

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou
Faculté du Génie de la Construction
Département de Génie Civil

Laboratoire de Modélisation numérique et expérimentale des Matériaux et Structures de génie civil
(LaMoMS)



Caractérisation des paramètres influençant la durabilité des matériaux cimentaires à base de matériaux de recyclages

Thèse de Doctorat 3^{ème} Cycle L.M.D présentée par :

Kahina HADDAD

Discipline: Génie Civil

Option : Structures et matériaux

Soutenue publiquement le 26/06/2018 devant le jury composé de :

BOUAFIA Youcef	Professeur	UMMTO	Président
KACI Salah	Professeur	UMMTO	Rapporteur
KHARCHI Fatoum	Professeur	USTHB	Examineur
KRIKER Abdelouahed	Professeur	UKM Ouargla	Examineur
DEHMOUS Hocine	MCA	UMMTO	Examineur
HADDAD Ourdia	MCB	UMMTO	Invité

Remerciements

Ce travail a été mené sous la direction de Monsieur KACI Salah. Je tiens à lui exprimer toute ma reconnaissance, tant pour ses conseils et sa disponibilité que pour la confiance qu'il m'a accordé pour mener à bien ce travail de recherche.

Je tiens à exprimer ma très sincère reconnaissance envers Monsieur BOUAFIA Youcef, qui m'a fait l'honneur d'accepter de présider le jury de soutenance, qu'il trouve ici l'expression de ma respectueuse gratitude. J'adresse également mes sincères remerciements à Madame KHARCHI Fatoum, Monsieur KRIKER Abdelouhed et Monsieur DEHMOUS Hocine, de m'avoir fait l'honneur d'examiner ce mémoire de thèse.

Mes sincères remerciements vont à Madame HADDAD Ourdia qui m'a proposé cet axe de recherche riche et passionnant. Un grand merci à vous pour m'avoir dirigé pendant ces années de doctorat avec une grande disponibilité, d'avoir répondu à mes questions avec pédagogie et aussi pour toutes les discussions enrichissantes que nous avons partagées.

J'ai effectué ma thèse au sein du Laboratoire de Génie Civil de l'université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou. Je remercie chaleureusement les membres de ce laboratoire en particuliers Madame BEN MEDJBAR Fadhila et Monsieur BOUHERRAOUA Rachid, pour leur aide, amitié, et leur disponibilité durant les investigations expérimentales.

Un grand merci à Madame HADJ KADOUR Sadia pour sa contribution dans la correction de mon article ainsi qu'à mon petit frère Abdelhak qui m'a aidé durant la réalisation de la partie expérimentale et de résoudre quelques problèmes techniques rencontrés au cours de ce travail.

Je réserve une mention très spéciale à mon mari Mokrane, pour son encouragement, son soutien continu et sa patience au moment difficile durant mes années de thèse, ainsi que pour son aide pour la réalisation de ce travail. Je remercie également mes beaux-parents, qui m'ont toujours soutenu et aidé durant toutes les périodes difficiles de la réalisation de ce travail.

Enfin, je dois une grande reconnaissance à mes parents, qui ont toujours été présents et qui m'ont toujours soutenu, pour leur dévouement et surtout pour leur amour et leurs sacrifices. Aussi, je ne manquerai pas de remercier chaleureusement mon oncle Maamar qui a répondu présent à mes sollicitations à un moment critique de ma thèse, ainsi que mes frères et sœurs et toute ma famille.

Résumé

Le recyclage des déchets issus de la construction est une voie prometteuse menant vers la construction durable. Le granulat de béton recyclé (GBR) est l'idée la plus répandue. Les GBR sont composés d'une partie de granulat naturel (GN) et d'une partie non négligeable de pâte de ciment durcie. Cette dernière apporte une porosité additionnelle au béton, porosité qui est un élément déterminant pour les propriétés mécaniques et de durabilité des bétons. En effet, une faible porosité constitue le meilleur moyen de défense des bétons contre les agents agressifs. Les objectifs de cette étude expérimentale visent à valoriser quelques matériaux de recyclage (déchets de marbre, granulats de béton recyclés, granulats de déchet de brique) et développer une technique à ultrason pour estimer la porosité et la connectivité des pores du béton.

Différentes formulations de bétons ont été composées en faisant une substitution volumique à différents pourcentages des GN par des GBR, le béton de référence est formulé avec uniquement des GN ; les autres paramètres de composition des bétons sont maintenus constants. Des essais de compression et de flexion ont été effectués pour évaluer les propriétés de résistance du béton. La durabilité a été approchée par des essais de porosité ouverte et d'absorption capillaire. Dans le test de vitesse des ondes ultrasoniques (VOU) les bétons ont été testés aux différents états de saturation pour étudier la connectivité des pores en fonction de l'évolution de la VOU. Une analyse statistique a été réalisée pour déterminer les corrélations entre ces différentes propriétés.

Les résultats des essais ont montré qu'il y a une diminution dans les propriétés de résistances (à la compression et à la flexion) et de durabilité (absorption par capillarité, porosité ouverte et absorption par immersion) des bétons étudiés. Cependant, les bétons produits en utilisant jusqu'à 60% de GBR ont atteint des propriétés satisfaisantes par rapport au béton de référence. L'analyse statistique a montré qu'il existe de bonnes corrélations entre le taux de substitution des GBR, la VOU, la porosité ouverte et l'état de saturation des bétons.

Mots clés : granulat de béton recyclé, porosité ouverte, VOU, état de saturation, résistance mécanique, connectivité, analyse statistique.

Abstract

The recycling of construction waste is the promising way towards sustainable construction. Recycled concrete aggregates granulate (RCA) is the most common idea. RCA are composed of natural aggregate (NA) and a significant part of hardened and aged cement paste. This paste brings an additional porosity to the concrete, porosity that is a determining agent concerning the concrete mechanic strength and durability. Indeed, a weak porosity constitutes the best means to protect concretes against the aggressive agents. The purpose of this experimental study is to upgrade the use of some recycling materials (marble waste, recycled concrete aggregates, recycled brick aggregates) and to develop an ultrasonic technique to estimate the concrete porosity and pores connectivity.

For this purpose, different concrete compositions were formulated by varying the RCA content, the reference concrete is made only of NA; the other composition parameters are kept constants. Compressive test and flexural strength test were carried out to evaluate the strength properties of concrete. In case of durability property, open porosity and capillary absorption were evaluated. In the ultrasonic pulse velocity test (UPV), the concretes are examined at different saturation level to estimate the concrete pores connectivity according to the UPV evolution. Statistical analysis was carried out to determine the correlations between these different properties.

Test results showed that there is a decrease in the strength properties (compressive strength and flexural strength) and durability properties (capillarity absorption, open porosity and absorption by immersion) of the concretes studied. However, the concretes produced using up to 60% of RCA achieved satisfactory properties to conventional concrete. Statistical analysis showed that there is a strong correlation between RCA content, UPV, open porosity and the saturation state of concretes.

Keywords: recycled concrete aggregate, open porosity, UPV, saturation state, mechanical strength, connectivity, statistical analysis.

Sommaire

Résumé

Abstract

Sommaire

Liste des figures

Liste des tableaux

Principales notations

Liste des travaux

Introduction générale	- 1 -
Chapitre I: Synthèse bibliographique	
Partie A : Généralités sur les bétons et l'environnement	- 4 -
I.1 Introduction.....	- 4 -
I.2 Constituants du béton.....	- 4 -
I.2.1 La pâte de ciment	- 4 -
I.2.2 Les granulats	- 5 -
I.2.3 Les additions minérales.....	- 6 -
I.3 Description de la microstructure	- 7 -
I.3.1 La pâte de ciment durcie	- 7 -
I.3.2 Les granulats	- 7 -
I.3.3 Interface pâte - granulats	- 7 -
I.3.4 Les pores	- 8 -
I.4 Durabilité des bétons.....	- 9 -
I.4.1 Dégradation des bétons	- 9 -
I.4.2 Principaux processus de dégradation chimique	- 10 -
I.4.2.1 La lixiviation ou l'hydrolyse (dissolution) des hydrates	- 10 -
I.4.2.2 Les échanges ioniques entre les hydrates et le milieu agressif.....	- 10 -
I.4.2.3 Formation de produits expansifs.....	- 10 -
I.4.3 Cinétique de dégradation des matériaux	- 11 -
I.4.4 Principales attaques chimiques	- 12 -
I.4.4.1 Attaque par la carbonatation.....	- 12 -
I.4.4.2 Attaque par les sulfates	- 13 -
I.4.4.3 Attaque par les chlorures.....	- 13 -
I.4.4.4 Attaque par les eaux (lixiviation).....	- 14 -
I.4.4.5 Réaction alcali-granulats	- 14 -

I.5 Critères de classification des bétons	- 15 -
I.6 Les bétons autoplaçants	- 16 -
I.6.1 Propriétés recherchées dans les BAP	- 17 -
I.6.1.1 Déformabilité libre	- 17 -
I.6.1.2 Déformabilité restreinte	- 18 -
I.6.1.3 Résistance à la ségrégation statique	- 19 -
I.6.1.4 Autres propriétés	- 20 -
I.6.2 Corrélation entre la composition et les propriétés d'un BAP frais	- 20 -
I.6.2.1 Phase granulaire	- 20 -
I.6.2.2 Phase visqueuse.....	- 21 -
I.6.2.3 Les superplastifiants.....	- 22 -
I.6.2.4 Les agents de viscosité.....	- 22 -
I.6.3 Formulation des BAP.....	- 23 -
I.6.4 Les BAP et leur utilisation	- 24 -
I.7 Le béton et l'environnement	- 24 -
I.8 Quelques chiffres des déchets de construction en Algérie.....	- 25 -
I. 9 Conclusion	- 26 -
Partie B: La problématique des GBR et leur valorisation.....	- 28 -
I.9 Introduction.....	- 28 -
I.10 Composition des granulats de béton recyclés (GBR)	- 28 -
I.11 Propriétés physiques et mécaniques des GBR	- 29 -
I.11.1 Masse volumique	- 29 -
I.11.2 Absorption d'eau.....	- 29 -
I.11.4 Abrasion Los Angeles.....	- 31 -
I.12 Propriétés mécaniques et physiques des bétons de GBR	- 31 -
I.12.1 Résistance à la compression.....	- 31 -
I.12.2 Résistance à la flexion.....	- 34 -
I.12.3 Autre propriété: Vitesse des ondes ultrasoniques	- 35 -
I.12.4 Masse volumique	- 38 -
I.12.5 Absorption d'eau et porosité ouverte de béton	- 38 -
I.13 Conclusion	- 42 -
 Chapitre II: Matériaux et procédures expérimentales	
II.1 Introduction	- 43 -
II.2 Matériaux et formulations.....	- 44 -
II.2.1 Matériaux.....	- 44 -
II.2.1.1 Ciment.....	- 44 -

II.2.1.2 Le déchet de marbre broyé.....	- 44 -
II.2.1.3 Le super-plastifiant	- 45 -
II.2.1.4 Eau de gâchage	- 45 -
II.2.1.5 Granulats.....	- 46 -
II.2.2 Méthodologie adoptée pour la conception des compositions de béton.....	- 51 -
II.2.2.1 Formulation des bétons	- 52 -
II.3 Procédures expérimentales	- 55 -
II.3.1 Fabrication du béton	- 55 -
II.4 Essais sur bétons frais	- 57 -
II.4.1 Etalement des bétons	- 57 -
II.4.2 Essai de la stabilité au tamis	- 58 -
II.4.3 Essai de la boîte en L.....	- 58 -
II.5 Essais sur béton durci	- 59 -
II.5.1 Essai de résistance à la compression.....	- 59 -
II.5.2 Essai de flexion.....	- 59 -
II.5.3 Porosité ouverte et absorption par immersion	- 60 -
II.5.4 Essai d'absorption par capillarité.....	- 62 -
II.5.5 Essai non destructif.....	- 63 -
II.6 Méthodes d'évaluation statistique	- 64 -
II.6.1 La plus petite différence significative.....	- 64 -
II.6.2 Erreur Standard.....	- 65 -
II.6 Conclusion	- 65 -

Chapitre III: Résultats et discussions

III.1 Introduction	- 66 -
III.2 Résultats et discussions de caractérisation des BAP à l'état frais et durci	- 66 -
III.2.1 A l'état frais.....	- 66 -
III.2.1.1 L'étalement des BAP.....	- 67 -
III.2.1.2 Essai de la boîte en L.....	- 67 -
III.2.1.3 Essai de la stabilité au tamis.....	- 68 -
III.2.2 A l'état durci.....	- 68 -
III.2.2.1 Résistance des BAP à 28 jours	- 68 -
III.2.3 Conclusions	- 72 -
III.3 Résultats et discussions de caractérisation des bétons fluides à l'état frais et durci.....	- 73 -
III.3.1 A l'état frais.....	- 73 -
III.3.2 A l'état durci.....	- 74 -
III.3.2.1 Résistance à la compression des bétons fluides à base de GBR récents et vieux.....	- 74 -

III.3.2.2	Résistance à la flexion des bétons fluides à base de GBR récents et vieux.....	- 78 -
III.3.2.3	Masse volumique.....	- 81 -
III.3.2.4	Porosité ouverte et absorption par immersion.....	- 82 -
III.3.2.5	Absorption d'eau par capillarité.....	- 84 -
III.3.2.6	Vitesse des ondes ultrasoniques (VOU).....	- 87 -
III.4	Analyse statistique des résultats.....	- 92 -
III.4.1	Corrélations des résultats des bétons à base de GBR8/16.....	- 92 -
III.4.2	Corrélations des résultats des bétons à base de GBR4/16.....	- 104 -
III.4.3	Comparaison statistique des différentes propriétés de béton à base de GBR8/16.....	- 115 -
III. 5	Conclusions.....	- 116 -
	Conclusion générale et perspectives.....	- 118 -
	Références bibliographiques.....	- 122 -

Liste des figures

Figure I. 1: Test d'étalement d'un BAP.....	- 17 -
Figure I. 2: Schématisation de la formation de voûtes au droit des armatures.....	- 18 -
Figure I. 3: Boite en L.....	- 19 -
Figure I. 4: Essai de stabilité au tamis.....	- 20 -
Figure I. 5: Etalement en fonction du volume de pâte dans un BAP (Yen et al. 1999).	- 22 -
Figure I. 6: Principe général de formulation d'un béton autoplaçant (Haddad 2007).....	- 23 -
Figure I. 7: Absorption d'eau de GBR en fonction du temps (Vieira et al. 2011).	- 30 -
Figure I. 8: Porosité en fonction de la résistance à la compression des bétons de GBR (Gomez-Soberon 2002).....	- 33 -
Figure I. 9: Effet du taux de brique concassée dans les GBR sur la résistance à la flexion du béton (Yang et al. 2011).....	- 35 -
Figure I. 10: Corrélation entre la résistance à la compression et les valeurs de VOU (Kwan et al. 2012)... ..	- 36 -
Figure I. 11: Corrélation entre la résistance à la compression et la VOU et la densité (Rao et al.2011).....	- 36 -
Figure I. 12: Corrélation entre VOU (V) et la résistance à la compression (S) du béton (Khatib 2005)	- 37 -
Figure I. 13: Capacité d'absorption d'eau du béton par rapport à la teneur en GBR (Kwan et al. 2012).	- 39 -
Figure I. 14: a) Absorptivité d'eau capillaire (Evangelista et de Brito 2010) et b) Absorption capillaire (Zega et Di Miao 2011) de béton conventionnel et de bétons contenant de GBR comme substitution de 30 et 100% des GN.	- 41 -
Figure II. 1: Déchet de marbre récupéré.	- 45 -
Figure II. 2: Courbes granulaires des granulats naturels.....	- 46 -
Figure II. 3: Superposition des courbes granulaires des GN et celles des GBR récents de classe 4/8 et 8/16.....	- 47 -
Figure II. 4: Superposition des courbes granulaires des GN et celles des GBR vieux de classe 4/8 et 8/16.	- 47 -
Figure II. 6: granulats naturels, granulats de béton recyclés, granulats de déchets de brique de fraction (8/16).	- 50 -
Figure II. 7: Observation au MEB des granulats naturels.....	- 50 -
Figure II. 8: Observation au MEB des granulats de béton recyclés.....	- 51 -
Figure II. 9: Comparaison entre une composition de béton fluide et celle d'un béton vibré.....	- 52 -
Figure II. 10: Essai d'étalement.	- 57 -
Figure II. 11: Photo descriptive de l'essai de stabilité au tamis (le tamis est de 5 mm).	- 58 -
Figure II. 12: Résultat d'essai de la boite en L.	- 58 -

Figure II. 13: Rupture de l'éprouvette ; La presse utilisée.....	- 59 -
Figure II. 14: La presse utilisée; Rupture de l'éprouvette.....	- 60 -
Figure II. 15: Dispositif expérimental de mesure d'absorption d'eau par capillarité.	- 63 -
Figure II. 16: Mesure de vitesse de propagation des ondes ultrasonique.....	- 64 -
Figure III. 1: Résistances à la compression des BAP.	- 70 -
Figure III. 2: Résistances à la compression des BAP.	- 71 -
Figure III. 3: Résistances à la compression des BAP.	- 72 -
Figure III. 4: Résistances à la compression des bétons fluides à base de GBR récents.....	- 75 -
Figure III. 5: Résistances à la compression des bétons fluides à base de GBR vieux.	- 75 -
Figure III. 6: Schémas de fissures des spécimens.....	- 76 -
Figure III. 7(a): Résistances à la compression en fonction du % de GBR de classes granulaires 8/16.....	- 77 -
.....	
Figure III. 7 (b): Résistances à la compression en fonction du % de GBR de classes granulaires 4/16 (b).	- 78 -
.....	
Figure III.8: Résistance à la flexion des bétons fluides à base de GBR récents.	- 78 -
Figure III.9 : Résistance à la flexion des bétons fluides à base de GBR vieux.	- 79 -
Figure III. 10 (a): Résistances à la flexion en fonction du % de GBR de classes granulaires 8/16.....	- 80 -
Figure III. 10 (b): Résistances à la flexion en fonction du % de GBR de classes granulaires 4/16.	- 80 -
Figure III.11: Masses volumiques des bétons fluides à base de GBR.	- 81 -
Figure III. 12: Porosité totale ouverte.....	- 83 -
Figure III. 13: Absorption par immersion.....	- 83 -
Figure III. 14 : Absorption d'eau par capillarité des bétons fluides.	- 85 -
Figure III.15 (a): VOU en fonction du taux de substitution en GBR8/16.	- 88 -
Figure III.15 (b): VOU en fonction du taux de substitution en GBR4/16.....	- 88 -
Figure III.16 (a) : VOU en fonction du taux de saturation à base de GBR8/16.	- 90 -
Figure III.16 (b) : VOU en fonction du taux de saturation des bétons à base de GBR4/16.	- 90 -
Figure III.17 (a): Les valeurs moyennes de la VOU des bétons en fonction du taux de substitution des GBR8/16 et l'état de saturation de béton.	- 91 -
Figure III.17 (b): Les valeurs moyennes de la VOU des bétons en fonction du taux de substitution des GBR4/16 et l'état de saturation de béton.	- 91 -
Figure III. 18: Résistance à la compression en fonction de la résistance à la flexion.	- 92 -
Figure III. 19: VOU en fonction de la résistance à la compression.....	- 93 -
Figure III. 20: VOU en fonction de la résistance à flexion.....	- 93 -
Figure III. 21: Masse volumique séchée (Mv sec) en fonction de la porosité ouverte.	- 94 -
Figure III. 22: Mv sec en fonction de l'absorption par immersion.....	- 94 -
Figure III. 23: VOU en fonction de la porosité ouverte séchée.....	- 95 -
Figure III. 24: VOU en fonction de la porosité ouverte séchée.....	- 95 -

Figure III. 25: VOU en fonction de l'absorption par immersion.....	- 96 -
Figure III. 26: VOU en fonction de la masse volumique.....	- 96 -
Figure III.27: Résistance à la compression en fonction de la porosité ouverte.	- 98 -
Figure III.28: Résistance à la compression en fonction de la masse volumique.	- 98 -
Figure III.29: Résistance à la compression en fonction de l'absorption par immersion.....	- 99 -
Figure III.30: Résistance à la flexion en fonction de la porosité ouverte.	- 99 -
Figure III. 31: Résistance à la flexion en fonction de la masse volumique.	- 100 -
Figure III. 32: Résistance à la flexion en fonction de l'absorption par immersion.	- 100 -
Figure III. 33: Résistance à la compression en fonction de % de substitution.	- 101 -
Figure III. 34: Résistance à la flexion en fonction de % de substitution.	- 101 -
Figure III. 35: Masse volumique en fonction de % de substitution.....	- 102 -
Figure III. 36: Porosité ouverte en fonction de % de substitution.	- 102 -
Figure III. 37: Absorption par immersion en fonction de % de substitution.	- 103 -
Figure III. 38: VOU en fonction de % de substitution.	- 103 -
Figure III. 39: Résistance à la compression en fonction de la résistance à la flexion.	- 104 -
Figure III. 40: VOU en fonction de la résistance à compression.....	- 105 -
Figure III. 41: VOU en fonction de la résistance à flexion.....	- 105 -
Figure III. 42: Masse volumique séchée (Mv sec) en fonction de la porosité ouverte.	- 106 -
Figure III. 44: VOU en fonction de la porosité ouverte séchée.....	- 107 -
Figure III. 45: VOU en fonction de la porosité ouverte séchée.....	- 107 -
Figure III. 46: VOU en fonction de l'absorption par immersion.....	- 108 -
Figure III. 47: VOU en fonction de la masse volumique.....	- 108 -
Figure III. 48: Résistance à la compression en fonction de la porosité ouverte.	- 109 -
Figure III. 49: Résistance à la compression en fonction de la masse volumique.	- 109 -
Figure III. 50: Résistance à la compression en fonction de l'absorption par immersion.....	- 110 -
Figure III. 51: Résistance à la flexion en fonction de la porosité ouverte.	- 110 -
Figure III. 52: Résistance à la flexion en fonction de la masse volumique.	- 111 -
Figure III. 53: Résistance à la flexion en fonction de l'absorption par immersion.	- 111 -
Figure III. 54: Résistance à la compression en fonction de % de substitution.	- 112 -
Figure III. 55: Résistance à la flexion en fonction de % de substitution.	- 112 -
Figure III. 56: Masse volumique en fonction de % de substitution.....	- 113 -
Figure III. 57: Porosité ouverte en fonction de % de substitution.....	- 113 -
Figure III. 58: Absorption par immersion en fonction de % de substitution.	- 114 -
Figure III. 59: VOU en fonction de % de substitution.	- 114 -

Liste des tableaux

Tableau I.1: Appréciation de la consistance en fonction de l'affaissement au cône.....	- 16 -
Tableau I. 2: Classification des BAP en fonction de leurs propriétés de l'état frais (Haddad 2007)....	- 24 -
Tableau I. 3: Quantités de débris issus des catastrophes naturelles en Algérie.....	- 26 -
Tableau I. 4: Valeurs d'abrasion Los Angeles des GBR et GN.....	- 31 -
Tableau I. 5: Classification de durabilité du béton basée sur les paramètres de perméabilité (Alexander et al.1999).....	- 41 -
Tableau II. 1: Caractéristiques chimiques des ciments utilisés.	- 44 -
Tableau II. 2: Propriétés chimiques du déchet de marbre.	- 45 -
Tableau II. 3: Résultats de caractérisation des granulats utilisés.....	- 49 -
Tableau II.4: Nomenclature des compositions de béton autoplaçants (BAP).	- 53 -
Tableau II.5: Nomenclature des compositions de béton fluides à base de GBR récents.....	- 53 -
Tableau II. 6: Nomenclature des compositions de béton fluides à base de GBR vieux.	- 53 -
Tableau II. 7: Compositions des différentes formules de BAP (kg/m ³).	- 54 -
Tableau II. 8: Compositions des différentes formules de béton fluide à base de GBR récents (kg/m ³).....	- 54 -
Tableau II. 9: Compositions des différentes formules de béton fluide à base de GBR vieux (kg/m ³). -	- 55 -
Tableau III. 1 : Propriétés à l'état frais des diverses formulations de BAP.....	- 67 -
Tableau III. 2 : Résistances moyennes des BAP et l'erreur standard en (MPa).	- 69 -
Tableau III. 3: Propriétés à l'état frais des bétons à base de GBR récents.....	- 73 -
Tableau III. 4: Propriétés à l'état frais des bétons à base de GBR vieux.	- 74 -
Tableau III. 5: Données concernant l'absorption d'eau par capillarité des bétons fluides à base GBR récents.....	- 86 -
Tableau III. 6: Résultats des mesures de la porosité ouverte sèche et de la VOU.....	- 87 -
Tableau III. 7: Analyse statistique de l'effet du taux de substitution sur quelques propriétés de béton	- 115 -

Principales notations

GN Granulat naturel

GBR Granulat de béton recyclé

GDB Granulat de déchet de brique

BR Béton recyclé

B réf Béton de référence

BAP Béton autoplaçant

BRV Béton recyclé vieux

VOU Vitesses des ondes ultrasoniques

Le travail de recherche présenté dans ce mémoire de thèse a été dirigé par mon directeur de thèse le Professeur **KACI Salah**, laboratoire de modélisation expérimentale et numérique des matériaux et structures de Génie civil (LaMoMS) ; de l'Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou.

Ce travail de thèse a fait l'objet de publications et communications suivantes :

Publications internationales

Kahina Haddad, Ourdia Haddad, Salima Aggoun, Salah Kaci (2017): «Correlation between the porosity and ultrasonic pulse velocity of recycled aggregate concrete at different saturation levels» **Canadian Journal of Civil Engineering**, 44(11): 911-917, <https://doi.org/10.1139/cjce-2016-0449>, ISSN 0315-1468, **indexée dans** ISI Thomson Reuters.

Rencontres nationales

1. **Kahina HADDAD** et al « Les bétons à base de granulats de béton de démolition (résistances et porosité ouverte », Colloque International Caractérisation et Modélisation des Matériaux et Structures, CMMS14-Tizi Ouzou, Algérie, 12-13 novembre 2014, cmms14@ummto.dz.
2. **Kahina HADDAD** et al « Les Bétons à base de GBD : Résistances, Vitesses à l'Ultronique et Porosités ouvertes», 2nd International Symposium on Materials and Sustainable Development, 2nd CIMDD, Boumerdès, Algérie, 09 et 10 Novembre 2015, cimdd2015@gmail.com

Introduction générale

Par ses bonnes performances en résistances mécaniques et en durabilité et son coût réduit, en comparaison aux autres matériaux de construction, le béton est de loin le matériau de construction le plus utilisé au monde. Le béton est utilisé par tous et pour tout type de construction, il en résulte une demande accrue en matériau de construction notamment en granulats naturels pour approvisionner les secteurs du bâtiment et des travaux publics.

Cependant, l'extraction des granulats de carrière a une grande incidence sur l'environnement, comme le déboisement et le changement du relief d'un massif et de paysage ; l'extraction des granulats alluvionnaire (rivières et oueds) provoque la baisse de la nappe phréatique puis le séchage des sols aux alentours de ces rivières. Ces deux procédés d'extraction ont des incidences négatives sur la faune et la flore qui dépendent de ces massifs de terres, et de ces eaux qui finissent par disparaître. En Algérie, la législation est devenue très sévère contre toute extraction abusive des granulats de rivière et des oueds.

Ainsi, pour préserver l'environnement, il est devenu indispensable de trouver de nouvelles sources en granulats qui peuvent apporter des solutions alternatives. Les granulats de recyclage semblent être une solution. Les matériaux de démolition ou de chantier provenant de la démolition ou de la réhabilitation du vieux bâti sont en quantité croissante et ne sont éliminés que par l'utilisation en remblai ou la mise en décharges sauvages, causant ainsi un impact sur l'environnement. Ce dernier constitue un paramètre essentiel du développement durable et sa préservation passe obligatoirement par le recyclage des gravats.

Le granulat de béton recyclé (GBR) est un composite de granulat naturel (GN) et d'une pâte de ciment durcie et vieillie. Cette pâte apporte une porosité additionnelle aux bétons formulés avec ce type de composant où les bonnes performances de durabilité sont demandées. Il est connu que la porosité est un indicateur de durabilité, car les pores du béton constituent le chemin d'accès à tous les agents agressifs de toutes natures. Les pores et les capillaires à l'intérieur de la structure facilitent les processus destructifs qui commencent généralement à la surface. Comme les bétons ordinaires, les bétons composés de GBR doivent présenter de bonnes performances mécaniques et de durabilité, il est alors important de maîtriser le paramètre de porosité de ces nouveaux bétons.

Le nombre croissant de structures en béton présentant des symptômes de détérioration prématurée due à l'action de l'environnement exige des procédures pour estimer la durabilité de

ce type de composant. Par conséquent, un test non destructif rapide et simple doit être développé pour évaluer la durabilité du béton.

Notre étude a pour objectifs de valoriser quelques matériaux de recyclage (poudre de marbre, granulats de béton recyclés et granulats de déchets de brique) pour la confection de bétons durables et performants puis de développer une méthode non destructive pour évaluer la durabilité de ces bétons.

Notre étude expérimentale est scindée en deux parties :

Première partie : le travail consiste à comparer les résultats de résistance à la compression à 28 jours d'un béton autoplaçant (BAP) à base de granulats naturels à ceux des BAP à base de granulats de béton recyclés et de granulats de déchets de brique.

Deuxième partie : le travail consiste à déterminer les propriétés de résistance et de durabilité telle que la porosité ouverte de deux catégories de béton fluide (bétons composés de GBR8/16 et bétons composés de GBR4/16), puis de développer une technique à l'ultrason pour estimer la porosité ouverte et la connectivité des pores dans ces bétons.

Pour répondre aux objectifs cités ci-haut on a alors fixé le programme suivant :

- Caractérisation des propriétés physiques et mécaniques des granulats recyclés.
- Étude des propriétés de résistance telles que la résistance à la compression et à la flexion.
- Étude des propriétés de durabilité telles que la porosité ouverte et l'absorption capillaire.
- Estimation de la porosité ouverte par les essais à l'ultrason des bétons à différents états de saturation.
- Étude de l'influence de la taille des GBR sur les différentes propriétés de résistance et de durabilité ainsi que les VOU
- Étude comparative des résultats des propriétés de résistance et de durabilité de tous les bétons.
- Analyse statistique des résultats obtenus.

Après l'introduction générale, ce présent document est composé de trois chapitres, une conclusion générale et des perspectives.

La première action menée dans ce projet de recherche a été de décrire le contexte scientifique et appréciatif de l'étude. Le **premier chapitre** présente par conséquent une synthèse bibliographique composée de deux parties. Dans la première partie nous avons fait un rappel des définitions fondamentales sur les bétons, leurs structures poreuses ainsi que les critères de leurs classifications. Puis nous avons repris les définitions des bétons autoplaçants (BAP), les

particularités de leurs formulations et de leurs caractérisations à l'état frais (essais spécifiques). Ensuite, l'impact de la production du béton sur l'environnement, et le besoin de recours à des ressources nouvelles ont été abordés. La deuxième partie du chapitre est dédiée à la présentation des travaux expérimentaux existants sur l'utilisation des granulats recyclés dans le béton, les diverses propriétés des granulats de béton recyclé ainsi que les propriétés de résistance et de durabilité tel que la porosité du béton à base de ces granulats.

Pour obtenir les résultats qui nous intéressaient, différents essais effectués sur diverses formulations ont dû être mis en place. A cet effet, le **chapitre 2** décrit en détail tous les matériaux utilisés avec leurs propriétés. Les résultats des essais de caractérisation des granulats utilisés dans cette étude sont présentés et discutés. Par la suite, nous avons illustré la méthode de formulation utilisée pour nos bétons ainsi que la composition des BAP et des bétons fluides étudiées au cours de nos travaux pour l'étude de diverses propriétés et méthodologie adoptée. Enfin sont exposés les protocoles expérimentaux qui nous ont permis de mesurer toutes les grandeurs mécaniques (résistance mécanique en compression et en flexion) et de durabilité. Cette dernière a été approchée par des essais de porosité ouverte et d'absorption capillaire. Une technique à ultrason pour estimer la porosité et la connectivité des pores dans ces bétons est présentée.

Les premiers résultats exposés dans cette thèse sont les résultats de caractérisation des BAP à l'état frais et durci. Le **troisième chapitre** débute par la présentation des propriétés des BAP à l'état frais tels que (Étalement, stabilité au tamis et le L_{Box}) et l'état durci tel que la résistance à la compression, puis une étude comparative entre les différents résultats obtenus sur les BAP à GN aux résultats obtenus pour les BAP formulés à plusieurs proportions en granulats recyclés. L'étude expérimentale sur les BAP appréhendées. On s'est intéressé à l'étude des bétons fluides. Sur ces bétons, on a présenté les résultats ainsi que leur analyse pour les propriétés à l'état frais et propriétés de résistance telles que la résistance à la compression et la flexion ainsi que les propriétés de durabilité. Une étude des vitesses des ondes ultrasoniques (VOU) en fonction des porosités de ces bétons est examinée et cela à différents niveaux de saturations. Enfin, une analyse statistique des propriétés de résistance et de durabilité ainsi que les VOU est effectuée.

Les conclusions générales clôturent cette thèse en synthétisant les principaux résultats de l'étude. Des perspectives de recherche sont aussi présentées, dans lesquelles on a proposé des axes qui nous paraissent pertinents à suivre, pour donner suite à notre étude et de concrétiser pleinement l'utilisation efficiente de ces nouveaux matériaux du génie civil.

Chapitre I

Synthèse bibliographique

Partie A : Généralités sur les bétons et l'environnement

Partie B : La problématique des GBR et leur valorisation

Partie A : Généralités sur les bétons et l'environnement

I.1 Introduction

De nos jours, le béton est le produit industriel le plus utilisé dans le monde. Il est fabriqué puis mis en place en phase fluide, il durcit et se consolide dans un deuxième temps, ce qui permet des réalisations techniques extrêmement variées. De plus, il présente des caractéristiques de résistance et de longévité particulièrement importantes.

Le béton varie en fonction de ses composants : nature des granulats, des adjuvants, du ciment, mais aussi en fonction de la mise en œuvre et du traitement de surface. Ainsi, en combinant ces différents produits on peut produire des bétons avec des propriétés très variables : en résistance, isolation thermique, résistance au feu, isolation phonique, durabilité. On peut également se permettre avec le béton des réalisations de formes très complexes, de différentes teintes et textures.

On peut réaliser les bétons avec des granulats de diverses natures soit des granulats d'origine alluvionnaire, des granulats de roches massives ou des granulats de recyclage et artificiels.

I.2 Constituants du béton

Le béton est un matériau hétérogène multiphasique poreux constitué d'un mélange de granulats et d'une pâte, elle-même constituée à partir de ciment, d'eau et éventuellement d'ajouts.

Chaque constituant joue un rôle bien défini. Les granulats constituent le squelette en principe inerte du béton, lui confèrent sa compacité, participent à sa résistance mécanique et atténuent les variations volumiques (retrait) lors du durcissement. La pâte de ciment est le siège des réactions d'hydratation des constituants qui conduisent aux processus de prise et de durcissement et la transforment en matrice liante. Le béton, matériau évolutif, connaît des transformations physico-chimiques et structurales tout au long de sa vie.

I.2.1 La pâte de ciment

La pâte de ciment est le constituant fondamental du béton puisqu'il permet la transformation d'un mélange sans cohésion en un corps solide (Neville 2000 et Regourd 1982). La pâte de ciment est le constituant à l'origine de la cohésion du béton, elle représente 20% à 50% du volume total du béton et se caractérise par sa capacité à s'hydrater avec de l'eau et à former une matrice solide qui lie les granulats entre eux. La pâte de ciment se constitue de ciment anhydre, d'eau et d'éventuels additifs.

Le ciment : le ciment anhydre est obtenu par mélange homogène d'argile et de calcaire, ou d'autres matériaux (des ajouts) contenant de la chaux, de la silice, de l'alumine et de l'oxyde de fer, cuits à haute température (température de clinkérisation, à 1450 °C) puis broyés. Tous les ciments courants contiennent du clinker Portland (mélange de calcaire et de silice cuits) qui assure la fonction liante. Cependant, En fonction des résistances et de la durabilité souhaitées, on peut envisager d'utiliser des ciments à base d'additifs divers (fumée de silice, cendres volantes, laitiers de haut fourneau...).

L'eau : l'eau est indispensable à la fabrication du béton. C'est d'elle que dépendent en grande partie la cohésion et la résistance de ce matériau de construction omniprésent. Associée au ciment, l'eau remplit deux fonctions : d'une part elle sert à l'hydratation du ciment et d'autre part elle permet la fluidification de la pâte.

Les adjuvants : les adjuvants sont des produits chimiques incorporés au béton frais en faibles quantités permettent d'améliorer les propriétés du matériau à l'état frais (ouvrabilité) ou à l'état durci. Les principaux adjuvants sont :

- **Plastifiants et superplastifiants** : Ces produits jouent un double rôle. Ils sont utilisés soit pour fluidifier le béton en maintenant le rapport (Eau / Ciment) constant (rapport prévu pour une résistance donnée), donc fluidifier sans apport additionnel d'eau. Ou bien, réduire le rapport (Eau / Ciment) pour avoir une meilleure résistance tout en ayant la même fluidité du béton (Kantro 1980).
- **Accélérateur / retardateur de prise** : les retardateurs de prise sont utilisés pour ralentir la vitesse de prise du matériau. Ils sont pratiques pour des transports de béton frais sur de longues distances. Les accélérateurs de prise ont un effet inverse de celui des retardateurs. Ils sont utilisés par temps froid ou en usine de préfabrication où il est parfois nécessaire d'accélérer la prise du béton pour procéder à un démoulage plus rapide ;
- **Entraîneurs d'air** : Permettent d'entraîner, à l'intérieur du béton, des microbulles d'air réparties en volume qui serviront d'espace d'expansion dans le béton durci. Ces microbulles permettent d'améliorer la durabilité du béton soumis à l'action du gel et du dégel. Ils améliorent la résistance du béton sous l'action des incendies.

I.2.2 Les granulats

Le granulat est un fragment de roche destiné à la fabrication d'ouvrages de travaux publics, de génie civil et de bâtiment. Sa nature et sa forme dépendent de sa provenance et des techniques de production. Sa taille est comprise entre 0 et 125 mm.

Trois grandes familles de granulats sont définies en fonction de leur origine:

- Les granulats alluvionnaires : leurs gisements sont des matériaux meubles, non consolidés. Ils proviennent de lits ou anciens lits de rivière, les fonds des lacs ou certains fonds marins. L'extraction des granulats alluvionnaires se fait « à sec » ou « dans l'eau », à l'aide de pelles hydrauliques ou de draglines. La technique d'exploitation varie en fonction de la situation du gisement par rapport à la hauteur du cours d'eau ou de la nappe phréatique. Ces granulats peuvent être traités suite à leur extraction. Ils sont concassés si leur granulométrie est trop importante. Cette opération est suivie d'un lavage et d'un calibrage.
- Les granulats de roches massives : les gisements de roches massives (carrières) correspondent à une multitude de situations géologiques. Cette matière première est présente dans différentes situations géologiques: couches plus ou moins massives de roches sédimentaires, massifs de granit, anciennes coulées volcaniques, roches métamorphiques... Leur extraction se fait généralement à l'explosif. Les roches sont ensuite concassées, lavées et criblées
- Les granulats de recyclage et artificiels : des granulats sont produits en concassant et en recyclant des matériaux de chantiers de démolition comme les bétons ou en recyclant des sous-produits de l'industrie tels les laitiers de hauts fourneaux ou les mâchefers. Plusieurs recherches ont été menées de part le monde pour développer et promouvoir la réutilisation de ces déchets dans le secteur approprié. Le déchet à récupérer subit des traitements divers (concassage, tri, calibrage, nettoyage...) pour le rendre apte à l'utilisation.

I.2.3 Les additions minérales

Il existe deux catégories de fines minérales :

- Les fines actives à caractère pouzzolanique : ce sont des particules de faibles diamètres qui sont ajoutées en quantités de l'ordre de 10 % du poids de ciment, améliorent notablement les performances de résistances et de durabilité du béton grâce à leurs propriétés pouzzolanique (cendres volantes, fumée de silice, laitier...) (Neville 2000).
- Les fines inertes comme les fillers calcaire : l'objectif dans leur utilisation est double ; soit d'améliorer la compacité des bétons et donc leur résistance ; soit d'améliorer la consistance des bétons notamment dans le cas des bétons autoplaçants et fluides qui nécessitent une forte teneur en fines pour assurer au BAP un compromis entre une bonne fluidité apportée par les fluidifiants et une bonne viscosité que l'on essaye d'avoir par l'introduction des fillers.

I.3 Description de la microstructure

Une fois durci, le béton peut être vu comme un solide hétérogène composé des phases suivantes.

I.3.1 La pâte de ciment durcie

La microstructure de la pâte de ciment durcie est constituée d'un solide poreux et de phases liquides et gazeuses présentes dans les pores. Elle est constituée de différents composés chimiques, tels que les différents C-S-H et la Portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$ et de pores à différentes échelles, connectés ou non, contenant de l'eau et de l'air. Pour un béton donné, les quantités de C-S-H et de Portlandite formées dépendent essentiellement du rapport eau/ciment (E/C) et du temps de réaction. Usuellement, une pâte de ciment durcie ordinaire contient 50% à 70% du volume de C-S-H et 25% à 27% du volume de Portlandite.

