse :**

C'est une caractéristique intéressante, un bon sable à béton doit avoir un module de finesse d'environ 2,2 à 2,8 ; au-dessous, le sable à une majorité d'éléments fins et très fin, ce qui nécessite une augmentation du dosage en eau, au-dessus, le sable manque de fines et le béton y perd en ouvrabilité (annexe 2).

$$Mf = \sum \frac{Rc=225}{100} = 2.25 \quad (\text{Eq 4.1})$$

Le sable obtenu est un sable moyen compris entre $2 < 2.25 < 2.5$, convient parfaitement pour la fabrication du béton (ouvrabilité satisfaisante et une bonne résistance).

- **Gravier naturel :**

Les résultats des analyses granulométriques des graviers naturels et recyclés étudiés sont regroupés respectivement dans les tableaux (4.3) et (4.4) suivants :

Tableau (4.3) : Analyse granulométrique du gravier naturel (3/8, 8/15).

Tamis (mm)	Refus de partiel	Refus cumulés	Refus cumulés (Tamisât (%)
16	0	0	0	100
12.5	660	660	22	78
10	1070	1730	57.66	42.34
8	720	2450	81.66	18.34
6.30	350	2800	93.33	6.67
4	160	2960	98.6	1.4
3	30	2990	99.66	0.34
Fond	10	3000	100	0

- Gravier recyclé :

Tableau (4.4) : Analyse granulométrique du gravier recyclé (3/8, 8/15).

Tamis (mm)	Refus de partiel	Refus cumulés	Refus cumulés (%)	Tamisât (%)
16	0	0	0	100
12.5	20	20	0.6	99.4
10	160	180	6	94
8	510	700	23.3	76.7
6.30	880	15800	52.6	47.4
4	1010	2590	86.3	13.7
3	260	2850	95	5
Fond	150	3000	100	0

Les courbes granulométriques sont ensuite tracés sur un graphique comportant en ordonnée le pourcentage des tamisât sous les tamis dont les mailles D sont indiquées en abscisse selon une graduation logarithmique.

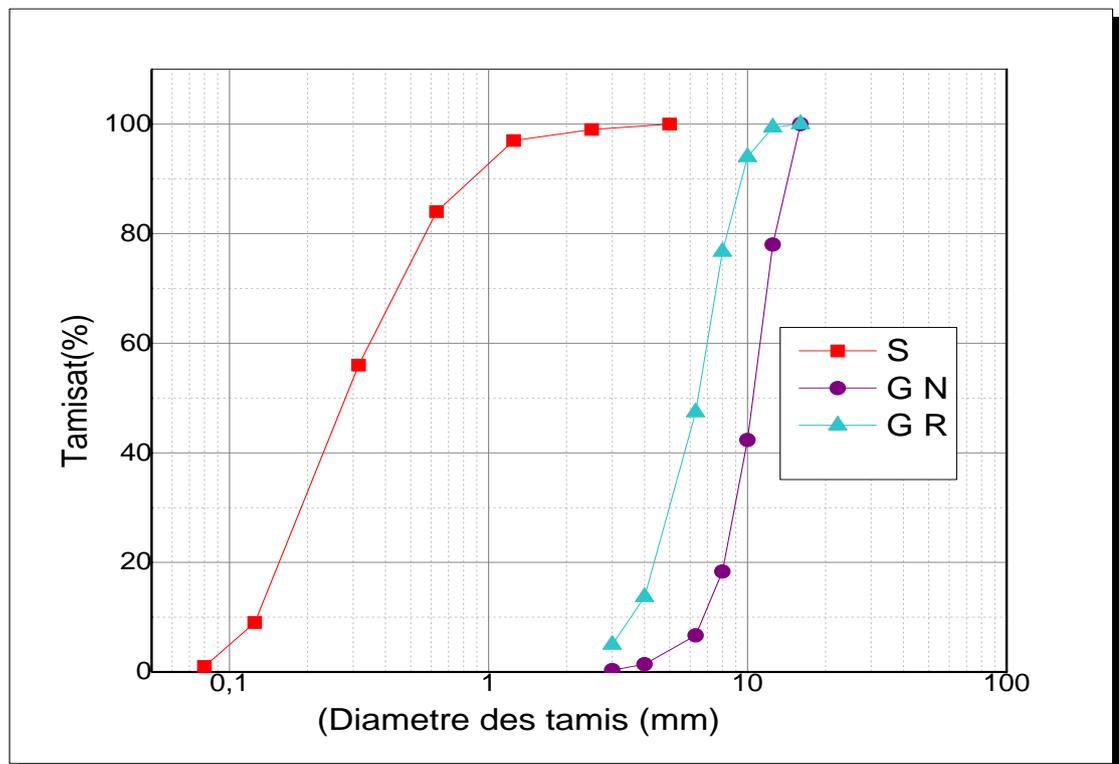


Figure (4.1) : Analyse granulométrique des granulats (naturel et recyclé)

On peut observer sur la figure (4.1), que tous les courbes des granulats naturels et recyclés sont continus, c'est-à-dire les agrégats choisis vont présenter un rythme adéquat dans la fabrication de tous les mélanges des bétons.

4.2.1.3 Masse volumique :

Chaque mesure de masse volumique apparente ou absolue a été effectuée 3 fois. Les résultats obtenus sont classés dans les tableaux (4.5) et (4.6) suivants

Les figures (4.2) et (4.3) montrent que les masses volumiques des granulats naturels apparentes et absolues sont nettement supérieures à celles des agrégats recyclés, ce qui peut être expliqué par l'existence de la pâte cimentaire collée aux granulats recyclés qui est poreuse.

- **Masse volumique apparente :**

Tableau (4.5) : Masses volumiques apparentes des constituants utilisés

Matériaux	Ne	M ₁ (g)	M ₂ (g)	ρ_{app} (g/cm ³)	$\rho_{app\ moyenne}$ (g/cm ³)
Sable naturel (0/5)	1	1860	460	1.4	1.41
	2	1880		1.42	
	3	1860		1.4	
Ciment	1	1510		1.05	1.043
	2	1500		1.04	
	3	1500		1.04	
Laitier	1	1490		1.03	1.033
	2	1500		1.04	
	3	1490		1.03	
Gravier naturel BHPN (3/8,8/15)	1	1900		1.44	1.446
	2	1880		1.52	
	3	1910		1.45	
Gravier recyclé BHPR (3/8,8/15)	1	1630	1.17	1.176	
	2	1640	1.18		
	3	1640	1.18		

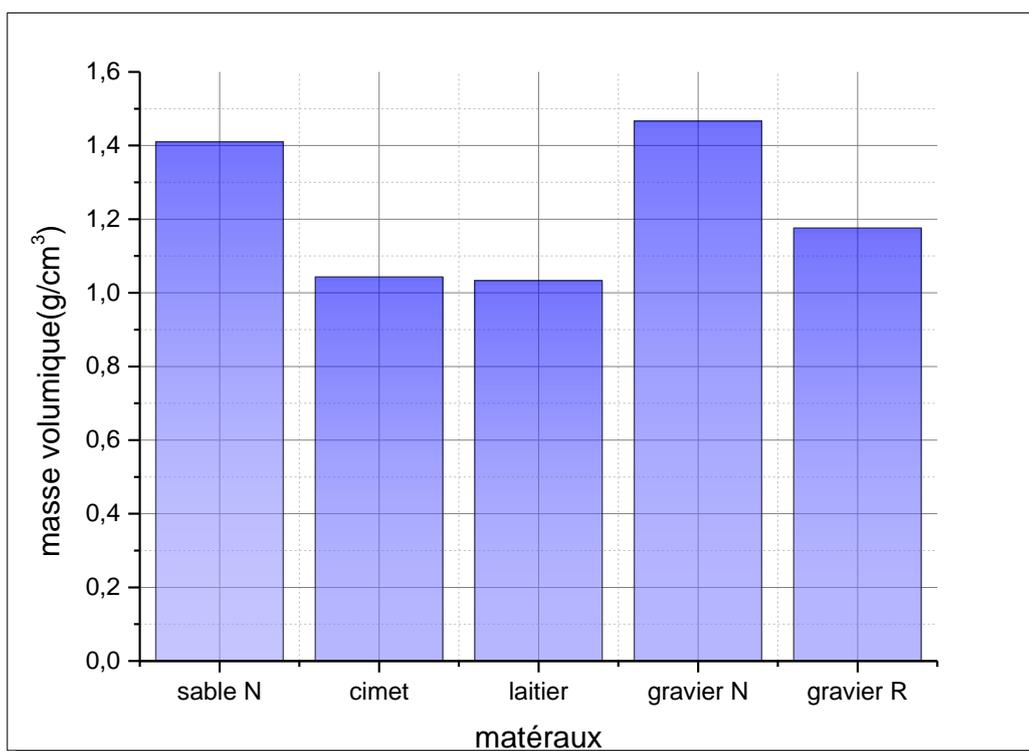


Figure (4.2) : Masses volumiques apparentes des constituants utilisés

- La masse volumique absolue :

Tableau (4.6) : Masses volumiques absolues des constituants utilisés

Matériaux	N _{ess}	M ₁ (g)	M ₂ (ml)	ρ_{app} (g/cm ³)	$\rho_{app} moy$ (g/cm ³)
Sable naturel (0/5)	1	300	120	2.5	2.46
	2		120	2.5	
	3		125	2.4	
Gravier naturel BHPN (3/8,8/15)	1		120	2.5	2.5
	2		120	2.5	
	3		123	2.5	
Gravier recyclé BHPR (3/8,8/15)	1		130	2.31	2.28
	2		135	2.22	
	3		130	2.31	