I.3.2 Les granulats

Les granulats constituent une phase généralement inerte au sens où ils ne participent pas à la réaction d'hydratation du ciment. Néanmoins, certaines interactions chimiques avec la pâte de ciment peuvent être préjudiciables au béton comme la réaction alcali-granulat. Les granulats participent grandement à la résistance mécanique du béton et leur fraction volumique est de 50% à 80% du volume total du béton. Ils sont caractérisés par leurs courbes granulométriques.

I.3.3 Interface pâte - granulat

Dans un béton, la liaison qui s'établit au cours de l'hydratation entre la matrice cimentaire et les granulats qu'elle enrobe, se traduit par une zone de pâte hydratée particulière appelée « auréole de transition ». Cette interface présente une porosité plus importante que le reste de la matrice; les pores, plus grossiers dans cette zone, deviennent un réseau de cheminement privilégié pour les transferts. Salih (1987) a montré que la perméabilité de l'interface est plus grande que celle de la matrice. Les pores, plus grossiers dans cette zone, forment une faiblesse structurelle. L'épaisseur de cette zone augmente avec le diamètre du granulat et avec la quantité d'eau d'hydratation (c'est-à-dire avec le rapport E/C). La nature et la porosité des granulats peuvent aussi influencer l'auréole de transition. L'interface pâte/granulat possède un rôle majeur dans le comportement du béton.

I.3.4 Les pores

Le béton est un matériau poreux, sa porosité influence fortement les propriétés mécaniques et de durabilités du matériau. Les pores se caractérisent par leur taille, leur connectivité et leur volume et peuvent être classés en différentes catégories :

Les pores d'air occlus: proviennent essentiellement de l'air piégé lors du malaxage du béton. Différentes techniques (damage, vibrations des coffrages, aiguilles vibrantes...) sont appliquées lors de la mise en œuvre pour optimiser la compacité (serrage) et donc minimiser la quantité de bulles d'air. Cette catégorie de pores constitue 2% à 3% du volume total d'un béton ordinaire et a une taille caractéristique millimétrique. Selon la plasticité du béton frais, certaines bulles d'air peuvent cependant atteindre la dimension des plus gros granulats. Un béton possédant une importante quantité d'air occlus aura également une meilleure durabilité face aux cycles de gel-dégel. Les pores présents dans les granulats et qui sont isolés du milieu extérieur font aussi partie de cette catégorie de pores mais sont généralement négligeables ;

Les pores capillaires: correspondent aux espaces entre grains de ciment non remplis d'hydrates. Leurs tailles sont inversement proportionnelles à la durée d'hydratation et augmentent proportionnellement avec le rapport E/C. Ils forment un réseau interconnecté d'épaisseur micrométrique rempli plus ou moins d'eau et sont les principaux responsables de la perméabilité du béton non armé (Chanvillar 1999). Ils jouent également un rôle clé dans le processus de rupture du béton ;

Les pores de gel : correspondent aux pores présents dans le gel C-S-H. Leur taille caractéristique est inférieure à quelques dizaine de nanomètres et leur volume est négligeable devant le volume des autres pores. Ils sont par ailleurs isolés et ne semblent pas influencer la résistance du béton. Même à une humidité ambiante très basse, l'eau demeure dans les pores de gel ;

La microfissuration du béton : provient de divers phénomènes. En plus des microfissures causées par la contraction on peut rajouter celles provoquées par les réactions chimiques non souhaitées ou encore par le processus de séchage du béton. Le développement de ces microfissures est généralement à l'origine de la rupture du béton même dans le cas des grosses structures.

La porosité du béton est une caractéristique intrinsèque de son réseau poreux. Elle est définie par le rapport entre le volume des pores V_p et le volume total du matériau V_t et est notées \emptyset tel que :

$$\Phi = \frac{V_p}{V_t} = \frac{V_p}{V_p + V_s} \quad (\text{I.1})$$

Où V_s est le volume des grains solide.

La porosité dépend de plusieurs facteurs : le rapport E/C, la compacité du béton frais, le volume pâte/granulats et la porosité des granulats.

I.4 Durabilité des bétons

Traditionnellement l'aptitude d'un béton à résister à la dégradation était appréciée par sa résistance à la compression. En effet, la résistance est une propriété étroitement liée à la structure poreuse donc à la perméabilité et la diffusivité et par conséquent à la durabilité. La durabilité du béton s'explique en grande partie, par la difficulté qu'ont les agents agressifs à pénétrer dans les réseaux poreux des bétons.

Un béton est d'autant plus durable qu'il résiste à la pénétration des agents agressifs. Cette qualité peut être caractérisée au moyen de deux grandeurs physiques : la perméabilité et la diffusivité. La première est relative au déplacement d'un fluide sous l'effet d'une pression motrice, elle dépend de la taille des espaces poreux dans lesquels s'écoule le fluide ainsi que leur interconnexion. La seconde est relative au déplacement d'une espèce chimique à l'échelle moléculaire sous l'effet d'un gradient de concentration.

I.4.1 Dégradation des bétons

La mauvaise durabilité de matériaux cimentaires se manifeste par une dégradation résultante d'une action simultanée des phénomènes internes au matériau (réaction physico-chimique) et des facteurs externes (conditions d'exposition). Ces phénomènes peuvent être subdivisés en plusieurs catégories (Neville 2000, Haddad 2002) :

- Les effets physiques, actions de la température, cycle de gel dégel, incendie.
- Actions mécaniques dues aux sollicitations dynamiques, à l'abrasion et à la fatigue.
- Les effets chimiques qui sont très nombreux, les environnements agressifs peuvent être liquides (eau de mer, pluies), solides (sols gypseux), gazeux (gaz carbonique).
- Effets biologiques dus principalement à la présence de bactéries (conduites d'égouts).

I.4.2 Principaux processus de dégradation chimique

Il est à noter que la structure interne du ciment est un milieu très alcalin possédant un pH voisin de 13. Par conséquent, tous les environnements lui sont agressifs. Sa structure poreuse le rend plus vulnérable devant la présence de liquide et de gaz qui le traverse ; les processus de perméation le régissant sont la perméabilité et la diffusion.

I.4.2.1 La lixiviation ou l'hydrolyse (dissolution) des hydrates

Lorsque l'eau entre en contact avec la pâte de ciment, elle tend à dissoudre certains produits qui sont à base de calcium. La chaux formée par l'hydratation est la plus vulnérable vis-à-vis des processus de dissolution (Baron et ollivier 1992). Le processus de dissolution a pour effet d'accroître la porosité, et par conséquent, la résistance mécanique de la pâte de ciment chute.

I.4.2.2 Les échanges ioniques entre les hydrates et le milieu agressif

Les eaux agressives sont en grande partie des milieux acides par rapport à la solution interstitielle. Ce qui favorise leurs réactions avec la pâte de ciment pour former de nouveaux produits qui peuvent être solubles et se diffuser par la suite vers l'extérieur. Ou bien elles peuvent se précipiter et remplir les pores, ne participant à aucune fonction de liaison ou de résistance.

I.4.2.3 Formation de produits expansifs

La formation de produits expansifs est fonction des matériaux utilisés ou du type d'exposition produite, on citera par exemple (Neville 2000) :

- L'attaque par les sulfates produit des gels expansifs. C'est le cas des sulfates de sodium qui réagissent avec la portlandite pour former du gypse à volume plus important que les produits d'origine.
- Réactions alcali-silice qui produit du gel de silice fortement expansif. Les alcalins contenus dans la solution interstitielle réagissent avec la silice contenue dans les grains produisant des produits silico-alcalin qui sont expansifs en présence d'eau.
- Corrosion des armatures forme du dioxyde de fer fortement expansif au voisinage des barres et provoque l'éclatement du béton.

Ces produits expansifs créent de très grandes pressions internes qui provoquent la fissuration de la matrice de ciment.

I.4.3 Cinétique de dégradation des matériaux

La cinétique de dégradation de la pâte de ciment est régie par la vitesse de transfert par diffusion ou par perméabilité des substances chimiques. Ces dernières sont en fonction des dimensions des pores ainsi que de leur connectivité. L'étude de la porosité et du transfert de matière paraît indispensable pour pouvoir déterminer ou prévoir la position du front de dégradation à n'importe quel âge du matériau.

La durabilité des matériaux est en fonction de son aptitude à être traversé par des liquides, des gaz. On distingue 3 modes de transfert dans un matériau cimentaire :

Transport de liquide par perméation : le processus de perméation est dû à un gradient de pression entre deux milieux. Le mouvement du liquide se fait de la zone à grande pression vers la zone à pression moins élevée. Ce mode de transport est négligeable pour le cas des matériaux cimentaires à cause de leur faible propriété de perméation.

Transport par migration: traduit le mouvement des ions sous l'application d'un champ électrique. L'orientation des particules dépend directement de la valence (loi de Nerst).

Transfert par diffusion : c'est le processus le plus rencontré dans le transport de matières à travers les matériaux. Lorsque le béton est mis au contact avec une solution agressive le phénomène de diffusion se déclenche. Le mouvement est dû au gradient de concentration entre l'intérieur et l'extérieur. La diffusion est suivie de réactions chimiques entre les hydrates et la solution interstitielle.

Le transport des ions agressifs se fait par diffusion en solution aqueuse ou en phase gazeuse, la pénétration des gaz s'effectue dans l'air contenu dans la porosité du matériau (pénétration du gaz carbonique CO_2). La variation de concentration dans l'eau interstitielle de la pâte de ciment, provoquée par la diffusion engendre des sur/sous saturations par rapport à différentes phases solides, ce qui rompt l'équilibre thermodynamique et provoque des phénomènes de dissolution ou de précipitation.

La cinétique de dégradation est la résultante des deux cinétiques de diffusion et de dissolution ou précipitation, la cinétique des réactions chimiques est très grande devant celle de la diffusion. Raison pour laquelle les phénomènes de dégradation sont gouvernés principalement par le processus de diffusion et par conséquent par la valeur de la concentration en ions dans la solution agressive.

Si l'on observe le réseau poreux vis-à-vis de la perméation et du transport de matière, l'ensemble des pores peut être classé en trois groupes:

- Pores interconnectés ou pores communicants (forment la porosité dite ouverte): ils forment un espace connecté dans le milieu poreux et participent au transport de matière à travers le matériau.
- Les pores aveugles ou bras morts : ils sont interconnectés d'un seul côté et peuvent être accessibles à un fluide extérieur mais ils ne participent pas au transport de matière.
- Pores non interconnectés ou isolés (forment la porosité fermée), sans liaison avec le milieu extérieur,

Dans le cas du béton, on néglige la proportion volumique de pores isolés, la porosité accessible est considérée comme égale à la porosité totale Φ .

I.4.4 Principales attaques chimiques

I.4.4.1 Attaque par la carbonatation

En présence d'humidité, le gaz carbonique contenu dans l'air, au contact du ciment, forme de nouveaux produits (CaCO_3). La carbonatation provoque le changement de la composition chimique de la microstructure des hydrates, par conséquent les propriétés liantes et mécaniques du matériau sont modifiées. L'action du CO_2 sur le matériau se manifeste même à très faibles concentrations (environ 0.03 en volume d'air) (Neville 2000). Les parois des tunnels destinés à la circulation routière sont un très bon exemple de structure en béton les plus exposés à une concentration très élevée en CO_2 . La carbonatation est influencée par plusieurs facteurs parmi d'autres :

La porosité notamment, la tortuosité a une grande influence sur la diffusion qui est le processus qui contrôle le phénomène de carbonatation (Baron et ollivier 1992).

Le degré d'humidité des pores. Si les pores sont saturés, la vitesse de diffusion du gaz carbonique est très lente alors que si les pores sont secs le CO_2 demeure sous forme gazeuse et ne peut attaquer les hydrates. La vitesse de carbonatation la plus élevée se produit lorsque l'humidité relative est comprise entre 50% et 75% (Neville 2000).

La variation de la température (entre 20°, 30° jusqu'à 50°) accélèrent un peu la carbonatation mais, au-delà de 60°, 70° le phénomène d'évaporation d'eau des pores se déclenche, ainsi le gaz carbonique ne trouve plus d'eau pour réagir et le phénomène la carbonatation va en baissant.

La concentration en gaz carbonique dans l'air : Plus la concentration en gaz carbonique extérieur est grande, plus la différence de concentration entre l'intérieur et l'extérieur est importante et plus la cinétique de diffusion devient grande donc la carbonatation devient importante.

I.4.4.2 Attaque par les sulfates

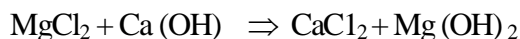
La présence des sulfates de calcium, de sodium, magnésium et d'ammonium dans l'environnement de la pâte de ciment représente un risque de dégradation majeur qu'on ne peut négliger. Lorsqu'ils sont mis en solution, les sulfates réagissent avec les hydrates de la pâte de ciment durcie mais également avec les produits anhydres, (aluminat tricalcique C_3A restant dans la pâte durcie). Ces réactions produisent de nouveaux composants expansifs «ettringite ». Ces produits, créent des tensions internes considérables qui, à une certaine limite, provoquent la fissuration de la pâte durcie et donc la diminution de ces caractéristiques mécanique (Baron et Ollivier 1992, Neville 2000). Les sulfates peuvent être d'origine naturelle, contenus dans les sols ou issus des déchets industriels, mais ils peuvent également parvenir d'une succession de processus de transformations chimiques et biologiques. C'est le cas de l'acide sulfurique produit par les bactéries présentes dans les canalisations des eaux usées (Dreux et Festa 1998, Baron et Ollivier 1996).

La pénétration des sulfates est régie par le processus de diffusion, leur agressivité est en relation directe avec la porosité de la pâte de ciment et donc le rapport E/C, mais également, avec le type de ciment utilisé, notamment la teneur en C_3A incorporé dans le mélange anhydre car, les sulfates réagissent avec les C_3A .

I.4.4.3 Attaque par les chlorures

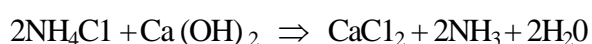
Autres que la corrosion des aciers, les chlorures quand ils sont à forte concentration (eau de mers et sel de déverglaçage) provoquent l'altération des hydrates. Une partie des chlorures est fixée par les silicates de calcium hydratés, une autre par l'hydroxyde de calcium formant des composés expansifs comme l'oxychlorure de calcium $CaCl_2 \cdot Ca(OH)_2 \cdot H_2O$, le monochloroaluminat $C_3A \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$ et la chloroettringite $CaCl_2 \cdot 3CaSO_4 \cdot 31H_2O$. (Baron 1992, Neville 2000)

Les chlorures de magnésium réagissent également avec la portlandite.



Le $Mg(OH)_2$ formé, appelé brucite, précipite dans les pores à la surface du béton en constituant une couche de surface protectrice qui empêche la réaction de se poursuivre.

Le chlorure d'ammonium réagit avec l'hydroxyde de calcium pour former du chlorure de calcium et de l'ammoniaque qui sont très solubles dans l'eau.



I.4.4.4 Attaque par les eaux (lixiviation)

L'eau représente un vecteur commun de toutes les attaques. Sa présence déclenche et/ou accélère leurs mécanismes d'action. L'eau pure peut nuire à la pâte de ciment, du fait qu'au contact de la solution interstitielle caractérisée par une basicité (pH compris entre 12,5 et 13,5), l'eau crée un déséquilibre thermodynamique entre la solution interstitielle et les hydrates, ce qui engendre le changement de phase des hydrates. La lixiviation est influencée par deux catégories de facteurs :

- ceux liés à la solution agressive : son pH qui traduit le caractère de basicité ou d'acidité de la solution; sa dureté : soit la somme des concentrations en cations métalliques présent dans l'eau, sa teneur en dioxyde de carbone agressif, en sulfate, etc.
- ceux liés à la pâte de ciment : le type de ciment utilisé, le rapport E/C et donc la porosité.

Les eaux de mer : l'attaque chimique résulte des réactions simultanées entre les sulfates et les chlorures contenues dans l'eau et des constituants du ciment (Baron et Ollivier 1992, Neville 2000).

Les eaux de pluies : les pluies propres ont généralement un pH compris entre 5 et 7. Les pluies provoquent une dégradation superficielle suivant des processus plus ou moins complexes mettant en jeu des phénomènes de dissolution dus aux acides (sulfurique, nitrique, carbonique) et d'expansion dus à la cristallisation des sels (Neville 2000).

Attaque par les eaux usées : l'activité bactérienne conduit au dégagement d'hydrogène sulfuré par la transformation de produits soufrés. Cet hydrogène sulfuré se combine avec l'humidité atmosphérique puis se condense sous forme d'acide sulfurique sur les parois du béton et réagit avec les hydrates. Cette réaction provoque la dégradation du béton. On peut aussi retrouver des eaux riches en minéraux provenant des zones industrielles. Selon le type de minéraux qu'elles véhiculent, elles attaquent les bétons avec lesquels elles sont en contact (Baron et Ollivier 1992, Neville 2000).

I.4.4.5 Réaction alcali-granulats

Le béton peut subir des désordres dus aux réactions chimiques produites entre la solution interstitielle, fortement basique et alcaline, avec certaines phases minéralogiques présentes dans les granulats. La réaction alcali-granulats produit des produits expansifs, ce qui conduit à la fissuration et à la baisse des performances mécaniques de la matrice de ciment. Selon la pétrographie des granulats, on distingue deux types de réaction pouvant se produire (Baron et Ollivier 1992) :

- Réaction alcali-silice : réaction entre les phases siliceuses réactives des granulats, l'opale amorphe, la calcédoine, la tridymite et la pâte de ciment
- Réaction alcali-carbonate : qui a lieu entre quelques calcaires dolomitiques et les alcalins du ciment Cette réaction conduit à la décomposition des cristaux de dolomite disséminés dans la fine matrice microcristalline des granulats calcaires.

Pour que la réaction alcali granulat se développe dans un béton, plusieurs conditions doivent être réunies présence de granulats réactifs, une concentration en alcalins élevée dans la solution interstitielle et surtout des conditions d'humidité très élevée, soit plus de 85%. A cela s'ajoute le type de ciment et le rapport E/C qui conditionnent la porosité et donc le transfert d'ions dans le matériau.

I.5 Critères de classification des bétons

Les ouvrages que l'on construit aujourd'hui en béton armé ont des propriétés très disparates tant par leur destination que par leurs dimensions, leur durée de vie ..., toute étude de composition de béton doit en tenir compte. Il convient donc d'en définir avec une grande clarté le cahier des charges qui contient les critères de la composition du béton souhaité en fonction de l'usage envisagé de l'ouvrage prévu. Quatre critères se distinguent et doivent être retenus (Dreux et Festa. 1998).

- La dimension maximale des granulats d'un béton D: correspond à la dimension maximale du plus gros granulat considéré séparément, choisi de manière à assurer le bétonnage correct des éléments en béton armé et précontraint.
- La résistance mécanique du béton: dépend principalement de la nature du ciment, rapport eau/ciment et le rapport granulat/sable. Pour l'étude de tout projet de construction il est impératif de prévoir au préalable la résistance du béton avec lequel sera construit l'ouvrage. Cette valeur est fonction de nature de l'ouvrage et des sollicitations auxquels il sera sujet (ouvrage d'art, bâtiment industriel, habitation, stockage, en région sismique, neigeuse...).
- Agressivité du milieu ambiant (durabilité): La présence de risques environnementaux agressifs (eaux agressives, fortes teneur en gaz carbonique, milieux acides, présence de chlorures, ...) et les conditions d'exploitation spécifiques (revêtement de fours ou incendies, conditions météorologiques extrêmes : gels sévères) sont des considérations qui conditionnent la durée de vie de l'ouvrage, et donc la composition du béton. En vue de l'objectif de durabilité, le choix de la classe de résistance du béton est en fonction de l'agressivité du milieu, elle est d'autant plus élevée que le milieu est plus agressif. Cela signifie que l'exigence de durabilité peut parfois déterminer la résistance à prendre.

- La consistance (ouvrabilité) : l'ouvrabilité d'un béton correspond à son aptitude à se mettre en place, compte tenu de son utilisation dans un ouvrage donné et en fonction des moyens de mise en œuvre et des ces propres caractéristiques. La consistance est souvent mesurée par le cône d'Abrams (affaissement ou étalement), mais elle peut également être mesurée à l'aide du maniabilimètre, à la table à secousse, plasticimètre... L'ouvrabilité est, pour le béton, une qualité fondamentale qui doit être très sérieusement prise en compte dans l'étude de composition et de mise en œuvre. Les bétons sont classés comme suit :

Tableau I.1: Appréciation de la consistance en fonction de l'affaissement au cône.

Consistance du béton	Affaissement (cm)	Serrage nécessaire
Très ferme	2	Vibration puissante
Ferme	3 à 5	Bonne vibration
Plastique	6 à 9	Vibration normale
Très plastique	10 à 15	Simple piquage
Fluide	≥ 16	Léger piquage

Lorsque l'affaissement est total, on parlera alors d'un béton autoplaçant. Dans ce cas, on mesure le diamètre moyen (étalement) de la galette de béton formée. Les bétons autoplaçants ont généralement un étalement compris entre 55 et 85 cm.

I.6 Les bétons autoplaçants

Un béton autoplaçant (BAP) est un béton qui se met en place sans vibration, par simple versement. Les BAP constituent une alternative intéressante pour les bétons vibrés ; leurs caractéristiques font que leur utilisation est très variée et parfois plus avantageuse que celles des bétons vibrés. En effet, par leur composition (forte teneur en fines, volume de gravillons réduit...) ils assurent des qualités de parement meilleures que dans le cas des bétons vibrés, ils offrent une meilleure mise en place dans les coffrages à géométries complexes et à fort confinement, la suppression de la vibration du béton permet une réduction des nuisances sonores sur chantier et la réduction de l'effectif en personnel (AFGC 2000, Teg 2005, Haddad 2007).

En 2005, un premier guide européen intitulé « The European guideline for self compacting concrete : specification, production and use » sur les BAP est publié (Teg 2005). Dans ce guide sont décrites les spécifications des BAP mais surtout les méthodes et essais de leur caractérisation à l'état frais ou bien lors de leur mise en place.

À l'état durci, les BAP sont régis par les mêmes réglementations que les bétons vibrés.

I.6.1 Propriétés recherchées dans les BAP

Les principales propriétés auxquelles devront répondre les BAP, à l'état frais, peuvent être subdivisées en trois catégories (Skarendahl et Petersson 1999, Teg 2005) :

I.6.1.1 Déformabilité libre

La déformabilité libre est définie comme étant l'aptitude qu'a un BAP à se mettre en place sans apport de vibration. Un BAP doit avoir une bonne capacité de remplissage et réduire au maximum la formation des vides aux coins des coffrages.

L'essai le plus utilisé pour caractériser la déformabilité libre d'un BAP est **l'essai au cône d'Abrams**.

L'ouvrabilité d'un béton est souvent imposée par un cahier des charges dans le but d'assurer une bonne mise en place. Dans le cas des BAP, c'est l'étalement qui est utilisé comme indicateur d'ouvrabilité (Figure I.1). L'étalement est la moyenne d'au moins deux mesures de diamètres de la galette du béton qui se forme après le soulèvement du cône d'Abrams (diamètre maximal et diamètre perpendiculaire, souvent exprimé en mm) et à un temps suffisamment long pour que le béton arrête de s'étaler (étalement final).

Pour les BAP, les recommandations préconisent un étalement dans une plage de 550 à 850 mm. Le guide Européen sur les BAP définit les différentes classes de BAP comme suit (Teg 2005) :

Classe SF1 : étalement compris entre 550 et 650 mm ;

Classe SF2 : étalement compris entre 660 et 750 mm ;

Classe SF3 : étalement compris entre 760 et 850 mm.



Figure I. 1: Test d'étalement d'un BAP.

Une appréciation visuelle de la galette permet d'avoir des indications sur l'état de ségrégation du béton. En effet, la formation d'un nid de cailloux au centre de la galette ou d'un halo de pâte à la

périphérie de la galette de béton, lors de l'essai, sont des signes de ségrégation du béton.

I.6.1.2 Déformabilité restreinte

La déformabilité restreinte se traduit par la capacité qu'a un BAP à traverser, sans blocage, ni formation de voûtes au voisinage des armatures. Cette propriété est aussi appelée résistance à la ségrégation dynamique. Lors de l'écoulement d'un BAP, les risques de séparation de la phase granulaire de la pâte sont très élevés, notamment en présence d'armatures. Au coulage du béton, la trajectoire des granulats se trouve modifiée, les granulats ont tendance à converger vers les mêmes endroits en formant des voûtes au voisinage des armatures (Figure I.2) bloquant alors l'écoulement du béton.

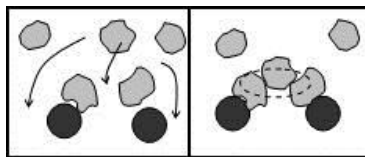


Figure I. 2: Schématisation de la formation de voûtes au droit des armatures.

Parmi les essais développés pour caractériser la déformabilité restreinte des BAP, il y a la **boîte en L**. C'est un essai d'écoulement qui permet de caractériser la capacité de remplissage d'un béton, sans blocage, sous son propre poids. Cet essai simule les conditions réelles d'écoulement du béton dans des coffrages ferrailés, et permet d'apprécier le béton par l'intermédiaire d'une valeur mesurable.

La boîte en forme de L est composée de deux compartiments séparés par une trappe, empêchant le passage du béton avant essai, et d'armatures intercalées devant la trappe (Figure I.3). Le guide européen sur les BAP recommande de choisir le nombre de barreaux à placer devant la trappe en fonction de la structure à réaliser : trois barreaux de fer rugueuses à espacement de 41 ± 1 mm pour la caractérisation des BAP d'ouvrages très ferrailés ; deux barreaux de fer à espacement de 59 ± 1 mm pour le restant des ouvrages.

Le mode opératoire de l'essai peut être décrit comme suit : un échantillon d'environ 13 litres de béton frais est versé dans le compartiment amont de l'appareil. Après arasement l'échantillon est laissé au repos pendant 1 minute. La trappe est ensuite tirée afin de laisser le béton s'écouler à travers les armatures. A la fin de l'essai, on mesure le **dénivelé** entre la partie verticale et l'extrémité aval de la partie horizontale [H_2 / H_1] (voir Figure I. 3).

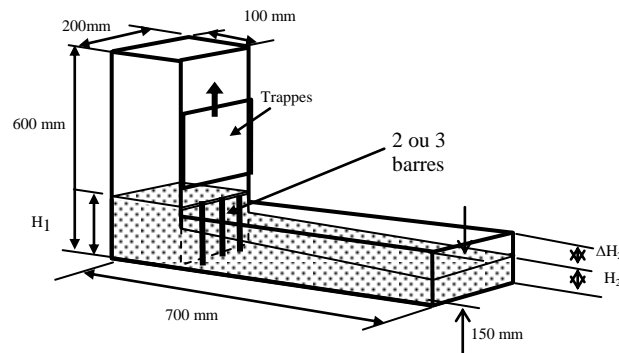


Figure I. 3: Boîte en L.

Les BAP sont classés en deux catégories selon que l'on utilise 2 ou 3 barreaux de fer :

Classe PA1 \geq 80 % avec deux barreaux

Classe PA2 \geq 80 % avec trois barreaux.

Une dénivelée inférieure à 80 % indique un risque de blocage du BAP et une séparation de phases : amoncellement des granulats au droit des armatures et écoulement de la pâte de travers.

I.6.1.3 Résistance à la ségrégation statique

La résistance à la ségrégation statique se traduit par la capacité qu'a un BAP à maintenir ses particules en suspension, sans risque de tassement des particules par gravité, ni ressuage.

Un BAP doit maintenir sa fluidité pendant la durée nécessaire pour son acheminement et sa mise en place. Or, pendant ce temps, en vertu de la loi de la gravité, les matières solides ont tendance à s'enfoncer, tandis qu'une partie de l'eau de gâchage et des fines remontent en surface du béton frais (ressuage), créant ainsi une ségrégation des phases entre la partie supérieure et la partie inférieure du béton.

Pour caractériser la ségrégation statique d'un BAP on utilise l'essai de **stabilité au tamis**. L'essai consiste à garder un échantillon de 10 litres de béton frais au repos pendant une durée de 15 minutes. Après ce temps, un sous-échantillon de quantité de (4.8 ± 0.2) kg de cet échantillon est versé sur un tamis de 5 mm d'ouverture. Après deux minutes d'attente, la laitance qui traverse le tamis est alors pesée (voir Figure I.4).

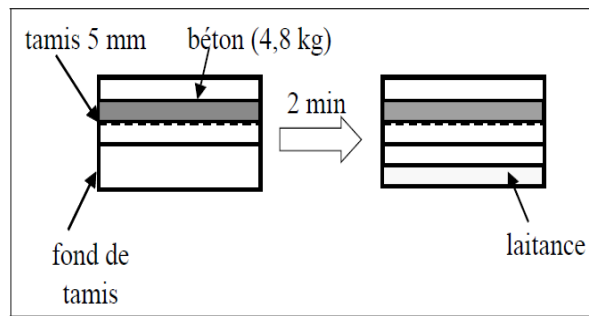


Figure I. 4: Essai de stabilité au tamis.

Le pourcentage de laitance par rapport au sous-échantillon est désigné comme l'Indice de Stabilité, et est calculé par la relation suivante :

$$IS = \frac{\text{Poids Laitance}}{\text{Poids sous Echantillon}} \times 100 \quad (I.2)$$

La classification de la stabilité des BAP est donnée comme suit :

$$SR1 : IS \leq 20 \%,$$

$$SR2 : IS \leq 15 \%.$$

En dessous de 15 % la stabilité est satisfaisante. Toutefois, une stabilité inférieure à 5 % nécessite une attention particulière. Dans ce cas, la pâte ou le mortier est très visqueux pour s'infiltrer dans tous les vides granulaires et assurer une bonne qualité de parement. Au-delà de 20 % les BAP ont une mauvaise stabilité, ils sont inutilisables.

I.6.1.4 Autres propriétés

Nous venons de voir les propriétés qui qualifient un béton d'autoplaçant. Toutefois, le BAP comme les autres bétons doit répondre aux exigences habituellement recommandées dans les cahiers des charges comme la robustesse, maintien d'ouvrabilité dans le temps, pompabilité, résistance et durabilité.

I.6.2 Corrélation entre la composition et les propriétés d'un BAP frais

Pour illustrer l'effet des éléments de composition sur les propriétés d'un BAP frais nous distinguons trois éléments principaux : la phase granulaire, la phase visqueuse et les adjuvants.

I.6.2.1 Phase granulaire

Les granulats influencent les propriétés des BAP de plusieurs manières : par leur volume par

rapport au volume total du béton ; par leur diamètre maximal ; par leur distribution granulaire.

Selon Okamura et Ouchi (2003) le volume de gravillons (diamètre compris entre 5 et 20 mm) à introduire dans un BAP ne devrait pas excéder les 50 % du volume solide du béton, et le volume du sable (diamètre inférieur à 5 mm) doit être inférieur à 40 % du volume du mortier de ce béton. Lorsque le volume des gravillons excède 50 % du volume solide l'énergie initialement nécessaire pour l'écoulement du béton est consommée par les contraintes de cohésion intergranulaires favorisant ainsi la formation de voûtes (Figure I. 3). Ce facteur conduit à prendre pour les BAP un rapport gravillon/sable (G/S) de l'ordre de 1.

Le diamètre maximal des granulats doit être choisi de sorte à éviter tous les risques de blocage de l'écoulement du béton. Plus ce diamètre est grand plus les risques de blocage en zones confinées sont importants. De même, plus le diamètre maximal est grand, plus les risques de pénétration dans la pâte, par l'effet de la gravité, sont importants.

D'après le guide européen sur les BAP, il est conseillé de limiter le diamètre maximal à des valeurs comprises entre 10 et 20 mm. De la même manière, il est conseillé de privilégier les granulats roulés par rapport aux granulats concassés, car les roulés par leur forme favorisent l'écoulement du béton (Teg 2005).

Les composants de base d'une formulation de BAP sont identiques à ceux d'une formulation de béton vibré mais leurs proportions sont différentes. Afin d'obtenir les propriétés requises à l'état frais d'un BAP, une importante quantité de fines et l'incorporation d'adjuvants (notamment les superplastifiants) sont nécessaires.

I.6.2.2 Phase visqueuse

La phase visqueuse (pâte) regroupe l'eau, le ciment, les additions et les fines granulaires. Dans un BAP, la pâte doit être suffisamment fluide pour ne pas empêcher l'écoulement des granulats et suffisamment dense pour empêcher toute forme de ségrégation. De plus le volume de pâte à introduire dans le béton doit être égal au volume de la porosité du squelette augmenté d'un volume minimum de lubrification (Yen et al. 1999).

Yen et al. (1999) ont permis de mettre en évidence une corrélation linéaire entre le volume de pâte du béton et sa fluidité (Figure I.5). Plus le volume de la pâte est grand, plus le béton est fluide.

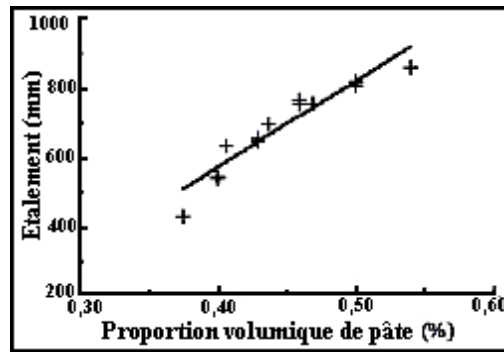


Figure I. 5: Etalement en fonction du volume de pâte dans un BAP (Yen et al. 1999).

La pâte joue aussi un rôle par sa viscosité, le volume de pâte à introduire dans un BAP est calculé de sorte à réduire les frottements inter-granulaires et à conférer au béton la fluidité souhaitée (Haddad 2007).

I.6.2.3 Les superplastifiants

La fluidité des BAP est obtenue en ajoutant des superplastifiants. Ces fluidifiants sont identiques à ceux employés pour les autres types de béton. Cette adjuvantation ne doit pas être trop élevée (proche du dosage de saturation) sous peine d'augmenter la sensibilité du béton à des variations de teneur en eau vis-à-vis du problème de la ségrégation et du ressuage.

Les superplastifiants interagissent avec les particules du ciment et des fines en s'adsorbant à leur surface pour diminuer le phénomène de floculation au contact de l'eau. Ainsi, les particules sont dispersées par combinaison d'effets électrostatiques et stériques et la proportion d'eau libre est plus importante (Baron et Ollivier 1996).

I.6.2.4 Les agents de viscosité

L'ajout d'un superplastifiant ayant pour effet d'augmenter l'ouvrabilité du béton mais également de réduire sa viscosité, afin de minimiser ce dernier point, les BAP contiennent souvent un agent de viscosité. Ce sont généralement des dérivés cellulosiques, des polysaccharides, des colloïdes naturels ou des suspensions de particules siliceuses, qui interagissent avec l'eau et augmentent la viscosité de celle-ci. Ils ont pour but d'empêcher le ressuage et les risques de ségrégation en rendant la pâte plus épaisse et en conservant une répartition homogène des différents constituants.

I.6.3 Formulation des BAP

En majorité, les méthodes de formulation des BAP se spécifient par la formulation du squelette granulaire du BAP. La formulation en terme de résistance et de durabilité reste inchangée en comparaison aux méthodes classiques de formulation des bétons vibrés.

Les BAP doivent satisfaire deux propriétés qui sont contradictoires : une bonne fluidité et une bonne viscosité. La démarche généralement adoptée pour la formulation des BAP est telle que décrite sur la Figure I. 6 (Haddad 2007). Ainsi, les méthodes de formulation des BAP nécessitent un programme expérimental assez conséquent pour fixer la **nature** et les **proportions** des composants de la pâte qui assurera une viscosité nécessaire pour éviter les problèmes de ségrégation d'une part et une bonne fluidité d'autre part.

Plusieurs méthodes pratiques de formulation des BAP existent, ces dernières procurent des formules théoriques dont les propriétés doivent être vérifiées et validées en laboratoire.

La méthode développée par Okamura et Ouchi (2003) préconise l'optimisation *au plus* du volume de pâte au détriment du volume des granulats, volume de gravillons inférieur à 50 % au volume solide du béton. La méthode conduit à des volumes de pâte très élevés, des quantités de liant significatives et donc à des bétons très onéreux.

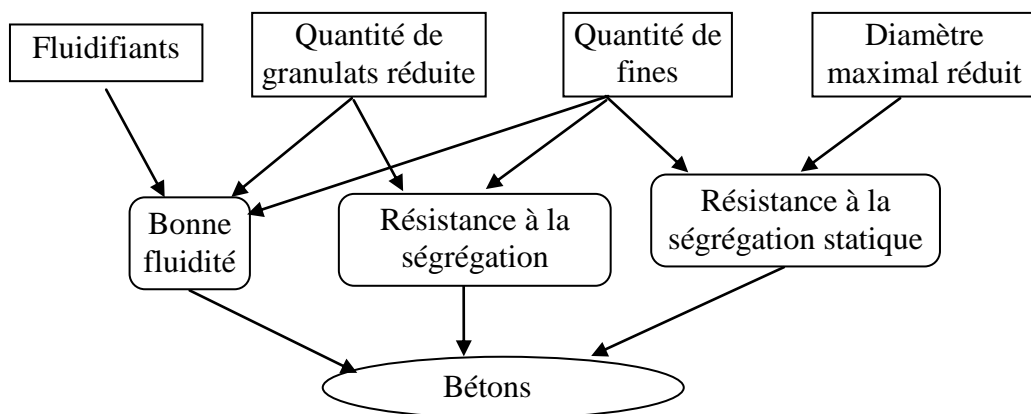


Figure I. 6: Principe général de formulation d'un béton autoplaçant (Haddad 2007).

La méthode proposée par Nan et al. (2012), préconise l'optimisation *au moins* du volume de pâte. Ils considèrent un volume de pâte égal à la porosité du squelette granulaire du béton augmenté d'une valeur qui conduirait à une bonne lubrification. Ce volume est a priori de l'ordre de 42 à 48 % du volume total de l'échantillon. Ce volume est par la suite corrigé par un coefficient dû à la lubrification des granulats.

De nos jours, certains laboratoires ont établi des fuseaux qui leur permettent de faciliter la recherche du squelette granulaire. Ainsi en fonction des granulats à utiliser il suffit alors de chercher les proportions qui vont permettre d’avoir un squelette du béton qui rentre dans le fuseau. Parmi les fuseaux des BAP développés il y a celui du CTG Italcementi Group (Haddad 2007).

I.6.4 Les BAP et leur utilisation

Dans le Tableau I. 2 suivant est décrit un exemple de classification des BAP en fonction de leurs propriétés et des utilisations possibles.

Tableau I. 2: Classification des BAP en fonction de leurs propriétés de l’état frais (Haddad 2007).

Viscosité ↑				Résistance à la ségrégation / déformabilité restreinte
VS 2 VF 2	Rampes			Valeurs spécifiques des classes SF1 & 2
VS 1 ou 2 VF 1 ou 2		Murs et piles	Éléments fins et élancés	Valeur spécifique de classe SF 3
VS 1 VF 1	Planchers et dalles			Valeur en SR spécifique pour les classes SF 2 & SF 3
	SF 1	SF 2	SF 3	
	Étalement →			

SF : étalement, VS : temps à 500 mm d’étalement ; VF : temps au V-funnel, SR : résistance à la ségrégation.

I.7 Le béton et l’environnement

Contre tous les avantages que procure le béton à l’humanité, la production du béton a des inconvénients sur l’environnement. Dans le processus de fabrication du béton, on porte atteinte à l’environnement soit à la phase de production de ses constituants (granulats, ciment, adjuvants...), soit à la phase de sa production lui-même, et éventuellement par l’aspect visuel du béton dans l’environnement.

La production du béton se fait essentiellement avec des granulats d’origines naturelles. Ainsi, le recours à de nouvelles carrières est parfois difficile à réaliser en raison : d’une réglementation rigoureuse (préservation des paysages, interdiction d’extraction de granulats alluvionnaires...),

mais aussi l'épuisement ou éloignement des gisements naturels des centrales de production des bétons.

L'implantation d'une carrière entraîne une modification du paysage (contrastes de forme, de couleurs...) avec des incidences très variables selon les types d'exploitation (apparition d'un plan d'eau, d'un front de taille minéral, déboisement, etc.).

Sur une autre échelle l'extraction de granulats dans les rivières provoque l'incision verticale du lit de la rivière par érosion en amont et en aval des exploitations. Ceci se traduit par un abaissement du fond de la rivière qui a plusieurs conséquences :

- l'appauvrissement écologique au niveau du lit mineur car le substratum alluvial est une zone d'habitat pour les poissons, les invertébrés, les végétaux aquatiques alors que le substratum rocheux mis à nu est beaucoup moins favorable pour la faune et la flore ;
- l'abaissement de la nappe alluviale, notamment en période d'étiage, provoque l'assèchement des zones humides et la modification des peuplements végétaux. Il s'ensuit une disparition de la diversité de milieux d'intérêt écologique au niveau du lit majeur. La ressource en eau se trouve diminuée, en quantité et en qualité.
- la déstabilisation des ouvrages d'art (ponts...) qu'il est alors nécessaire de conforter par des seuils.

Par la production du béton, le premier impact des déchets des centrales de fabrication du béton près à l'emploi « BPE » est visuel : rejet de laitance de béton qui s'accumule et prend en masse, conduisant à un colmatage des réseaux et un dépôt dans le milieu naturel.

Deux besoins se ressentent actuellement : Trouver des ressources alternatives aux granulats naturels et limiter donc l'impact de leur extraction sur l'environnement ; Traiter les déchets des constructions en ruine.

I.8 Quelques chiffres des déchets de construction en Algérie

L'Algérie, n'a connu aucun progrès significatif pour favoriser la filière du recyclage des déchets de construction et de démolition qui sont estimés à la hausse. C'est pourquoi il faut surmonter tous les obstacles pour promouvoir cette filière de valorisation, qui a des conséquences bénéfiques non seulement sur la protection de l'environnement, mais également sur la rentabilité économique qui peuvent engendrer.

- Selon l'association française du génie parasismique (AFPS), dans son rapport préliminaire sur le séisme du 21 mai 2003, déclare que parmi les dégâts causés, environ 190000 unités d'habitation touchées, un pourcentage de 30% pour les bâtiments non récupérables.
- La Commission de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement (C.A.T.E), dans son rapport du 13 avril 2003 sur "L'urbanisation et les risques naturels et industriels en Algérie inquiétudes actuelles et futures", a présenté les statistiques ci-dessous (voir Tableau I.3).

Tableau I. 3: Quantités de débris issus des catastrophes naturelles en Algérie.

Lieu	Date	Dégâts
El Asnam –Chlef (séisme)	10 Octobre 1980	29000 logements détruits
Mascara (séisme)	18 août 1994	1000 habitations détruites
Skikda (explosion gazoduc)	3 mars 1998	10 maisons détruites 50 maisons endommagées
Ain-Temouchent (séisme)	22 septembre 1999	600 habitations détruites 1200 sérieusement endommagées
Bab El-Oued Alger (inondations)	9 et 10 novembre 2001	22400 logements endommagés 3000 à détruire complètement

Ces quantités très importantes et gênantes de matériaux abandonnées dans la nature, peuvent être valorisées et recyclées, permettant d'une part de libérer de l'espace pour les constructions nouvelles, et d'autres parts d'absorber le manque en granulats.

I. 9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous sommes revenus sur les généralités des bétons et les bétons autoplaçants. Nous avons discuté l'influence des paramètres de formulation sur les propriétés des bétons. Puis nous avons par la suite abordé l'impact de la production du béton sur l'environnement, et le besoin du recours à des ressources nouvelles.

L'utilisation des granulats recyclés à une grande importance du point de vue environnemental car cela permet de préserver la nature en réduisant l'extraction des granulats naturels et cela permet également de réduire le nombre de décharges de ces matériaux.

La durabilité, mais aussi les propriétés mécaniques des bétons dépendent essentiellement de la porosité soit le volume des vides. On vient de voir que toutes les attaques chimiques et leurs

cinétiques sont régies par la porosité et la connectivité des pores dans le béton durci. La cinétique de dégradation du béton est régie par la vitesse de transfert par diffusion ou par perméabilité des substances chimiques. Ces dernières sont fonction des dimensions des pores ainsi que de leur connectivité. Par conséquent, l'étude de la porosité et du transfert de matière paraît indispensable pour pouvoir déterminer ou prévoir la position du front de dégradation à n'importe quel âge du matériau, soit donc prévoir la durée de vie d'une construction.

La porosité ouverte est une propriété physique qui caractérise la durabilité du béton et qui peut être recherchée en tant qu'indicateur de cette dernière. En effet, une faible porosité constitue le meilleur moyen de défense des bétons contre tous les agents agressifs.

Partie B: La problématique des GBR et leur valorisation

I.9 Introduction

Le recyclage des matériaux de construction est la solution la plus prometteuse, car non seulement elle permet de répondre au déficit de production, mais aussi de mieux protéger l'environnement. Les déchets de démolition représentent un gisement important issus de la déconstruction des vieux bâtis et des différentes catastrophes qui les génèrent.

Ainsi, pour préserver l'environnement, les chercheurs se sont efforcés de développer des ressources alternatives en recyclant les matériaux tels que les déchets de construction, industriels et automobiles, y compris le caoutchouc des pneus usés (Almeida et al., 2007, Silva et al., 2013, Etxeberria et al., 2007, Chen et al., 2003, Debieb et Kenai, 2008, Malhotra, 1978).

Pour une utilisation efficace des déchets, des chercheurs (Huda et Alam 2014, 2015, Zhu et al 2016, Salesa et al 2017) ont étudié les caractéristiques du béton à plusieurs générations de recyclage afin de trouver une solution très opérante. Cependant, par rapport à l'agrégat naturel, la qualité de granulat recyclé est médiocre (ceci sera traité de manière approfondie dans les sections suivantes). En effet, les granulats de béton recyclés sont plus poreux que les granulats naturels (Debieb et al., 2010; Poon et al., 2004). Ainsi les bétons produits en utilisant ce type de composant présentent une plus grande porosité que ceux fabriqués avec des granulats naturels (Gómez-Soberón 2002, Thomas et al 2013, Gonzalez et Etxeberria 2014). On sait que la porosité du béton a un effet direct sur sa durabilité car les pores du béton constituent le chemin d'accès à différents types d'agents agressifs (Breysse et Gérard 1997). Ainsi, les bétons produits avec les granulats de béton recyclés doivent être testés avec soin pour s'assurer qu'ils présentent des propriétés mécaniques et une durabilité souhaitables, compte tenu de leur forte porosité, ce qui peut leur conférer des propriétés moins bonnes que celles des bétons fabriqués avec des granulats naturels (Taverni et Soroushian 1996). Il est donc essentiel de pouvoir contrôler la porosité de ces bétons.

I.10 Composition des granulats de béton recyclés (GBR)

Les granulats de béton recyclés diffèrent des granulats naturels par leur composition. En effet, le GBR est un matériau composite, dont les deux constituants sont des granulats naturels (GN) concassés partiellement et la pâte de ciment hydraté concassée les enrobant. Les éléments constitutifs de ces granulats recyclés sont présents en proportion différente. En effet, le taux de pâte de ciment présent dans les granulats de béton recyclés varie en fonction de leur origine,

c'est-à-dire en fonction de la formulation de base du béton initial utilisée pour préparer ce type d'agrégat.

I.11 Propriétés physiques et mécaniques des GBR

I.11.1 Masse volumique

Plusieurs masses sont considérées lors de l'essai de caractérisation des granulats. Le terme Masse volumique apparente désigne le rapport entre la masse d'un volume donné d'agrégat (dans les conditions soit séchée soit saturée en surface sèche) et la masse d'un volume égal d'eau.

Ces masses volumiques des différentes sources des granulats utilisées dans cette étude sont des caractéristiques importantes, à la fois, d'un point de vue de qualité et lors de concevoir les proportions des composants de béton. En termes de proportions des composants de béton, la masse volumique est importante parce que c'est la caractéristique qui détermine la quantité de remplacement de GBR en utilisant la proportion volumétrique. Cette méthode de dosage remplace une quantité donnée de GN par un volume égal de GBR.

Comme il a été noté dans les études antérieures, la masse volumique de GBR est inférieure à celle des GN. Ceci est dû à l'existence d'une pâte de ciment poreuse et moins dense dans les GBR (Poon et al.2004). En raison de leur origine et de leur taille les GBR peuvent avoir des masses volumiques différentes selon la quantité de pâte de mortier qui se colle à leur surface (Gomez-Soberon 2002).

I.11.2 Absorption d'eau

La mesure d'absorption est essentielle pour la formulation des bétons. En effet cette mesure va nous permettre de corriger la quantité d'eau finale à introduire dans la composition du béton pour compenser l'absorption supplémentaire des granulats. En fonction de l'état des granulats avant la gâchée (granulats secs ou saturés ou simplement humides), on doit recalculer la quantité d'eau à introduire dans le béton : ainsi si les granulats sont secs, ils risquent d'absorber de l'eau efficace prévue pour l'hydratation du ciment, et donc voir le rapport eau /ciment (E/C) à la baisse ; à l'inverse si les granulats sont humides ou saturés, ils peuvent fournir au béton plus d'eau, impliquant une hausse du rapport E/C.

La capacité d'absorption d'eau de GBR est supérieure à celle de GN (qui est inférieur à 1.5% pour presque tous les GN) car le GBR est composé de pâte de ciment, poreuse par nature

pouvant absorber de grandes quantités d'eau. La variation de la capacité d'absorption d'eau rapportée dans diverses références est due à la variation de la teneur en pâte de ciment dans cet agrégat ainsi qu'au contenu d'autres composants tels que les briques d'argile et tuiles concassés qui ont une très grande capacité d'absorption d'eau.

De Juan (2004) rapporte que l'absorption d'eau des GN est comprise entre 0 et 4%, tandis qu'elle est comprise entre 16 et 17% pour le mortier adhérent et entre 0.8 à 13%, pour les GBR avec une moyenne de 5.6 %.

Vieira et al. (2011) ont représenté la capacité d'absorption d'eau de GBR en fonction du temps (Figure I.7). Le graphique d'absorption révèle que l'absorption d'eau de GBR se produit principalement pendant la période initiale d'immersion, atteignant environ 80% de son potentiel d'absorption après seulement 5 minutes d'immersion. Après cette période, l'augmentation de l'absorption d'eau est beaucoup plus lente, atteignant une valeur de 84% après 30 min. De Juan (2004) a également rapporté que 70 à 90% du potentiel d'absorption d'eau des GBR était utilisé après 10 min d'immersion.

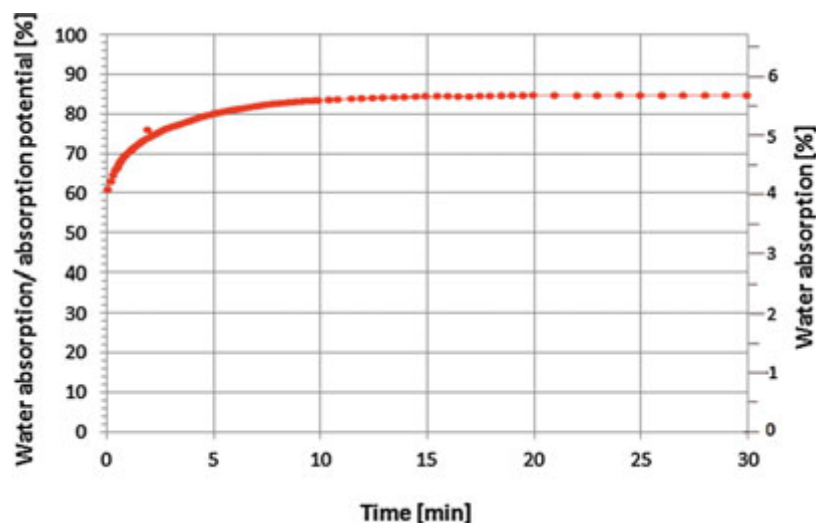


Figure I. 7: Absorption d'eau de GBR en fonction du temps (Vieira et al. 2011).

Les GBR obtenus à partir d'un béton à faible rapport E/C, et donc avec une porosité plus faible et une résistance mécanique plus élevée, ont une absorption d'eau plus faible (Hansen et Narud 1983). La granulométrie d'un GBR a un effet significatif sur sa capacité d'absorption d'eau: Le GBR fin a une capacité d'absorption d'eau supérieure à celle des GBR grossiers en raison des quantités relativement plus élevées de mortier adhérent que dans le GBR grossier. D'autre part, les GBR préparés avec différents âges de cure ont des capacités d'absorption d'eau presque identiques (Katz 2003).

I.11.4 Abrasion Los Angeles

La valeur globale d'abrasion est définie comme le pourcentage de perte de poids par abrasion, de sorte qu'une valeur élevée indique une faible résistance à l'abrasion (Neville 2000). Plusieurs tests sont effectués pour évaluer la valeur d'abrasion des agrégats. Parmi ceux-ci, le test d'abrasion de Los Angeles est plus couramment utilisé dans le monde entier et par conséquent les valeurs d'abrasion obtenues à partir de ce test rapportées dans diverses références sont considérées dans cette section. Selon ASTM C-33, «Spécification standard pour les granulats de béton», la valeur d'abrasion de Los Angeles devrait être inférieure à 50% pour les granulats utilisés dans la production de béton.

Le Tableau I.4 montre quelques valeurs de Los Angeles pour les GBR ainsi que les GN rapportés dans diverses références. En général, le GBR a une valeur d'abrasion inférieure à celle des granulats naturels en raison de la présence de mortier adhérent, qui se désintègre pendant l'abrasion avec certaines parties d'agrégat naturel.

Tableau I. 4: Valeurs d'abrasion Los Angeles des GBR et GN.

Référence	Taille de granulat (mm)	Los Angeles (%)	
		GBR	GN
Gonzalez-Fonteboa and Martinez-Abella (2008)	5-40	39.65	-
Rao et al. (2011)	4-20	37.1	21.56
Gomes and de Brito (2009)	<25.4	37.96	28.52
López-Gayarre et al. (2009)	4-20	37.2, 33.1	24, 26.4

I.12 Propriétés mécaniques et physiques des bétons de GBR

I.12.1 Résistance à la compression

La résistance à la compression est une propriété importante du béton et est souvent liée à la qualité du béton. La facilité avec laquelle on peut la tester et sa corrélation avec d'autres propriétés du béton font qu'elle soit couramment utilisée dans la spécification des matériaux.

En tant que tel, la plupart des études sur les GBR ont inclus les effets de l'addition de GBR sur la résistance à la compression du béton.

Dans cette section, la résistance à la compression du béton contenant les GBR est mise en évidence. Normalement, la résistance à la compression du béton diminue avec l'addition de GBR (Dhir et al. 1999, Topçu et Sengal 2004) et la réduction de la résistance peut atteindre 40% (Katz 2003, Chen et al. 2003). Dans certaines études, il a été souligné que la réduction de la résistance à la compression était comprise entre 12 et 25%, lorsque 25-30% (Corinaldesi 2011, Etxeberria et al 2007) ou 100% de GN ont été remplacés par les GBR (Li et al. 2009). Cependant, une influence négligeable est observée lorsque le GBR grossier ou fin est utilisé pour une substitution jusqu'à 30% des GN grossiers (Gomez-Soberon. 2002, Li et al. 2009, Rao et al. 2011) ou bien 20% des GN fin (Dhir et al. 1999), respectivement. Une augmentation de la porosité du béton due à l'ajout de GBR (en raison de la vieille teneur en mortier) et la faible liaison entre l'agrégat et la matrice sont les principales raisons de la réduction de la résistance à la compression du béton (Kwan et al. 2012).

La réduction de la résistance à la compression due à l'addition de GBR peut être contrôlée en changeant divers facteurs de la composition de béton tels que le rapport E/C, la procédure de la composition, en traitant l'agrégat et en utilisant une addition minérale. Les informations rassemblées jusqu'à présent sur l'utilisation de GBR dans le béton montrent que les modifications dans la procédure de la composition du béton sont l'étape clé pour développer un béton de bonne qualité contenant tout type de GBR. Etxeberria et al. (2007) ont rapporté que le béton préparé en remplaçant 25% des GN par les GBR peut être utilisé comme béton de résistance moyenne (30- 45 MPa) ayant une résistance à la compression similaire au béton conventionnel, lorsque les deux compositions sont préparées avec la même quantité de ciment et le rapport E/C de 0.55. Cependant, une réduction du rapport E/C efficace à 0.52 c'est à dire une augmentation de 6% de la quantité de ciment était nécessaire pour que le béton de granulats recyclés contenant 50% de GBR atteigne une résistance similaire à celui du béton conventionnel. Ces valeurs sont devenues 0.50 et 8.3%, respectivement, pour le béton contenant 100% de GBR.

La résistance à la compression du béton de GBR a diminué à mesure que la porosité du béton contenant du GBR grossier augmentait (Figure I.8) (Gomez-Soberon 2002).

Park et al. (2005) ont observé une diminution de la résistance à la compression avec l'augmentation du taux des vides du béton poreux où diverses quantités de GN ont été remplacées par du GBR. La résistance diminue rapidement au-dessus du taux de vide de 25%.

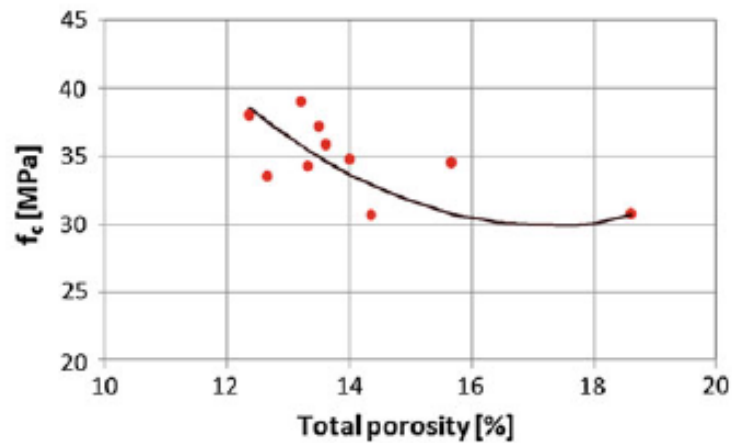


Figure I. 8: Porosité en fonction de la résistance à la compression des bétons de GBR (Gomez-Soberon 2002).

Le béton contenant un GBR plus gros a une résistance plus élevée que le béton similaire contenant un GBR plus petit, car la teneur en mortier dans un GBR plus grand est généralement plus faible que dans un GBR plus petit (Tavakoli et Soroushian 1996, Hansen et Narud 1983).

Tavakoli et Soroushian (1996) et Gonzalez et Etxeberria (2014) ont rapporté que la résistance à la compression du béton contenant les GBR dépend de plusieurs facteurs tels que la résistance du béton source à partir duquel le GBR est généré, la procédure de la composition, le rapport E/C et la taille de l'agrégat. Ils ont observé une résistance plus élevée dans le béton contenant du GBR que dans le béton contenant du GN, à condition que la résistance du béton à partir duquel le GBR était généré soit supérieure à celle du béton contenant du GN utilisé pour l'objectif de comparaison.

Hansen et Narud (1983) ont observé une résistance plus faible dans le béton contenant de GBR en comparaison à celle du béton témoin, lorsque la résistance du béton témoin dépassait la résistance du béton à partir duquel le GBR était généré. Les variations de résistance des bétons de GBR et du béton témoin contenant les GN étaient dues à la liaison entre le mortier de ciment et le granulat; une faible liaison donnait un GBR de mauvaise qualité et donc un béton de GBR de moindre résistance.

Poon et al. (2004) ont rapporté que la résistance du béton de GBR provenant du béton à haute résistance est plus élevée que celle du béton de GBR provenant du béton de résistance ordinaire en raison de la formation d'une microstructure plus dense dans la zone interface pâte-granulats dans le premier cas en comparaison au deuxième cas et aussi une résistance plus élevée du GBR provenant du béton à haute résistance que celle des GBR provenant de résistance ordinaire.

Généralement, l'addition de GBR coïncide avec une réduction de la résistance à la compression, bien que l'on ait observé que certains GBR provoquent une augmentation. On a observé que la sévérité de cette réduction dépend d'un grand nombre de variables, qui incluent la résistance souhaitée de la composition de béton, le taux de remplacement des GN par les GBR, la source du matériau du GBR, la taille du GBR, la procédure de la composition du béton, les conditions de durcissement et plusieurs autres facteurs.

I.12.2 Résistance à la flexion

De même que pour la résistance à la compression, l'addition des GBR dans le béton diminue la résistance à la flexion. Cependant, dans plusieurs études, il a été rapporté que cette addition ne réduisait pas autant la résistance à la flexion par rapport à la résistance à la compression. La variation de la résistance à la flexion entre le béton de référence et le béton contenant des GBR était négligeable dans certaines études et inférieure à 30% dans d'autres selon les variations de différents facteurs tels que la quantité de remplacement, origine et qualité de l'agrégat recyclé, rapport E/C et résistance souhaitée du béton.

Safiuddin et al. (2011) n'ont pas observé de différences significatives entre la résistance à la flexion à 7 et 28 jours du béton de référence et celle du béton de GBR. La résistance augmentait avec le temps de durcissement comme dans le béton de référence.

Yang et al. (2011) ont observé une réduction de 7.5 à 13.8% de la résistance à la flexion due au remplacement de 100% du GN par les GBR à divers âges. Au même taux de substitution, Casuccio et al. (2008) ont observé une réduction de 5 à 21% de la résistance à la flexion à 28 jours. Singh et Sharma (2007) ont observé une réduction de 4 à 15% de de la résistance à la flexion de 1 et 28 jours des compositions de bétons de 20 et 25 MPa.

Takavoli et Soroushian (1996) ont observé une résistance à la flexion plus élevée pour le béton de GBR en utilisant des GBR de taille plus petite que pour un béton de GBR de taille plus grande, et dans certains cas la résistance à la flexion était plus élevée que celle du béton de référence.

Katz (2003) a observé une résistance à la flexion similaire à 28 jours pour le béton de référence, le béton de GBR grossier, le béton de GBR fin et de sable naturel, obtenu à partir de béton durci de 1 jour. Cependant, la résistance à la flexion de bétons de GBR obtenu à partir de bétons de 3 et 28 jours était de 11.5% inférieur en comparaison à celle du béton de référence. D'autre part, la réduction de résistance en flexion dans le béton avec du ciment Portland blanc était de 29.9, 20.9 et 31.3% pour 1, 3 et 28 jours de cure, respectivement.

Yang et al. (2011) ont observé des réductions de la résistance à la flexion de 3 et 9% en comparaison au béton de référence à 7 et à 28 jours du béton avec du GBR en tant qu'agrégat grossier unique. L'ajout de brique concassée jusqu'à un niveau de substitution de 50% de GBR a légèrement augmenté la résistance à la flexion due au faible module de Young de la brique et a donc amélioré la résistance à la traction le long de l'interface pâte-granulat (Figure I.9). Les modes de défaillance du béton de référence et de béton de GBR se sont produits à l'interface de l'agrégat et de la matrice de mortier, tandis que l'interface et l'agrégat défaillant se produisaient dans le béton de GBR contenant la brique concassée.

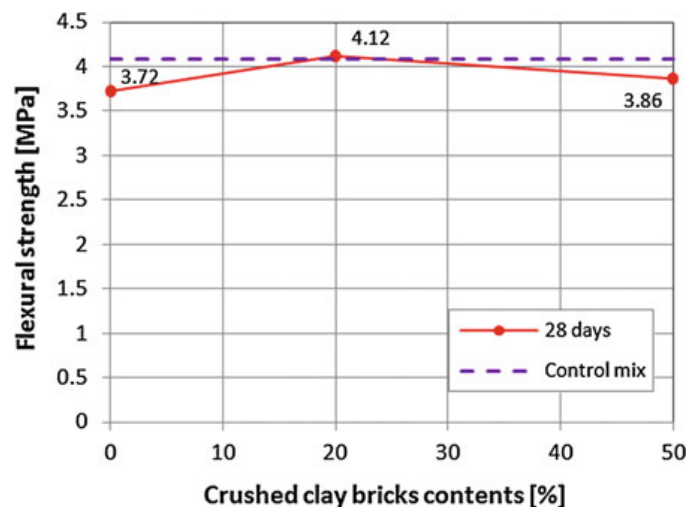


Figure I. 9: Effet du taux de brique concassée dans les GBR sur la résistance à la flexion du béton (Yang et al. 2011).

I.12.3 Autre propriété: Vitesse des ondes ultrasoniques

L'évaluation de la vitesse des ondes ultrasoniques (VOU) à travers le béton peut donner des informations importantes telles que la résistance et la performance élastique du béton. C'est une méthode d'essai non destructive peu coûteuse et rapide pour évaluer la qualité du béton. L'influence de GBR sur la VOU dans le béton est rapportée dans diverses références, dont certaines sont mises en évidence ci-après.

Kwan et al. (2012) ont observé une diminution de VOU dans le béton due à la substitution du GN par le GBR, cependant, comme dans le béton conventionnel, la VOU dans le béton de GBR a également augmenté avec la durée de durcissement. La VOU de tous les types de bétons se situaient dans l'intervalle de 3.66-4.58 km / s après 28 jours de cure et est classée comme bonne catégorie. Ainsi, ils ont tenté de corréler la VOU à la résistance à la compression de tous les spécimens. Tous les échantillons de béton des GBR ont montré une bonne corrélation entre ces deux variables, car les valeurs de R^2 étaient supérieures à 0.80 (voir Figure I.10). Rao et al.

(2011) ont observé une diminution de VOU à mesure que le remplacement des GN par les GBR augmentait. De plus, l'essai de résistance à la compression est effectué sur les mêmes échantillons sur lesquels le test de VOU est effectué ainsi la relation vitesse-force aussi que la densité est obtenue (voir Figure I.11).

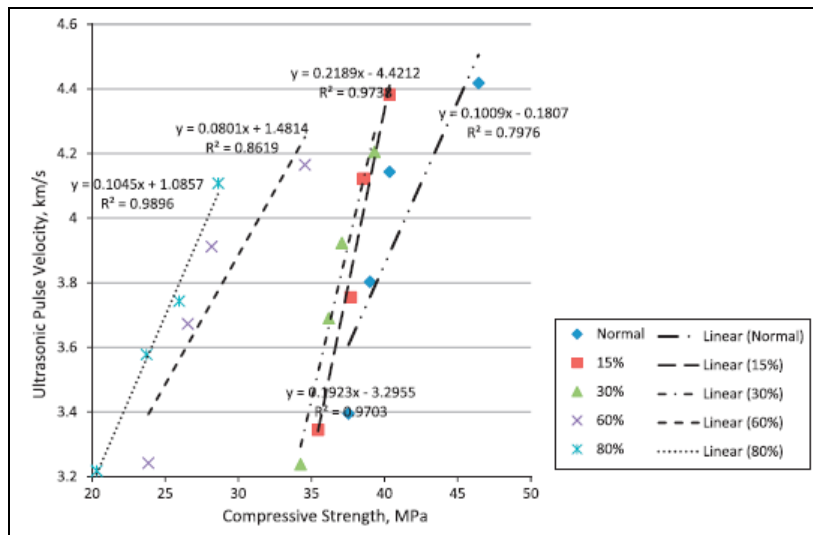


Figure I. 10: Corrélation entre la résistance à la compression et les valeurs de VOU (Kwan et al. 2012).

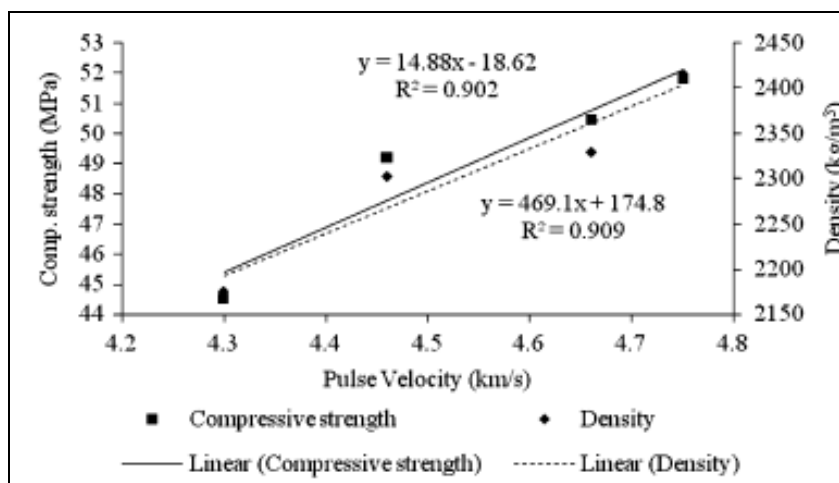


Figure I. 11: Corrélation entre la résistance à la compression et la VOU et la densité (Rao et al.2011).

Khatib (2005) a observé une diminution systématique de la VOU à mesure que le remplacement du GN fin par le GBR fin augmentait. Au même niveau de substitution, la VOU dans le béton

contenant les déchets de brique recyclés fin (DBR) était plus élevée que celle observée sur le béton de GBR fin. Les auteurs ont observé une forte augmentation de la VOU avec l'âge de durcissement de 1 à 7 jours, puis ont ralenti à mesure que le temps de durcissement augmentait. Ils ont également proposé une relation exponentielle entre la résistance à la compression et la VOU, qui convenait particulièrement bien pour les grands taux de remplacement de GN fin par GBR fin et GDB fin (Figure I.12). Cependant, Kwan et al. (2012) ont commenté que les relations polynomiales ou exponentielles n'étaient pas appropriées pour relier la VOU avec la résistance à la compression du béton contenant les GBR car il y avait une certaine valeur de VOU après laquelle son augmentation ne signifierait pas nécessairement une augmentation de la résistance à la compression.

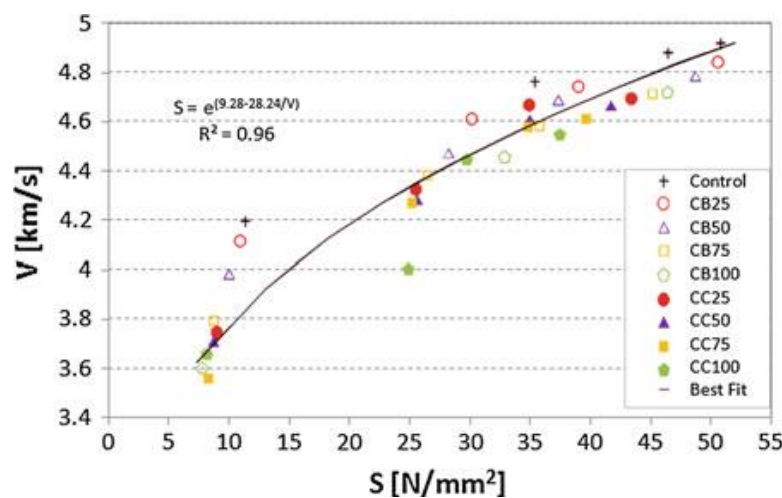


Figure I. 12: Corrélation entre VOU (V) et la résistance à la compression (S) du béton (Khatib 2005).

Tu et al. (2006) ont observé une VOU inférieure pour le béton à haute performance de GBR comme substitution des deux GN fin et grossier en comparaison à la vitesse observée pour le béton à haute performance avec GBR comme seul agrégat grossier. La VOU augmente avec le rapport E/C.

Kou et al. (2011) ont observé que quel que soit le type d'addition minérale utilisée comme liant, une diminution de la VOU du béton à 28 jours avec l'augmentation de la substitution des GN grossiers par les GBR. Cependant, la VOU dans le béton de GBR à tous les taux de substitution et avec la fumée de silice et métakaolin comme ajouts minéraux était significativement plus élevée que celui de béton conventionnel avec un seul liant ordinaire ou le béton de GBR avec ou sans les cendres volantes et laitier granulé de haut fourneau. La VOU dans le béton de GBR avec cendres volantes et laitier granulé était légèrement inférieure à celle du béton conventionnel. Le

gain en VOU entre 28 et 90 jours de durcissement pour le béton de GBR avec additions minérales était plus élevé que pour le béton avec ciment ordinaire comme liant unique en raison de la formation de plus de produits d'hydratation et de l'amélioration conséquente de la microstructure de bétons de GBR due à une réaction pouzzolanique.

I.12.4 Masse volumique

En comparaison avec un GN, le GBR a généralement une densité plus faible en raison de sa nature poreuse, qui est due au mortier adhérent. En raison de la faible densité du GBR, la densité du béton produite avec ce granulat diminue aussi.

Lorsque le GN est remplacé à 100% de GBR, des études ont trouvé une baisse de la masse volumique d'environ 6% à 10% (Zaharieva et al. 2003, Poon et al. 2004, Ferreira et al. 2011). Bien que cette diminution de masse volumique ne soit pas négligeable, le béton résultant en générale n'est pas classé en béton à faible masse volumique. Bien que la masse volumique réduite ne soit pas une qualité négative pour le béton, elle est souvent due à l'augmentation des vides, ce qui peut entraîner des problèmes de résistance et de perméabilité.

I.12.5 Absorption d'eau et porosité ouverte de béton

L'une des principales préoccupations concernant l'utilisation du GBR est l'impact qu'il peut avoir sur les caractéristiques de durabilité du béton. Nombreux facteurs affectent la durabilité du béton et, par conséquent, ses effets sur la durabilité peuvent être mesurés de différentes façons. L'un de ces facteurs est la porosité ouverte du béton.

La porosité d'un béton se réfère à la quantité de vides dans un béton. Celui-ci est composé de pores capillaires, de gel, d'air occlus et d'espaces dans l'interface pâte-granulat du béton. La porosité d'un béton a des effets sur la résistance et dans une certaine mesure, sur la perméabilité de ce béton. La perméabilité d'un béton se réfère à l'écoulement à travers un milieu poreux. La porosité ouverte fait référence à la partie de la structure des pores qui contribue à l'écoulement du liquide à travers le béton. Typiquement ceci inclut les grands pores capillaires, qui ne sont pas discontinus, et fournissent ainsi une voie pour le passage des liquides. Alors que les granulats poreux introduisent plus de pores dans le béton. La porosité ouverte d'un béton affecte les propriétés de transport et donc la durabilité de ce béton. Le transport des chlorures, l'oxygène, dioxyde de carbone et de l'humidité peut provoquer une corrosion dans les armatures. La présence d'eau dans le béton peut également avoir des effets négatifs en termes de durabilité gel-dégel (Neville 2000).

La capacité d'absorption d'eau du béton est une propriété importante, qui fournit des données sur la porosité accessible à l'eau du béton; le béton à haute capacité d'absorption d'eau est moins durable dans des conditions environnementales agressives. Étant donné que la capacité d'absorption d'eau des GBR est supérieure à celle des GN, le béton contenant des GBR a une capacité d'absorption d'eau supérieure à celle du béton conventionnel. L'absorption d'eau est évaluée par un test d'immersion, qui mesure la porosité ouverte des éprouvettes de béton. Plusieurs références sont disponibles sur l'évaluation de la capacité d'absorption d'eau du béton contenant des GBR.

Kwan et al. (2012) ont observé une augmentation de la capacité d'absorption d'eau du béton à mesure que le taux de substitution des GN par les GBR augmentait (Figure I.13). Ils indiquent que jusqu'à 30% de substitution des GN par des GBR conduit à une capacité d'absorption d'eau inférieure à 3%, c'est-à-dire un béton considéré comme ayant une faible capacité d'absorption d'eau. Pour une substitution de 80%, la capacité d'absorption d'eau du béton de GBR était 2.2 fois plus élevée que celle du béton conventionnel. Rao et al. (2011) ont également observé une augmentation graduelle de la capacité d'absorption d'eau du béton avec l'incorporation de GBR en raison de la capacité d'absorption d'eau plus élevée de GBR, qui était environ 3.5 fois plus élevée que le GN.

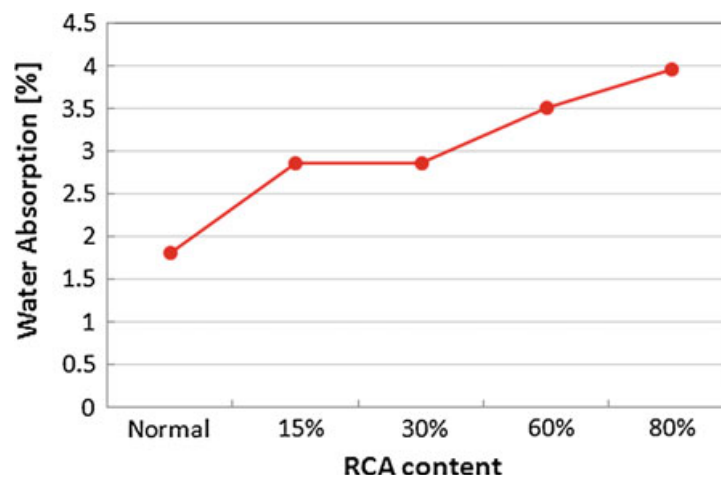


Figure I. 13: Capacité d'absorption d'eau du béton par rapport à la teneur en GBR (Kwan et al. 2012).

La capacité d'absorption d'eau du béton conventionnel et du béton de GBR préparé en remplaçant 30 et 100% du volume des GN fin par des GBR fin dans l'étude d'Evangelista et de Brito (2010) était respectivement de 11.3, 13.2 et 16.5%. La capacité d'absorption d'eau du béton avec 30 et 100% de GBR fin était respectivement d'environ 16 et 46% plus élevée que celle du béton conventionnel. Gomes et de Brito (2009) ont observé une augmentation linéaire de

la capacité d'absorption d'eau du béton avec l'augmentation du taux de substitution des GN par des GBR et des granulats de déchets de brique et de mortier concassé (GDBMC). La capacité d'absorption d'eau du béton contenant du GDBMC était significativement plus élevée que celle observée pour le béton de GBR en raison de la plus grande porosité du premier type d'agrégat.

Une autre méthode pour évaluer l'absorption d'eau consiste à mesurer le taux d'absorption d'eau par succion capillaire à l'intérieur d'une éprouvette de béton. Cet essai permet d'exprimer la vitesse d'absorption par remontée capillaire.

L'équation qui régit le mécanisme de l'absorption d'eau est la suivante :

$$i = (C +) S t^{1/2} \quad (I.2)$$

i étant le terme concernant la quantité d'eau absorbée (kg/m^2), S l'absorptivité ($\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}^{1/2}$) et t le temps écoulé (s). C est l'éventuelle valeur initiale observée par certains chercheurs.

L'absorptivité est influencée en premier lieu par le rapport E/C . D'autre part, plus la porosité de granulat introduit dans le béton est élevée, plus la valeur mesurée d'absorptivité est grande. L'évaluation du comportement des bétons face à ce mécanisme de transfert permet de compléter et d'approfondir l'analyse des propriétés caractéristiques de leur durabilité.

De nombreuses études ont été réalisées sur des bétons de GBR pour évaluer leurs absorptivités. Evangelista et de Brito (2010) ont observé une augmentation d'environ 34 et 70% de l'absorptivité de l'eau capillaire due à la substitution volumique de 30 et 100% des GN fin par des GBR fin, respectivement, attribué à la formation de plus de pores capillaires due à leurs porosité élevée (Figure I.14 a). Zega et Di Miao (2011) ont également observé une augmentation de 13% de la capacité d'absorption d'eau capillaire du béton due à la substitution volumique de 20 et 30% de volume des GN fin par les GBR fin en raison de la porosité élevée des GBR en comparaison à celle du GN (Figure I.14b). Cependant, l'absorptivité capillaire des bétons de GBR était inférieure à la valeur maximale spécifiée en Argentine, c'est-à-dire inférieure à $4 \text{ g} / \text{m}^2 / \text{s}^{1/2}$.

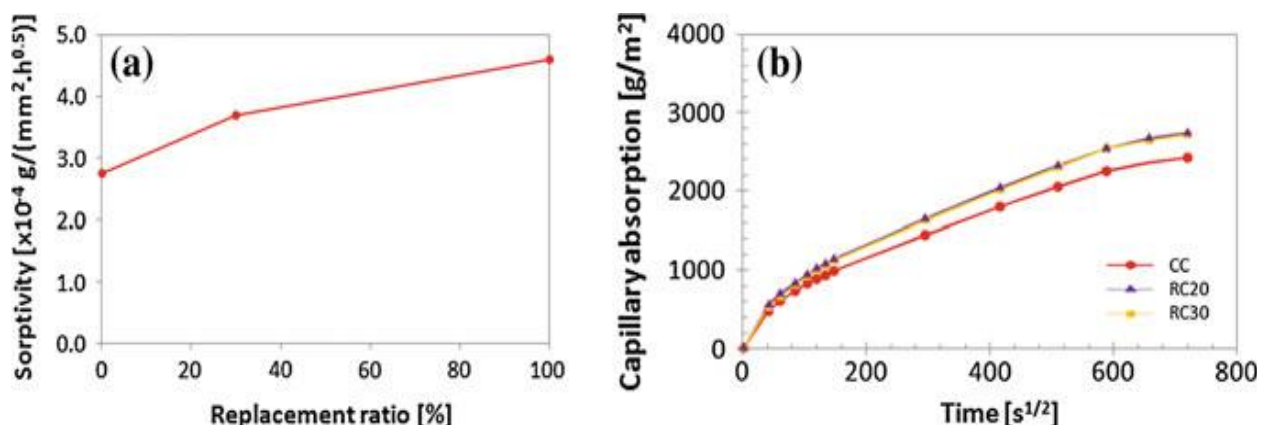


Figure I. 14: a) Absorptivité d'eau capillaire (Evangelista et de Brito 2010) et b) Absorption capillaire (Zega et Di Miao 2011) de béton conventionnel et de bétons contenant de GBR comme substitution de 30 et 100% des GN.

Gomes et de Brito (2009) ont observé une augmentation progressive du coefficient d'absorption capillaire avec le taux de GBR et de GDBMC; l'augmentation maximale du coefficient d'absorption capillaire des bétons de GBR et ceux avec GDBMC à 50% de substitution des GN était respectivement de 16.6 et 71.5% par rapport au béton conventionnel. Gonçalves et al. (2004) ont également observé un coefficient d'absorption capillaire plus élevé pour le béton contenant des GBR en comparaison avec le béton conventionnel; cependant, ils n'ont observé aucun effet dû à l'augmentation de la teneur en GBR dans le béton sur le coefficient d'absorption capillaire. Cependant, selon Alexander et al. (1999), le béton contenant des GN et des GBR pourrait être classé en terme de durabilité comme suit (Tableau I.5) :

Tableau I. 5: Classification de durabilité du béton basée sur les paramètres de perméabilité (Alexander et al.1999).