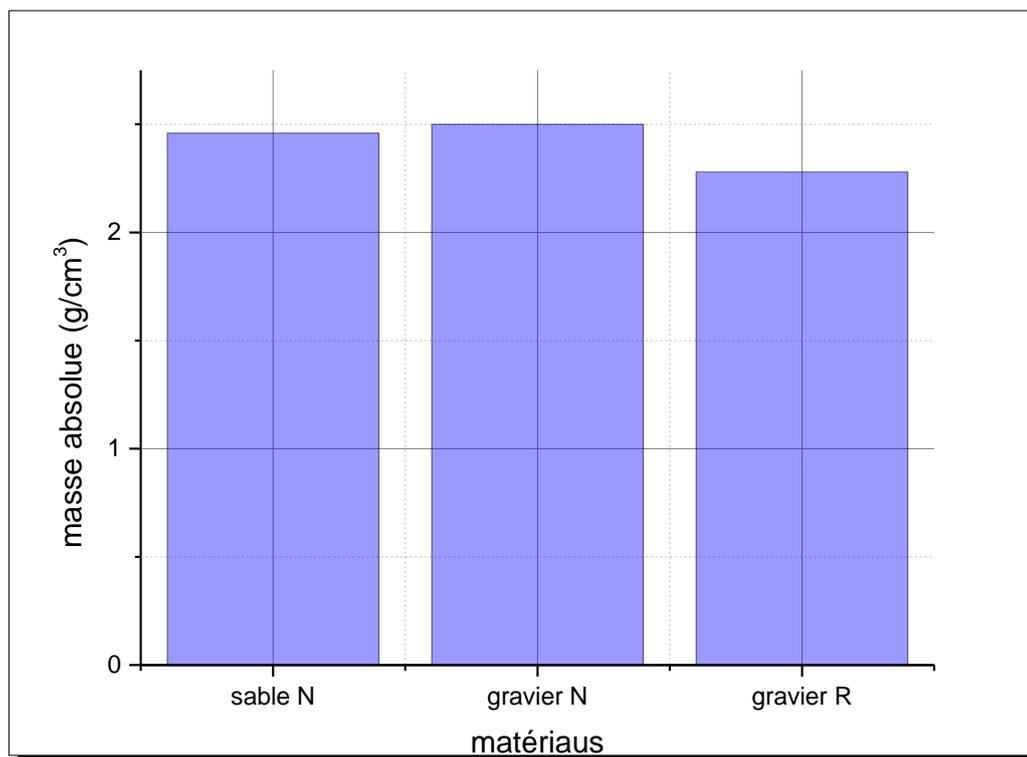


Figure (4.3) : Masses volumiques absolue des constituants utilisés

4.2.1.4 Absorption d'eau :

Le taux d'absorption d'eau est déterminé selon les normes [NF P 18-554] et [NF P 18-555] par la formule suivante :

$$A_b = \frac{(M_H - M_S)}{M_S} \cdot 100 \text{ (\%)} \quad \text{Eq (4.2)}$$

M_H en (g) : la masse de l'échantillon immergé pendant 24h dans l'eau après avoir épongé soigneusement avec un chiffon absorbant l'eau à la surface des granulats ;

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

Tableau 4.7 : Taux d'absorption d'eau

Gravier recyclé	M_H (g)	M_S (g)	A_b (%)
3/8, 8/15	3170	3000	5.667
Gravier naturel	M_H (g)	M_S (g)	A_b (%)
3/8, 8/15	3050	3000	1.667

Les taux d'absorption illustrés dans la figure (4.4) montrent que les granulats recyclés présentent des coefficients d'absorptions plus élevées (absorbent beaucoup plus d'eau) par rapport aux granulats naturels plus denses donc moins poreux.

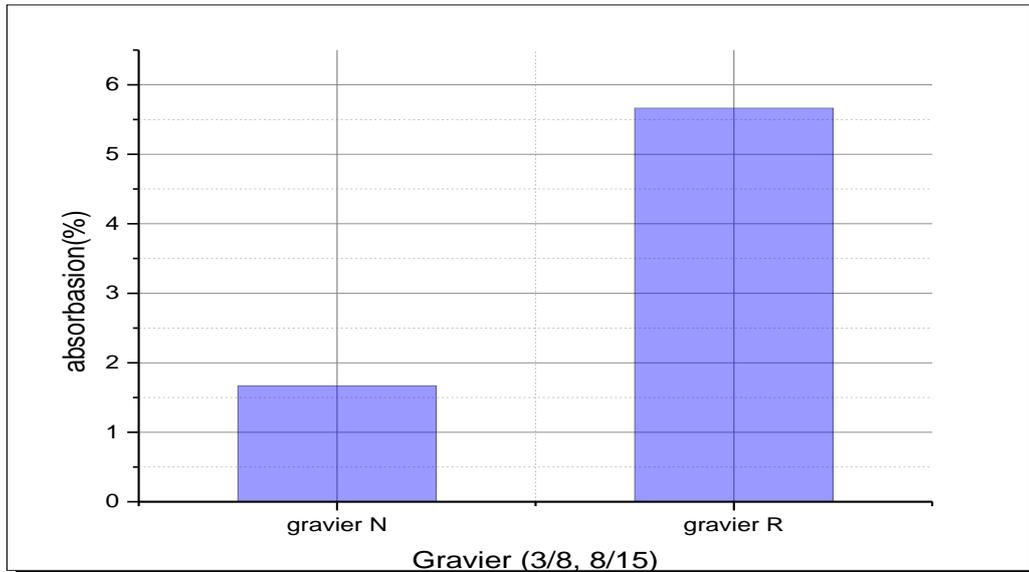


Figure (4.4) : Taux d’absorbation d’eau

4.2.2 Résultats mécaniques

4.2.2.1 Essais Los Angeles :

D’après le tableau (4.9) et la figure (4.5) ci-dessous la valeur du coefficient LA pour le gravier recyclé (assez dure) est supérieure à celle de gravier naturel (dure), ainsi, le gravier naturel a une bonne résistance à la dureté, tandis que les granulats obtenus par recyclage présentent de faibles résistances. Ceci est dû à la quantité de mortier attaché des granulats recyclés (voir annexe2)

Tableau (4.8) : Résultats d’essai Los Angles

Type de gravier	Gravier naturel	Gravier recyclé
Coefficient LA	24.2	39.2

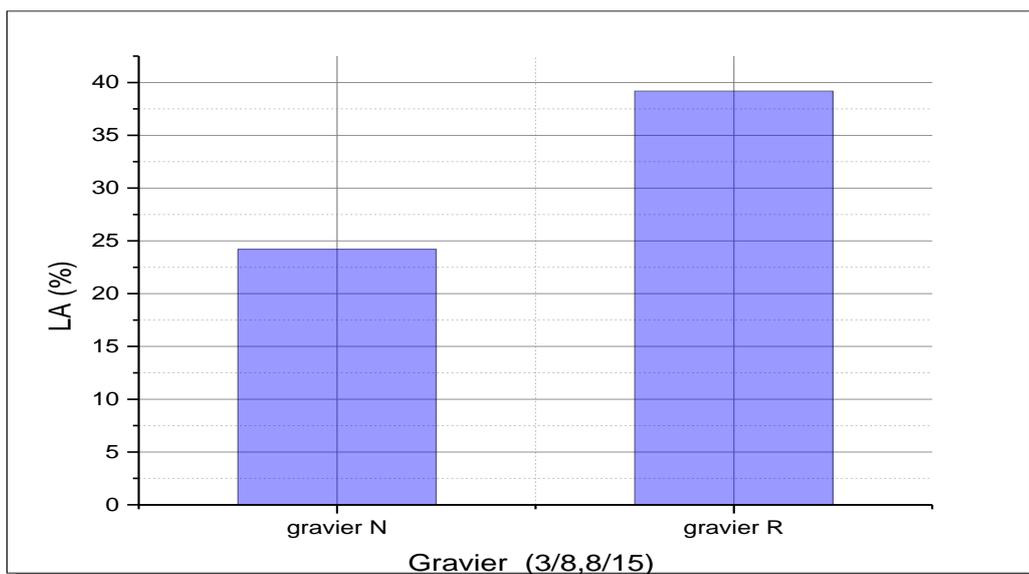


Figure (4.5) : Résultats d’essai Los Angles

4.2.2.2 Affaissement au cône d'Abrams

L'un des objectifs de conception des mélanges de notre béton était d'obtenir un affaissement supérieur à 100 mm dans tous les mélanges. Comme le montre le tableau (4.9) tous les mélanges répondaient à cette exigence et pouvaient être classés dans la classe de maniabilité S3 conformément à la norme. (Voir annexe3)

Les valeurs d'affaissement ont été chutés lorsque le granulats recyclés a été incorporée (recyclage de béton précoce à 7 jours, et recyclage de béton mûré à 12 mois).

Tableau (4.9) : Valeurs de l'affaissement du béton à différent pourcentage en fonction de temps de recyclage (précoce à 7 jours, mûré à 12 mois).