Classe de durabilité	Perméabilité à l'oxygène (Echelle log) ^a	Absorptivité (mm/h ^{1/2})	diffusion des ions chlore (mS/cm)
Excellente	>10.0	<6	<0.75
Bonne	9.5-10.1	6-10	0.75-1.50
Mauvaise	9.0-9.5	10-15	1.5-2.5
Très mauvaise	<9.0	>15	>2.50

^a Logarithme négatif du coefficient de perméabilité à l'oxygène.

I.13 Conclusion

Les développements récents sur les propriétés du béton avec GBR ont été discutés en détail dans cette partie du chapitre. Les résultats sont présentés dans plusieurs sections différentes pour présenter les propriétés du béton durci. Les granulats générés à partir de béton recyclé ou d'autres déchets à base de céramique sont utilisés comme substitution partielles ou complètes d'agrégats fins et grossiers dans le béton. L'utilisation de ces granulats comme granulats grossiers est plus polyvalente que celle de granulats fins. Les bétons ordinaires et à haute résistance peuvent être produits avec des GBR. Dans plusieurs études, il a été rapporté que jusqu'à 30% de substitution des GN par des GBR n'a pas sensiblement détérioré les performances mécaniques et de durabilité du béton résultant. Cependant, en améliorant les techniques de préparation de la composition du béton, presque toutes les propriétés du béton avec des GBR peuvent être sensiblement améliorées et dans certains cas, les résultats de propriété sont comparables à ceux des propriétés conventionnelles.

L'évaluation de la valeur totale des GBR est un processus continu auquel cette recherche vise à contribuer. L'influence du GBR sur la VOUE à travers le béton est rapportée dans quelques références. Cependant, la plupart des études se sont concentrées uniquement sur le développement des relations associées pour prédire les propriétés mécaniques du béton formulé avec les GBR. Par conséquent, une étude sur l'évaluation du paramètre de durabilité du béton de granulats GBR tel que la porosité ouverte en utilisant la VOUE est importante. Puisque l'état d'humidité dans le béton peut avoir des effets significatifs sur ses propriétés de durabilité (gel-dégel) des bétons étaient testés à différents niveaux de saturation. Des chercheurs ont rapporté que la résistance à la compression du béton contenant les GBR dépend de plusieurs facteurs tels que la taille de granulats et la source des GBR. Dans cette recherche, deux classes de GBR ont été utilisées pour évaluer l'influence de la taille des GBR sur la VOUE et cela pour les différents états de saturations.

Toutes ces contributions ont le potentiel pour aider à affiner d'avantage le système de classification existant des GBR, ce qui pourrait favoriser davantage leur utilisation efficace.

Chapitre II

Matériaux et procédures expérimentales

II.1 Introduction

Le secteur des travaux publics est un grand consommateur de granulats naturels. Il est également l'un des plus gros producteurs de déchets dont 97% sont inertes. Issus des chantiers, les déchets inertes sont représentés par une multitude de matériaux de déconstruction (béton, gravas traités ou non, briques, bois, verre, etc...). A l'heure actuelle, il est nécessaire de considérer ces déchets inertes comme un gisement de matériaux alternatifs utilisables. Dans cette étude on s'est intéressé au recyclage des bétons et des et les déchets de brique, mais également on a pensé à récupérer les déchets de marbre des marbreries pour l'utiliser comme addition inerte dans le béton.

Ce chapitre décrit le détail du programme expérimental réalisé tels que les matériaux utilisés avec leurs propriétés physiques et mécaniques, les différentes formules de béton étudiées, les mesures des propriétés à l'état frais et durci ainsi les propriétés de durabilité des bétons recyclés. La caractérisation de ces propriétés a été réalisée expérimentalement afin de les confronter à celles du béton formulé avec uniquement des granulats naturels. Pour cela, différentes formules de bétons à base de granulats recyclés ont été comparées au béton formulé de granulats naturels.

Une étude préliminaire sur les matériaux de recyclage (déchet de marbre, granulats de béton recyclés, granulats de déchet de brique) a été menée sur les bétons autoplaçant (BAP). Les bétons ainsi formulés étaient comparés à un BAP à base de granulats naturels. Le critère de comparaison choisi pour ces bétons étant la résistance mécanique en compression. Ensuite une étude plus approfondie est réalisée sur les bétons fluides en raison de leurs fortes utilisations sur les chantiers.

Sur les bétons fluides, un test de propagation des ondes ultrasoniques a été effectué pour estimer la porosité et la connectivité des pores et de déterminer la corrélation entre la vitesse de propagation des ondes ultrasoniques (VOU), le taux de GBR et la porosité accessible à l'eau. Pour estimer la variation du degré de connectivité des pores du béton en fonction du taux des GBR, nous avons testé les différents bétons à différents états de saturation. Les granulats recyclés ont été utilisés comme remplacement partiel puis total des granulats naturels au pourcentage de 0, 20, 40, 60, 80 et 100%.

II.2 Matériaux et formulations

II.2.1 Matériaux

Dans notre étude, nous avons utilisé des matériaux naturels locaux et ceux du recyclage.

II.2.1.1 Ciment

Deux ciments, dont les caractéristiques chimiques sont présentées dans le Tableau II.1 ont été utilisés pour formuler les différentes compositions :

- un CPJ- CEM II/B 32.5 R, sa surface spécifique Blaine est de 4300 - 4800 cm²/g et sa masse volumique de 3030 kg/m³.
- un type CPJ- CEM II/B 42.5 N, Sa surface spécifique Blaine est de 3800 cm²/g et sa masse volumique de 3130 kg/m³.

Provenant de l'usine Hammam Eddalaa région de M'sila, Algérie.

Tableau II. 1: Caractéristiques chimiques des ciments utilisés.

Type de ciment	CEM II/B 32.5 R	CEM II/B 42.5 N
C ₃ S	58.00 – 64.00	62
C ₂ S	12.00 – 20.00	22
C ₃ A	6.0 – 8.00	8.2
C ₄ AF	10.00 – 13.00	13
SO ₃	2.10 – 2.50	2.5
MgO ₃	1.00 – 1.30	1.3
Cl ⁻	0.01 – 0.03	0.03
Résidus insolubles	0.70 – 1.50	-
Perte au feu	8.00 – 10.00	-

II.2.1.2 Le déchet de marbre broyé

Pour la formulation des bétons on a utilisé le déchet de marbre comme addition minérale. Ce déchet est récupéré d'une marbrerie de Larbâa Nath Irathen. Le marbre est fourni sous forme de pâte humide (voir Figure II.1).



Figure II. 1: Déchet de marbre récupéré.

La pâte est dans un premier temps séchée à une température 105 °C. Les mottes de marbre obtenues sont par la suite broyées pour disperser la poudre. La poudre grossière est concassée pour réduire son diamètre et optimiser la quantité à récupérer. Nous avons alors récupéré par tamisage les fines à diamètre inférieur à 1 mm.

Lorsqu'il est utilisé dans le béton, la poudre à déchets de marbre peut jouer deux rôles distincts: soit comme un substitut du ciment pour améliorer la viscosité du béton ou comme un substitut des agrégats pour améliorer la fluidité du béton, en particulier celui des bétons autoplaçant (Haddad 2007); dans cette étude, il a servi le deuxième but.

Les propriétés chimiques cette addition sont données dans le Tableau II.2.

Tableau II. 2: Propriétés chimiques du déchet de marbre [Division Projets et Réalisations O.RG.M].

Composition	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	MnO	P ₂ O ₅	CO ₂
%	6.51	1.11	0.93	50.75	0.93	0.21	0.22	<0.05	0.02	0.08	39.04

II.2.1.3 Le super-plastifiant

Un super-plastifiant haut réducteur d'eau (MEDAFLOW 30 produit par Granitex) a été utilisé pour la confection des bétons étudiés. Le dosage est donné par rapport au poids du ciment. Il permet d'obtenir des bétons et mortiers de grande qualité en termes de résistance et de fluidité. En plus de sa fonction principale de super-plastifiant, il permet de diminuer considérablement la teneur en eau du béton. MEDAFLOW 30 permet également un maintien d'ouvrabilité sur une longue période (2heures). Sa densité est de 1.07, sa teneur en ions chlore est inférieure à 1g/l et il possède 30% d'extrait sec. Son dosage peut varier de 0.5 à 2% de la masse de ciment selon l'effet souhaité.

II.2.1.4 Eau de gâchage

L'eau utilisée dans cette étude est l'eau du robinet, qui est une eau potable.

II.2.1.5 Granulats

Les granulats utilisés dans cette étude sont :

- **Granulats Naturels (GN)** : Ces granulats ont une forme semi concassée, ils sont de trois classes granulaires délivrées sous les appellations commerciales suivantes : Sable 0/4, Gravier 4/8, Gravier 8/16.

- **Granulats de Béton Recyclés (GBR)** : Deux types de GBR d'état de vieillissement différents sont utilisés GBR récents et GBR vieux. L'idée est de déduire l'influence de l'état de vieillissement des GBR sur la composition du béton.

Les GBR récents sont issus d'un laboratoire de contrôle de qualité des bétons de chantiers, leur classe de résistance est de 20 MPa. Les GBR vieux sont issus d'un vieux chantier démoli qui date des années 80, et exposé aux éléments extérieurs.

Les blocs de béton récupérés sont d'abord concassés manuellement, puis écrêter aux tamis de 4, 8 et 16 mm pour avoir les fractions granulaires de 4/8 et 8/16 mm.

- **Granulats de Déchets de Brique (GDB)** : Ces déchets sont récupérés de la briqueterie de Oued Aïssi, puis concassés manuellement au niveau de notre laboratoire, puis tamisé aux tamis 8 mm et 16 mm pour avoir la fraction granulaire 8 /16.

Les distributions granulaires de ces granulats ont été déterminées selon NF EN 933-1, elles sont représentées sur les Figures II.2, II.3, II.4 et II.5 ci-dessous.

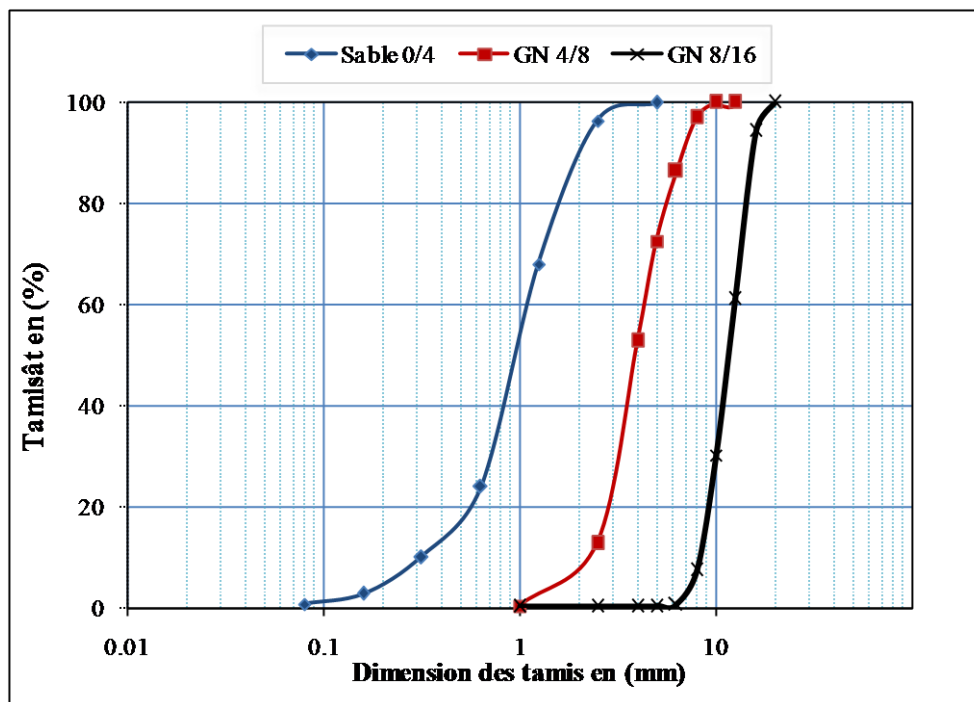
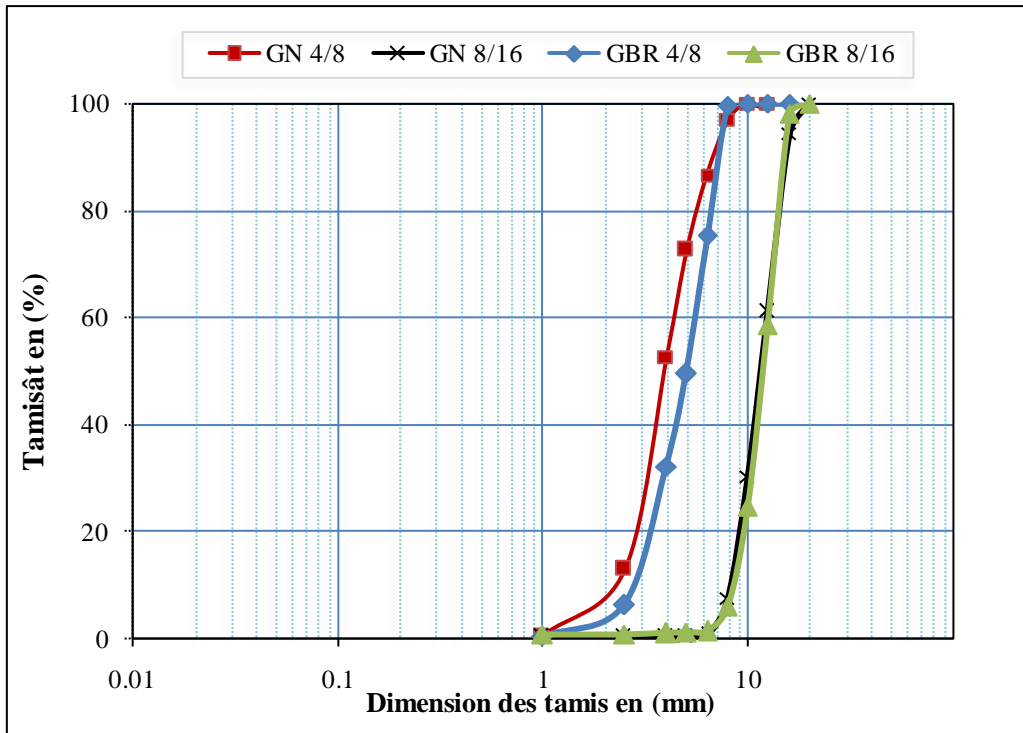


Figure II. 2: Courbes granulaires des granulats naturels.



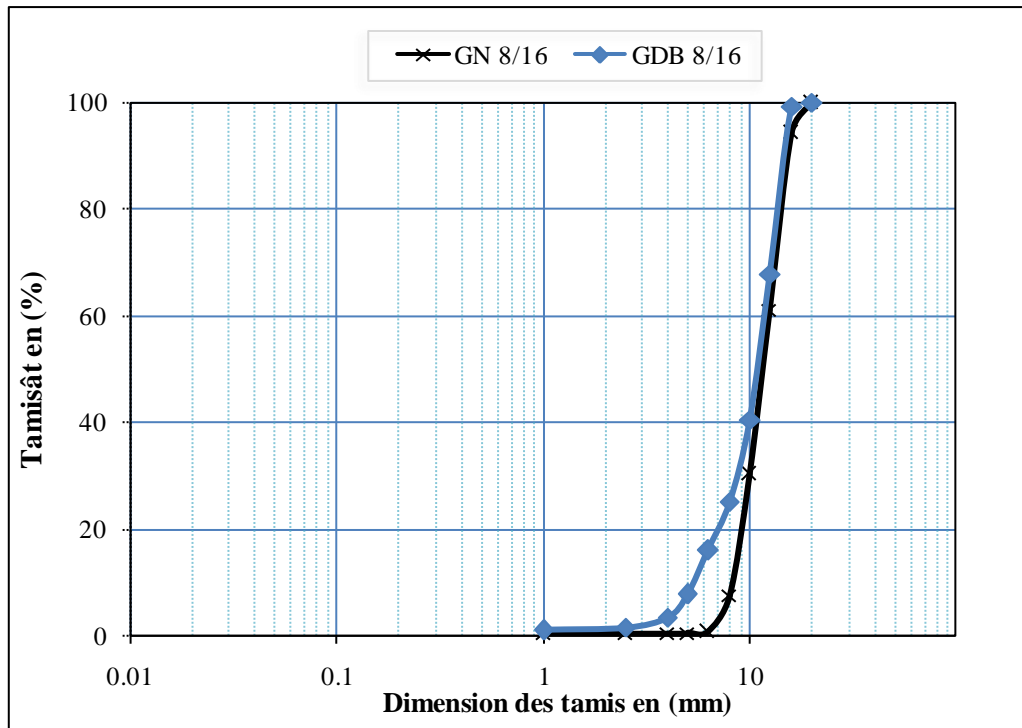


Figure II. 5: Superposition des courbes granulaires des GN et celle des GDB de classe 8/16.

D'après ces analyses granulométriques, on constate que la distribution granulaire des GN et celles des GBR récents, GBR vieux ainsi que les GDB sont très ressemblantes en pourcentages des tamisâts pour chaque taille de tamis.

Les propriétés physiques et mécaniques des granulats utilisés ont été déterminées selon les spécifications EN (NF EN 933-1, NF EN 1097-6.2014, NF EN1097-2, and NF EN 1097-1).

Comme le montre le Tableau II.3, la masse volumique apparente des granulats de béton recyclés récents et vieux était comparable à celle des granulats naturels, et celle des granulats de déchets de brique était légèrement inférieur. Cependant, les GBR récents et vieux ainsi que les GDB ont montré des masses volumiques absolues et saturées à surface sèche inférieures et une absorption d'eau plus élevée par rapport aux GN. Les valeurs d'absorption d'eau des GN 8/16 et GBR récents 8/16 étaient respectivement de 1.15% et de 6.09%. Pour les GN 4/8 (1.38 %) et les GBR récents 4/8 (7.22 %). Ainsi, l'absorption d'eau des GBR était cinq fois supérieure à celle des GN. L'absorption d'eau plus élevée était due à la présence du mortier adhérent à la surface du GBR, qui présentait une structure poreuse. En outre, le GBR contenait des fissures en raison du processus de concassage. Ainsi, le GBR de taille petite a une capacité d'absorption d'eau supérieure à celle du GBR de taille plus grande en raison des quantités relativement plus élevées de mortier adhérent en comparaison au GBR plus gros.

Donc on peut dire que les pores des GBR sont plus connectés entre eux que pour le cas des GN.

Plus un matériau est poreux, plus la connectivité entre les pores est importante et plus sa capacité à absorber des fluide sera importante (Khelidj et al., 2002; Neville 2000).

Pour l'absorption d'eau des GDB on voit qu'il y a une différence significative (environ 12%) en comparaison avec les GN et bétons recyclés, cette valeur est très élevée, ceci peut s'expliquer par sa porosité élevée à la conception de la brique elle-même.

Enfin pour les résultats des essais de Los Angeles et de Micro Deval, on remarque que les GBR ont une résistance à l'usure et à la fragmentation par choc inférieures à celles obtenues sur les GN. Cela peut s'expliquer par l'histoire des GBR et donc à la présence d'un réseau de fissures plus grand dans ces granulats, ce qui augmente leur aptitude à s'endommager davantage.

Tableau II. 3: Résultats de caractérisation des granulats utilisés.

	GN			GBR récents		GBR vieux		GDB
	Sable 0/4	Gravier 4/8	Gravier 8/16	Gravier 4/8	Gravier 8/16	Gravier 4/8	Gravier 8/16	Gravier 8/16
Module de finesse	2.98	-	-	-	-	-	-	-
Mv apparente (kg/l)	2.75	2.73	2.71	2.69	2.67	2.63	2.60	2.53
Mv absolue (kg/l)	2.60	2.63	2.63	2.25	2.30	2.22	2.22	1.97
Mv saturée à surface sèche (kg/l)	2.66	2.67	2.66	2.41	2.44	2.38	2.37	2.19
Absorption (%)	2.09	1.38	1.15	7.22	6.09	6.9	6.56	11.30
Los Angeles (%)	-	21.83	21.47	31.89	34.19	36.70	37.39	-
Micro Deval (%)	-	22.53	22.39	35.91	32.15	38.23	32.70	-

Mv : Masse volumique

Par les observations visuelles des granulats (voir Figure II.6) on constate que les GBR présentent une surface rugueuse et spongieuse en la comparant à celle des GN qui ont une surface plutôt uniforme présentant moins de pores, alors que pour celle de grains de brique concassés, a la forme angulaire aigue. La texture des particules des gros granulats issues du béton concassé est couverte d'une couche relativement non négligeable de mortier de ciment.



Figure II. 6: granulats naturels, granulats de béton recyclés, granulats de déchets de brique de fraction (8/16).

Les observations au Microscope à Balayage Electronique (MEB), ont permis de visionner la microstructure des GN et des GBR, ainsi que leur composition chimique.

Ces analyses sont effectuées sur un appareil LEICA S430i. Le canon à électron est un filament de tungstène chauffé par effet joules. Les observations sont effectuées en mode électron rétrodiffusé BET (Backscattered Electron Imaging). Ce mode d'observation donne accès à un contraste en fonction de la composition chimique. La quantité d'électrons rétrodiffusés ressortant de l'échantillon dépend de la nature chimique des couches traversées. Le taux d'émission électronique augmente avec le numéro atomique. La résolution spatiale dans ce mode de fonctionnement est d'environ 100nm.

La Figure II.7 montre les GN qui sont uniformes présentant moins de pores et de très légères fissures, sont composés principalement de Silicium (Si) et de quelques autres minéraux en faible pourcentage comme l'aluminium (Al), le fer (Fe) et le titane (Ti).

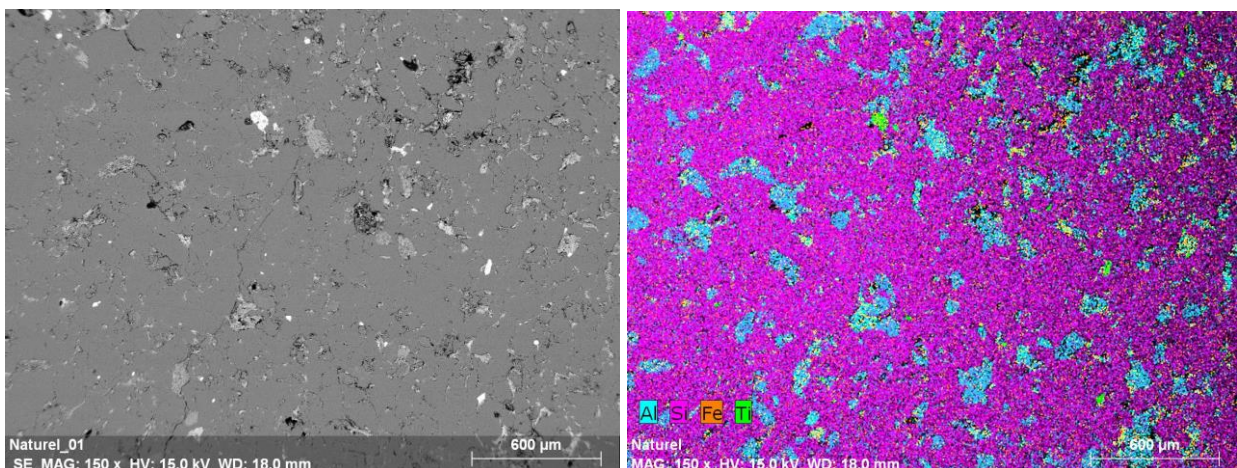


Figure II. 7: Observation au MEB des granulats naturels.

La Figure II.8 montre que les GBR sont hétérogènes, composés de plusieurs grains, relié par une pâte de ciment durcie. Ces granulats présentent de fissures et sont plus poreux. On a observé par ailleurs des taches blanches, correspondant à des grains de ciment anhydres. L'analyse chimique montre que ces granulats sont composés de plusieurs éléments chimiques, les principaux sont le calcium (Ca), le potassium (K), le silicium (Si), le fer (Fe) et le titane (Ti).

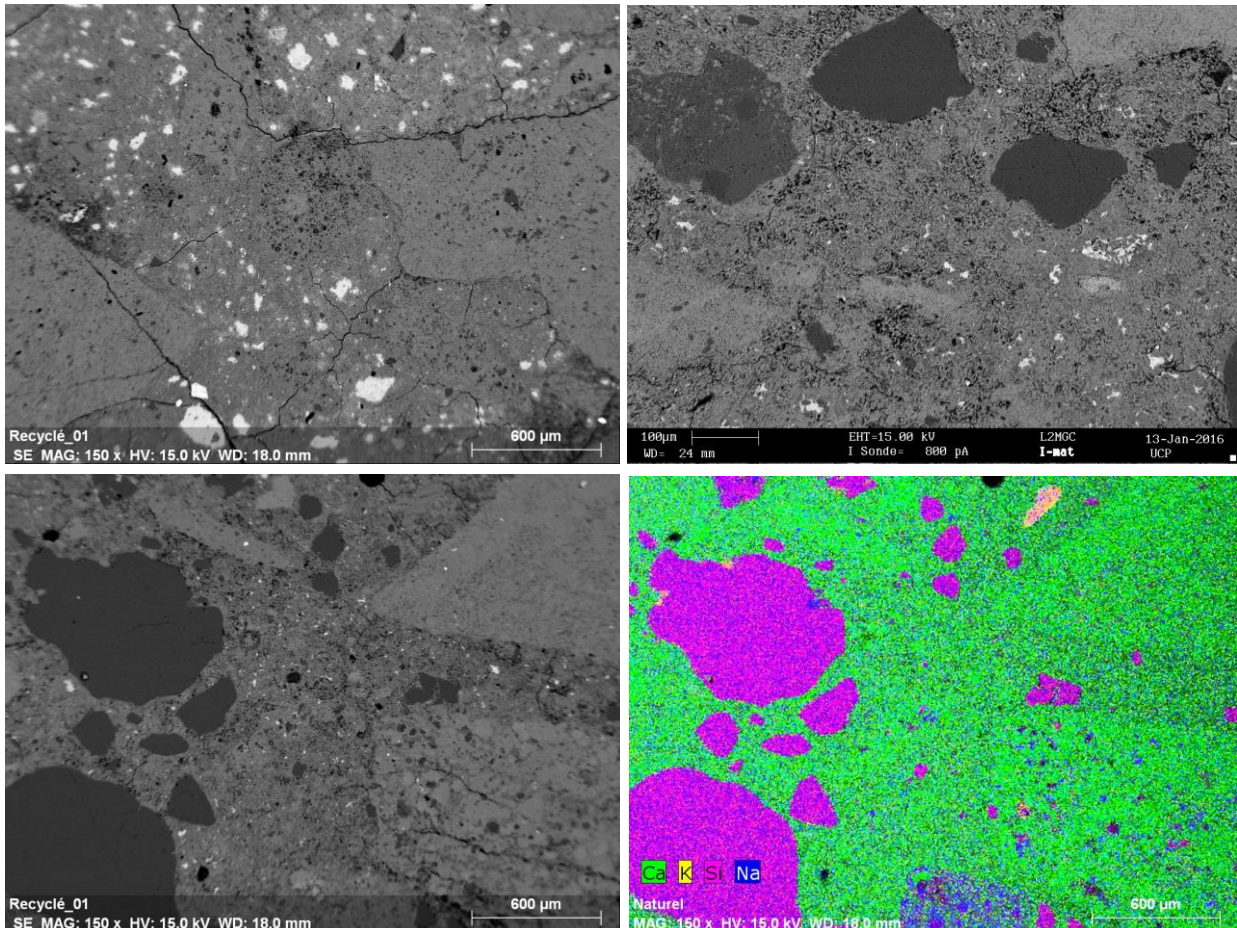


Figure II. 8: Observation au MEB des granulats de béton recyclés.

II.2.2 Méthodologie adoptée pour la conception des compositions de béton

La confection des bétons est menée dans le souci d'identifier l'influence du taux de substitution des granulats naturels par les granulats recyclés sur les paramètres d'étude. Pour bien mener l'étude comparative, nous avons formulé des bétons à mêmes volumes de pâte, mêmes volumes solide, mêmes rapport G/S et mêmes quantités de ciment. Nous avons souhaité des bétons fluides à mettre en place par simple piquage et des bétons autoplaçants à mettre en place sans vibration. Nous avons alors décidé de formuler des bétons à rapport G/S proche de 1 (Baron et Ollivier 1999, Dreux et Festa 1998). Pour optimiser la fluidité de nos bétons nous avons introduit les fines de marbre à un dosage de 250 kg/m^3 pour les bétons fluides, et de 300 kg/m^3 pour les BAP.

Les bétons formulés ont un rapport eau efficace /ciment égal à 0.50 et 0.43 pour les bétons fluides et les BAP, respectivement.

II.2.2.1 Formulation des bétons

Pour la formulation d'un béton fluide, il faut satisfaire deux propriétés qui sont opposés. Une bonne fluidité contre une bonne viscosité ; soit une bonne capacité d'écoulement sans ségrégation des différentes phases du béton. Ceci rend la phase de formulation plus complexe et plus pointue que les bétons ordinaires vibrés. Les meilleures caractéristiques rhéologiques du béton sont obtenues par le choix des proportions optimales des différents constituants.

Pour la formulation du béton fluide, nous sommes d'abord passés par les étapes de formulation des bétons ordinaires en termes de résistance et de fraction volumique d'un volume de 1 m³ de béton. Nous avons donc utilisé la méthode de Dreux Gorisse. Pour la formulation du squelette granulaire de notre béton de référence, nous avons utilisé les courbes des granulats naturels (sable et gravillons 4/8 et 8/16 pour tracer une première courbe granulaire du béton prescrite par la méthode de Dreux Gorisse. Nous avons alors défini les proportions granulaires de ces trois granulats.

Une fois, tous les composants d'un béton sans les additions de marbre sont obtenus, nous avons alors, repris cette formule, nous avons substitué une partie du volume solide prévu pour les granulats, nous l'avons remplacé par des fines de marbre, tout en préservant les proportions volumiques des trois granulats utilisés (voir Figure II.9).

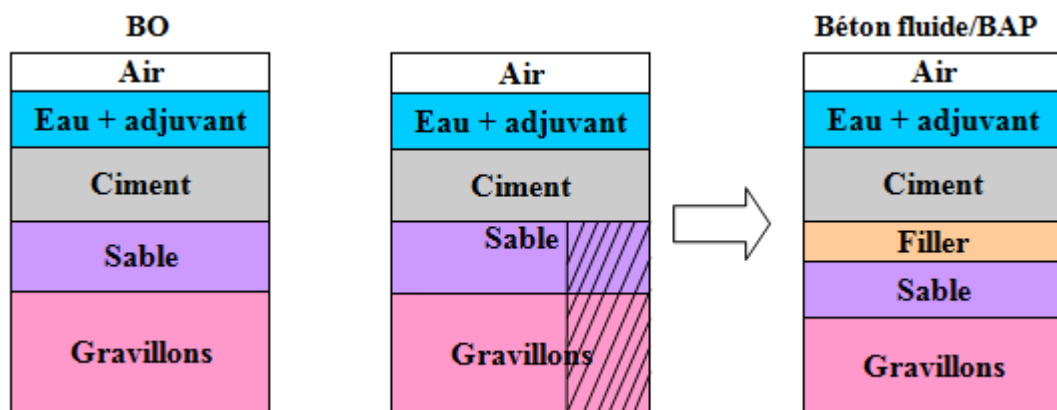


Figure II. 9: Comparaison entre une composition de béton fluide et celle d'un béton vibré.

Nous avons en dernier réajusté les proportions de chacun des granulats pour que la courbe granulaire finale s'ajuste au mieux avec le fuseau des bétons fluides. Une fois la formule connue, on passe à l'étape test de la formule en laboratoire pour le réajustement, pour avoir la formule (composition) de référence (Bréf) à utiliser pour le reste de l'étude.

Plusieurs compositions de bétons sont formulées. La première composition étant la composition de référence (B réf) à 100 % de GN. Pour définir la composition des bétons fluides à base de granulats de recyclage (**BR**), nous avons repris la composition de référence (B réf), et nous avons alors fait une substitution volumique des granulats naturels par les granulats recyclés, et cela à différents pourcentages.

Ici nous avons donné les noms des compositions en fonction des pourcentages des granulats recyclés.

Tableau II.4: Nomenclature des compositions de béton autoplaçants (BAP).

	% GBR récents 8/16	% GDB8/16
BAP réf	0	0
BAP30/0	30	0
BAP50/0	50	0
BAP70/0	70	0
BAP100/0	100	0
BAP50/50	50	50
BAP25/25	25	25
BAP0/50	0	50

Tableau II.5: Nomenclature des compositions de béton fluides à base de GBR récents.

	% GBR4/8	% GBR8/16
B réf	0	0
BR20	0	20
BR40	0	40
BR60	0	60
BR80	0	80
BR100	0	100
BR60/60	60	60
BR100/100	100	100

Tableau II. 6: Nomenclature des compositions de béton fluides à base de GBR vieux.

	% GBR4/8	% GBR8/16
BRV20	0	20
BRV40	0	40
BRV60	0	60
BRV80	0	80
BRV100	0	100
BRV60/60	60	60
BRV100/100	100	100

Le dosage en SP a été fixé de manière à avoir des étalements au cône d'Abrams compris entre 350 mm et 450 mm pour les bétons fluides et entre 600 mm et 800 mm pour les bétons autoplaçants. Les différentes compositions de 1 m³ de béton ainsi formulées sont données dans le Tableau II.7, Tableau II.8, et le Tableau II.9.

Tableau II. 7: Compositions des différentes formules de BAP (kg/m³).

	BAP réf	BAP 30/0	BAP 50/0	BAP 70/0	BAP 100/0	BAP 50/50	BAP 25/25	BAP 0/50
Eau totale	168.8	170	174	176	178	190	180	187
Ciment	350	350	350	350	350	350	350	350
Poudre de marbre	300	300	300	300	300	300	300	300
Sable	643.5	643.5	643.5	643.5	643.5	643.5	643.5	643.5
GN4/8	300	300	300	300	300	300	300	300
GN8/16	620	470	351	260	-	-	351	350
GBR8/16	-	250	364	450	600	340	232	-
GDB8/16	-	-	-	-	-	310	214	327
Superplastifiant	4.48	4.48	4.48	4.48	4.48	4.48	4.48	4.48

Tableau II. 8: Compositions des différentes formules de béton fluide à base de GBR récents (kg/m³).

	B réf	BR20	BR40	BR60	BR80	BR100	BR60/60	BR100/100
Eau totale	200.4	207.2	213.6	219.8	225.5	231.5	228.8	246.2
Ciment	350	350	350	350	350	350	350	350
Poudre de marbre	250	250	250	250	250	250	250	250
Sable	643.5	643.5	643.5	643.5	643.5	643.5	643.5	643.5
GN4/8	286.0	286.0	286.0	286.0	286.0	286.0	109.8	-
GN8/16	699.8	547.8	401.8	261.8	105.2	-	-	-
GBR4/8	-	-	-	-	-	-	261.8	258.1
GBR8/16	-	139.4	273.4	401.8	524.6	642.0	401.8	642.0
Superplastifiant	3.78	3.78	3.78	3.78	3.78	3.78	3.78	3.78

Tableau II. 9: Compositions des différentes formules de béton fluide à base de GBR vieux
(kg/m³)

	B réf	BRV20	BRV 40	BRV 60	BRV 80	BRV 100	BRV 60/60	BRV 100/100
Eau totale	200.4	207.7	214.6	221.2	227.4	233.3	229.6	246.9
Ciment	350	350	350	350	350	350	350	350
Poudre de marbre	250	250	250	250	250	250	250	250
Sable	643.5	643.5	643.5	643.5	643.5	643.5	643.5	643.5
GN4/8	286.0	286.0	286.0	286.0	286.0	286.0	109.8	-
GN8/16	699.8	544.5	397.0	257.0	124.61	-		
GBR4/8	-	-	-	-	-	-	261.8	258.1
GBR8/16	-	138.4	270	394.62	512.48	623.6	401.8	642.0
Superplastifiant	3.78	3.78	3.78	3.78	3.78	3.78	3.78	3.78

Les quantités des granulats sont données en masses sèches.

II.3 Procédures expérimentales

Les essais expérimentaux de cette étude ont été exclusivement réalisés sur des échantillons de béton obtenus par coulage dans différents moules.

II.3.1 Fabrication du béton

Pour uniformiser les essais, nous avons décidé de travailler avec des granulats secs. Il a donc fallu mettre en étuve tous les granulats pour sécher pendant au moins 24 heures. Après séchage, faire en sorte que tous les granulats soient ramenés à température ambiante et les mettre en sac pour éviter qu'ils reprennent de l'humidité.

Préparer les moules prévus pour les éprouvettes de béton, les moules sont huilés pour faciliter le décoffrage.

Préparer les pesées des matériaux à utiliser (gravillons, ciment, filler...). Séparer l'eau en deux quantités ($\approx 10\%$ pour l'humidification des granulats et $\approx 90\%$ le reste d'eau prévue pour le béton).

Le malaxeur utilisé pour la fabrication des bétons est un malaxeur à axe vertical planétaire.

Après avoir déterminé les proportions de chaque composant, la séquence de malaxage retenue a été la suivante :

- Humidifier tout le matériel à utiliser ;
- Introduire le sable et les gravillons dans le malaxeur ;
- Mettre le malaxeur en marche pour homogénéiser le mélange sec pendant 30 s ;

- Laisser le malaxeur en marche et ajouter progressivement l'eau de pré-humidification et le mélanger pendant 30 s ;
- Ajouter le ciment et la poudre de marbre, ensuite mélanger le tout durant 30 s ;
- Verser l'eau restante graduellement et laisser malaxer pendant 60 s ;
- Introduire le super-plastifiant et malaxer pendant 1mn 30 s.
- Effectuer immédiatement les essais de caractérisation du béton frais.
- Remplir les moules d'éprouvettes par simple versement (sans vibration).

La mise en place a été effectuée dans les différents moules destinés aux échantillons correspondants aux essais programmés. Les bétons fluides ont été mis en place par simple piquage, en maintenant le nombre de coups de piquage constant sur toutes les éprouvettes et sur les différents bétons. Les bétons autoplaçants n'ont subi aucune vibration, ni autre méthode de compaction.

Une fois coulés, les échantillons ont été recouverts d'un film plastique pour éviter l'évaporation de l'eau. Le démoulage a été effectué en un jour.

Après la période de durcissement requise, les échantillons ont été retirés du bac d'eau et leurs surfaces ont été essuyées. Outre la mesure des propriétés fraîches (ouvrabilité), les essais suivants ont été réalisés sur le béton durci :

a- Propriétés de résistance

- Résistance mécanique en compression (NF EN 12390-3)
- Résistance mécanique en flexion (NF EN 12390-5)

Ces propriétés ont été déterminées à l'âge de 28 jours

b- Propriétés de durabilité

- Porosité ouverte (accessible à l'eau)
- Absorption d'eau par capillarité

Ces propriétés ont été déterminées uniquement sur les bétons fluides de GBR récents.

c- Test non destructif

Des essais de vitesse des ondes ultrasoniques ont été effectués sur des éprouvettes de bétons fabriqués avec des GBR récents

II.4 Essais sur bétons frais

La plupart des formulations de BAP sont conçues actuellement de manière empirique (Okamura et Ouchi, 2003, AFGC, 2000). Cependant on doit concilier deux caractéristiques à priori contradictoires la fluidité et la ségrégation. Par conséquent les BAP doivent satisfaire plusieurs tests. Nous avons choisi trois qui sont recommandés par (AFGC 2000) qui permettent de caractériser les principales propriétés du BAP à l'état frais (la fluidité et la stabilité statique et dynamique, en milieu libre et confiné) : l'étalement au cône d'Abrams, l'écoulement à la boîte en L et la stabilité au tamis. Les essais de caractérisation ont été effectués selon les procédures décrites au chapitre I (voir § I.6.1).

II.4.1 Etalement des bétons

L'essai d'étalement est effectué sur les BAP ainsi que les bétons fluides. L'essai au cône d'Abrams est l'un des essais les plus couramment utilisés car il est très simple à mettre en œuvre. Cet essai est traditionnellement utilisé pour mesurer l'affaissement d'un béton et ainsi de définir son caractère plus ou moins plastique « norme NFP 18 451 soit NA 431 ».

L'affaissement des bétons fluides ou les BAP étant total, c'est une mesure du diamètre de la galette obtenue après étalement qui est réalisée. Cette mesure permet de déterminer la capacité du matériau à s'écouler en milieu non confiné donc sans obstacle. (Voir Figure II. 10). Lors de l'essai d'étalement une observation visuelle peut nous renseigner sur la stabilité du béton (absence de ségrégation).

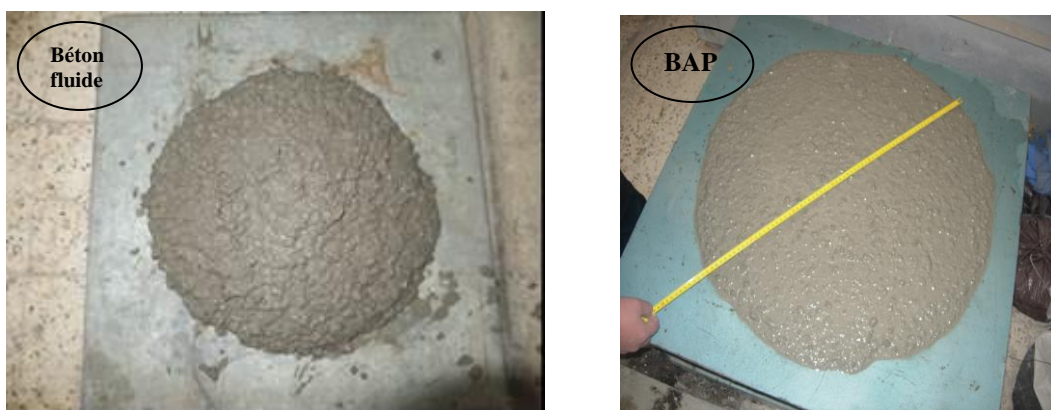


Figure II. 10: Essai d'étalement.

II.4.2 Essai de la stabilité au tamis

L'essai au tamis effectué sur les BAP est utilisé pour caractériser la stabilité du béton, soit son caractère à résister à la ségrégation statique : descente des gros gravillons par l'effet de la gravité et remonté de la pâte qui est légère.



Figure II. 11: Photo descriptive de l'essai de stabilité au tamis (le tamis est de 5 mm).

Cet essai nous permet également de voir s'il y a un problème de ressuage précoce (soit dans les 15 minutes après la gâchée) (voir Figure II. 11).

II.4.3 Essai de la boîte en L

L'essai de la boîte en L est effectué pour le BAP seulement, il permet d'évaluer la capacité de remplissage en milieu confiné ainsi que le risque de blocage (Voir Figure II. 12).



Figure II. 12: Photo descriptive de l'essai de la boîte en L

II.5 Essais sur béton durci

II.5.1 Essai de résistance à la compression

La résistance mécanique en compression d'un béton correspond à la charge de rupture (charge maximale enregistrée) au cours de l'essai d'écrasement sous une contrainte normale axiale. La mise en charge doit se faire d'une manière continue jusqu'à la rupture de l'éprouvette (voir Figure II. 13).

Les éprouvettes utilisées pour déterminer la résistance mécanique en compression des différents bétons étudiés sont cylindriques de diamètre 15cm et de hauteur 30 cm, suivant la norme NF EN 12390-3.

La presse utilisée est d'une capacité maximale de 2000 KN, (voir Figure II. 13). Les essais ont été réalisés avec une vitesse de chargement de 0.5 MPa/s.



Figure II. 13: Rupture de l'éprouvette ; La presse utilisée.

II.5.2 Essai de flexion

La résistance à la flexion est un test indirect bien connu utilisé pour déterminer la résistance à la traction du béton. La résistance à la traction est l'une des propriétés fondamentales les plus importantes du béton. Une prédiction précise de la résistance à la traction du béton aidera à atténuer les problèmes de fissuration, à améliorer la prédiction de la résistance au cisaillement et à minimiser la rupture du béton. Des cubes prismatiques (100 mm x100 mm x 400 mm) selon la norme NF EN 12390-5, ont été utilisés à l'âge de 28 jours.

Le chargement mécanique est appliqué à l'aide d'un bras hydraulique à mi travée de la poutre à travers un système d'appui rigide. La machine d'essai est de type ELE (IBERTEST) de capacité de 200 KN (voir Figure II. 14), équipée d'une chaîne d'acquisition et de contrôle numérique. Un traitement statistique automatique est réalisé à chaque fin de série de test. L'essai est piloté en force, lors de l'essai, l'effort, le déplacement vertical au milieu de la poutre, les déformations sont relevées automatiquement. La vitesse de chargement est de 10 m/s.

Si P est la charge de flexion maximale produisant la rupture du prisme (voir Figure II.14), la résistance à la traction par flexion se calcule comme suit :

$$f_{ctm-fl} = \frac{3Pl}{2bh^2} \quad (\text{II.1})$$

Avec P la charge maximale, l la portée libre, b la largeur et h la hauteur du prisme.



Figure II. 14: La presse utilisée; Rupture de l'éprouvette.

II.5.3 Porosité ouverte et absorption par immersion

Ces propriétés sont mesurées selon la procédure AFREM (AFPC 97) sur des éprouvettes 15x30cm. La porosité ouverte est une grandeur intéressante du point de vue microstructural car elle influe sur les propriétés de transfert des bétons. L'essai dure 24 heures et commence par l'imbibition des échantillons : le corps d'épreuve est placé dans un dessiccateur, dans lequel est maintenu le vide (pression inférieure ou égale à 25 mbars) pendant quatre heures. Une fois les quatre heures écoulées, l'eau d'immersion est progressivement introduite de façon à ce que le corps d'épreuve soit recouvert d'environ 20 mm d'eau. Pendant le remplissage, aucune entrée d'air ne doit se produire. Pendant 20 heures, cette pression réduite est conservée dans le dessiccateur.

La détermination de la masse de l'échantillon immergé peut ensuite être réalisée. Le corps d'épreuve est placé sur un panier de pesée hydrostatique et est totalement immergé sans contact avec le fond du récipient. Le corps d'épreuve est pesé à 0,01 g près et sa masse immergée (M_{eau}) est ainsi obtenue. La masse volumique de l'eau d'immersion est prise égale à 1000 kg/m^3 .

L'échantillon est sorti de l'eau et essuyé rapidement et soigneusement à l'aide d'un chiffon humide pour éliminer l'eau superficielle sans toutefois retirer l'eau des pores. L'échantillon est placé sur la balance et la masse de l'échantillon à l'air libre relevée est notée M_{sat} (en kg).

Pour évaluer la masse sèche nous avons introduit les éprouvettes dans une étuve réglée à une température de 60°C , suffisamment longtemps, jusqu'à ce que la masse des éprouvettes se stabilise à une valeur constante (sur 24 heures la variation de la masse est inférieure à 1 %).

Généralement, les éprouvettes satisfont cette condition après environ 3 semaines. On note la valeur de la masse de l'échantillon à l'état séché (M_{sec}), en kilogrammes.

Les différentes propriétés de l'échantillon sont ensuite exprimables à partir des valeurs déterminées précédemment.

Les masses volumiques du béton saturé $M_{V_{sat}}$ et séché $M_{V_{sec}}$ à l'étuve sont alors données par les formules suivantes :

$$M_{V_{sec}} = \frac{M_{sec}}{V} = \frac{M_{sec}}{M_{sat} - M_{eau}}, \text{ et } M_{V_{sat}} = \frac{M_{sat}}{V} = \frac{M_{sat}}{M_{sat} - M_{eau}} \quad (\text{II.2})$$

Où V : volume de l'échantillon en (m^3),

$M_{V_{eau}}$: masse volumique de l'eau en (kg/m^3),

L'eau évaporée par séchage occupe le volume des pores accessibles à l'eau, la masse sèche et la masse à saturation nous permettent donc d'estimer la porosité accessible à l'eau et donc ouverte. La porosité notée P_o et exprimée en pourcentage (%) est calculée par l'équation [2].

$$p_o = \frac{M_{sat} - M_{sec}}{M_{V_{eau}} \times V} \times 100 = \frac{M_{sat} - M_{sec}}{M_{V_{eau}} \times (M_{sat} - M_{eau})} \times M_{V_{eau}} \times 100 \quad (\text{II.3})$$

$M_{V_{eau}}$: masse volumique de l'eau en (kg/m^3)

A partir des masses volumiques du béton saturé et séché à l'étuve, l'absorption par immersion (Abs) peut être calculée par la relation suivante :

$$Abs = \frac{M_{sat} - M_{sec}}{M_{sec}} \times 100 \quad (\text{II.4})$$

Où : $M_{saturée}$ et $M_{sèche}$ sont données en (kg), elles sont respectivement masse de l'éprouvette saturée et masse de l'éprouvette séchée.

II.5.4 Essai d'absorption par capillarité

L'absorption d'eau par capillarité a été déterminée des échantillons cylindriques d'un diamètre de 150 mm et d'une hauteur de 100 mm selon les recommandations AFPC-AFREM (AFPC, AFREM, 1997). L'essai consiste à mesurer la masse d'eau absorbée par une éprouvette de béton préalablement conditionnée par un étuvage à 80°C (trois échantillons par composition).

Le préconditionnement des échantillons est le suivant :

- Après démoulage, les échantillons sont conservés dans un bac rempli d'eau à la température ambiante jusqu'à l'âge de 28 jours (norme NF P 18-404).
- A l'issue de la période de cure, les échantillons sont conservés dans une étuve ventilée à $80 \pm 2^\circ\text{C}$. Durant cette période, le suivi de la masse est réalisé à intervalle de temps régulier, jusqu'à ce que la variation de masse entre deux pesées espacées de 24 heures soit inférieure à 0,01%. Les éprouvettes sont alors placées dans des sacs étanches puis remises dans l'étuve ventilée à $80 \pm 2^\circ\text{C}$ pendant 10 jours, afin de favoriser l'équilibre hydrique dans l'échantillon. Le sac est ensuite extrait de l'étuve puis conservé 12 heures à une température de $20 \pm 2^\circ\text{C}$.
- A l'issue de ce retour en température, l'éprouvette est sortie du sac. Sa surface latérale est recouverte d'une feuille d'aluminium auto-adhésive pour éviter l'évaporation latérale de l'eau absorbée durant l'essai
- Le côté inférieur de l'éprouvette a été placé dans l'eau jusqu'à une profondeur de 5 mm. Pour que le fond de ces éprouvettes soit accessible à l'eau on a mis des billes au fond du bac. L'échantillon a été retiré périodiquement et pesé pour déterminer la quantité d'eau absorbée.

L'essai d'absorption capillaire est réalisé à la suite de ce préconditionnement. Il consiste à suivre l'évolution de la masse des éprouvettes plongées de 5 mm dans de l'eau (Figure II. 15). Les échéances de mesure sont les suivantes : $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$, 1, 2, 4, 8, 24 et 72 heures.

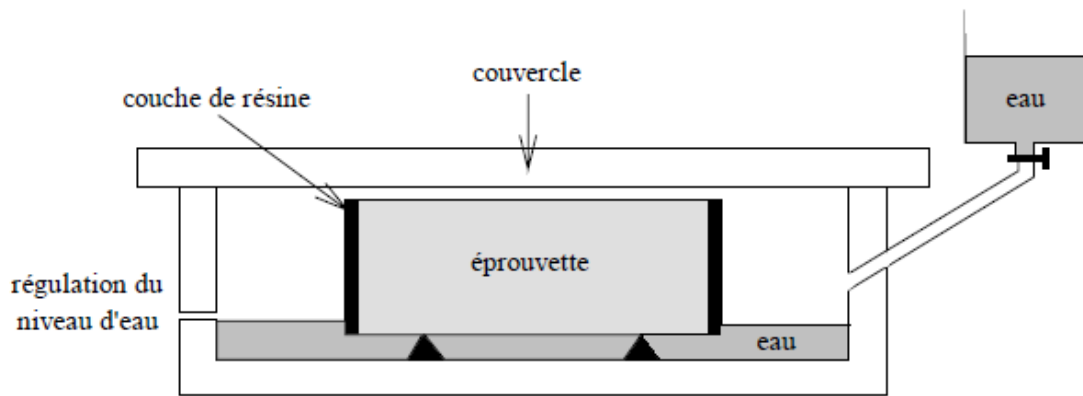


Figure II. 15 : Dispositif expérimental de mesure d'absorption d'eau par capillarité.

Le coefficient d'absorption capillaire est calculé par la relation suivante :

$$C_a = \frac{M_x - M_0}{A}, \text{ en kg/m}^2 \quad (\text{II.5})$$

Où M_x : masse de l'éprouvette à une échéance donnée (kg), M_0 est la masse initiale de l'éprouvette (kg), A est la section de l'éprouvette (m^2).

II.5.5 Essai non destructif

Au-delà des essais d'absorption d'eau par immersion et donc de porosité ouverte, les éprouvettes destinées à cet essai sont également utilisées aux essais à l'ultrason.

La méthode des ultrasons consiste à mesurer le temps de déplacement d'une impulsion ultrasonique traversant le béton à tester. Le circuit du générateur d'impulsions comprend un circuit électronique pour générer une impulsion et un transducteur pour transformer ces impulsions électroniques en énergie mécanique ayant une fréquence de vibration de 54 KHz. Le temps de déplacement de l'onde entre l'émetteur et le récepteur est mesuré électroniquement. La longueur du trajet entre les transducteurs divisé par le temps de déplacement donne la vitesse moyenne de propagation des ondes.

Pour évaluer la relation entre les VOU et le degré de saturation des bétons, nous avons testé les éprouvettes à plusieurs états de saturation (d'humidité).

A saturation les éprouvettes étaient essuyées en surface par du papier absorbant puis pesées, elles étaient ensuite testées à l'ultrason. Pour la mesure de la VOU nous avons utilisé l'appareil Pundit Lab+ (Schwerzenbach 2012). La VOU a été obtenue par transmission directe selon la norme EN 12504-4. Trois mesures sont prises au centre des surfaces latérales de chaque cylindre, dans une

direction perpendiculaire à la surface de béton comme montré sur la Figure II. 16. Pour assurer un couplage acoustique entre les transducteurs et la surface à tester une fine couche de couplant est appliquée sur le transducteur et sur la surface.



Figure II. 16: Mesure de vitesse de propagation des ondes ultrasonique.

Pour passer d'un état de saturation à un autre les éprouvettes étaient remises dans l'étuve à 60°C et pesées régulièrement de manière à les tester aux états de saturation souhaités (saturation intermédiaire comprise entre les valeurs de $S_r = 100\%$ et $S_r = 0\%$).

Pour chaque état de saturation, avant les essais à l'ultrason, les éprouvettes étaient introduites dans des sacs hermétiques pendant 24 heures pour les refroidir à la température de 20°C et empêcher l'évaporation de l'eau encore contenue à l'intérieur des éprouvettes. A 24 heures, les éprouvettes étaient testées à l'ultrason, puis remises à l'étuve pour poursuivre leur séchage pour l'échéance suivante. Ainsi, les éprouvettes étaient pesées et testées à l'ultrason à plusieurs échéances de séchage.

Six états de saturation sont considérés: Saturation complète ($SR=100\%$), quatre saturations intermédiaires ($SR= 40\%$, $SR= 15\%$, $SR= 2\%$, $SR= 1\%$) et état sec ($SR=0\%$).

A chaque saturation intermédiaire correspond une porosité ouverte séchée (P_o). Cette porosité ouverte séchée correspond au volume d'eau évaporée mesuré par rapport à l'état de saturation de 100 %. la porosité (P_o) est exprimée en (%) et elle est calculée par l'équation (II.3) précédente.

II.6 Méthodes d'évaluation statistique

II.6.1 La plus petite différence significative

Les résultats de chaque test ont été évalués pour estimer leur significativité statistique. Cette évaluation a été effectuée en calculant la différence la moins significative (LSD). Cette valeur représente la plus petite différence entre deux valeurs moyennes, qui peuvent être considérées

comme statistiquement significatives à un niveau de confiance de 95%. Le LSD a été calculé dans chaque cas en utilisant l'analyse de variance (ANOVA) et le test- t de Bonferroni modifié.

Cette méthode d'évaluation tient compte des variations d'un seul facteur et, par conséquent, un LSD distinct a été calculé pour chaque complément d'échantillons pour une variation donnée. Par exemple, la vitesse des ondes ultrasoniques dans B réf, BR20, BR40, BR60, BR80, BR100, pour un niveau de saturation 0% pourrait être comparée à une seule valeur LSD car chacune représente une variation seulement d'un niveau de saturation du béton. Un exemple de la procédure de ce calcul est présenté dans l'annexe A.

II.6.2 Erreur Standard

Lorsque les résultats des tests sont présentés en grands groupes qui excluent l'utilisation de l'évaluation LSD, des erreurs standards des résultats mesurés sont présentés afin d'indiquer le niveau de variation. Les erreurs standards sont des mesures de la dispersion des données dans un ensemble de résultats ayant les mêmes unités de mesure que les données.

II.6 Conclusion

L'étude expérimentale présentée dans ce chapitre porte sur les propriétés physiques et mécaniques de plusieurs types de granulats recyclés. Les GBR et GDB ont montré des masses volumiques inférieures et une absorption d'eau plus élevée par rapport au GN. L'absorption d'eau des GBR était cinq fois supérieure à celle des GN. L'absorption d'eau élevée était due à la présence du mortier adhérent à la surface du GBR, qui présentait une structure poreuse. En outre, le GBR contenait des fissures en raison du processus de concassage. Également les GBR ont une résistance à l'usure et la fragmentation par choc inférieures à celles obtenues sur les GN.

Les granulats étudiés sont ensuite utilisés dans la fabrication de différents bétons de granulats recyclés qui sont également testés.

Plusieurs formulations de BAP et de bétons fluides ont été composées, puis testées pour les différentes propriétés de résistance et de durabilité.

Pour qualifier la durabilité des différents bétons, quelques essais ont été définis : certains sont liés au domaine de la mécanique, comme l'essai à la compression et à la flexion, d'autres concernant le domaine physique, avec par exemple les essais d'absorption et de porosité accessible à l'eau. Tous ces essais devraient permettre de déterminer des propriétés révélatrices, directement ou indirectement, de la durabilité des bétons.

Chapitre III

Résultats et discussions

III.1 Introduction

Dans ce chapitre, les résultats de recherche expérimentale sont présentés et analysés. Les premiers résultats exposés sont les résultats de caractérisation des BAP à l'état frais et à l'état durci (résistance en compression). Ensuite on s'est intéressé à l'étude des bétons fluides de deux catégories (bétons composés de GBR8/16 et bétons composés de GBR4/16). Sur ces bétons, on a présenté les résultats ainsi que leur analyse pour les propriétés à l'état frais et propriétés de résistance telles que les résistances à la compression et à la flexion plus les propriétés de durabilité et ce pour identifier la présence de diverses fractions de substitution des GN par les GBR dans le béton. Ensuite, une technique à ultrasons pour estimer la porosité et la connectivité des pores dans ces bétons est présentée. La méthode est basée sur l'analyse des vitesses des ondes ultrasoniques en fonction des porosités de ces bétons à différentes fractions de substitution, et cela à différents niveaux de saturation. Enfin, une analyse statistique pour les propriétés de résistance et de durabilité ainsi que les VOU est effectuée.

III.2 Résultats et discussions de caractérisation des BAP à l'état frais et durci

III.2.1 A l'état frais

Les différents résultats obtenus sur les BAP à l'état frais sont récapitulés dans Tableau III.1 suivant :

Tableau III. 1 : Propriétés à l'état frais des diverses formulations de BAP.

	Étalement (mm)	Stabilité au tamis (%)	Taux de remplissage L_{Box} : (%)	Appréciation visuelle du la galette d'étalement
BAP réf	610	1.5	96	Absence de ségrégation
BAP 30/0	770	11.3	90	La galette présente près de 2 mm de laitance sur sa périphérie.
BAP 50/0	620	0.5	89	Absence de ségrégation
BAP 70/0	700	5.2	92	Absence de ségrégation
BAP 100/0	740	6.1	87	Absence de ségrégation
BAP 50/50	720	3.4	96	Absence de ségrégation
BAP 25/25	680	1.4	81	Absence de ségrégation
BAP 0/50	720	3.6	85	Absence de ségrégation

Avec le super-plastifiant utilisé nous avons pu avoir des bétons auto-plaçant et cela dans la plage des dosages prescrite dans la fiche technique du produit (soit 2 %).

III.2.1.1 L'étalement des BAP

L'étalement d'un béton autoplaçant peut varier entre 550 et 850 mm selon l'association française du génie civil (AFGC 2000). Les résultats obtenus présentés sur le Tableau III.1, montrent que tous nos bétons ont des valeurs d'étalement situées à l'intérieur du domaine des BAP.

Pour toutes les compositions de BAP, l'auréole de laitance à la périphérie des galettes de béton était absente ou très faible (de 1 à 2 mm). De plus, les gros granulats ont toujours été entraînés correctement par la pâte cimentaire et ne sont pas restés amoncelés au milieu des galettes de béton.

Nos bétons présentent un bon étalement sans ségrégation, donc cette composition respecte le critère d'étalement d'un BAP.

III.2.1.2 Essai de la boîte en L

Sur la ségrégation dynamique des BAP : l'essai de la boîte en L est exploité au travers du taux de remplissage (rapport des hauteurs de béton en fond et en début de boîte), qui doit en principe être supérieur à 0.8 (AFGC 2000). Les résultats mesurés donnent des taux de remplissage qui s'inscrivent dans le domaine des BAP, elles sont supérieures à 80 %.

III.2.1.3 Essai de la stabilité au tamis

L'essai de stabilité au tamis permet de calculer un taux de ségrégation et de déduire si le béton testé possède une stabilité satisfaisante ou non. Tous les BAP ont présentés une bonne stabilité au tamis, pas de ségrégation statique. En effet, la quantité de laitance est située dans le domaine des BAP (voir Tableau III. 1), soit inférieure à 20 % pour tous les BAP validés.

On tient toutefois à signaler que pour les BAP réf, 50/0, 50/50, 25/25, et 0/50 on a relevé une laitance $P < 5$ %, la résistance à la ségrégation est dite « importante ». Selon la réglementation, lorsque la stabilité au tamis est inférieure à 5 %, il y a lieu d'accorder plus d'attention quant à l'écoulement des bétons dans les éléments fortement ferraillés.

Pour les BAP 30/0, 70/0 et 100/0 ont une laitance $P < 15\%$, stabilité satisfaisante, béton homogène et stable.

III.2.2 A l'état durci

III.2.2.1 Résistance des BAP à 28 jours

La résistance mécanique à la compression est une caractéristique essentielle du matériau béton. Par conséquent, sa détermination a été suivies pour toutes les compositions de béton étudiées dans ce projet. Cette résistance mécanique a été calculée à l'âge de 28 jours par moyenne des résistances d'une série de trois échantillons cylindriques 15x30 cm.

Les valeurs de résistance moyennes à la compression (f_{cm}) ainsi que l'erreur standard (Sd) sont donnés dans le Tableau III. 2. L'erreur standard a été calculée sur des mesures réalisées sur trois éprouvettes du même béton.

Tableau III. 2: Résistances moyennes des BAP et l'erreur standard en (MPa).

	f_{cm} moyenne	Sd	R_{c28-Sd}	R_{c28+Sd}
BAP réf	26.23	1.03	25.10	27.35
BAP 30/0	25.69	1.37	24.57	26.81
BAP 50/0	24.86	0.96	23.74	25.98
BAP 70/0	22.81	2.19	21.69	23.93
BAP 100/0	21.02	0.14	19.90	22.14
BAP 25/25	27.98	0.26	26.76	29.01
BAP 50/50	23.32	1.44	22.20	24.44
BAP 0/50	21.20	1.59	20.07	22.32

Nous rappelons ici que tous les bétons étudiés sont tous formulés à mêmes proportions (pâtes, solides, ciment, addition, $E_{\text{efficace}}/C...$) excepté le volume des GN et des GR.

Notre premier constat porte sur la résistance à 28 jours du BAP de référence. Avec les matériaux utilisés, qui sont des matériaux locaux nous avons pu formuler un béton autoplaçant qui présente une assez bonne résistance mécanique à la compression à 28 jours (26 MPa) tout en sachant que nous avons utilisé un ciment 32.5 et un rapport $E/C = 0.43$.

En ce qui concerne les autres BAP testés, ils ont des valeurs de résistance à 28 jours supérieures à 21.0 MPa et inférieures à 28.0 MPa. Toutes les valeurs sont donc dans une plage de variation égale à (28.0-21.0) soit 9 MPa.

Pour comparer les valeurs de résistance entre les différents BAP, nous avons représenté les valeurs des résistances moyennes sur les mêmes graphiques sous forme d'histogrammes. Nous avons de plus, représenté pour chaque colonne la barre d'erreur correspondant à chacune des valeurs. Pour une meilleure comparaison, nous avons séparé les résultats en deux catégories : BAP de référence et BAP à base de différentes proportions en granulats de béton recyclés ; BAP de référence et BAP à base de différentes proportions en GBR et des GDB.

▪ L'effet des GBR sur la résistance à la compression

Effet des GBR sur la résistance à la compression des compositions de BAP réf (0% GBR, 0% GDB), BAP 30/0 (30% GBR, 0% GDB), BAP 50/0 (50% GBR, 0% GDB), BAP 70/0 (70% GBR, 0% GDB), et BAP 100/0 (100% GBR, 0% GDB) sont montrés sur la Figure III.1

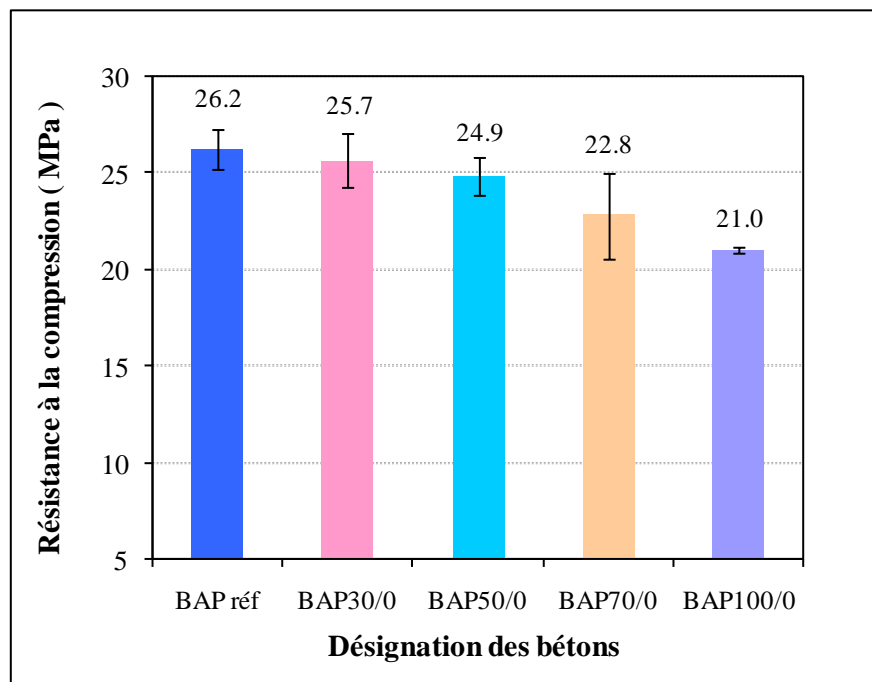


Figure III. 1: Résistances à la compression des BAP.

Ces résultats montrent que la résistance à la compression du béton diminue avec l'augmentation du taux de substitution des GN par des GBR. Ce résultat confirme ce qui est déjà obtenu par d'autres études (Çakır 2014, Hansen et al. 1983, Katz 2003). La relation inverse entre la teneur en GBR et la résistance à la compression est liée aux propriétés mécaniques des GBR décrit au chapitre II. La porosité intrinsèque élevée du mortier adhérent et les fissures résiduelles due au processus du concassage ont créé des zones de faiblesse dans le béton.

En comparant les résultats de résistance deux à deux, on constate que le BAP30/0 et le BAP50/0 ont quasiment les mêmes résistances et leurs résistances sont sensiblement la même que celle du BAP de référence. La différence des résistances entre ces bétons pris deux à deux est de l'ordre de 1 à 2 MPa.

Globalement, on peut conclure que jusqu'à 50 % de substitution des GN par les GBR les bétons résultants se caractérisent par les mêmes résistances (voir Figure III.1). Au-delà de 50 % de substitution la résistance a tendance à baisser.

Toutefois, il est bien de souligner que le fait de substituer aux granulats naturels, en partie ou en totalité, par des granulats de béton recyclés on obtient des bétons de résistances appropriées pour des utilisations structurales.

- **L'effet des GBR et des GDB sur la résistance à la compression**

Sur la Figure III. 2 nous avons représenté les résistances des BAP à granulats naturels et ceux avec des déchets de briques associés aux granulats des bétons de démolition. Dans ce cas, le mélange déchets de briques et granulats de béton de démolition se justifie par le fait que dans les déchets de bâtiment on trouve souvent ce mélange correspondant à la maçonnerie (mortier + brique). Nous avons mélangé ces deux déchets à parts égales (BAP 25/25 et BAP 50/50) ; dans le premier cas nous avons introduit 50 % du volume de gravillons en granulats naturels, dans le deuxième nous n'avons pas mis de granulats naturels (les pourcentages de chacun des constituants sont indiqués sur la nomination des bétons).

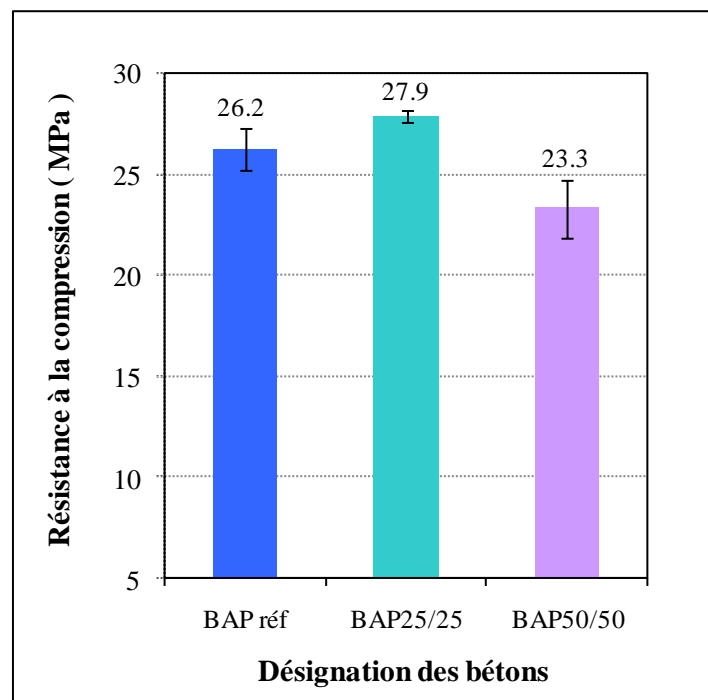


Figure III. 2: Résistances à la compression des BAP.

Encore une fois, on constate que les BAP à granulats de recyclage ont des résistances supérieures à 21 MPa.

La résistance du BAP 50/50 est comparable à celle du BAP réf, elle est en baisse de 11 % par rapport à celle du BAP réf. Une légère augmentation de 6.5 % de la résistance a été observée sur le BAP à 50 % de granulats naturels à 25% des déchets de brique et à 25% de béton recyclés par rapport au BAP à 100% de granulats naturels.

Dans cette partie nous avons souhaité savoir si l'on peut recycler les déchets de brique mélangés aux granulats naturels.

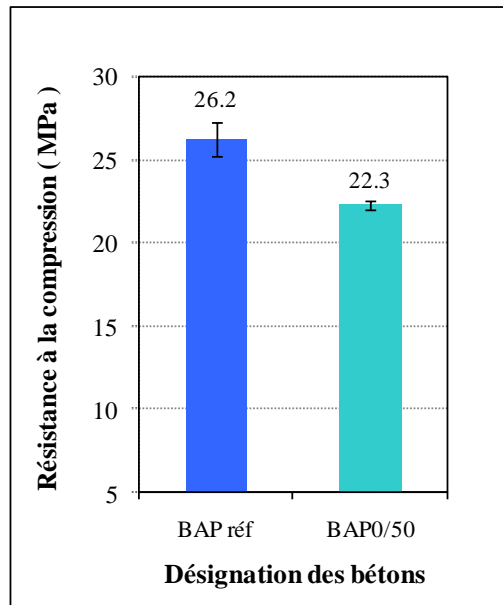


Figure III. 3: Résistances à la compression des BAP.

La réponse est à priori positive. En effet, le BAP à base de granulats naturels à 50 % de volume des gravillons et les déchets de briques à 50 autres pourcent, présente une résistance comparable à celle du BAP de référence (voir Figure III.3).

Si on compare la résistance du BAP 50/50 qui est un BAP à base de 50 % de GBR et 50 % de GDB et celle du BAP 100/0 qui est un BAP à GBR uniquement, on pourra conclure qu'on peut formuler des BAP à base de granulats recyclés. Car dans les deux cas étudiés, nous avons eu d'assez bonnes résistances en comparaison au BAP de référence.

III.2.3 Conclusions

Dans cette étude expérimentale sur les BAP, nous avons fixé comme objectifs l'étude de la possibilité de valorisation et du recyclage des déchets liés à la démolition ou réhabilitation de constructions. On s'est intéressé au recyclage des GBR et GDB.

La substitution des granulats naturels, partielle ou totale, par des granulats recyclés dans un béton offre des gains économiques et environnementaux.

Les résultats obtenus permettent de conclure ce qui suit :

- L'utilisation des déchets de marbre comme filler a été avantageux pour formuler tous nos bétons autoplaçants. Avec cette addition, nous avons pu avoir des BAP à bonne viscosité (pas de ségrégation) sans ajout d'agent de viscosité.
- Avec ce filler (déchet de marbre) et les granulats naturels, nous avons formulé un BAP de référence à une résistance à la compression à 28 jours de 26.2 MPa.

- les BAP formulés à des dosages variables en granulats de béton recyclés à savoir (30%, 50%, 70% et 100%) présentent des résistances similaires à celle du BAP de référence.
- Dans les mêmes conditions, le BAP à base de granulats de déchets de brique (50%) présente une résistance similaire à celle du béton de référence.
- Le BAP à base de GBR à 25% et déchet de briques à 25 % (correspondant plus au moins à un déchet de maçonnerie brique) présente une résistance similaire à celle du béton de référence.

Finalité, tous les BAP formulés par des granulats de recyclages et les déchets de marbre présentent des résistances à la compression supérieures à 21 MPa, cela traduit l'aptitude de ces bétons à être utilisés comme béton prêt à l'emploi dans la construction en générale.

III.3 Résultats et discussions de caractérisation des bétons fluides à l'état frais et durci

III.3.1 A l'état frais

Quand l'affaissement d'un béton est supérieur à 220 mm, on parlera d'un béton fluide (Dreux et al. 1998). Nous rappelons ici que le dosage en SP a été fixé de manière à avoir des étalements au cône d'Abrams compris entre 350 mm et 450 mm. L'idée est de fixer une même ouvrabilité pour les bétons et d'assurer un procédé fixe de la mise en place du béton. Ainsi, une compacité semblable des bétons afin d'éviter d'avoir un impact sur le mode de placement sur la compacité du béton, et donc sa porosité qui est le paramètre clé de cette étude.

Les résultats obtenus présentés sur les Tableaux III. 3 et III.4 montrent que tous nos bétons ont des étalements situés à l'intérieur du domaine des bétons fluides.

Tableau III. 3: Propriétés à l'état frais des bétons à base de GBR récents.

Nomenclature	Etalement D (mm)
B réf	440
BR20	410
BR 40	417
BR 60	400
BR 80	440
BR 100	410
BR 60/60	438
BR 100/100	400

Tableau III. 4: Propriétés à l'état frais des bétons à base de GBR vieux.

Nomenclature	Étalement D (mm)
BRV20	410
BRV 40	417
BRV60	442
BRV 80	445
BR V100	390
BRV 60/60	420
BRV 100/100	390

Pour toutes les compositions de bétons, l'auréole de laitance à la périphérie des galettes de béton était absente. Les gravillons ont toujours été entraînés correctement par la pâte de ciment et ne sont pas restés amoncelés au milieu des galettes de béton. Nos bétons présentent un bon étalement sans ségrégation.

L'utilisation des déchets de marbre comme filler a été avantageux pour formuler tous nos bétons. Avec cette addition, nous avons pu avoir des bétons fluides à bonne viscosité (pas de ségrégation).

III.3.2 A l'état durci

III.3.2.1 Résistance à la compression des bétons fluides à base de GBR récents et vieux

Les valeurs de la résistance moyenne à la compression à 28 jours des différents bétons fluides à base de GBR récents [B réf (0% GBR), BR20 (20% GBR8/16), BR40 (40% GBR8/16), BR60 (60% GBR8/16), BR80 (80% GBR8/16), BR100 (100% GBR4/16), BR60/60 (60% GBR8/16 et 60% GBR 4/8) et BR100/100 (100% GBR8/16 et 100% GBR 4/8)] et celles des bétons fluides à base de GBR vieux [BRV20 (20% GBR8/16), BRV40 (40% GBR8/16), BRV60 (60% GBR8/16), BRV80 (80% GBR8/16), BRV100 (100% GBR4/16), BRV60/60 (60% GBR8/16 et 60% GBR 4/8) et BRV100/100 (100% GBR8/16 et 100% GBR 4/8)] sont illustrées sur les Figures III. 4 et III.5. Les barres d'erreur indiquent l'erreur standard estimée à partir de mesures effectuées sur trois cylindres de la même famille. Pour évaluer les différences dans les valeurs de résistance à la compression entre les compositions, une analyse statistique basée sur les valeurs de 5% de LSD (différence la moins significative) est incluses plus tard.

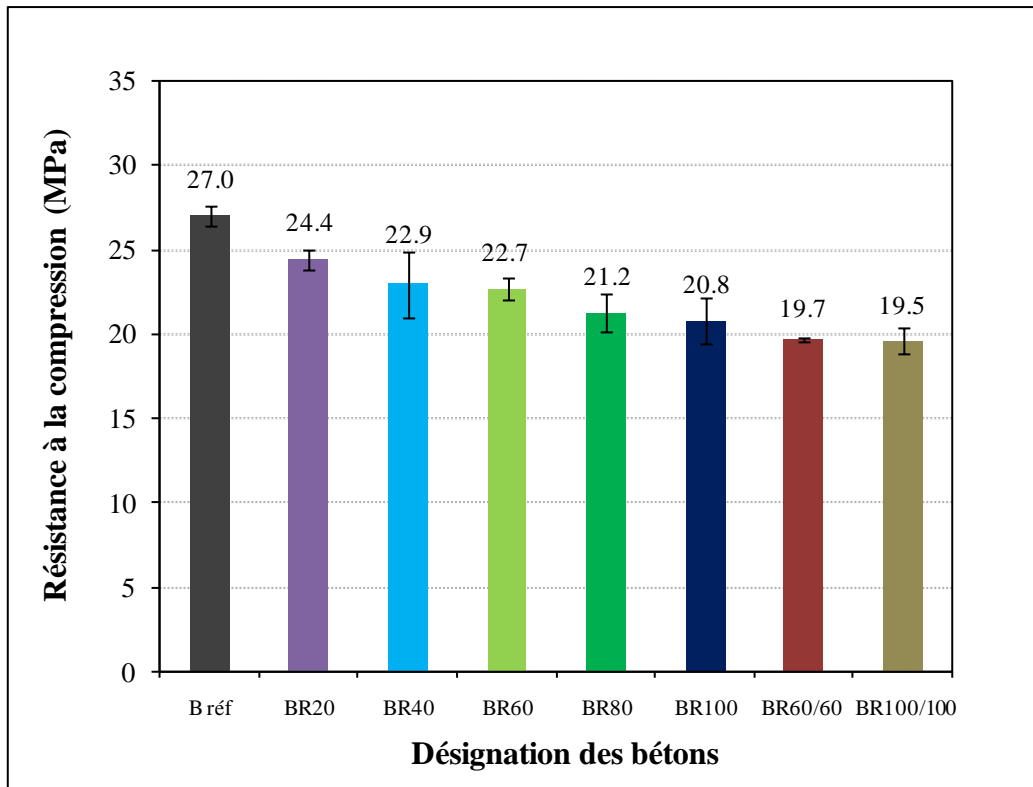


Figure III. 4: Résistances à la compression des bétons fluides à base de GBR récents.

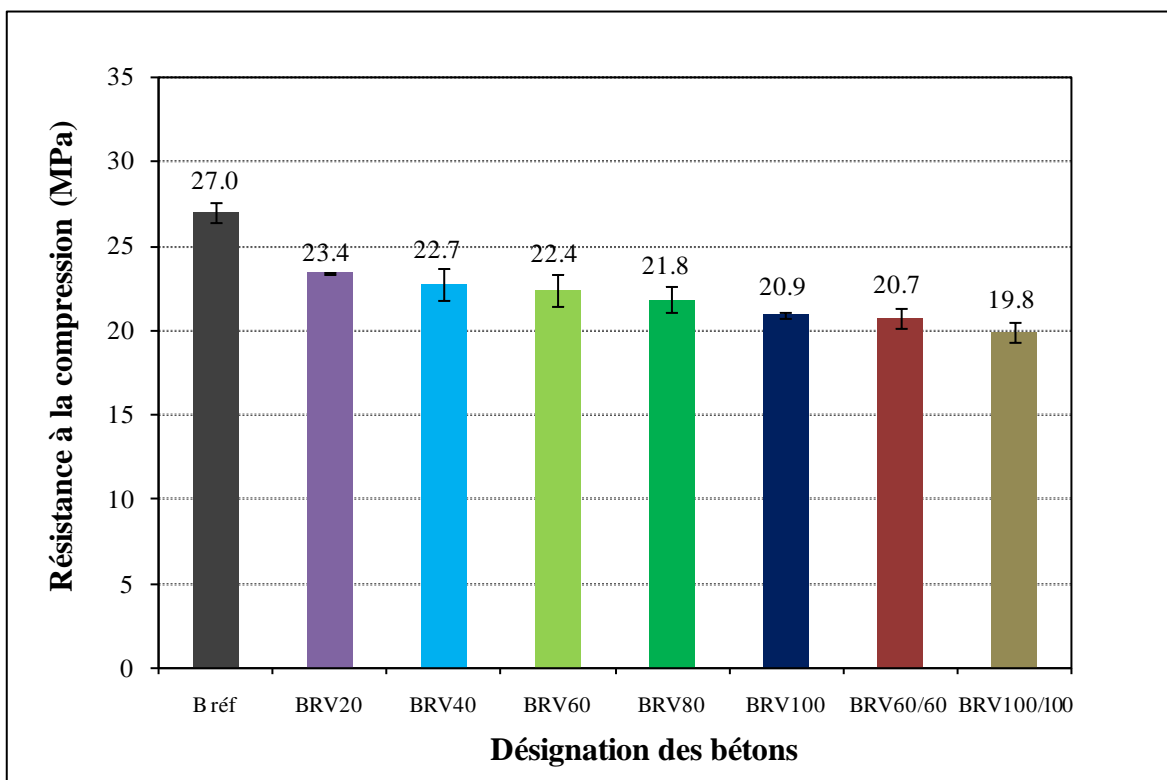


Figure III. 5: Résistances à la compression des bétons fluides à base de GBR vieux.