Type de béton	P%	Age (jours)	Affaissement (cm)
BHP Naturel BHPN	100%	7	18.2
		28	17.7
		56	17.1
		91	17
BHPRP Recyclé a 7j	25%	7	16.7
		28	16.1
		56	15.9
		91	15.2
	75%	7	15.2
		28	15.1
		56	14.7
		91	13.5
BHPRM Recyclé a 12 m	25%	7	13.4
		28	13.2
		56	13.2
		91	13
	75%	7	12.6
		28	12.4
		56	12
		91	11.2

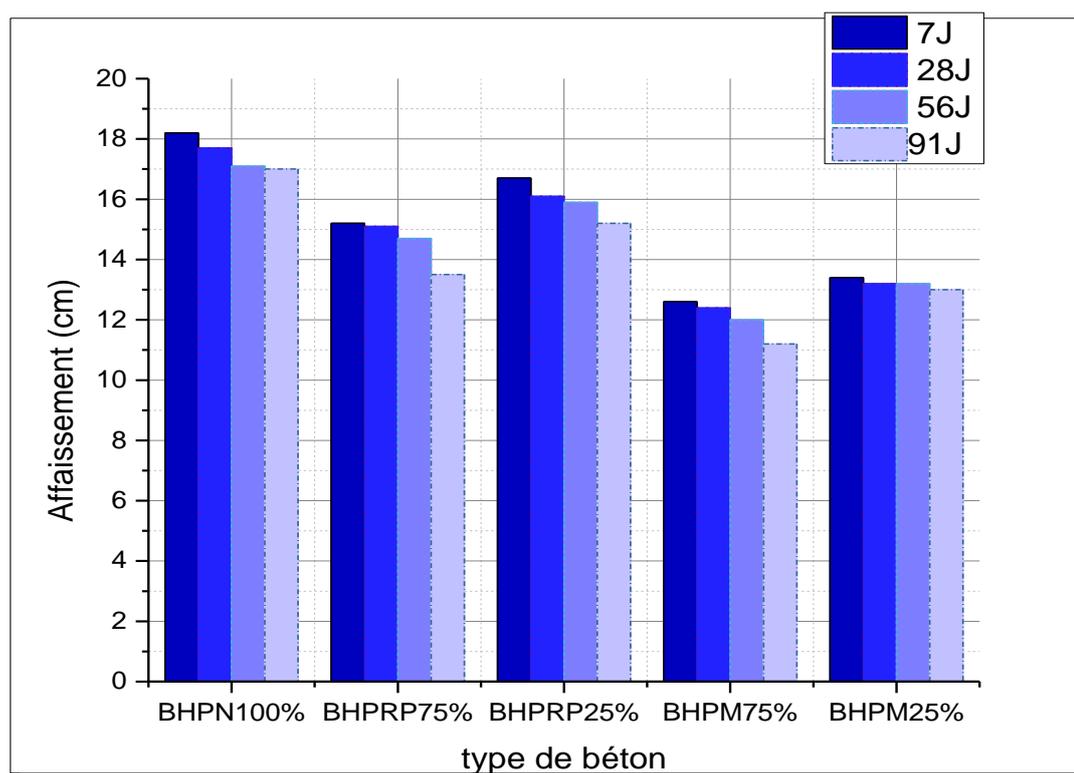


Figure (4.6) : Détermination de la consistance en fonction de l'affaissement

Selon la figure (4.6) on remarque que l'affaissement des BHP à base de granulats recyclés, diminue avec l'augmentation du taux de substitution de granulats naturels par des granulats recyclés (BHPRP25, BHPRP75 et BHPRM25, BHPRM75) par rapport à celui du béton à base de granulats naturels (BHPN). Cette perte de maniabilité est due à l'absorption d'eau plus élevée des GR par rapport aux GN et à la forme irrégulière des GR, cette forme augmente le frottement entre les différents composants du mélange de béton et, par conséquent, réduit l'affaissement.

Bien que le rapport E/L des mélanges ayant la même teneur en GR précoce (BHPRP25, BHPRP75) et en GR mature (BHPRM25, BHPRM75) n'ait pas été modifié, l'utilisation de la GR précoce a augmenté la maniabilité. Cette augmentation pourrait être due à la résistance plus faible du GR précoce lorsqu'il a été broyé (à 7 jours), ce qui a entraîné une forme plus ronde des particules de GR qui a réduit le frottement entre les différents composants du BHP.

4.2.2.3 La masse volumique (densité) de béton à l'état frais

Dans le tableau (4.10), on présente les résultats des mesures de la masse volumique des bétons (BHPN, BHPRP25, BHPRP75, BHPRM25 et BHPRM75) à l'état frais.

Tableau (4.10) : Détermination de la masse volumique des bétons à l'état frais

Type de béton	P%	Age (jours)	Masse volumique (g/c)
BHPN Naturel	100%	7	2.370
		28	2.380
		56	2.380
		91	2.370
BHPRP Recyclé a 7 j	25%	7	2.310
		28	2.290
		56	2.310
		91	2.320
	75%	7	2.240
		28	2.240
		56	2.230
		91	2.240
BHPRM Recyclé a 12 m	25%	7	2.320
		28	2.330
		56	2.320
		91	2.320
	75%	7	2.230
		28	2.240
		56	2.230
		91	2.230

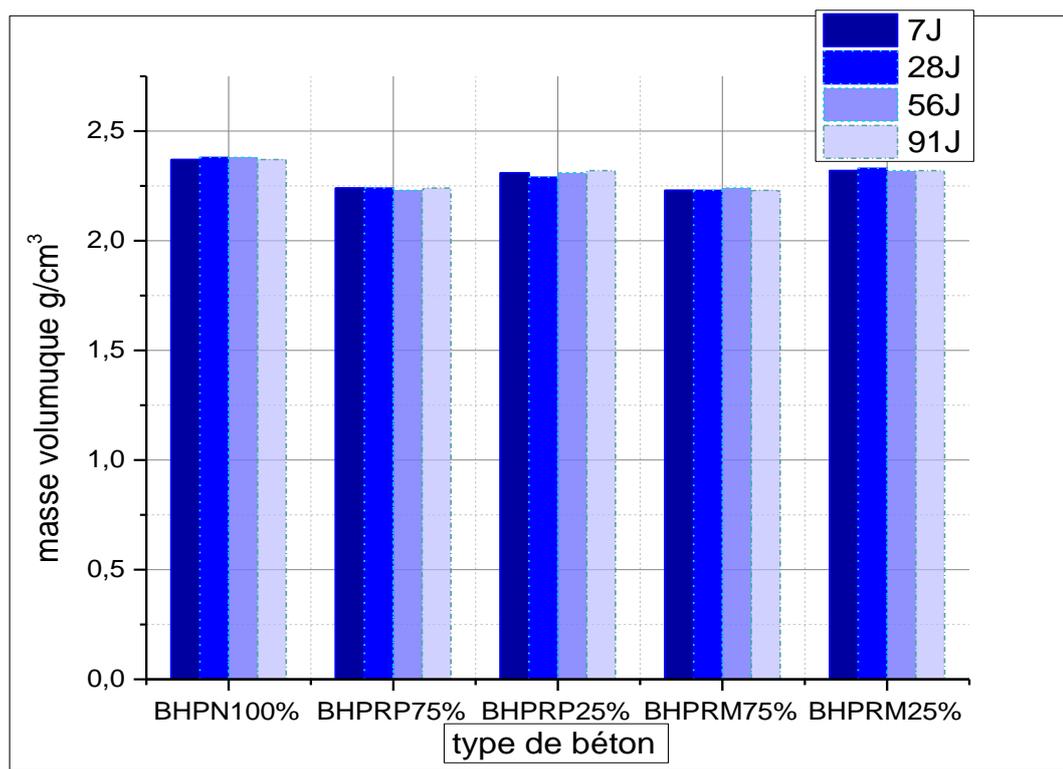


Figure (4.7) : Détermination de la masse volumique de béton à l'état frais

Comme on peut le voir dans la figure (4.7), la masse volumique fraîche des mélanges a diminué avec la teneur en GR. Cela est dû à la densité plus faible de GR par rapport au GN.

Le béton exposé au durcissement à l'air perd de la masse en raison de l'évaporation de l'eau libérée par l'agrégat. Par conséquent, la masse volumique de BHPRM est légèrement inférieure après 12 mois de durcissement qu'après une période de durcissement de 7 jours. Cela entraînerait à son tour un GR mature moins dense que le GR précoce dans des conditions environnementales.

4.2.3 La masse volumique (densité) de béton a l'état durci

La densité du béton dépend d'un certain nombre de facteurs dans le principal est la teneur en eau libre interne, elle-même fonction de l'hygrométrie et de la température.

Dans les tableaux (1.11), tableau (1.12), tableau (1.13), tableau (1.14), et le tableau (1.15) on regroupe la variation de la densité des BHPN, BHPRP25, BHPRP75, BHPRM25 et BHPRM75 en fonction des temps 7, 28, 56 et 91 jours.