Ces résultats montrent que la résistance à la compression du béton diminue avec l'augmentation

du taux de substitution des GN par les GBR. Pour le BR20 et BRV20, la résistance à la compression était inférieure de 9.6% et de 13.3% respectivement à celle du B réf. A 100% de substitution des GN de classe 8/16 par le GBR de classe 8/16, le pourcentage de diminution de la résistance à la compression était de 23% et de 22.5% pour le BR100 et pour le BRV100 respectivement par rapport à celle du B réf. La taille de GBR a un effet sur la résistance à la compression : Dans le cas où le GN de classe 4/16 a été complètement substitué par le GBR de classe 4/16 (substitution à 100%), il y avait une diminution de 27.5% et de 26.4% de la résistance à la compression pour le BR100/100 et le BRV100/100 respectivement en comparaison à celle du B réf. Ces résultats concordent avec les conclusions d'Etzeberria et al. (2007), Cakır (2014) et Hansen et Narud (1983), qui ont trouvé qu'à 100% du taux de substitution, la résistance à la compression diminue de 20% à 25% à l'âge 28 jours. Katz (2003) a obtenu des résultats similaires, avec du ciment Portland ordinaire, la réduction était de 22% à 26%, en fonction de l'âge de concassage du vieux béton.

La relation inverse entre la teneur en GBR et la résistance à la compression est liée aux propriétés mécaniques des GBR décrit au chapitre II. La porosité intrinsèque élevée du mortier adhérent et les fissures résiduelles due au processus du concassage ont créé des zones de faiblesse dans le béton. Lorsque le béton s'approche de la charge ultime, les fissures plus larges sont observées et ont traversé ces zones de faiblesse au lieu de l'agrégat lui-même à l'intérieur des spécimens. Ce phénomène est illustré à la Figure. III. 6.

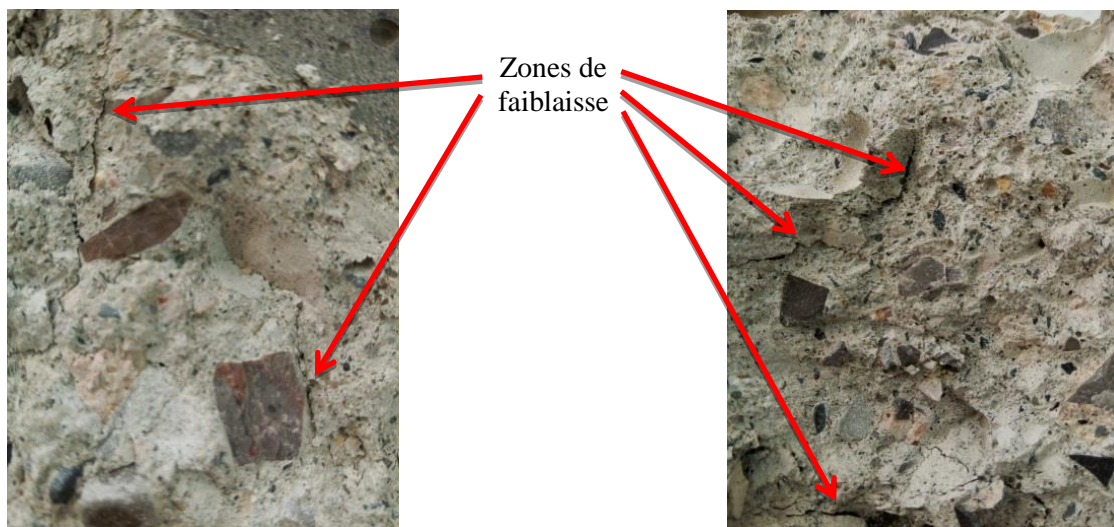


Figure III. 6: Schémas de fissures des spécimens.

Ces zones auraient une probabilité plus élevée d'être interconnectées entre elles à mesure que le contenu en GBR augmente. Par conséquent, lorsqu'il atteint la limite de seuil, une réduction

graduelle de la résistance à la compression a été observée. Les résultats des Figures III.4 et III.5 indiquent que la limite est de 60% du taux de substitution des GN 8/16 par les GBR 8/16, car la valeur de résistance moyenne à 80% de la teneur en GBR a chuté de 21.2% pour le BR80 et une baisse de 19.1% pour le BRV80 par rapport à l'intrigue précédente de 60% de la teneur en GBR. Cette valeur est élevée par rapport aux deux fractions consécutives 40% et 60%. A 40% de substitution on a observé une chute de 15% et de 15.7% pour les bétons BR40 et BRV40 respectivement, et comme indiqué par la résistance moyenne entre le béton de référence et 60% de la teneur en GBR qui ne diffère que de 16% et de 17.1% pour les bétons BR60 et BRV60 respectivement. Par conséquent, nous pouvons également conclure que le remplacement du GN par le GBR jusqu'à 60% serait le niveau minimal pour la composition de béton puisqu'il n'y a pas de réduction significative de la résistance à la compression.

▪ Comparaison des résistances à la compression des bétons fluides de GBR récents et bétons de GBR vieux

La comparaison entre les bétons fluides à base de GBR récents et bétons fluides à base de GBR vieux a été évaluée sur la base du taux de diminution.

Le taux de diminution de la résistance à la compression pour les deux qualités de bétons a été calculé par rapport à la résistance à la compression à 28 jours du B réf (0% GBR).

Les Figures III.7 présentent la valeur des taux de diminution en fonction du % de substitution des GBR de classes granulaires 8/16 (Figure III.7 a) et 4/16 (Figure III.7 b).

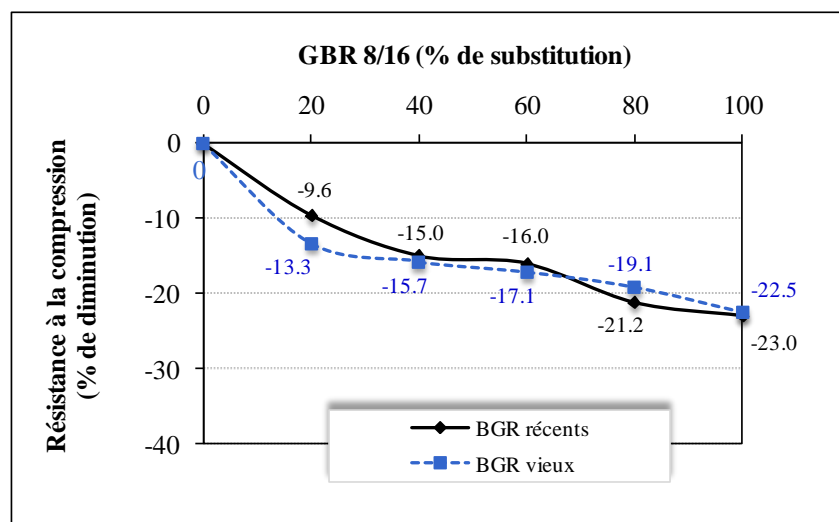


Figure III. 7(a): Résistances à la compression en fonction du % de GBR de classes granulaires 8/16.

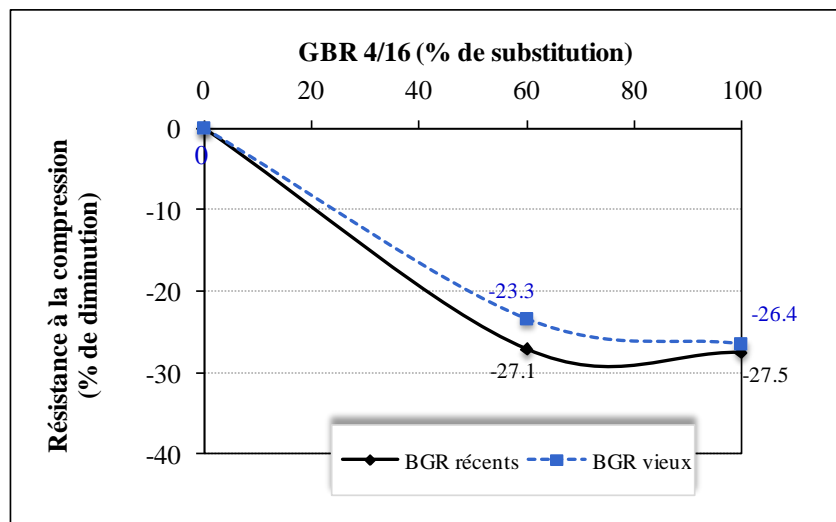


Figure III. 7 (b): Résistances à la compression en fonction du % de GBR de classes granulaires 4/16 (b).

On peut voir à partir de ces figures que le taux de diminution de la résistance à la compression pour les deux qualités de béton est très ressemblant. Cela signifie que l'état de vieillissement des GBR vieux qui date depuis les années 80 n'a pas d'effet sur la résistance à la compression.

III.3.2.2 Résistance à la flexion des bétons fluides à base de GBR récents et vieux

Les valeurs de la résistance moyenne à la flexion à 28 jours des différents bétons fluides à base de GBR récents et vieux sont indiquées sur les Figures III.8 et III.9.

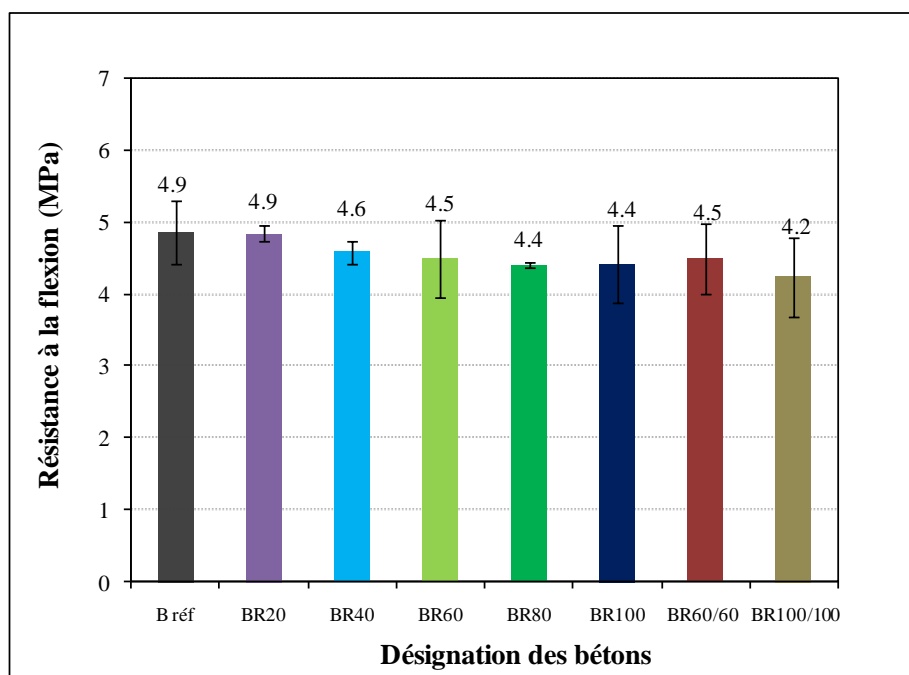


Figure III.8: Résistance à la flexion des bétons fluides à base de GBR récents.

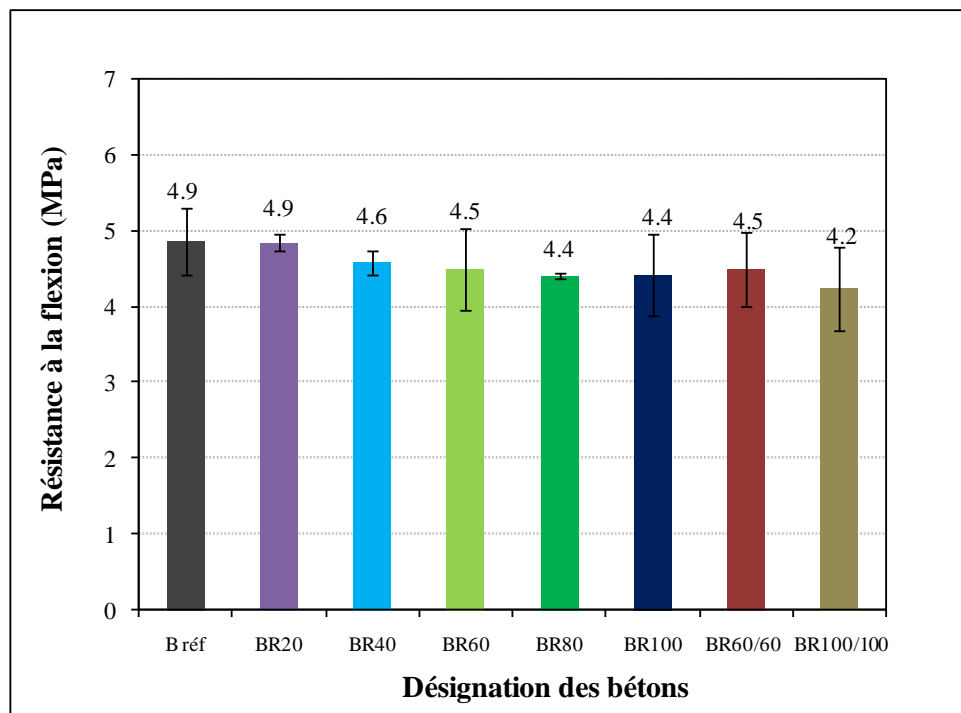


Figure III.9 : Résistance à la flexion des bétons fluides à base de GBR vieux.

Les résultats ont montré que tous les bétons produits en utilisant le GBR présentaient des résistances similaires ou légèrement inférieures à celles du B réf. La résistance à la flexion du BR100 et du BRV100 était inférieure de 10.2% et de 8.2% en comparaison à celle du B réf. Ces résultats étaient similaires à ceux rapportés par Katz (2003) qui a constaté une diminution de 11.5% du BR avec du ciment Portland ordinaire. Tavakoli et Soroushian (1996) ont conclu que la résistance à la flexion du GBR ne présentait aucune tendance nette par rapport à celle du béton de référence de composition similaire.

A 100% de substitution des GN de classe 4/16 par les GBR de la même classe, la réduction était de 14.29% et de 16.33% pour le BR100/100 et le BRV100/100, respectivement. Cette diminution était liée aux propriétés mécaniques du GBR, tel qui est décrit dans le chapitre II.

▪ Comparaison des résistances à la flexion des bétons fluides de GBR récents et bétons de GBR vieux

La comparaison entre les bétons fluides à base de GBR récents et bétons fluides à base de GBR vieux a été évaluée sur la base du taux de diminution.

Le taux de diminution de la résistance à la flexion des deux qualités de bétons pour les deux classes de substitutions en GN par les GBR est montré sur la Figure III.10.

La diminution en pourcentage de la résistance à la flexion des deux qualités de bétons été calculée par rapport à la résistance à la flexion à 28 jours du B réf (0% GBR).

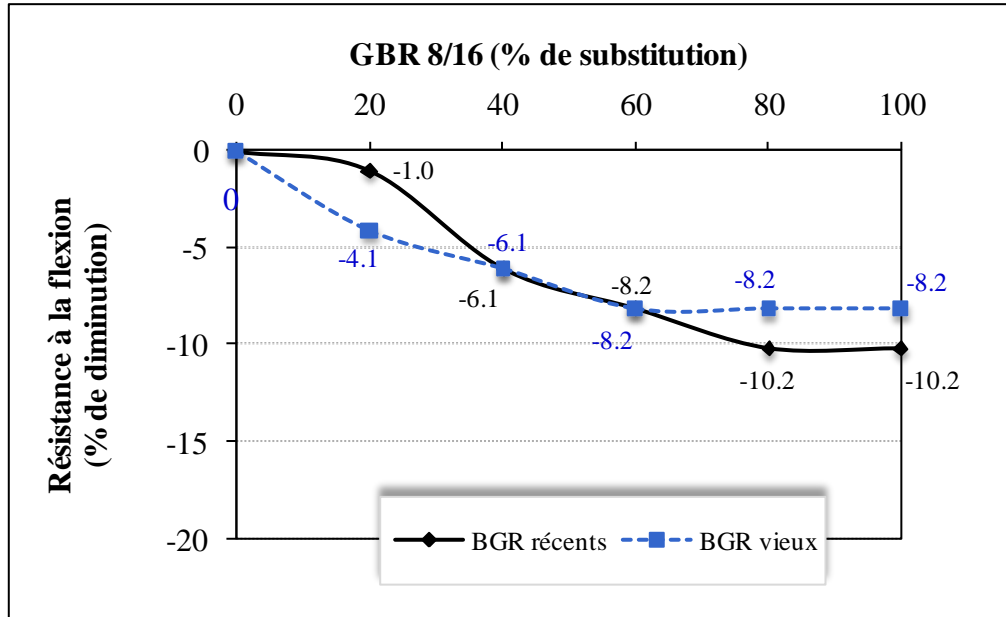


Figure III. 10 (a) : Résistances à la flexion en fonction du % de GBR de classes granulaires 8/16.

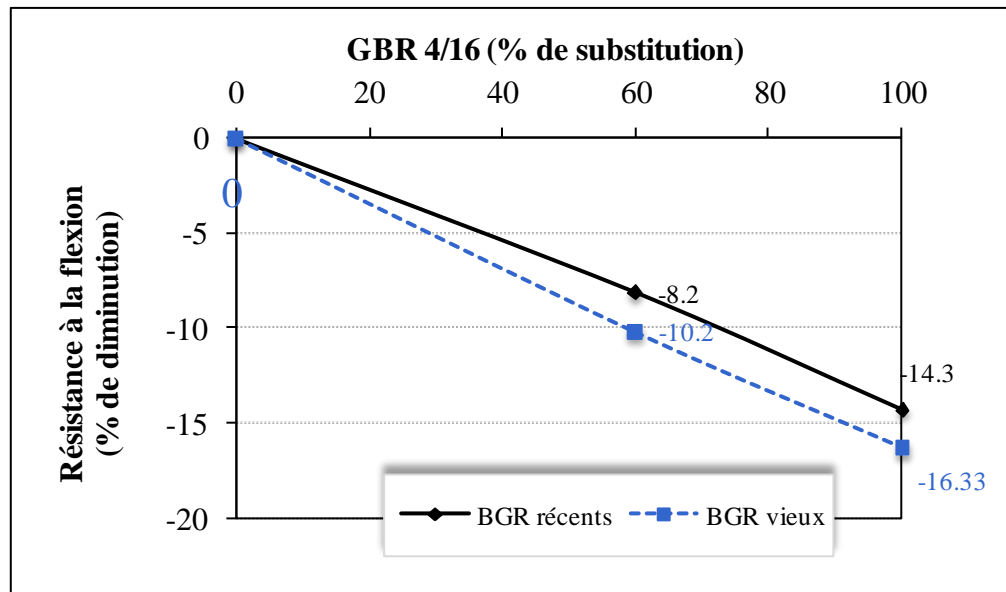


Figure III. 10 (b): Résistances à la flexion en fonction du % de GBR de classes granulaires 4/16.

Les bétons fluides à base de GBR récents ont montré des taux de diminution en résistance à la flexion comparables à ceux des bétons fluides à base de GBR vieux.

■ Commentaire

Les différents résultats indiquent clairement qu'en termes de résistance, la résistance des bétons fluides à base de GBR récents peut être considéré comme équivalente à celle des bétons fluides à base de GBR vieux. Nous rappelons ici que l'idée d'utiliser deux types de GBR d'état de vieillissement différents (GBR récents et GBR vieux) est de déduire l'influence de l'état de vieillissement des GBR sur la composition du béton. Comme les deux types de GBR utilisés dans cette étude ont donné des taux de diminution en résistance à la compression et à la flexion très proches et cela pour les différents pourcentages de substitution, donc on a décidé de travailler uniquement sur un seul type de GBR soit les GBR récents pour le reste de l'étude. Ainsi, les essais qui suivent ont été réalisés uniquement sur les bétons fluides de GBR récents.

III.3.2.3 Masse volumique

La masse volumique du béton est généralement mesurée dans le cadre d'un processus de contrôle de la qualité, elle est d'un emploi presque quotidien en construction, en particulier lorsque l'on travaille avec des bétons à haute ou basse masse volumique. Pour les besoins de cette étude, les masses volumiques sont considérées pour évaluer les effets des taux de remplacement sur la masse volumique. La Figure III.11 illustre les masses volumiques à l'état séché et saturé pour toutes les compositions de bétons. Les barres d'erreur indiquent l'erreur standard estimée à partir de mesures effectuées sur trois cylindres de la même famille.

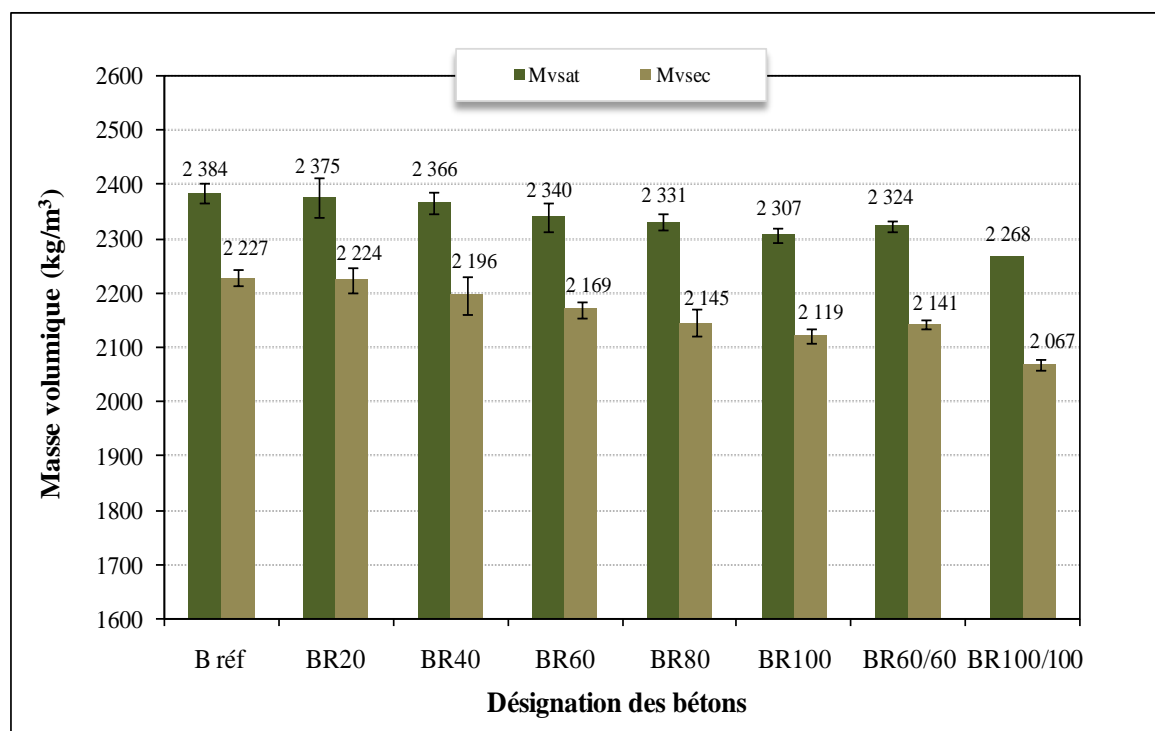


Figure III.11: Masses volumiques des bétons fluides à base de GBR.

Lorsqu'on compare entre les deux niveaux de saturation, toutes les compositions de bétons semblent se comporter de la même manière en termes de magnitude et de taux de perte de masse volumique, augmenter le taux de substitution des GN par les GBR la masse volumique du béton réduit.

La réduction de masse volumique sèche en comparaison à celle du B réf est de l'ordre de 4.84% et de 2.6% pour un remplacement de 100% et de 60% de GBR8/16 respectivement, ainsi une réduction de 7.18% et de 3.86% pour un remplacement de 100% et de 60% de GBR4/16 respectivement. Les pertes moyennes pour le remplacement de 100% et de 60% de GBR 4/16 sont plus élevées que les pertes moyennes pour le remplacement de 100% et de 60% de GBR8/16 en raison d'une porosité et connectivité des pores plus élevée.

III.3.2.4 Porosité ouverte et absorption par immersion

La durabilité d'une structure est en partie liée à la résistance qu'offrent les matériaux poreux constitutifs à la pénétration des agents agressifs. La porosité ouverte est le paramètre principal de cette résistance et plus particulièrement, la porosité ouverte interconnectée qui autorise la pénétration des agents agressifs extérieurs dans le béton.

Les résultats moyens de porosité ouverte des compositions de béton testés sont illustrés sur la Figure III.12 et les barres d'erreur associées représentent un écart type sur la base des données collectées. La porosité ouverte est un pourcentage basé sur le volume de béton déterminé par pesée immergée. Pour évaluer les différences dans les valeurs de porosité entre les compositions, une analyse statistique basée sur les valeurs de 5% de LSD est incluses plus tard.

Les porosités ouvertes mesurées pour les différentes compositions varient d'environ 14% à environ 21%. L'erreur associée aux données indique qu'il n'y avait pas de grandes variances dans un béton donné.

Les porosités élevées est évidentes dans les augmentations de l'eau absorbée (voir Figure III.13). Les valeurs d'absorption d'eau sont exprimées en pourcentage de la masse sèche à l'étuve de chaque échantillon. Les valeurs d'absorption des bétons contenant les GBR sont plus élevées que celle du béton de référence et montrent une tendance croissante vers une teneur plus élevée en GBR.

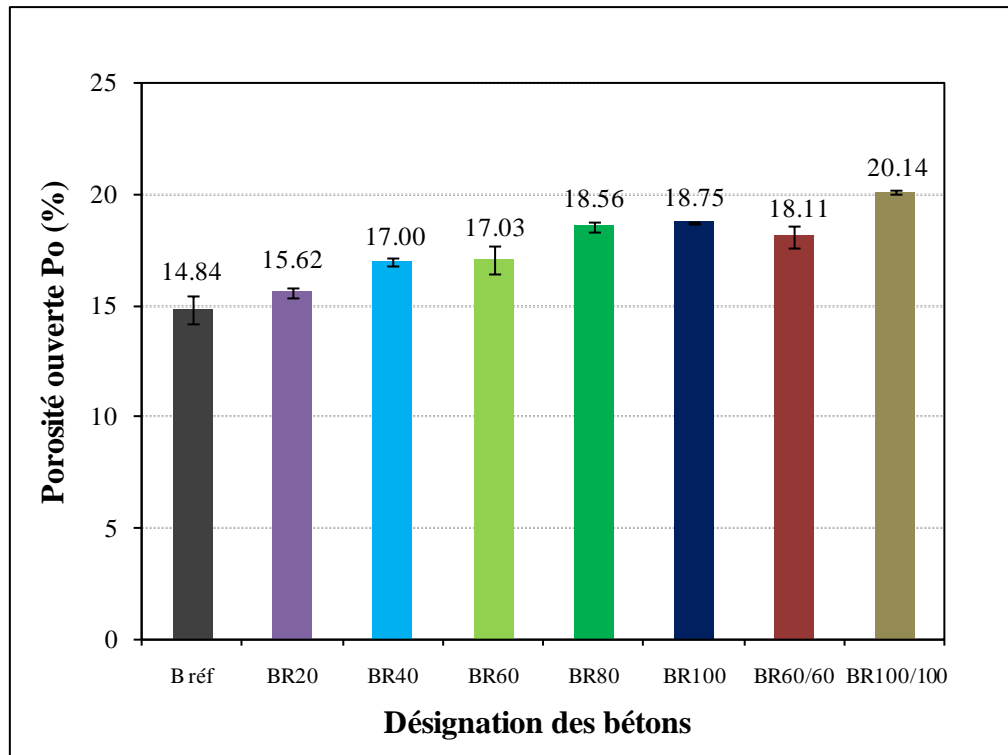


Figure III. 12 : Porosité totale ouverte.

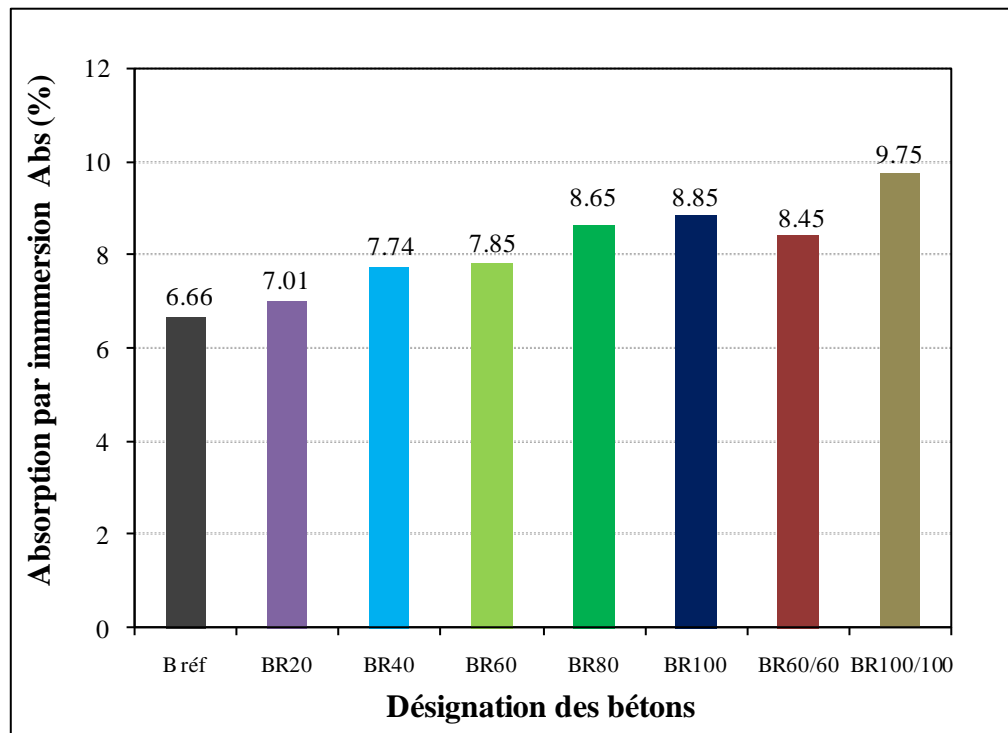


Figure III. 13: Absorption par immersion.

L'absorption d'eau de béton avec 100% de GBR de classe 8/16 était de 8.85%, contrairement à celle du B réf qui était de 6.66%, la différence étant de 32.88%. Ces résultats sont conformes à

ceux rapportés dans les études précédentes, qui ont montré que l'absorption d'eau augmentait de 35 à 56% lorsque les matériaux recyclés sont utilisés (Tavakoli et Soroushian 1996, Thomas et al. 2013).

La valeur d'absorption la plus élevée est atteinte avec le béton de 100% de GBR de classe 4/16, elle est augmentée de 46% en comparaison à celle du B réf. Plus le béton contient des éléments moins petits en GBR plus sa capacité d'absorption d'eau sera supérieure en raison des quantités relativement plus élevées de mortier adhérent que dans le GBR grossier.

Ces résultats sont dus à la capacité d'absorption élevée du GBR lui-même, qui a créé une pression d'osmose plus élevée dans le béton. En outre, le GBR est un matériau poreux cela correspond à des propriétés de perméabilité élevées pour le béton et à des chances plus élevées de connectivité au sein du système de microstructure de l'échantillon. Hearn et al. (2006) ont mentionné que l'écoulement induit par la pression fournirait le moyen le plus simple pour la transmission des molécules puisque les voies d'écoulement internes ne sont pas obstruées. Ceci explique l'absorption d'eau la plus élevée à 100% des GBR de classe 4/16 qui se produit, par l'intermédiaire des effets capillaires par la pression d'osmose élevée quand des échantillons secs sont immergés dans l'eau.

Ces augmentations de porosités ouvertes et donc l'absorption d'eau sont attribuables à la structure poreuse du GBR, qui à son tour est liée au fait que l'agrégat présente une fissuration résiduelle dû au processus du concassage. Cette augmentation est aussi liée à la porosité intrinsèque de la pâte de ciment durcie qui affecte la porosité finale du béton fait avec ces agrégats.

La porosité ouverte du béton est directement proportionnelle au degré de connectivité de ses pores et fissures. Ainsi, parce que la porosité ouverte augmente avec la quantité des GBR substituée, on peut conclure que cela également augmente le degré de connectivité des pores et des fissures.

III.3.2.5 Absorption d'eau par capillarité

L'absorption par capillarité est un phénomène physique susceptible de faire pénétrer des substances agressives extérieures à l'intérieur du béton.

Le béton est en effet un matériau qui possède des pores capillaires dont la dimension varie suivant ses caractéristiques de composition (rapport eau/ciment, additions minérales, types de granulats, etc.). Lorsqu'un liquide se retrouve en contact avec ce type de pore, des tensions de

surface font remonter ce liquide à l'intérieur du capillaire. Les pores capillaires ouverts sur le milieu extérieur vont donc conduire, à laisser s'infiltrer par succion des liquides pouvant contenir des espèces chimiques potentiellement préjudiciables au bon fonctionnement et à la durée de vie d'une construction soumise à ces attaques.

Au cours de l'essai d'absorption, seule la quantité d'eau globale ayant pénétré dans l'échantillon est mesurée et non la hauteur maximale atteinte par le liquide. La quantité d'eau absorbée dans cet essai augmente avec le taux de substitution des GN par les GBR dans le béton car le nombre et le volume de leurs pores sont supérieurs à ceux des bétons de moins de GBR.

L'absorption d'eau par capillarité ainsi que la cinétique de ce phénomène physique sont examinées pour les bétons fluides de GBR récents.

Les résultats d'absorption capillaire obtenus pour ces bétons après 72 h sont présentés sur la Figure III. 14.

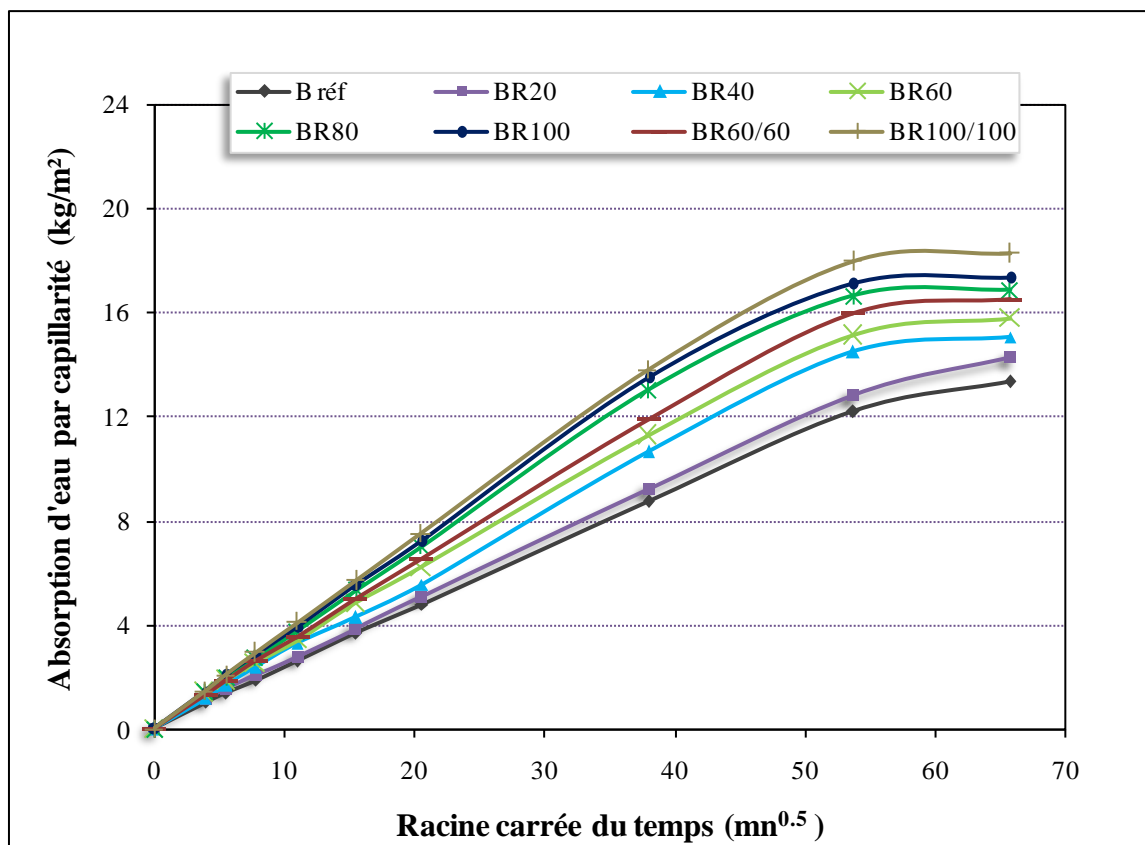


Figure III. 14 : Absorption d'eau par capillarité des bétons fluides.

On voit que l'absorption d'eau par capillarité augmente fortement dans les premières heures puis se stabilise pour le reste de l'essai. De plus, l'absorption d'eau dans les bétons composés de GBR

était similaire à celle du B réf. Cependant, les bétons composés de GBR présentait des taux d'absorption d'eau plus élevés, le taux augmente avec la quantité de substitution des GN par les GBR.

A partir de ces courbes, l'absorption capillaire à trois jours et la cinétique de cette absorption ont été calculées et reportées sur le Tableau III.5 pour faciliter la comparaison entre les différents bétons.

Tableau III. 5: Données concernant l'absorption d'eau par capillarité des bétons fluides à base GBR récents.

	B réf	BR20	BR40	BR60	BR80	BR100	BR60/60	BR100/100
Absorption capillaire à 72 h (kg/m ²)	13.35	14.25	15.1	15.78	16.9	17.34	16.50	18.30
Cinétique d'absorption Capillaire (10 ⁻² kg/(m ² .s ^{1/2}))	4.54	4.85	5.14	5.37	5.75	5.9	5.61	6.22
Porosité accessible à l'eau (%)	14.84	15.62	17.00	17.03	18.56	18.75	18.11	20.14

On constate tout d'abord que le béton de granulats recyclés dont le taux du GBR est le plus élevé (BR100/100, 100% de GBR de classe 4/8 et 100% de GBR de classe 8/16) présente également l'absorption capillaire la plus grande.

Ensuite, en comparant directement le B réf et les bétons de granulats recyclés d'une même catégorie (bétons composés de GBR 8/16 et ceux composés de GBR 4/16) on peut noter que les bétons recyclés présentent une absorption capillaire et une cinétique d'absorption plus élevée que le B réf. Cela était dû à la structure plus poreuse de GBR, qui a entraîné une plus grande connectivité des pores et élargi le réseau capillaire dans le béton.

Les compositions de béton ayant un faible pourcentage en GBR ont une porosité inférieure et le système de pores est moins continu. Ils se traduisent par une plus faible quantité d'eau absorbée par l'absorption capillaire.

En comparant les résultats entre les deux catégories de béton, on peut faire l'analyse suivante.

- Les bétons fluides de GBR de classe 4/16 absorbent d'avantage d'eau que les bétons fluides composés de GBR de classe 8/16 (+1.68 et +1.07 pour les taux de substitution 100% et 60%, respectivement). Ce résultat est toujours lié à la structure la plus poreuse du GBR, qui a entraîné un volume et un nombre de porosité capillaire plus importants dans le béton et par conséquent une connectivité des pores plus importante.

III.3.2.6 Vitesse des ondes ultrasoniques (VOU)

L'essai de vitesse des ondes ultrasoniques (VOU) comportent fondamentalement la mesure de la vitesse de l'onde électronique à travers le béton. Cet essai est utilisé pour diagnostiquer la qualité du béton dans la limite de l'uniformité, la détermination de la fissuration, la résistance, l'estimation et l'évaluation de la détérioration du béton.

Le but de son utilisation dans la présente étude était de pouvoir utiliser les mesures de VOU pour prévoir la durabilité des bétons produits en utilisant les GBR à différents niveaux de saturation et d'établir les relations entre la VOU, le taux de substitution des GN par les GBR, et la porosité ouverte à différents états de saturation (Sr).

Les résultats des mesures de la porosité ouverte sèche (Po) et de la VOU sont listés dans le Tableau III. 6.

Tableau III. 6: Résultats des mesures de la porosité ouverte sèche et de la VOU.