Tableau (4.11) : Résultats obtenus pour la détermination de la masse volumique des BHPN, BHPRP et BHPRM à 7j

Type de béton		Éprouvettes	M (kg)	M moyenne (Kg)	Mv (kg /m ³)	Mv moyenne (kg)	
BHPN Naturel	Cylindrique	1	15.31	15.34	2389.5	2389.2	
		2	15.37		2388.9		
	Cubique	1	2.34	2.34	2340	2340	
	Prismatique	1	9.5	9.485	2370	2368.75	
		2	9.47		2367.5		
	BHPRP Recyclé A 7j	25 %	Cylindrique	1	14.850	14.86	2308.051
2				14.870	2311.160		
Cubique			1	2.320	2.320	2320	2320
Prismatique			1	9.330	9.305	2332.5	2326.25
		2	9.280	2320			
75 %		Cylindrique	1	14.370	14.370	2233.447	2233.447
			2	14.370		2233.447	
		Cubique	1	2.240	2.240	2240	2240
		Prismatique	1	9.170	9.1	2292.5	2275
			2	9.030		2257.5	
	BHPRM Recyclé A 12m	25 %	Cylindrique	1	14.99	14.95	2329.81
2				14.94	2322.04		
Cubique			1	2.320	2.320	2320	2320
Prismatique			1	9.360	9.305	2340	2326.75
		2	9.250	2313.5			
75 %		Cylindrique	1	14.510	14.46	2255.21	2243.937
			2	14.410		2232.664	
		Cubique	1	2.22	2.22	2220	2220
		Prismatique	1	9.04	9.07	2260	2267.5
			2	9.1		2275	

Tableau (4.12) : Résultats obtenus pour la détermination de la masse volumique des BHPN, BHPRP et BHPRM à 28j

Type de béton		Éprouvettes	M (kg)	M moyenne (kg)	Mv (kg /m ³)	Mv moyenne (kg /m ³)	
BHPN Naturel	Cylindrique	1	15.38	15.36	2425.87	2422.715	
		2	15.34		2419.56		
	Cubique	1	2.35	2.35	2350	2350	
	Prismatique	1	9.55	9.535	2387.5	2387.75	
		2	9.52		2388		
BHPRP Recyclé A 7j	25 %	Cylindrique	1	15.025	15.967	2335.25	2330.745
			2	14.967		2326.24	
	Cubique	1	2.346	2.346	2346	2346	
		Prismatique	1	9.458	9.444	2364.5	2261
	2		9.430	2357.5			
	75 %	Cylindrique	1	14.556	14.583	2262.36	2266.555
			2	14.610		2270.75	
		Cubique	1	2.287	2.287	2287	2287
			Prismatique	1	9.176	9.2015	2294
	2	9.227		2306.75			
BHPRM Recyclé A 12m	25 %	Cylindrique	1	15.16	15.15	2356.23	2354.175
			2	15.14		2352.12	
	Cubique	1	2.398	2.398	2398	2398	
		Prismatique	1	9.142	9.137	2285.5	2284.25
	2		9.132	2283			
	75 %	Cylindrique	1	14.65	14.61	2276.97	2270.75
			2	14.57		2264.53	
		Cubique	1	2.290	2.290	2290	2290
			Prismatique	1	9.2	9.18	2300
	2	9.16		2290			

Tableau (4.13) : Résultats obtenus pour la détermination de la masse volumique des BHPN, BHPRP et BHPRM à 56 j

Type de béton		Éprouvettes	M (kg)	M moyenne (Kg)	Mv (kg /m ³)	Mv (kg /m ³)	
BHPN Naturel	Cylindrique	1	15.437	15.4	2399.29	2393.535	
		2	15.363		2387.78		
	Cubique	1	2.347	2.347	2347	2347	
	Prismatique	1	9.595	9.605	2398.75	2401.25	
2		9.615	2403.75				
BHPRP Recyclé A 7j	25 %	Cylindrique	1	14.850	15.01	2308.051	2332.919
			2	15.170		2357.787	
		Cubique	1	2.400	2.400	2400	2400
		Prismatique	1	9.470	9.445	2367.5	2361.25
	2		9.420	2355			
	75 %	Cylindrique	1	14.600	14.66	2269.195	2278.518
			2	14.720		2287.84	
		Cubique	1	2.340	2.340	2340	2340
Prismatique		1	9.190	9.175	2297.5	2293.75	
	2	9.160	2290				
BHPRM Recyclé A 12m	25 %	Cylindrique	1	15.341	15.320	2384.36	2381.02
			2	15.298		2377.68	
		Cubique	1	2.442	2.442	2442	2442
		Prismatique	1	9.444	9.69	2261	2317.5
	2		9.496	2374			
	75 %	Cylindrique	1	14.884	14.893	2313.34	2313.735
			2	14.902		2316.13	
		Cubique	1	2.272	2.272	2272	2272
Prismatique		1	9.154	9.129	2288.5	2282.25	
	2	9.104	2276				

Tableau (4.14) : Résultats obtenus pour la détermination de la masse volumique des BHPN, BHPRP et BHPRM à 91 j

Type de béton		Éprouvettes	M (kg)	M moyenne (Kg)	Mv (kg /m ³)	Mv moyenne (kg /m ³)	
BHPN Naturel	Cylindrique	1	14.490	14.395	2252.09823	2237.3329	
		2	14.30		2222.56761		
	Cubique	1	2.390	2.390	2390	2390	
	Prismatique	1	9.570	9.465	2392.5	2366.25	
		2	9.360		2340		
	BHPRP Recyclé A 7j	25 %	Cylindrique	1	15.090	15.085	2345.35281
2				15.080	2343.79857		
Cubique			1	2.400	2.400	2400	2400
Prismatique			1	9.640	9.595	2410	2398.75
		2	9.550	2387.5			
75 %		Cylindrique	1	14.760	14.825	2294.06279	2304.1653
			2	14.890		2314.26795	
		Cubique	1	2.310	2.310	2310	2310
		Prismatique	1	9.360	9.385	2340	2346.25
2			9.410	2352.5			
BHPRM Recyclé A 12m	25 %	Cylindrique	1	15.280	15.290	2345.35281	2344.5756
			2	15.300		2343.79857	
		Cubique	1	2.368	2.369	2369	2369
		Prismatique	1	9.470	9.44	2367.5	2360
	2		9.410	2352.5			
	75 %	Cylindrique	1	14.970	14.95	2326.7019	2323.5934
			2	14.930		2320.48492	
		Cubique	1	2.330	2330	2330	2330
Prismatique		1	9.340	9.325	2335	2331.35	
	2	9.310	2327.5				

Tableau (4.15) : Densité moyenne des BHPN, BHPRP et BHPRM

Type de béton		Jour	7J	28J	56J	91J
		Ep				
BHPN		Cylindrique	2389.2	2422.715	2393.535	2397.333
		Cubique	2340	2350	2400	2400
		Prismatique	2368.75	2387.75	2401.25	2400
BHPRP A 7 j	25%	Cylindrique	2309.604	2330.745	2332.919	2344.576
		Cubique	2320	2346	2347	2390
		Prismatique	2326.25	2300.375	2361.25	2366.25
	75%	Cylindrique	2233.447	2266.555	2278.518	2304.165
		Cubique	2240	2287	2340	2310
		Prismatique	2275	2261	2293.75	2346.25
BHPRM A 12m	25%	Cylindrique	2325.025	2354.175	2381.02	2344.576
		Cubique	2320	2398	2442	2369
		Prismatique	2326.75	2284.25	2317.15	2360
	75%	Cylindrique	2243.937	2270.75	2313.735	2323.593
		Cubique	2220	2290	2272	2330
		Prismatique	2267.5	2295	2282.25	2331.35

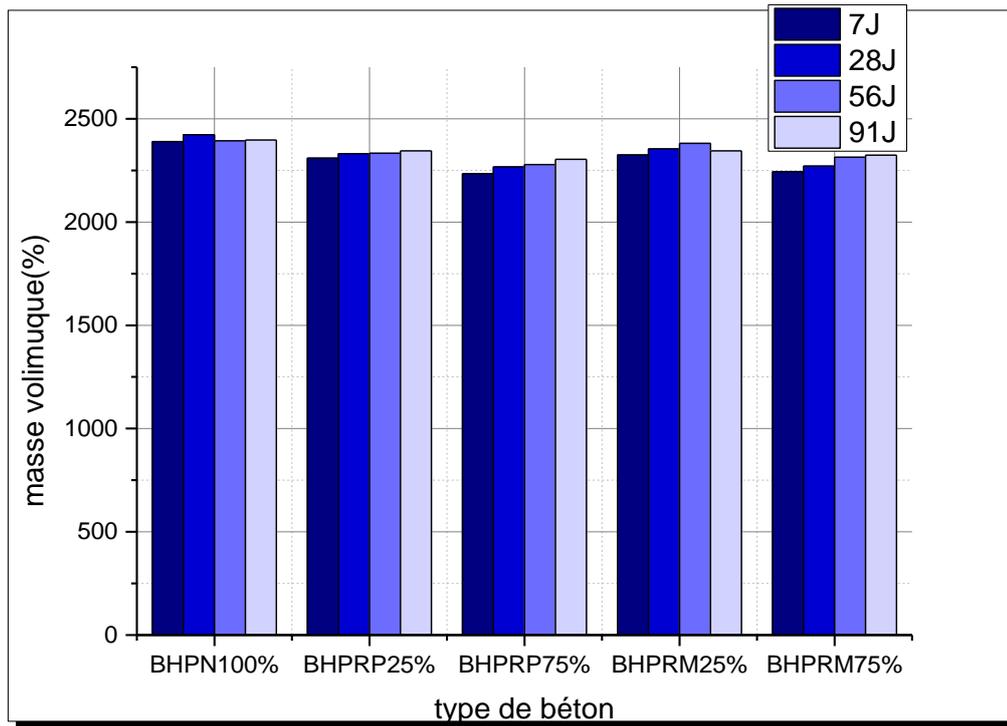


Figure (4.8) : Variation de la densité moyenne des BHPN, BHPRP et BHPRM en fonction des temps pour des éprouvettes cylindrique

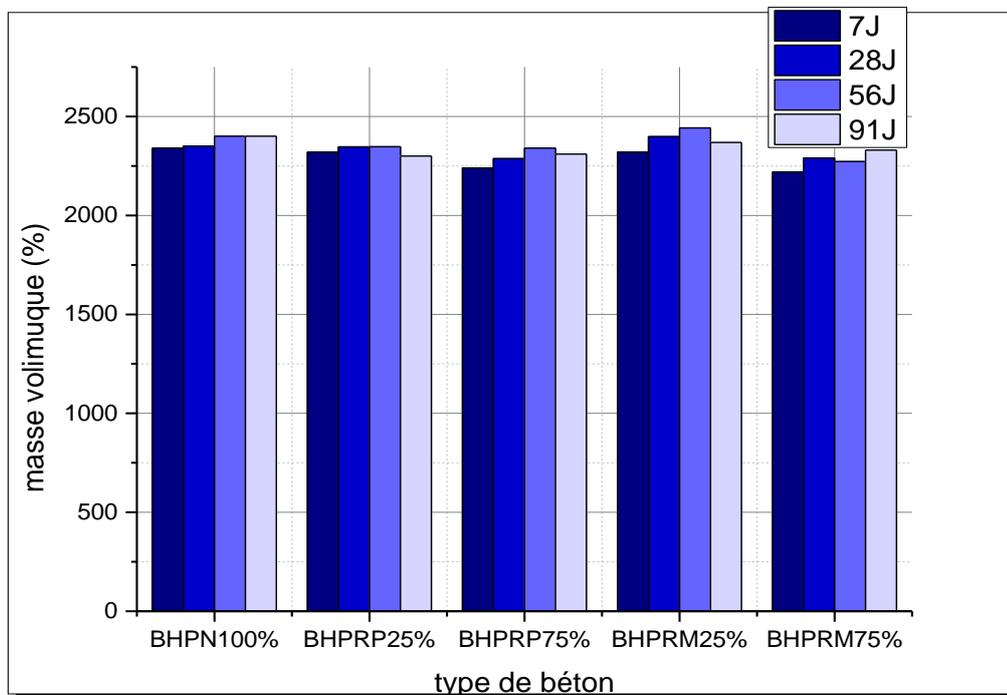


Figure (4.9) : Variation de la densité moyenne des BHPN, BHPRP et BHPRM en fonction des temps pour des éprouvettes cubique

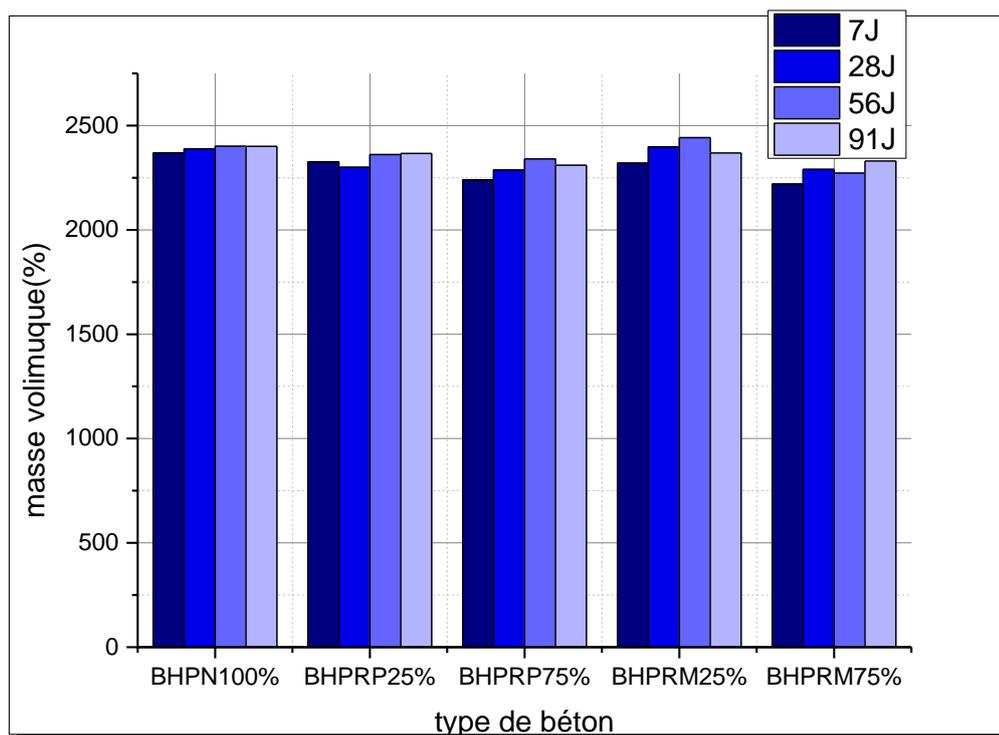


Figure (4.10) : Variation de la densité moyenne des BHPN, BHPRP et BHPRM en fonction des temps pour des éprouvettes prismatique

La densité durcie des mélanges est illustrée à la figure (4.8), dans laquelle on peut observer un comportement similaire à celui de la densité fraîche. D'une part, à un âge (7, 28, 56 ou 91 jours), la densité durcie diminue avec la teneur en GR. Encore une fois, la faible densité de GR. D'autre part, la maturité du GR n'a pas influencé la densité durcie, puisque presque les mêmes valeurs ont été obtenues quelle que soit la maturité de GR utilisée.

En ce qui concerne l'évolution de la densité durcie au fil du temps, elle a légèrement diminué de 7 à 91 jours. Selon la littérature, cela est dû au processus de séchage (évaporation de l'eau) que subit le béton lors du durcissement à sec. Ainsi, la perte de masse que le béton a subie à 91 jours était plus importante qu'à 7 jours, tandis que le volume des échantillons de béton est resté à peu près constant. Cela a conduit à une densité durcie plus faible à des âges plus avancés. De plus, la densité durcie, quel que soit l'âge du béton, est inférieure à la densité fraîche en raison de l'évaporation de l'eau mentionnée ci-dessus. L'absorption d'eau plus élevée de GR par rapport au GN a entraîné une libération différée d'eau plus élevée par les agrégats, ce qui a augmenté l'évaporation de l'eau, la perte de masse et la réduction de la densité.

4.2.4 Résultats des essais de compression et traction par flexion :

La résistance a été longtemps considérée comme la qualité essentielle pour ne pas dire la seule, à rechercher pour un béton ; mais nous avons suffisamment insisté dans le titre précédent sur la qualité d'ouvrabilité et son importance primordiale pour pouvoir dire que la résistance est une qualité également importante ; ouvrabilité et résistance sont d'ailleurs à

étudier de pair car elles sont étroitement dépendante l'une de l'autre et d'autant plus qu'elles varient en sens inverse en fonction de certains facteurs essentiels de la composition du béton .

La résistance mécanique en compression est le repère principal pour toute caractérisation de la résistance mécanique et de la qualité des bétons. Les éprouvettes utilisées sont de forme cylindrique et cubique de dimensions respectivement $(160 \times 320) \text{ mm}^2$ et $(100 \times 100 \times 100) \text{ mm}^3$. Pour chaque type de béton et à chaque échéance d'essai, la résistance en compression obtenue est la moyenne issue de deux éprouvettes.

L'essai de résistance en traction par flexion permet de contrôler la résistance d'un béton sous l'action d'un moment de flexion. Il consiste à soumettre une éprouvette de forme prismatique de section $(h \times h)$ et de portée (L) $(100 \times 100 \times 400) \text{ mm}^3$ à une charge concentrée appliquée au milieu (P) , on utilise l'essai de flexion à trois points (une charge appliquée sur le prisme) qui offre l'avantage de présenter toute une zone de moment maximal constant.

Les tableaux (4.16), (4.17), (4.18), (4.19), (4.20), (4.21) et (4.22) regroupent tous les résultats obtenus de ces essais à 7, 28, 56 et 90 jours.