	Sr= 100%		Sr= 40%		Sr =15%		Sr =2%		Sr =1%		Sr= 0%	
	Po (%)	VOU (m/s)	Po (%)	VOU m/s	Po (%)	VOU (m/s)	Po (%)	VOU (m/s)	Po (%)	VOU (m/s)	Po (%)	VOU (m/s)
B réf	0.00	4222	9.69	4072	12.84	4032	14.55	3984	14.71	3945	14.84	3903
BR20	0.00	4188	9.40	4039	13.18	4011	15.38	3943	15.57	3899	15.62	3861
BR40	0.00	4106	9.83	3945	14.19	3916	16.67	3851	16.88	3809	17.00	3752
BR60	0.00	4068	9.58	3897	14.15	3861	16.66	3807	16.91	3749	17.03	3707
BR80	0.00	3931	10.83	3772	15.96	3741	18.25	3680	18.44	3645	18.56	3572
BR100	0.00	3893	11.35	3730	16.15	3697	18.41	3623	18.65	3564	18.75	3515
BR60/60	0.00	4000	11.51	3842	15.28	3800	17.54	3715	17.92	3691	18.11	3584
BR100/100	0.00	3826	12.68	3666	17.65	3605	19.86	3505	20.08	3433	20.14	3357

▪ Effet des GBR sur la VOU dans le béton

Les Figures III.15 et III.16 montrent l'effet des GBR et l'état de saturation sur la vitesse des ondes ultrasoniques de différentes compositions de béton. Les valeurs des VOU diminuent avec l'augmentation du taux des GBR dans les compositions de béton et diminuent également avec la diminution du taux de saturation. L'essai a été effectué dans six états de saturations (Sr=100%, Sr=40%, Sr=15%, Sr=2%, Sr=1%, Sr=0%). Les barres d'erreur indiquent les valeurs de l'erreur standard. Pour évaluer les différences dans les valeurs de vitesses entre les compositions, une analyse statistique basée sur les valeurs de 5% de LSD est incluses plus tard.

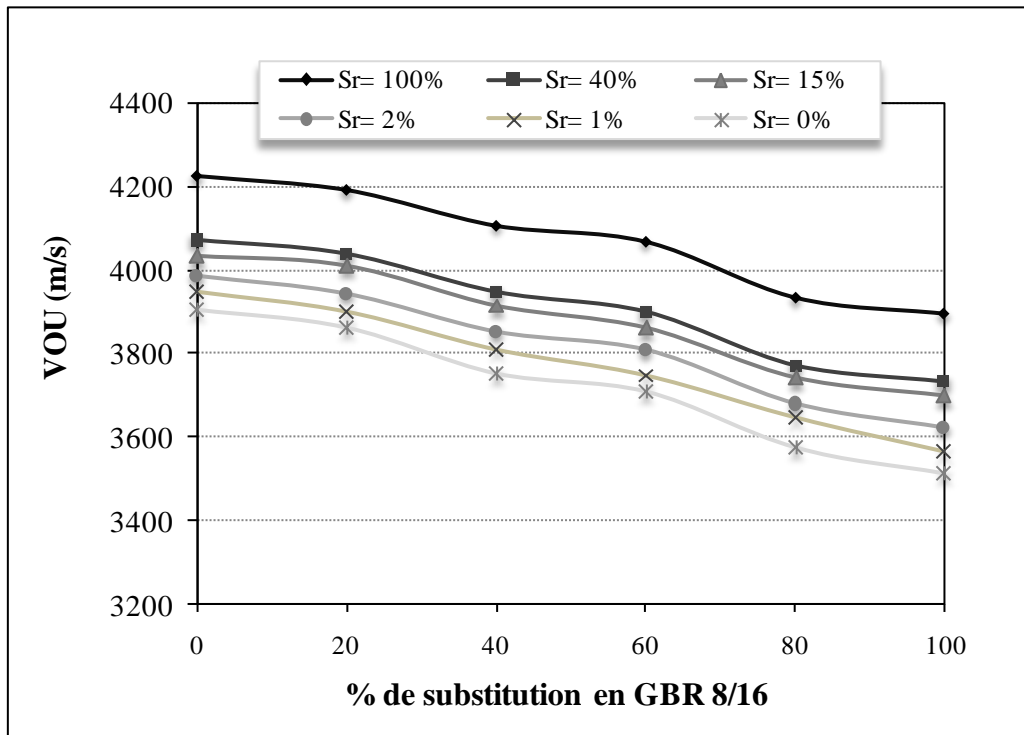


Figure III.15 (a): VOU en fonction du taux de substitution en GBR8/16.

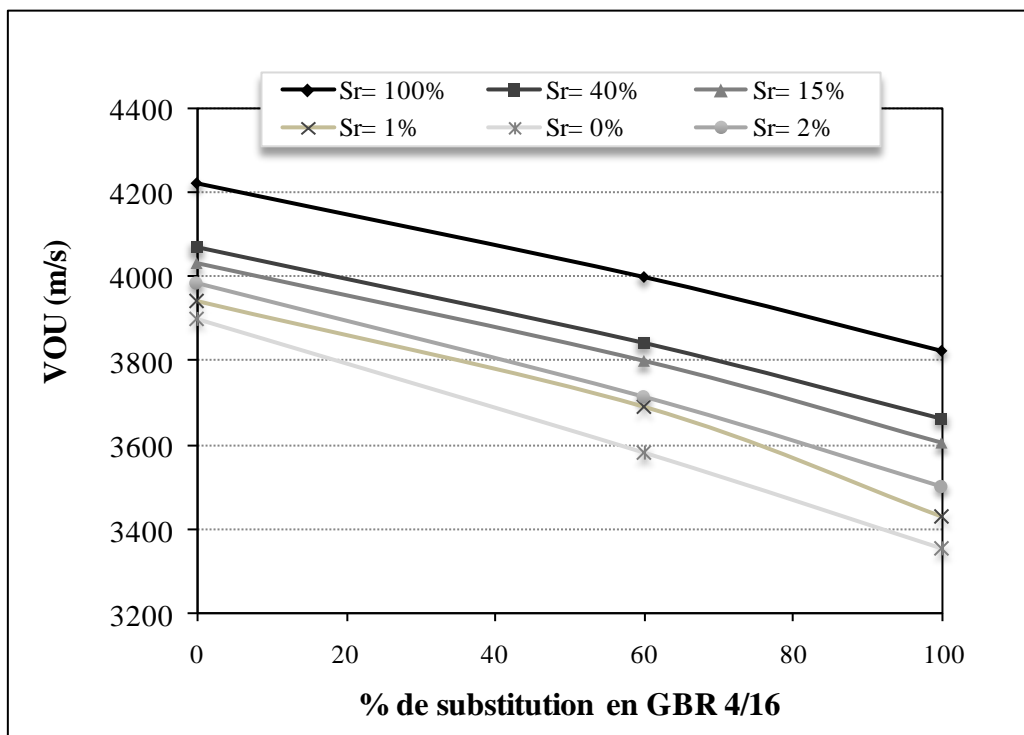


Figure III.15 (b): VOU en fonction du taux de substitution en GBR4/16.

En comparant les résultats entre les deux catégories de béton pour l'état de saturation complète (Sr = 100%), on peut faire les analyses suivantes :

- Pour une substitution des GN par les GBR de taille 8/16, le pourcentage de diminution de la VOU dans le BR60 et dans le BR100 est de 3.65% et de 7.8% respectivement en comparaison à celle du béton de référence.
- Pour une substitution des GN par les GBR de taille 4/16, le pourcentage de diminution de la VOU dans le BR60/60 et le dans le BR100/100 augmente à 5.26% et à 9.38% respectivement en comparaison à celle du béton de référence.

Ces pourcentages de diminutions sont semblables pour tous les états de saturation.

A 100% de substitution en GBR 8/16, Kou et al. (2012) et Rao et al. (2011) ont trouvés des variations de vitesses ultrasoniques semblables qui sont respectivement de 8% et de 10%, par contre Soares et al. (2014) ont trouvé une variation de 5.4% due aux qualités de leurs granulats utilisés. Kwan et al. (2012) ont observé une diminution de la VOU dans le béton dû au remplacement du GN par les GBR. Les valeurs des VOU de tous les types de bétons étaient dans l'intervalle de 3200- 4420 m/s après une cure de 28 jours.

Cette diminution est liée à la porosité, qui augmente avec la quantité de GBR dans le béton. Ainsi la taille de GBR a un effet sur les VOU, plus le béton contient de GBR plus petit plus la vitesse est réduite, car la teneur en mortier dans un GBR plus petit est plus importante que dans un GBR plus gros et par conséquent une porosité plus élevée.

L'augmentation de la quantité de GBR et l'utilisation des GBR plus petit augmente le nombre de pores dans le béton, qui affecte la transmission des ondes ultrasoniques.

▪ Effet de l'état de saturation du béton sur la VOU

La VOU diminue aussi avec la diminution du niveau de saturation (Figure III.16). On peut voir que pour tous les bétons, la VOU était inférieur à l'état sec. Pour le B réf, la VOU diminue de 4222 m/s au $S_r = 100\%$ à 3903 m/s au $S_r = 0\%$. Pour BR100, la VOU diminue de 3893 m/s au $S_r = 100\%$ à 3515 m/s au $S_r = 0\%$. Les valeurs les plus élevées de la VOU ont été obtenues au $S_r = 100\%$. Comme les bétons sont tous formulés en utilisant les mêmes paramètres (c-à-d, même quantité de pâte, de solide, de ciment, de poudre de marbre et même rapport effective eau/ciment), ce résultat est attribuable à la présence d'eau dans les pores ouverts des bétons. L'eau dans les pores constitue un lien entre les phases solides pour le déplacement des ondes. Les valeurs les plus basses de la VOU sont obtenues sur les bétons avec $S_r = 0\%$, où les pores ouverts sont totalement séchés.

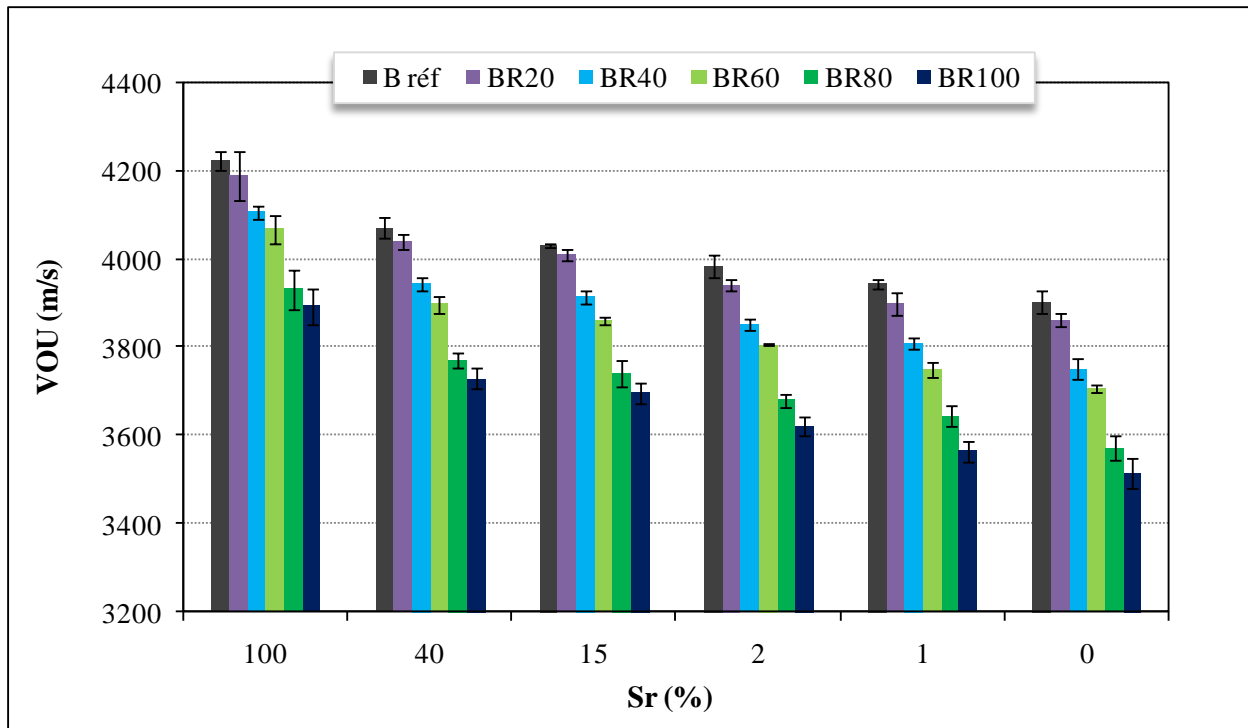


Figure III.16 (a) : VOU en fonction du taux de saturation à base de GBR8/16.

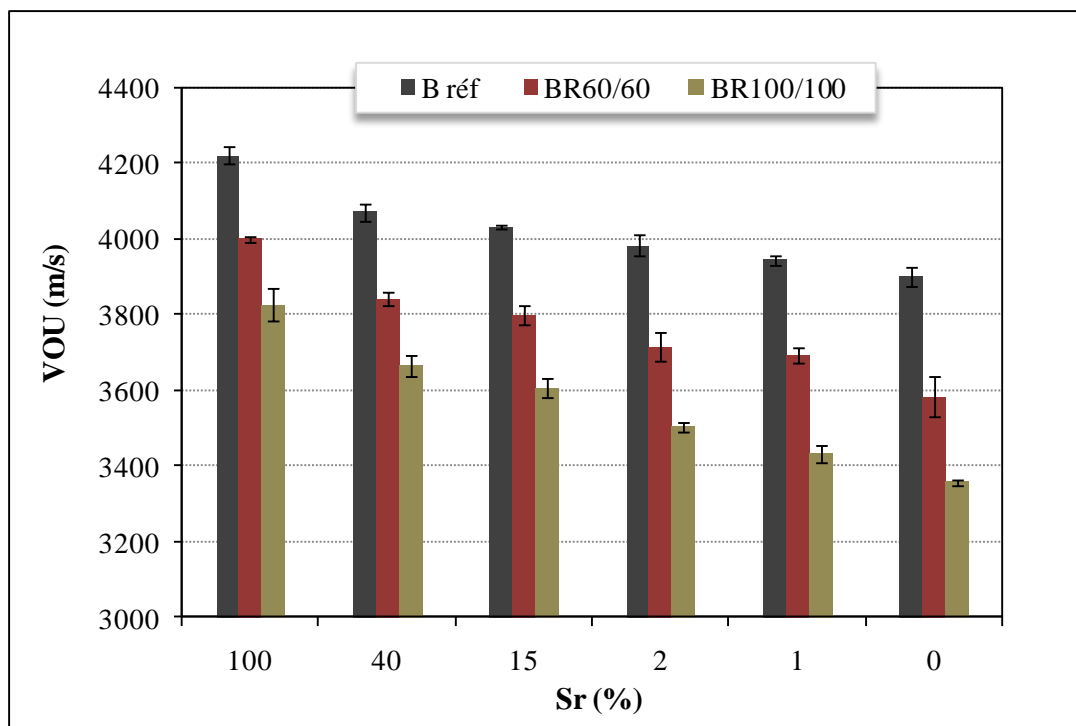


Figure III.16 (b) : VOU en fonction du taux de saturation des bétons à base de GBR4/16.

Les Figures III.17 montrent clairement la relation entre les valeurs moyennes de VOU, le taux de substitution des GN par les GBR, l'état de saturation du béton de béton et la taille des GBR utilisées.

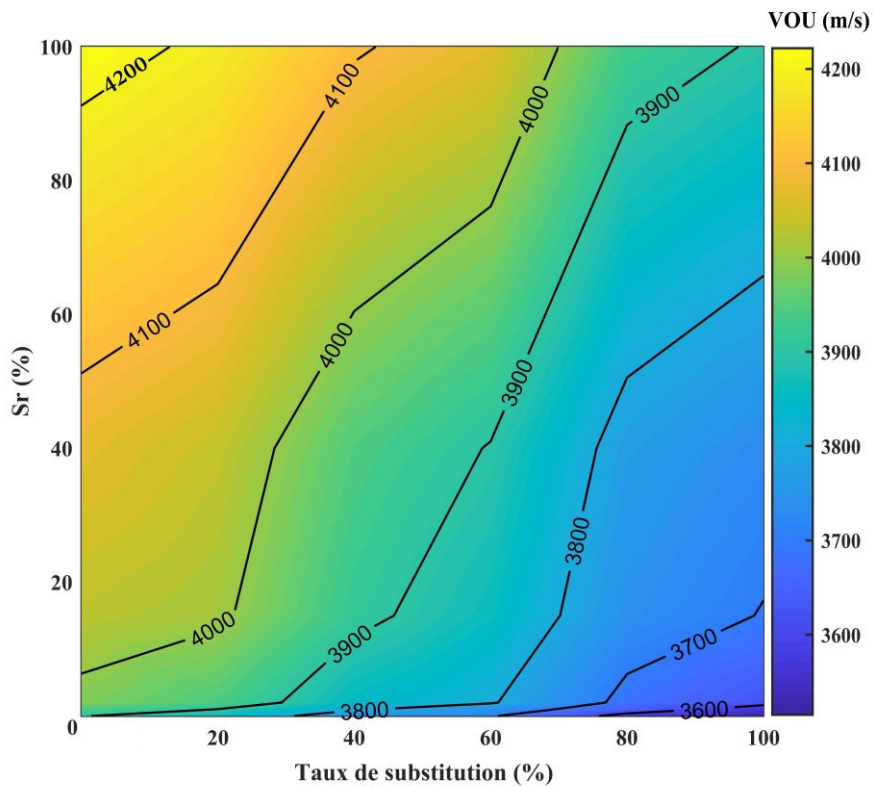


Figure III.17 (a): Les valeurs moyennes de la VOU des bétons en fonction du taux de substitution des GBR8/16 et l'état de saturation de béton.

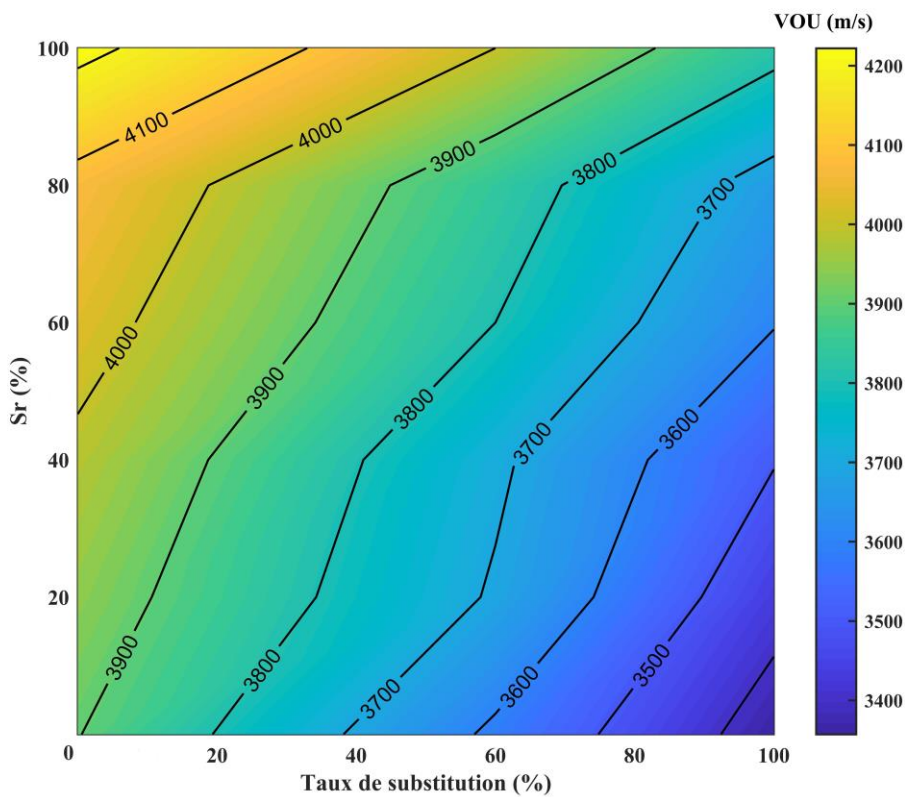


Figure III.17 (b): Les valeurs moyennes de la VOU des bétons en fonction du taux de substitution des GBR4/16 et l'état de saturation de béton.

III.4 Analyse statistique des résultats

III.4.1 Corrélations des résultats des bétons à base de GBR/16

L'analyse des corrélations a été effectuée entre la résistance à la compression, la résistance à flexion, masses volumiques, absorption, porosité ouverte, le taux de substitution et la vitesse de des ondes ultrasoniques. Il a été observé qu'il y a une bonne corrélation entre ces propriétés. Une relation linéaire de forme de : $y = ax+b$ et est obtenue étant donné un meilleur ajustement des données avec les valeurs de R^2 et a un sens physique.

Les équations de régressions et les valeurs du coefficient de corrélation entre les propriétés mécaniques sont montrées sur les Figures III. 18 à III. 20. Comme il ressort de ces résultats, la valeur du coefficient de corrélation varie de 0.86 à 0.92. Les valeurs élevées du coefficient de corrélation indiquent qu'il y a une bonne corrélation entre ces propriétés du béton. Le coefficient de corrélation entre la résistance à la compression et à la flexion est élevé (0.89). Ces propriétés de résistance ont également une très bonne corrélation avec la vitesse des ondes ultrasoniques (VOU). Cela signifie que l'incorporation de GBR dans le béton réduit ses propriétés de résistance. Il rend la matrice plus poreuse en raison de la porosité élevée des GBR se qui se répercute sur la porosité du béton formulé avec ce type de composant.

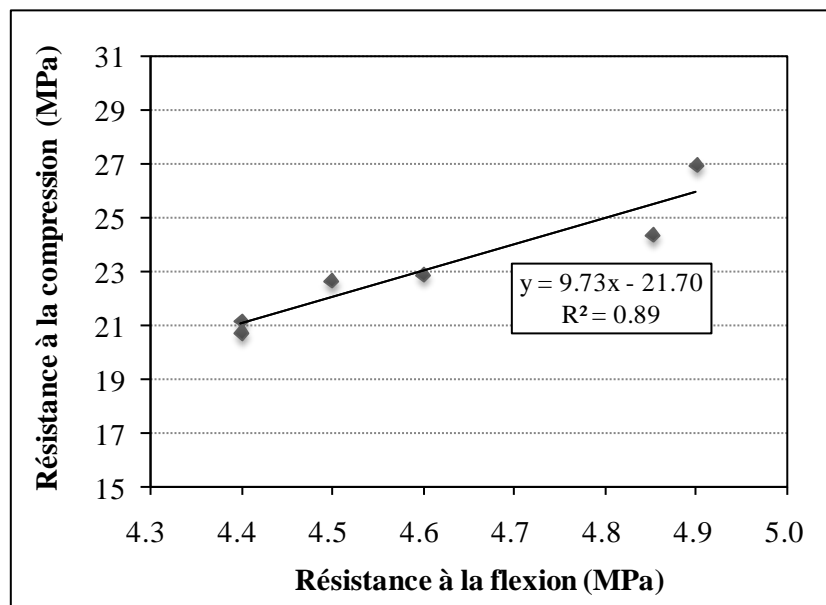


Figure III. 18: Résistance à la compression en fonction de la résistance à la flexion.

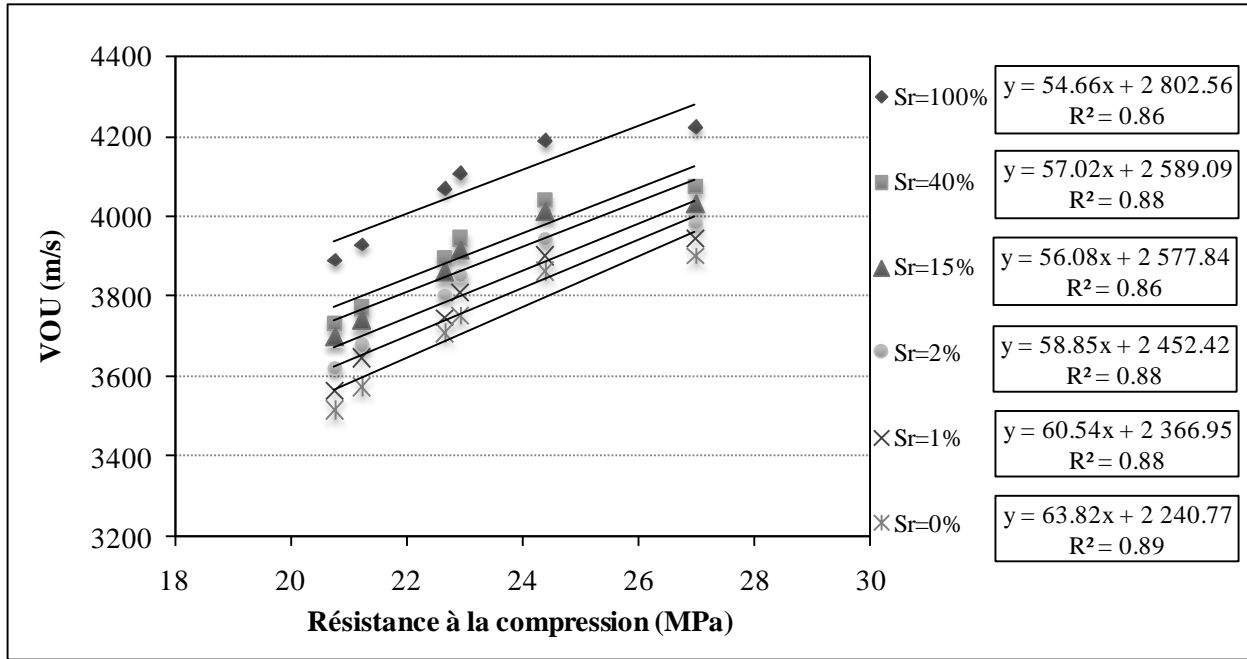


Figure III. 19: VOU en fonction de la résistance à la compression.

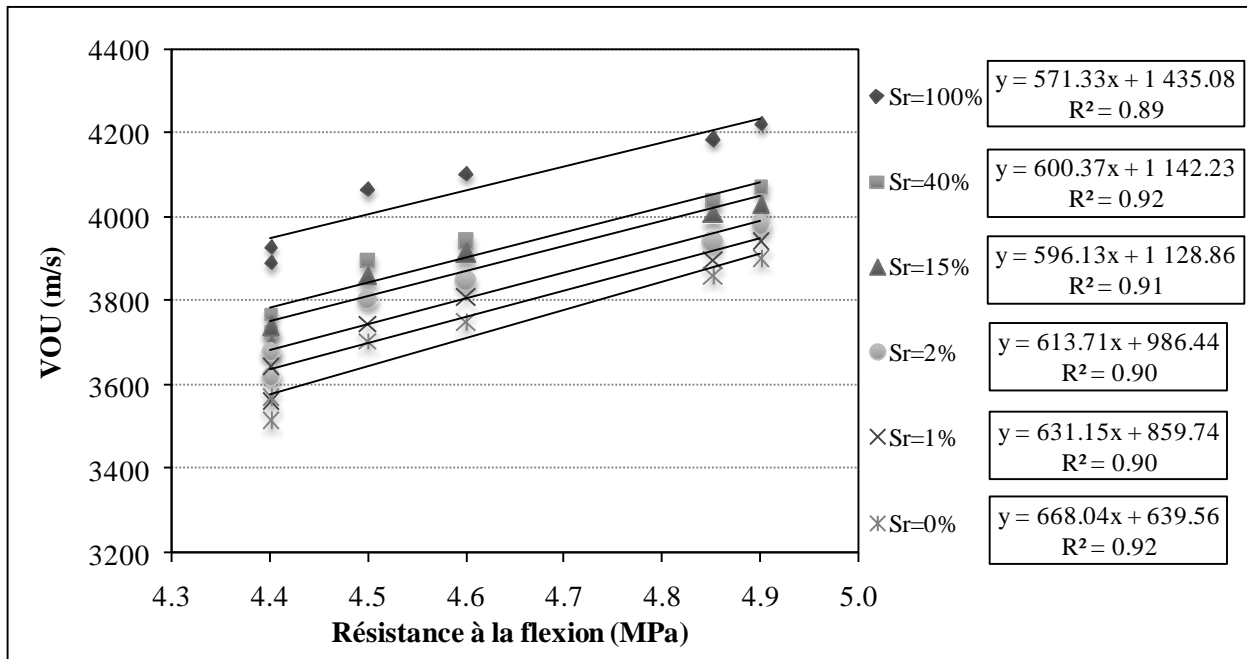


Figure III. 20: VOU en fonction de la résistance à flexion.

Une analyse de régression a été réalisée pour établir une relation générale entre les propriétés physiques (masses volumique, absorption et porosité ouverte) montrée sur les Figures III. 21 à III. 26 avec le meilleur ajustement établi.

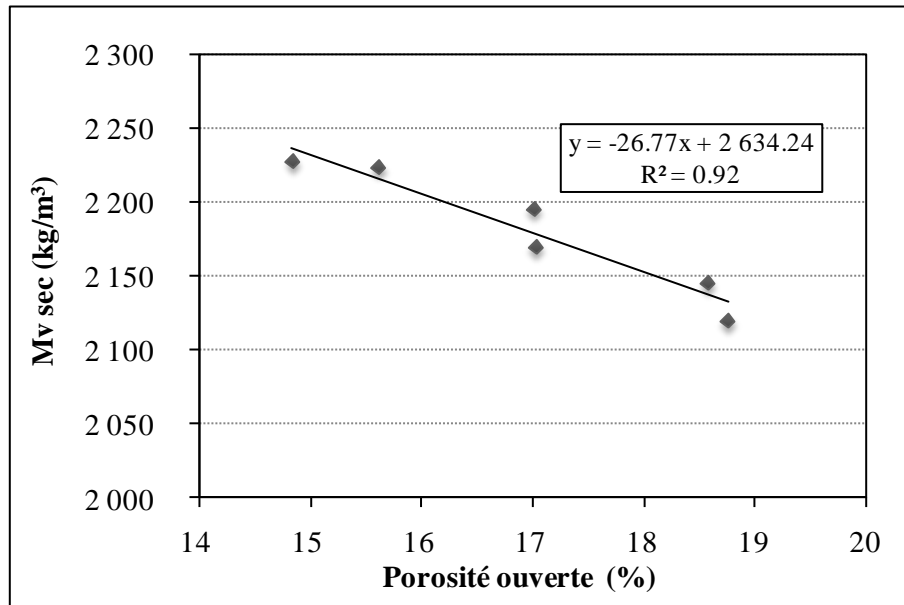


Figure III. 21: Masse volumique séchée (Mv sec) en fonction de la porosité ouverte.

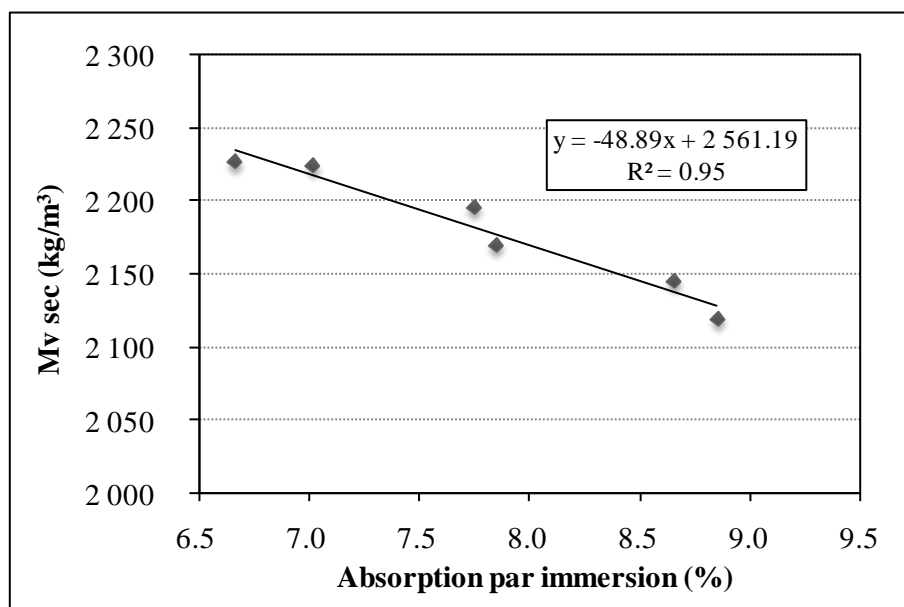


Figure III. 22: Mv sec en fonction de l'absorption par immersion.

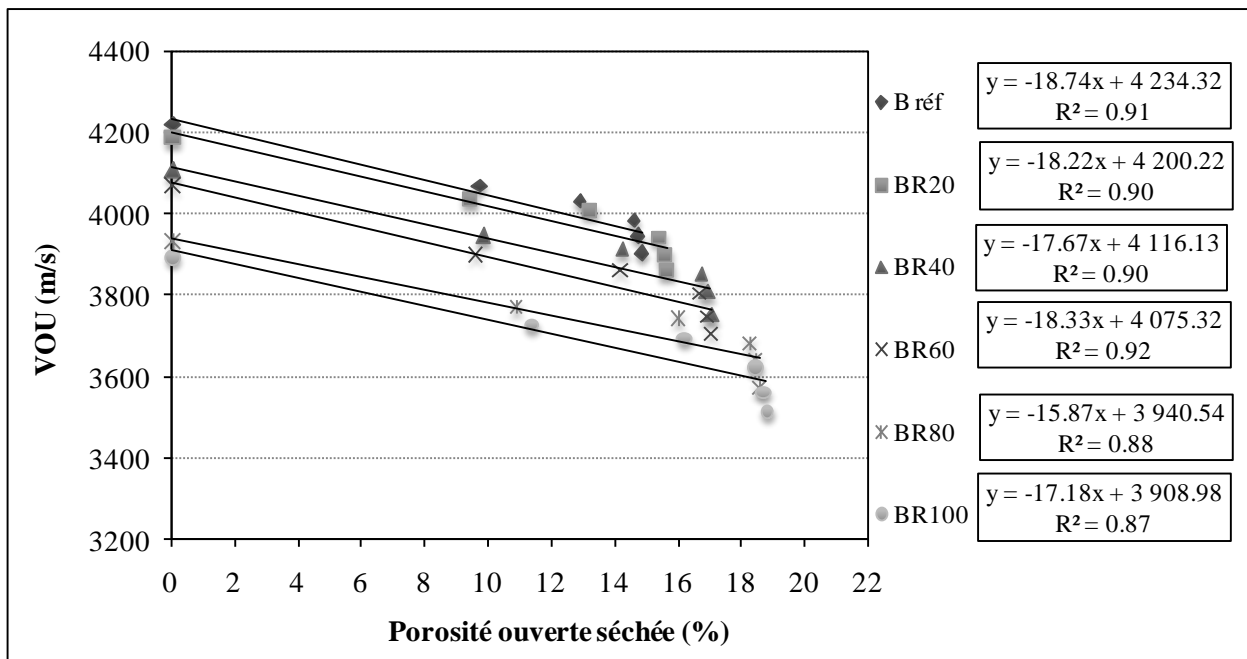


Figure III. 23: VOU en fonction de la porosité ouverte séchée.

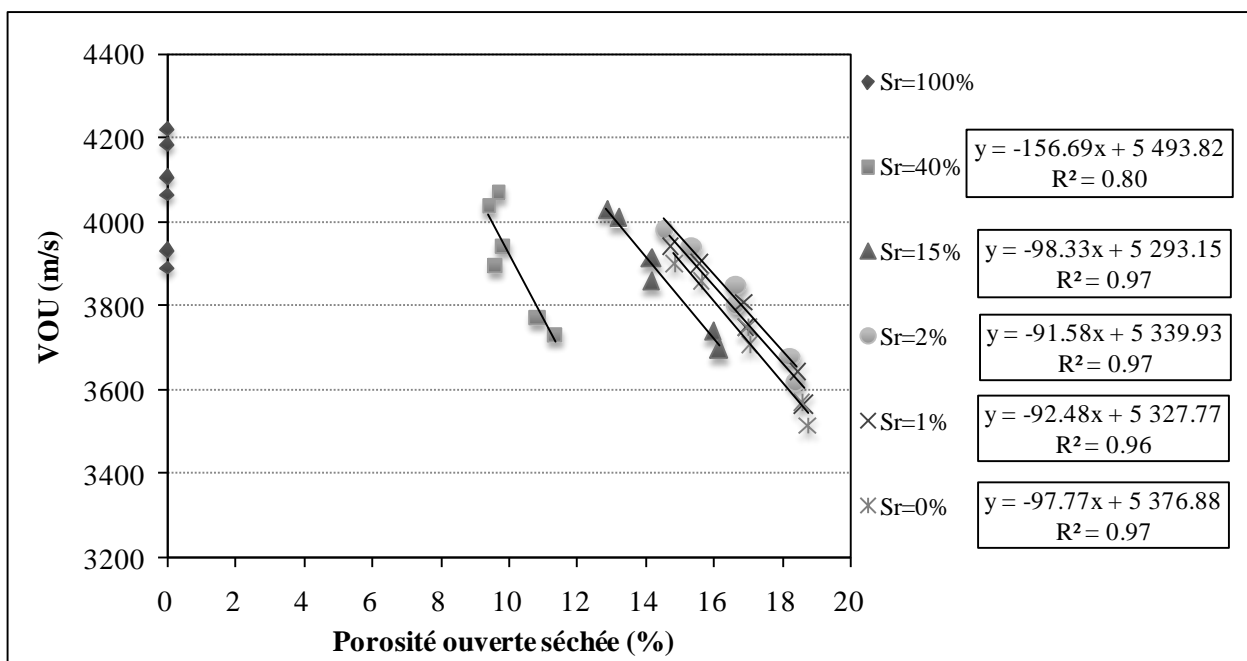


Figure III. 24: VOU en fonction de la porosité ouverte séchée.

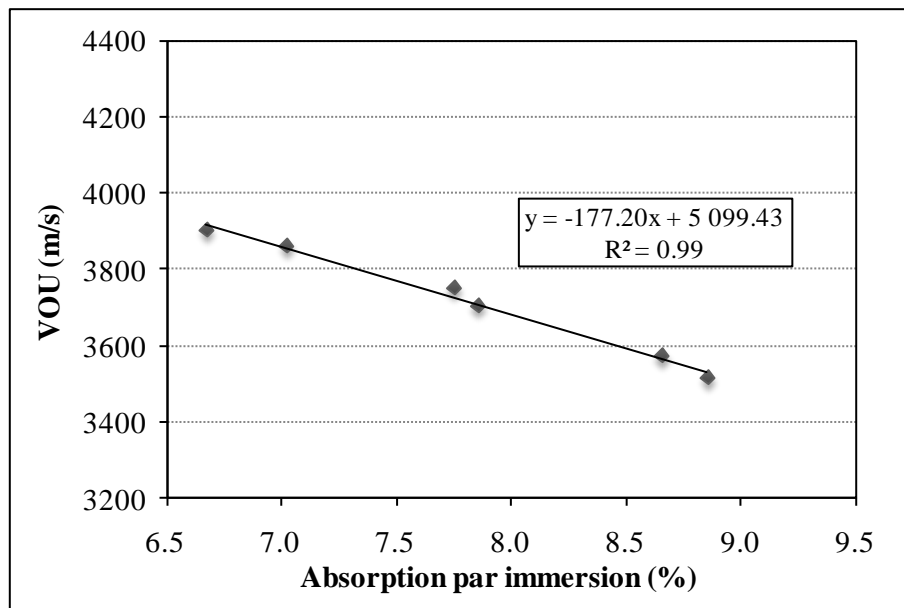


Figure III. 25: VOU en fonction de l'absorption par immersion.

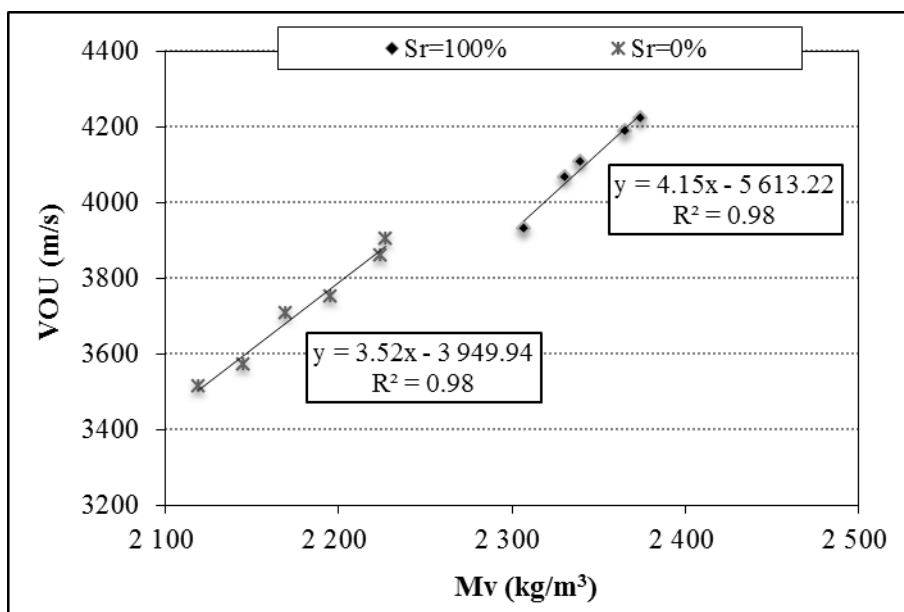


Figure III. 26: VOU en fonction de la masse volumique.

La valeur du coefficient de corrélation variait de 0.8 à 0.99. La valeur du coefficient de corrélation était proche de un. Cela signifie que l'inclusion de GBR dans le béton donne une influence significative sur les propriétés de durabilité. Le GBR augmente la porosité du béton et devient plus absorbant au liquide que dans le béton de référence. Il diminue de sa masse volumique et augmente la connectivité des pores. La Figure III. 23 montre la variation de VOU avec la porosité ouverte séchée. La VOU diminue pendant que l'eau présente dans les pores

s'évapore. Par conséquent, elle diminue avec l'augmentation de la porosité séchée. De plus, quand les pores accessibles à l'eau étaient presque totalement secs, la VOU converge à une valeur constante. Ainsi, on a observé que, pour tous les bétons, il y avait un rapport inverse entre la VOU et la porosité ouverte séchée.