Tableau (4.16) : Résultats obtenus pour la détermination de la résistance à la compression et en traction par flexion des BHPN, BHPRP et BHPRM à 7j

Type de béton		Éprouvette	Compression		Traction par flexion		
			f_{cj} (MPa)	f_{cj} moy (MPa)	ftj (MPa)	ftj moy (MPa)	
BHPN Naturel	Cylindrique	1	35.763	35.417			
		2	35.070				
	Cubique	1	64.914	64.914			
	Prismatique	1					1.920
2				1.940			
BHPRP Recyclé A 7j	25 %	Cylindrique	1	29.877	28.452		
			2	27.027			
		Cubique	1	46.015	46.015		
	Prismatique	1			1.790		1.803
		2			1.816		
	75 %	Cylindrique	1	27.360	27.245		
			2	27.130			
		Cubique	1	39.855	39.855		
Prismatique		1			1.190	1.165	
	2			1.140			
BHPRM Recyclé à 12m	25 %	Cylindrique	1	35.296	35.242		
			2	35.189			
		Cubique	1	46.856	46.856		
	Prismatique	1			1.510	1.410	
		2			1.310		
	75 %	Cylindrique	1	28.561	27.955		
			2	27.349			
		Cubique	1	40.360	40.360		
Prismatique		1			1.350	1.363	
	2			1.1376			

Tableau (4.17) : Résultats obtenus pour la détermination de la résistance à la compression et en traction par flexion des BHPN, BHPRP et BHPRM à 28j

Type de béton		Éprouvette	Compression		Traction par flexion		
			f _{cj} (MPa)	f _{cj} moy (MPa)	ftj (MPa)	ftj moy (MPa)	
BHPN Naturel	Cylindrique	1	36.218	36.724			
		2	37.230				
	Cubique	1	70.696	70.696			
	Prismatique	1					2.320
2				2.422			
BHPRP Recyclé A 7j	25 %	Cylindrique	1	33.017	31.469		
			2	29.920			
		Cubique	1	57.029	57.029		
		Prismatique	1				
	2				1.808		
	75 %	Cylindrique	1	29.590	29.725		
			2	29.860			
		Cubique	1	54.476	54.476		
Prismatique		1			2.129		
	2			2.013			
BHPRM Recyclé A 12m	25 %	Cylindrique	1	36.039	38.075		
			2	40.110			
		Cubique	1	70.344	70.344		
		Prismatique	1				
	2				2.012		
	75 %	Cylindrique	1	30.446	30.488		
			2	30.510			
		Cubique	1	67.367	67.367		
Prismatique		1			2.131		
	2			2.161			

Tableau (4.18) : Résultats obtenus pour la détermination de la résistance à la compression et en traction par flexion des BHPN, BHPRP et BHPRM à 56 j

Type de béton		Éprouvette	Compression		Traction par flexion	
			f_{cj} (MPa)	f_{cj} moy (MPa)	ftj (MPa)	ftj moy (MPa)
BHPN Naturel	Cylindrique	1	35.689	36.853		
		2	38.016			
	Cubique	1	84.064	84.064		
	Prismatique	1				
2				2.477		
BHPRP Recyclé A 7j	25 %	Cylindrique	1	39.5	38.132	
			2	44.484		
		Cubique	1	78.192	78.192	
		Prismatique	1			
	2				1.914	
	75 %	Cylindrique	1	37.157	37.218	
			2	37.279		
		Cubique	1	65.516	65.516	
Prismatique		1			1.902	
	2			2.045		
BHPRM Recyclé A 12m	25 %	Cylindrique	1	41.690	41.992	
			2	42.294		
		Cubique	1	79.369	79.369	
		Prismatique	1			
	2				2.307	
	75 %	Cylindrique	1	39.127	40.016	
			2	40.905		
		Cubique	1	70.861	70.861	
Prismatique		1			2.229	
	2			2.059		

Tableau (4.19) : Résultats obtenus pour la détermination de la résistance à la compression et en traction par flexion des BHPN, BHPRP et BHPRM à 91 j

Type de béton		Éprouvette	Compression		Traction par flexion		
			f_{cj} (MPa)	f_{cj} moy (MPa)	f_{tj} (MPa)	f_{tj} moy (MPa)	
BHPN Naturel	Cylindrique	1	37.680	45.802			
		2	53.924				
	Cubique	1	91.681	91.681			
	Prismatique	1					2.192
2				2.060			
BHPRP Recyclé A 7j	25 %	Cylindrique	1	43.432	44.231		
			2	45.029			
		Cubique	1	83.529	83.529		
	Prismatique	1			1.921		1.891
		2			1.861		
	75 %	Cylindrique	1	37.880	37.366		
			2	36.852			
		Cubique	1	81.801	81.801		
Prismatique		1			2.068	1.968	
	2			1.868			
BHPRM Recyclé A 12m	25 %	Cylindrique	1	42.814	46.602		
			2	50.390			
		Cubique	1	89.319	89.319		
	Prismatique	1			1.943	1.967	
		2			1.991		
	75 %	Cylindrique	1	41.880	41.609		
			2	41.338			
		Cubique	1	85.940	85.940		
Prismatique		1			1.883	1.995	
	2			2.107			

Tableau (4.20) : Résultats obtenus des résistances moyennes en compression sur cylindrique des BHPN, BHPRP et BHPRM (MPa)

Type de béton		Jour Ep	7J	28J	56J	91J
BHPN		Cylindrique	35.417	36.724	36.853	45.802
BHPRP A 7 j	25%	Cylindrique	28.452	31.469	38.132	44.231
	75%	Cylindrique	27.245	29.725	37.218	37.366
BHPRM A 12m	25%	Cylindrique	35.242	38.075	41.992	46.602
	75%	Cylindrique	27.955	30.488	40.016	41.609

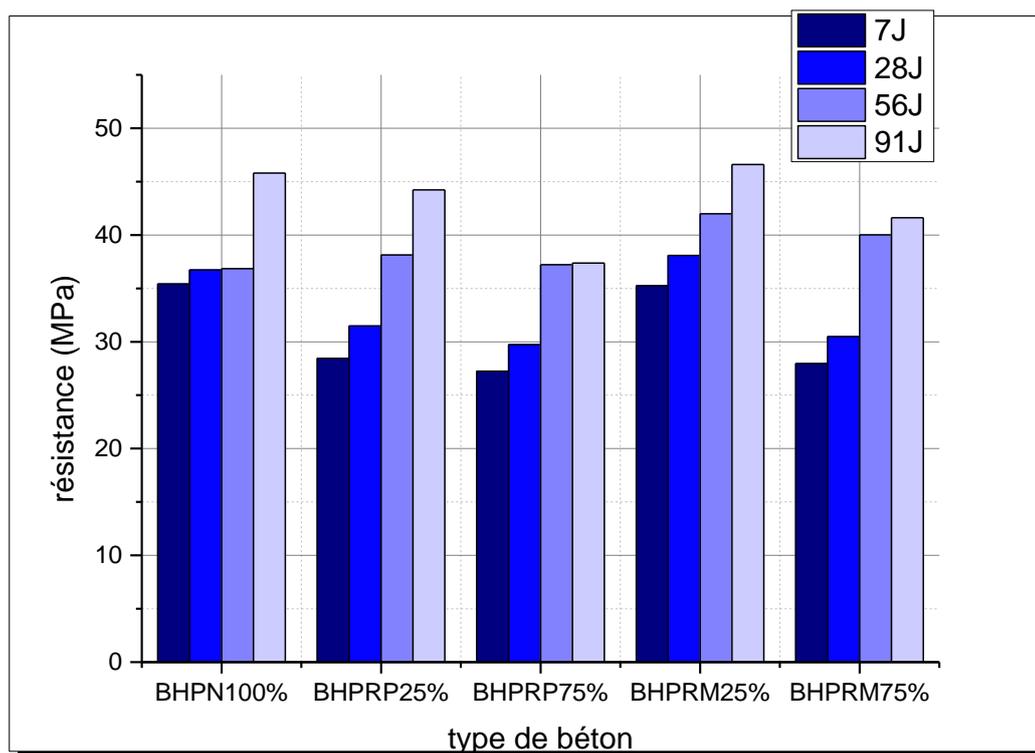


Figure (4.11) : Variation de la résistance à la compression en fonction de l'âge du béton (BHPN, BHPRP et BHPRM) MPa des éprouvettes cylindrique

Tableau (4.21) : Résultats obtenus des résistances moyennes en compression sur cubique des BHPN, BHPRP et BHPRM (MPa)

Type de béton		Ep	7J	28J	56J	91J
BHPN		Cubique	64.914	70.696	84.065	91.681
BHPRP A 7 j	25%	Cubique	46.015	57.029	78.192	83.529
	75%	Cubique	39.855	54.476	65.516	81.801
BHPRM A 12m	25%	Cubique	46.856	70.344	79.369	89.319
	75%	Cubique	40.360	67.367	70.861	85.940

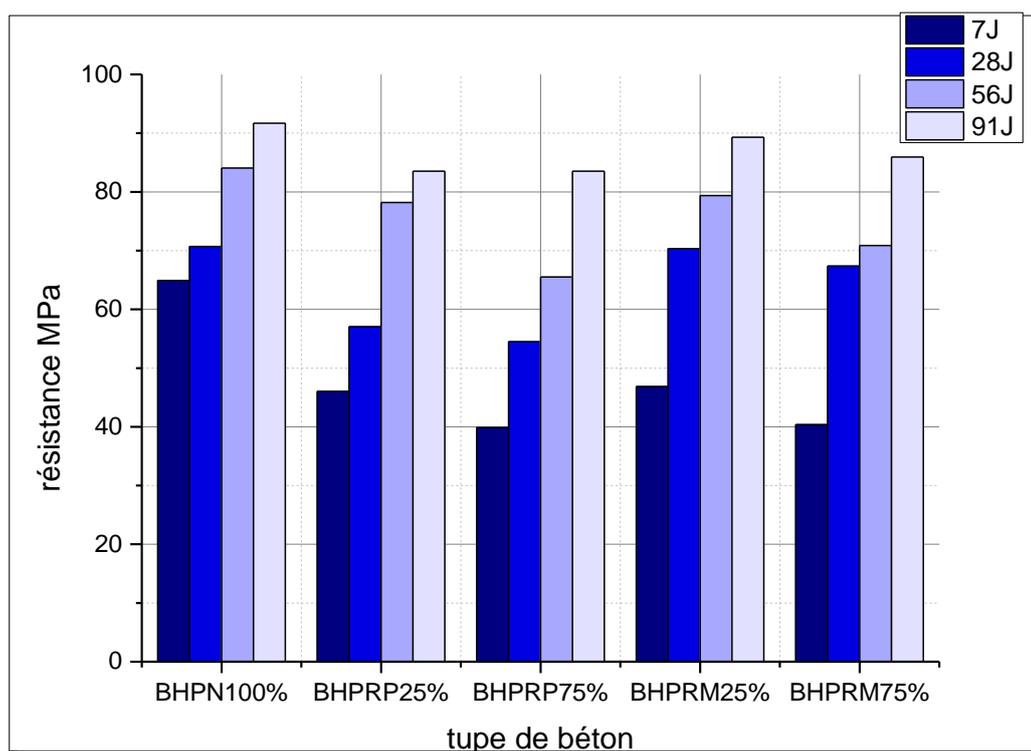


Figure (4.12) : Variation de la résistance à la compression en fonction de l'âge du béton (BHPN, BHPRP et BHPRM) MPa des éprouvettes cubiques

La propriété la plus importante du béton à l'état durci est la résistance à la compression, qui est montrée pour les mélanges de cette recherche à la figure (4.9) et (4.10). De plus, les tableaux (4.20) et (4.21) montrent l'effet de chaque facteur (teneur en RA et sa maturité) sur la résistance à la compression des éprouvettes cylindriques et cubiques.

Les résultats des tableaux (4.20) et (4.21) et la figure (4.9) et (4.10) montrent que la résistance à la compression a diminué avec l'utilisation de la GR, quel que soit l'âge du béton.

La qualité (résistance et rigidité) du BP à partir duquel le GR est obtenu à une influence significative sur le comportement du béton de granulats recyclés. Par conséquent, le GR provenant d'un BP de qualité supérieure offre une plus grande résistance au béton produit avec eux.

Pour l'effet de la maturité de GR on remarque que le BHP recyclé mature, donne des résistances à la compression plus élevées à la fois à 7,28,56 et 90 jours en raison du développement des résistances du BP avec le temps et de la rigidité des GR.

Le développement de la résistance à la compression au fil du temps des mélanges est plus lent lorsque le taux de GR augmente. Cela est attribué à l'absorption d'eau plus élevée de GR par rapport au GN, ce qui entraîne un plus grand rejet d'eau différé dans le temps.

Tableau (4.22) : Résultats obtenus des résistances moyennes en traction par flexion sur prismes des BHPN, BHPRP et BHPRM (MPa)

Type de béton		Jour	7J	28J	56J	91J
BHPN		Prismatique	1.930	2.371	2.347	2.126
BHPP	25%	Prismatique	1.803	1.81	1.915	1.891
	75%	Prismatique	1.165	2.071	1.974	1.891
BHPRM	25%	Prismatique	1.41	2.144	2.194	1.967
	75%	Prismatique	1.363	2.146	2.144	1.995

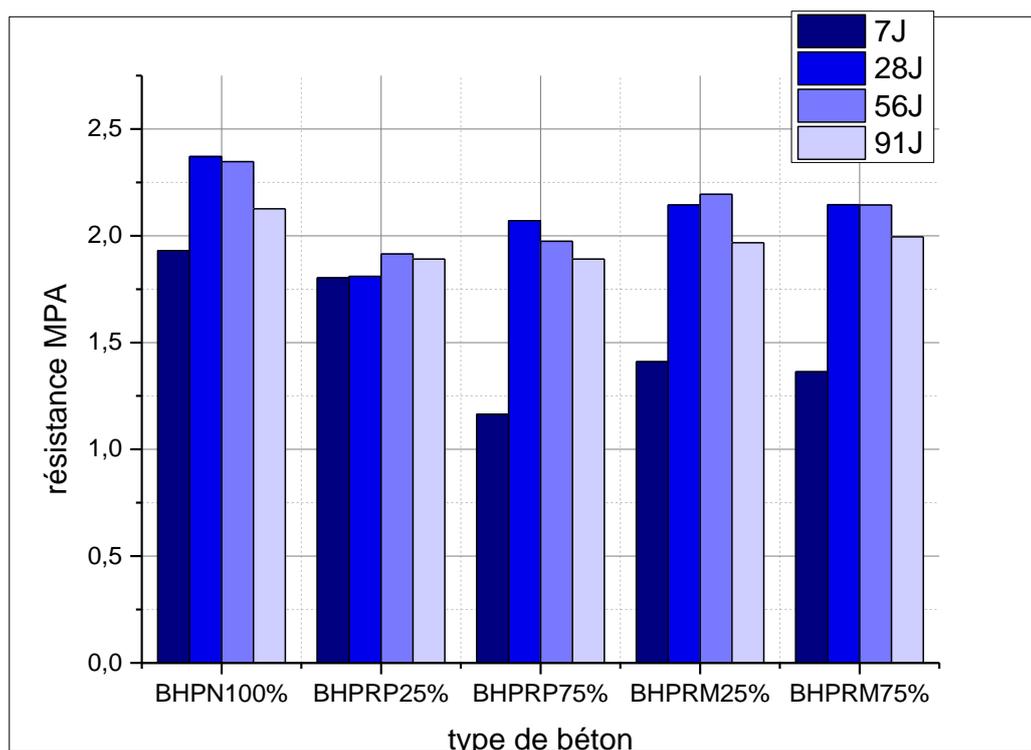
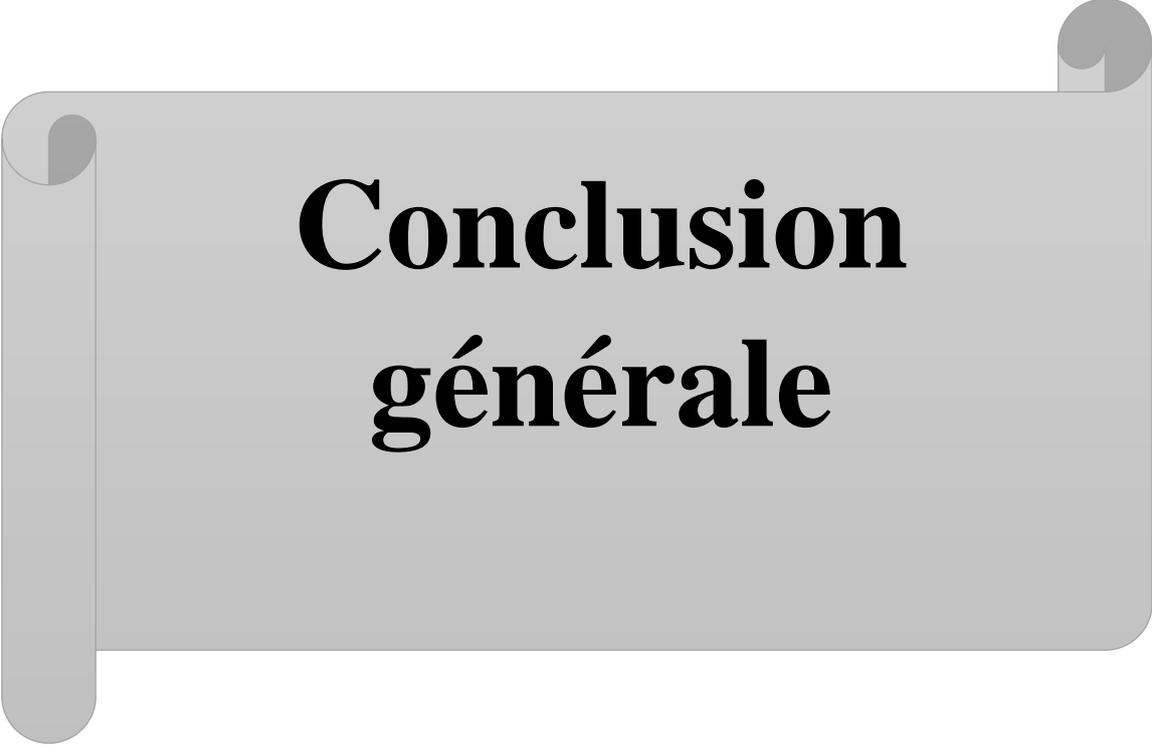


Figure (4.13) : Variation de la résistance à la traction par flexion en fonction de l'âge du béton (BHPN, BHPRP et BHPRM) MPA des éprouvettes prismatiques

Les résistances à la traction par flexion des différents mélanges sont illustrées respectivement à la figure ((4.11) et au tableau (4.22). Selon les résultats, l'utilisation de GR a diminué la résistance à la traction par flexion. Ainsi, le mélange de BHPN a montré une résistance à la traction par flexion à 91 jour de 2,126 MPa, alors qu'elle était de 1,891 MPa dans les mélanges 25% et 75% de GRP et 1,967 MPa dans les mélanges 25% de GRM et 1.995 MPa dans les mélanges de 75% de GRM. Ce comportement a été causé par la porosité des mélanges lorsque la teneur en déchets augmentait. De plus, la force de liaison entre le GR et la matrice cimentaire qui est inférieure à celle de l'utilisation de GN.

La maturité de GR a également affecté les résultats obtenus, lorsque le GR précoce a été utilisée par rapport au GR mature. Comme dans la résistance à la compression, ce comportement est attribué à la qualité inférieure de la GR lorsqu'un BP est fabriqué dès le plus jeune âge est utilisé pour sa production. La diminution de la résistance à la traction par flexion est due à la maturité de la GR.



Conclusion générale

Conclusion générale

L'utilisation des granulats recyclés sont aujourd'hui considérés comme une solution d'avenir afin de répondre au déficit entre production et consommation et de protéger l'environnement et pour confectionner un nouveau béton.

Pourtant, bien que ces avantages soient tangibles et que l'intérêt qu'ils suscitent chez les constructeurs soit grandissant, les BHPR demeurent en dessous de l'utilisation qui pourrait en être faite en raison de questions sans réponses posées par de nombreux chercheurs, maîtres d'ouvrage et maîtres d'œuvre. Certaines des inconnues qui les concernent nécessitent donc d'apporter des résultats de recherches probantes quant à leur facilité de formulation à base des matériaux disponibles, notamment en termes de performances.

L'objectif de ce travail de mémoire de fin d'étude était de contribuer expérimentalement à la compréhension du comportement des bétons de granulats recyclés (résistance à la compression), afin, d'aider à la conception d'ouvrages moins impactant d'un point de vue environnemental et plus sûrs. Nous nous sommes intéressés à l'influence du granulats recyclés sur le comportement du béton.

Ainsi, le premier objectif était la formulation d'un BHPR en additionnant 12% de laitier qui donne des résistances à la compression (90 jours) dépassent 50MPa. Le deuxième objectif était de différencier entre la maturité de deux bétons recyclés.

La nature rhéologique des agrégats recyclés (GR) fait que leur maturité affecte le comportement du béton fabriqué avec eux. Dans cette étude, l'influence de la maturité de GR sur le comportement du béton à haute performance (BHP) a été étudiée. Ainsi, cinq mélanges ont été produits avec 0%, 25% et 100% de GR maturée (période de durcissement à l'air de 12 mois) et précoce (période de durcissement à l'air de 7 jours), résultant du broyage du même béton parent (BP). Les conclusions suivantes peuvent être tirées de l'analyse effectuée :

La maturité de GR n'a pas affecté la densité fraîche ou durcie du BHP. La légère diminution de la densité de GR causée par l'évaporation de l'eau pendant le durcissement à l'air était négligeable par rapport à la densité de l'ensemble du mélange de béton ;

Le développement de la résistance à la compression et à la traction par flexion trois point du béton au fil du temps a rendu le BHPR précoce plus humide et plus déformable que le BHPR mature, ce qui a légèrement aggravé le comportement mécanique du BHP.

Dans l'ensemble, on peut conclure que la maturité de GR affecte les performances mécaniques et, en particulier, la résistance, il convient donc de la prendre en compte lors de l'utilisation de ce type d'agrégat

Annexe

Annexe (1) : Valeurs préconisées pour l'équivalent de sable ES

E_{SV}	E_{SP}	Nature et qualité du sable
ES < 65	ES < 60	Sable argileux : Risque de retrait ou gonflement à rejeter pour des bétons de qual
65 < ES < 75	65 < ES < 70	Sable légèrement argileux de prop admissible pour des bétons de qualité cou quand on ne craint pas particulièrement retrait.11
75 ≤ ES ≤ 85	70 ≤ ES ≤ 80	Sable propre à faible pourcentage de argileux convient parfaitement pour des bé de haute qualité.
E.S ≥ 85	E.S > 85	Sable très propre : L'absence totale de argileuses risque d'entraîner un défaut plasticité du béton qu'il faudra rattraper par augmentation du dosage en eau.

Annexe (2) : Classification des sables en fonction du module de finesse

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

Annexe (3) : Classification des roches en fraction du coefficient L_a

Coefficient L_a	Nature de la roche
< 20	Très dure
20 à 25	Dure
25 à 30	Assez dure
30 à 40	Mis dure
40 à 50	Tendre
>50	Très tendre

Annexe (4)



CONFORMITÉ PRODUIT

CLASSE SR5

NA 442 : 2013 – EN 197-1 : 2012.

DESIGNATION NORMALISEE

NA 442-CEM I 42.5 N-LH/SR 5.

OUVRAGES EN MILIEUX AGRESSIFS

Eau, Sol, Air.

OUVRAGES MASSIFS

FABRICATION

-PRODUIT 100% ALGERIEN

-Fabrication exclusive à l'usine Amouda Ciment sise à El Beïda Laghouat.

CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES

PROPRIETES CHIMIQUES

Bogue : C3A <= 5%.

NA 5042 (EN 196-2) : SO3 <= 3%.

NA 5042 (EN 196-2) : Chlorure <= 0.1%

PROPRIETES PHYSICO-MECANIQUE

NA 230 (EN 196-3) : DP > 60 mm.

NA 234 (EN 196-1) :

- Résistance à la compression (2 jours) > 10 MPa

- Résistance à la compression (28 jours) > 42.5 MPa

EMPLOIS ET USAGES CONFORME À VOS PROJETS

- Tunnels et travaux souterrains.
- Terrains gypseux, eaux pures, eaux usées et industrielles.
- Milieux sulfatés.
- Fondations et structures à réaliser dans des milieux agressifs.
- Injections.
- Ouvrages massifs.
- Travaux à la mer.



NOS PRODUITS AUSSI



AL IMRAN

NA 442-CEM II / B-L 32.5 R.

Ciment pour les professionnels de la construction.



AWTED

NA 442-CEM I/II-A-L 42.5 N

Ciment aux performances élevées, (super structure).

POUR PLUS D'INFORMATION VEUILLEZ CONSULTER NOTRE SITE WEB :

www.amoudaciment.com

Email : service.clients@amoudaciment.com

Direction commerciale

Lotissement 303, Section 4, Zone d'activités Amara,
Chéraga, Alger.
Tél. : 023 305 615 Région Nord : 0665 621 536
Fax : 023 30 55 14 Région Sud : 0668 303 403



Coordonnées usine

Commune El-Daïcha, Quartier Sid' Saïd,
village de LAGHOUAT
Tél. : 029 173 480 Spécialité Qualité : 0668 403 779
Fax : 029 17 34 81



Annexe (6)

MEDAFLOW RE 25

Conforme à la norme NA 774 , NA 5102 et NA 5075

**Super plastifiant–Haut réducteur d'eau
Pour travaux de préfabrifications**

Description

Le MEDAFLOW RE 25 est un super plastifiant haut réducteur d'eau. Il est conçu à base de polymères de synthèse et son utilisation dans le béton permet l'obtention d'un rapport E/C très bas. Le MEDAFLOW RE 25 permet d'obtenir des bétons et mortiers de très haute qualité.

Domaines D'application

- Bétons à hautes performances
- Réduction du temps de décoffrage
- Accélération de la rotation des moules
- Bétons précontraints et architecturaux

Propriétés

Grâce à ses propriétés le MEDAFLOW RE 25 permet :

Sur béton frais :

- Obtention d'un rapport E/C très bas
- Amélioration considérable de la fluidité
- Faciliter la mise en œuvre du béton
- Décoffrage rapide

Sur béton durci :

- Augmenter les résistances mécaniques à jeune âge
- Diminuer la porosité
- Augmenter la durabilité
- Diminuer le retrait

DESIGNATION	Rc (MPA)	
Jours	1J	28J
Témoin	5,4	28,0
MEDAFLOW RE25 (%)	13,2	39,5

Ciments CPJ = 42,5 = 350Kg/m³
E/C = 0,38

Caractéristiques :

- Aspect..... liquide
- Couleur..... Brun clair
- pH.....7
- Densité..... 1,06 + 0,01
- Teneur en chlore..... < 0,1 g/l
- Extrait sec..... 25%

Les renseignements donnés dans cette notice sont basés sur notre connaissance et notre expérience à ce jour. Il est recommandé de procéder à des essais de convenance pour déterminer la fourchette d'utilisation tenant compte des conditions réelles de chantier.



Granitex
قرانيتكس

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



Mode D'emploi :

Il est recommandé d'ajouter le MEDAFLOW RE 25 dans le béton après introduction des ¾ de l'eau de gâchage. Il est conseillé de réaliser des essais dans les conditions de chantier afin de déterminer le dosage adéquat pour les résultats recherchés.

Il peut être aussi ajouté directement dans le camion malaxeur (toupie), puis malaxer à grande vitesse : 1min/m3.

Par temps chaud, le MEDAFLOW SR25 peut être combiné à un retardataire de prise (MEDARETARD GR).

Dosage :

Plage de dosage recommandée :

1,0 à 2,5% du poids de ciment soit 0,93 litres à 2,38 litres.

Pour 100 Kg de ciment.

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

Conditionnement Et Stockage :

Le MEDAFLOW RE 25 est conditionné en bidons de 11 kg , fûts de 240 kg et cubéténaire 1100 kg.

Délai de conservation :

12 mois dans son emballage d'origine, à l'abri du gel et de la chaleur (5°C < t < 35°C)

Lors d'une exposition du produit au soleil, sa couleur est sujette à changer de ton.

Précautions D'emploi :

Manipulation non dangereuse.

Se référer à la fiche de données de sécurité disponible sur : www.granitex-dz.com

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

PV d'essais conforme aux normes, établi par le CNERIB en 06 FEV 2012

Annexe (6) : Classement des bétons selon la valeur d'affaissement au cône d'Abrams

Classe de consistance	Définition	Affaissement (mm)
S1	Ferme	10 à 40
S2	Plastique	50 à 90
S3	Très plastique	100 à 150
S4	Fluide	160 à 210
S5	Très fluide	≥220