Des valeurs plus élevées du coefficient de corrélation indiquent que la porosité ouverte a une bonne corrélation avec l'absorption, masse volumique et la VOU.

Une analyse de régression a été faite pour établir une relation générale entre les propriétés de résistance et de durabilité. L'analyse a été réalisée en utilisant les données des résultats globaux. La corrélation entre les propriétés de résistance (résistance à la compression, résistance à la flexion) et les propriétés de durabilité (porosité ouverte, masse volumique et absorption par immersion) est illustrée sur les Figures III. 27 à III. 32. La valeur du coefficient de corrélation varie de 0.83 à 0.97 pour la relation entre les propriétés de résistance à la compression et de durabilité. De même, la valeur R^2 varie de 0.83 à 0.94 pour la relation entre les propriétés de résistance à la flexion et de durabilité. Des valeurs de coefficient plus élevées indiquent qu'une propriété de résistance a une bonne corrélation avec la durabilité.

Cela signifie qu'une augmentation de la porosité ouverte avec l'introduction de GBR dans le béton conduit à une diminution de la résistance à la compression et diminue la qualité du béton. Les valeurs du coefficient de corrélation indiquent que les propriétés de résistance (résistance à la compression et à la flexion) ont une forte relation avec l'absorption par immersion et masse volumique. Généralement, une augmentation de la porosité conduit à une diminution de la résistance.

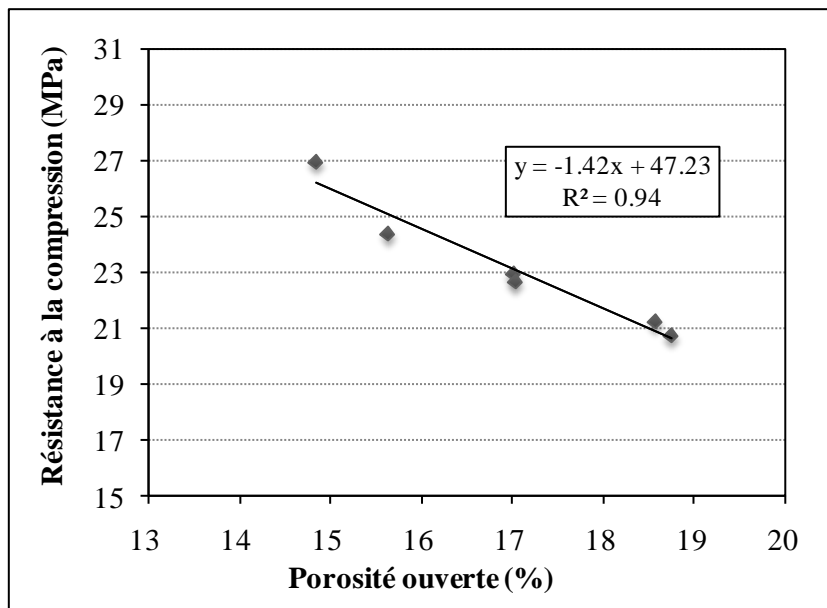


Figure III. 27: Résistance à la compression en fonction de la porosité ouverte.

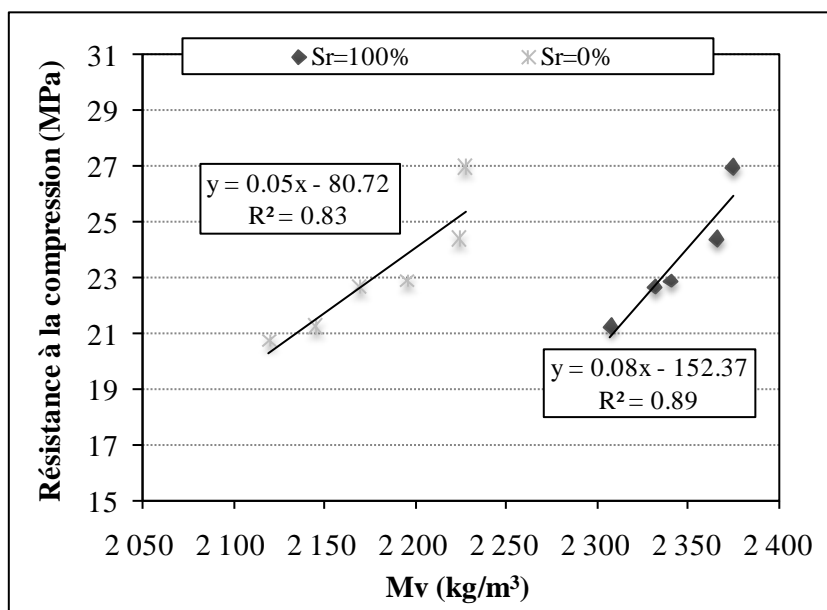


Figure III. 28: Résistance à la compression en fonction de la masse volumique.

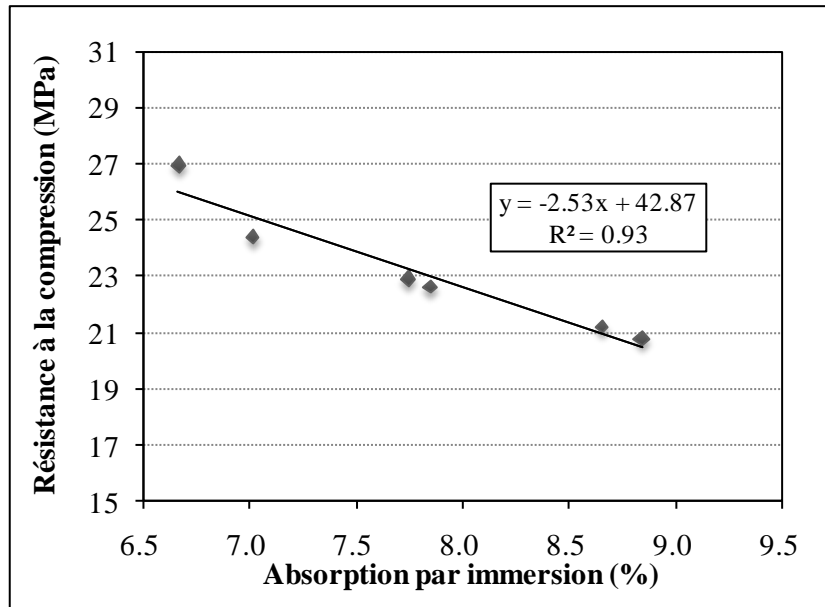


Figure III. 29: Résistance à la compression en fonction de l'absorption par immersion.

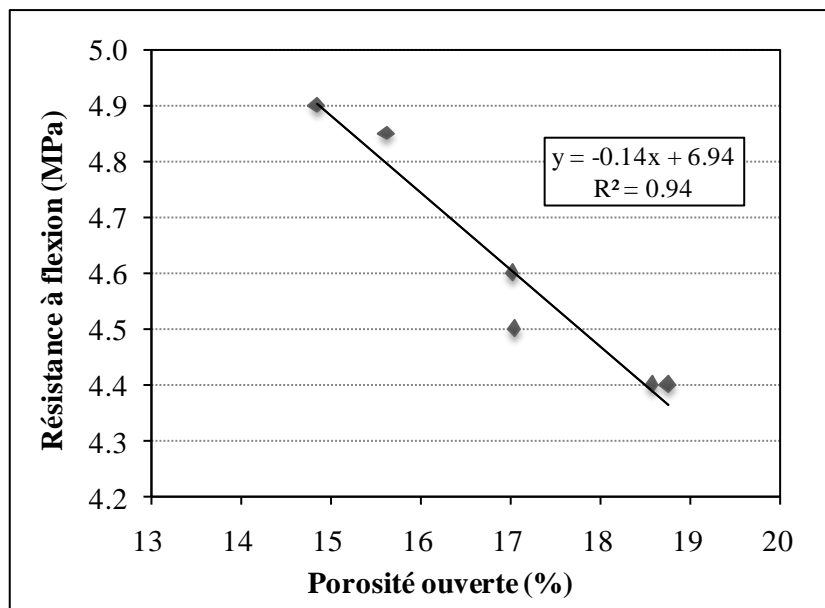


Figure III. 30: Résistance à la flexion en fonction de la porosité ouverte.

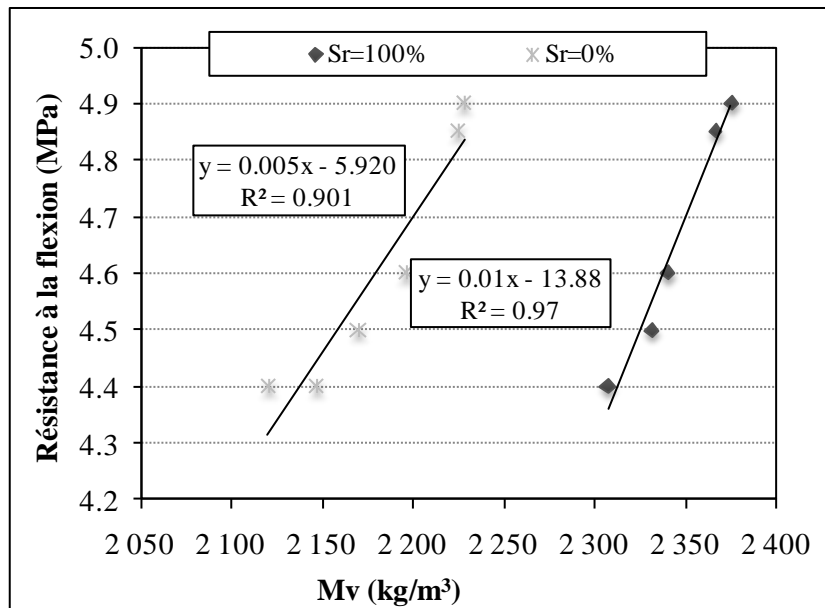


Figure III. 31: Résistance à la flexion en fonction de la masse volumique.

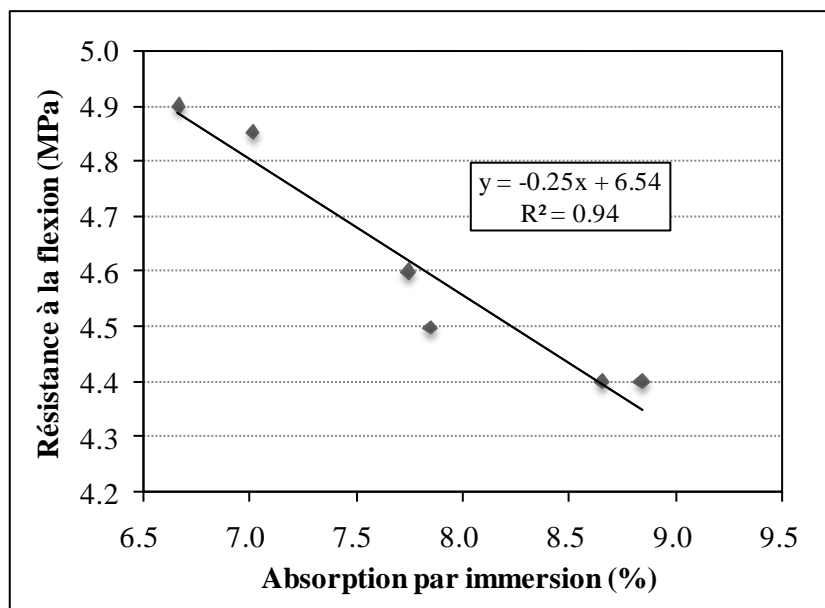


Figure III. 32: Résistance à la flexion en fonction de l'absorption par immersion.

Les analyses de régression montrées sur les Figures III.33 à III.38 montrent clairement la forte liaison entre les valeurs de ces différentes propriétés et le taux de substitution des GN par les GBR. Une relation linéaire sous la forme de $y = ax + b$ semble correspondre le mieux aux données avec la valeur R^2 la plus élevée (0.92 à 0.99). La valeur du coefficient de corrélation était très proche de un. Cela signifie que l'inclusion de GBR dans le béton donne une influence significative sur les différentes propriétés de durabilité et de résistance.

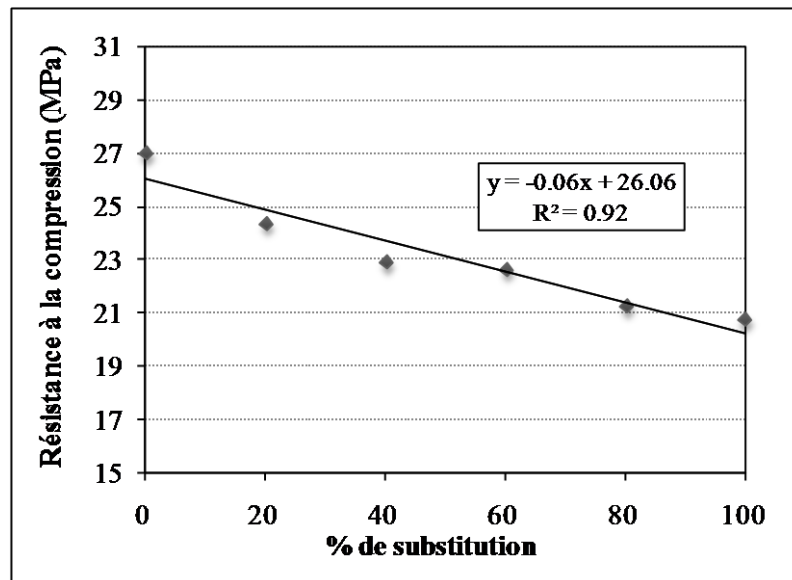


Figure III. 33: Résistance à la compression en fonction de % de substitution.

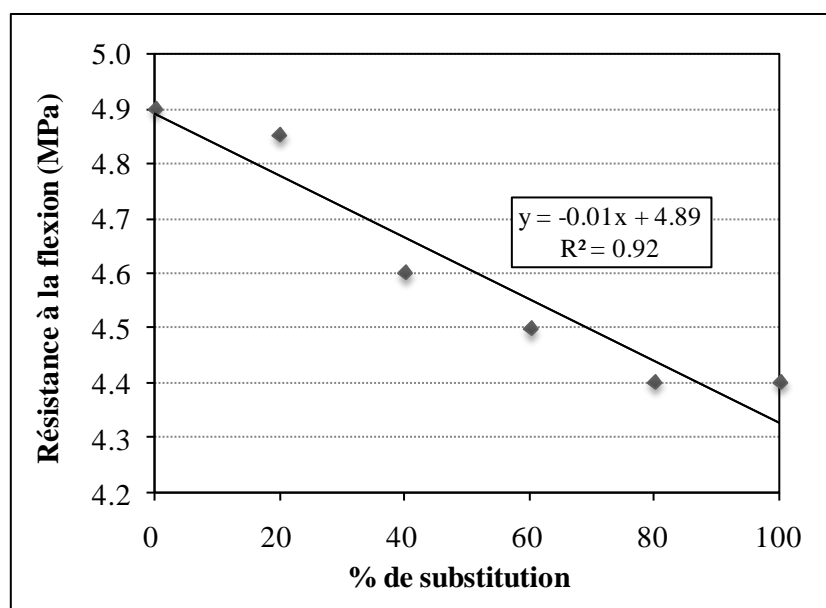


Figure III. 34: Résistance à la flexion en fonction de % de substitution.

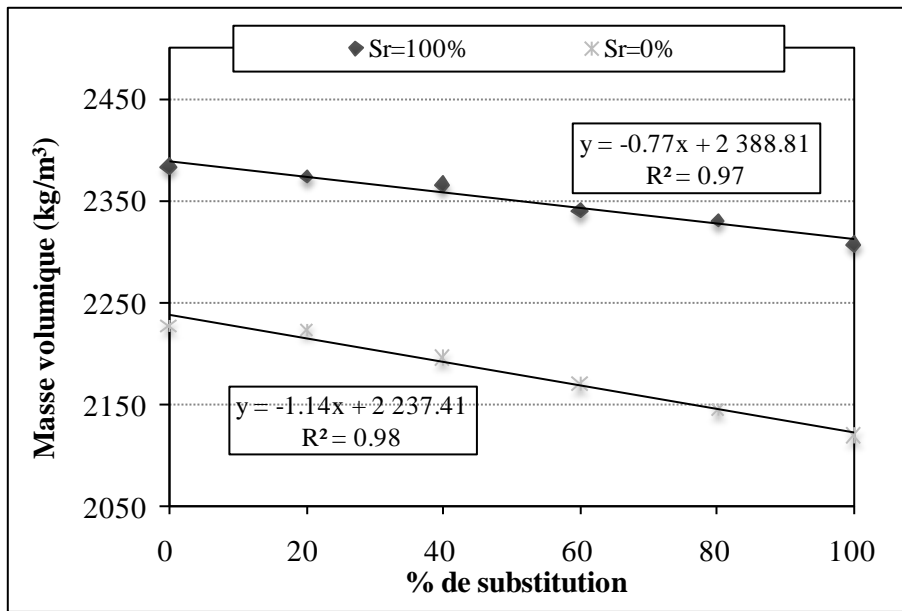


Figure III. 35: Masse volumique en fonction de % de substitution.

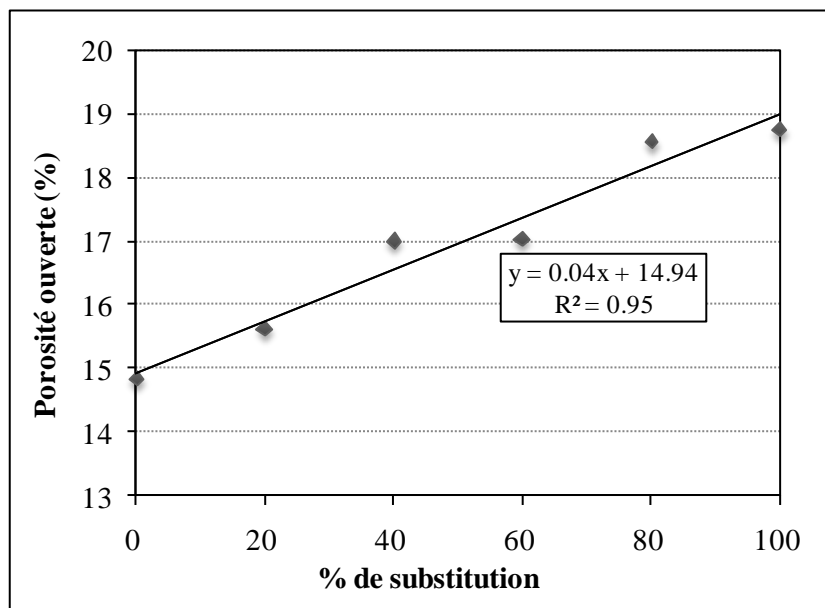


Figure III. 36: Porosité ouverte en fonction de % de substitution.

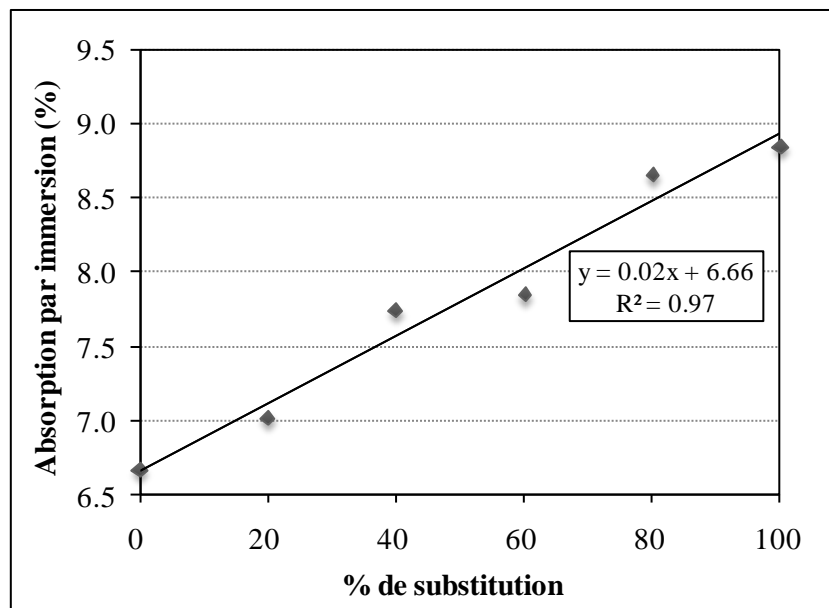


Figure III. 37: Absorption par immersion en fonction de % de substitution.

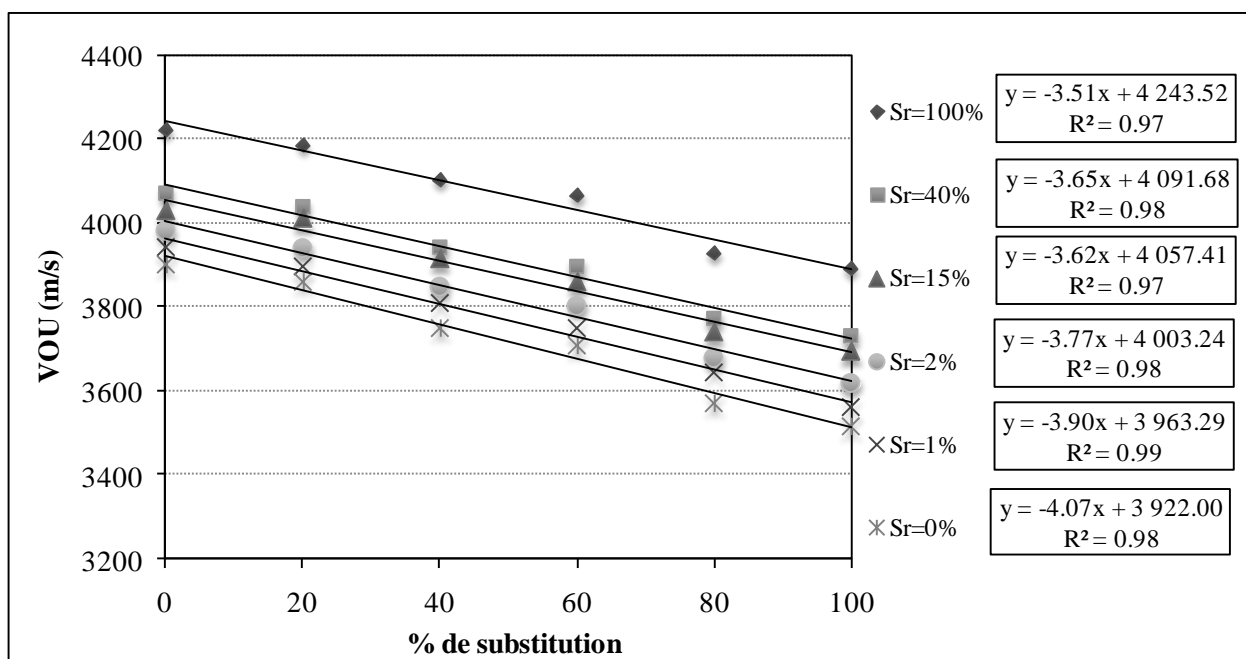


Figure III. 38: VOU en fonction de % de substitution.

La Figure III. 38 montre que l'amplitude de la VOU est en fonction de l'état de saturation. La pente des équations de régression augmente avec le degré de saturation. Pour les valeurs de Sr de 100%, de 40%, de 15%, de 2%, de 1%, et 0%, la pente était -3.51, -3.65, -3.62, -3.77, -3.90, et -4.07, respectivement. Ainsi, la valeur absolue augmente de 3.51% pour les bétons entièrement saturés à 4.07% pour ceux dans l'état entièrement séché.

La diminution de la pente peut être expliquée sur le degré de connectivité de pore dans les bétons. Plus le contenu de GBR est élevé, plus la porosité est élevée et plus le degré de connectivité de pore sera important. Par conséquent, la propagation des ondes ultrasoniques est gênée, avec la teneur en eau de ces pores jouant également un rôle significatif en cela.

III.4.2 Corrélations des résultats des bétons à base de GBR4/16

La Figure III.39 montre la relation entre les propriétés de résistance (résistance à la compression, résistance à la flexion). Une relation linéaire sous la forme de $y = ax + b$ semble correspondre le mieux aux données avec les valeurs R^2 les plus élevées. La valeur du coefficient de corrélation est de 0.83. Des valeurs plus élevées du coefficient de corrélation indiquent que la résistance à la compression a une bonne corrélation avec la résistance à la flexion.

La Figure III.40 et III.41 montrent la relation entre les propriétés de résistance et la VOU. L'augmentation de la teneur en GBR a entraîné une diminution de la VOU. Cela signifie que la qualité du béton est réduite en termes de porosité et connectivité. En raison de la diminution de la qualité du béton, les propriétés de résistance ont également diminué. La déclaration ci-dessus est prouvée par des valeurs plus élevées de R^2 . Cela a varié de 0.80 à 0.99.

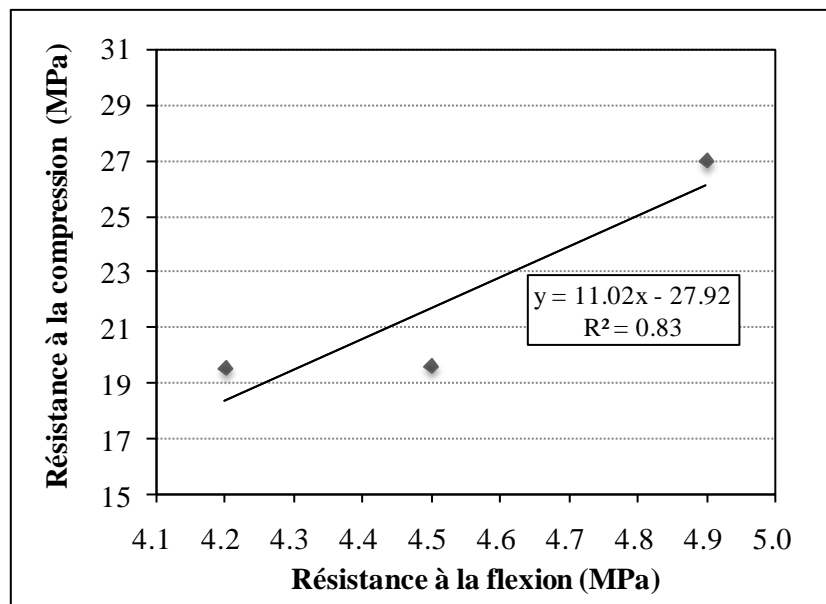


Figure III. 39: Résistance à la compression en fonction de la résistance à la flexion.

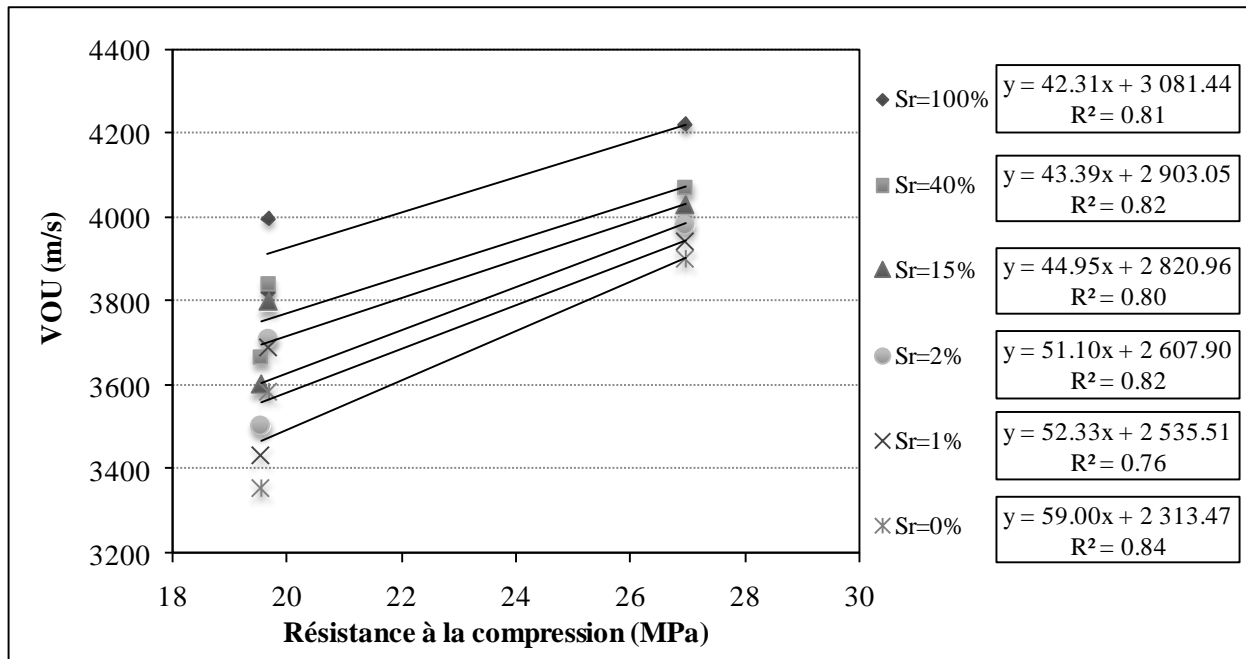


Figure III. 40: VOU en fonction de la résistance à la compression.

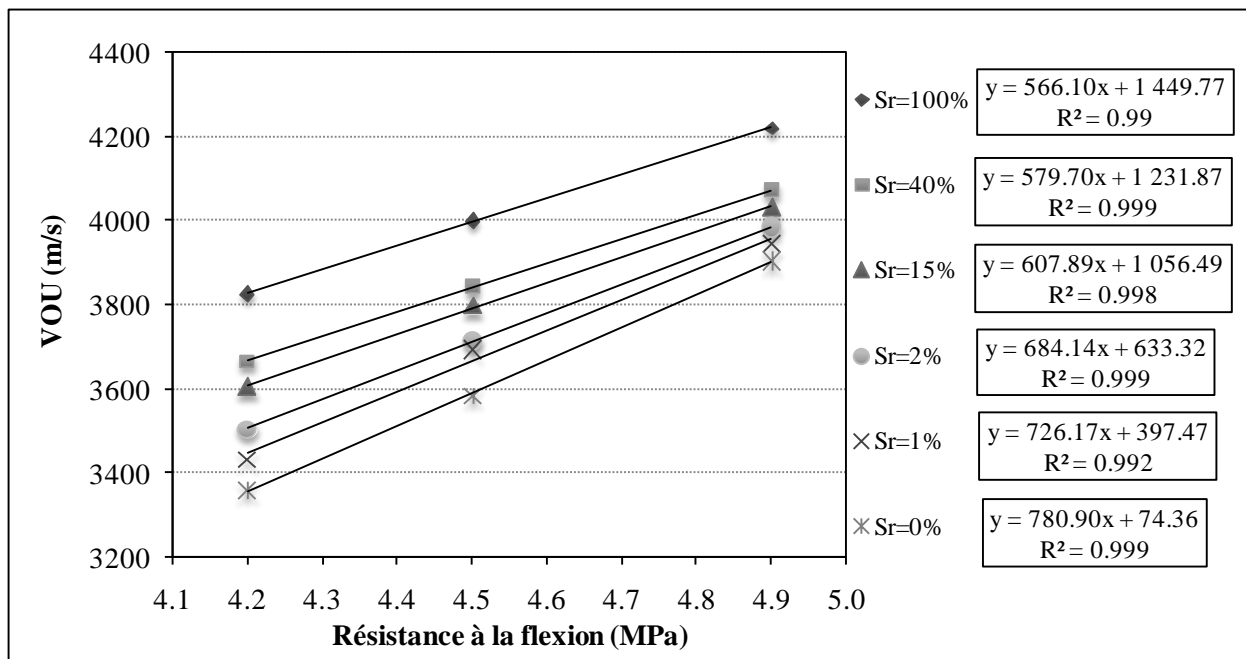


Figure III. 41: VOU en fonction de la résistance à flexion.

L'analyse de régression entre les propriétés physiques (masses volumique, absorption et porosité ouverte) pour toutes les compositions de béton est illustrée aux Figures III.42 à III.47. Une relation linéaire sous la forme de $y = ax + b$ semble correspondre le mieux aux données avec la valeur R² le plus élevée (0.82 à 0.99) indiquant une bonne corrélation. Les valeurs élevées du

coefficient de corrélation indiquent que la porosité est fortement liée aux autres propriétés durabilité et de VOU.

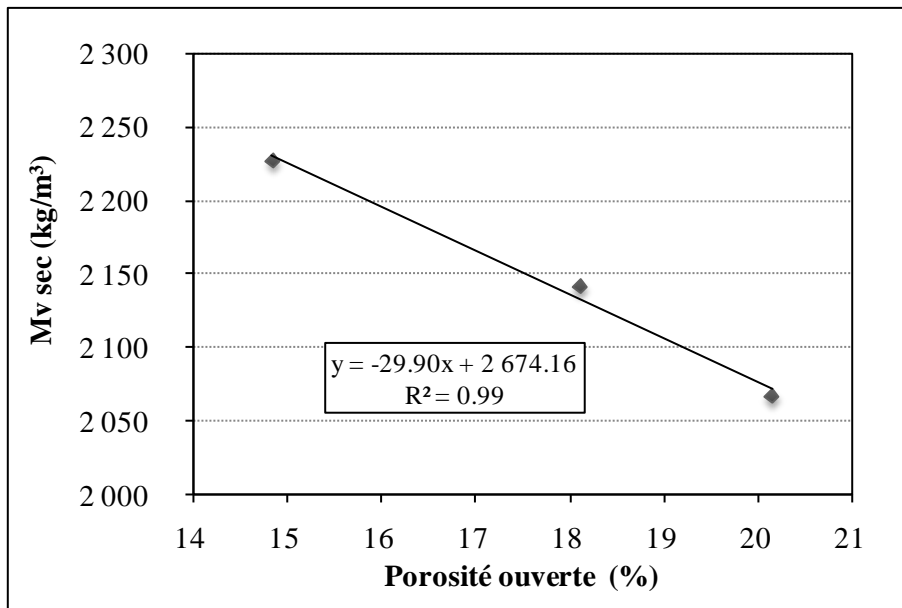


Figure III. 42: Masse volumique séchée (Mv sec) en fonction de la porosité ouverte.

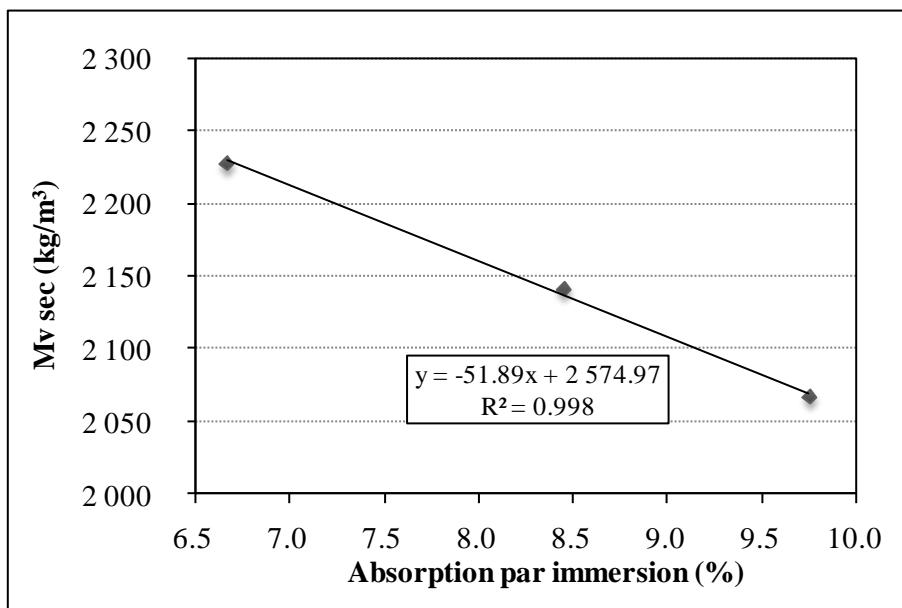


Figure III. 43: Mv sec en fonction de l'absorption par immersion.

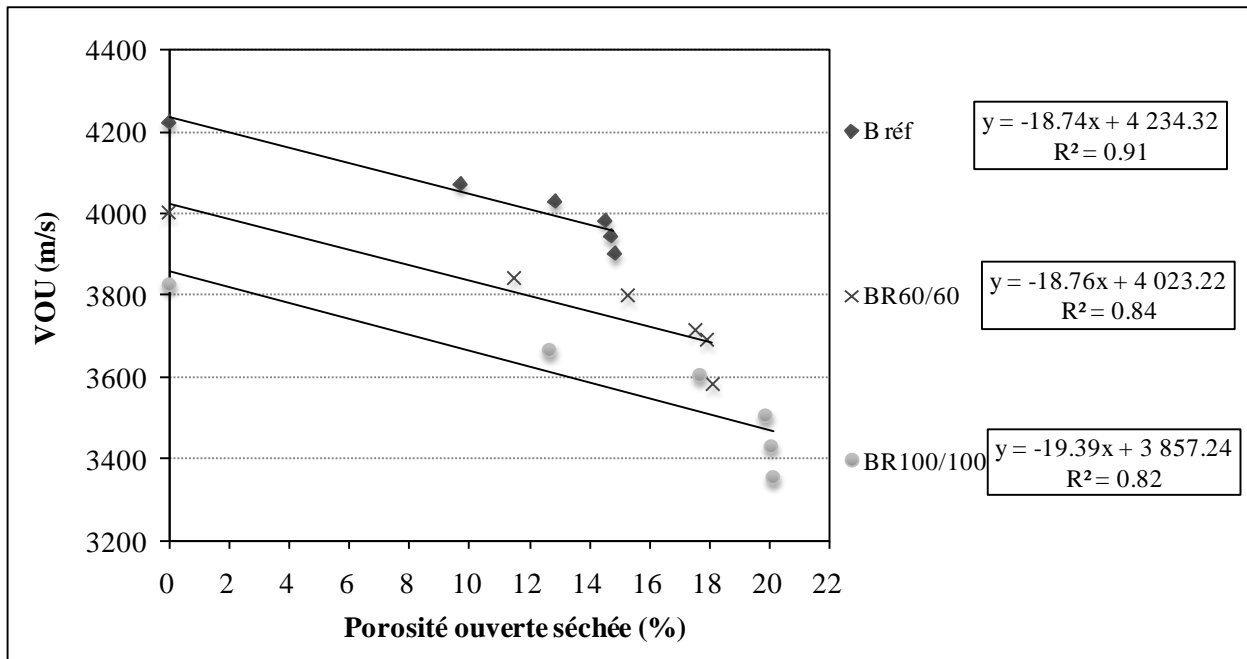
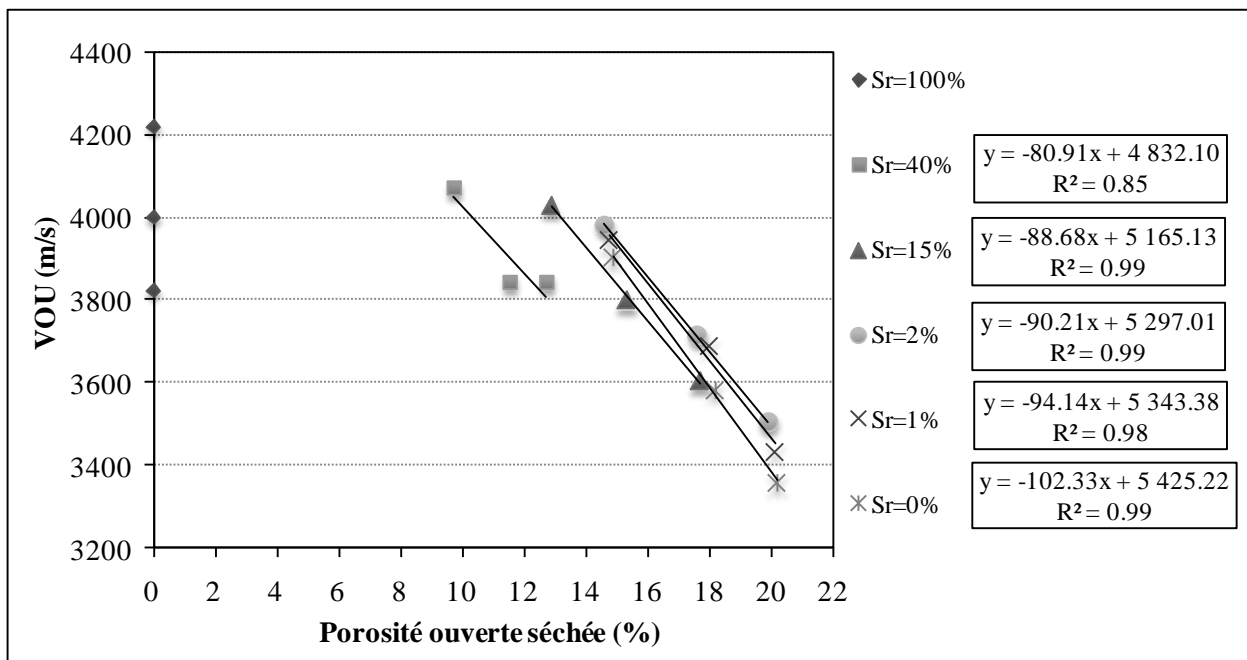


Figure III. 44: VOU en fonction de la porosité ouverte séchée.



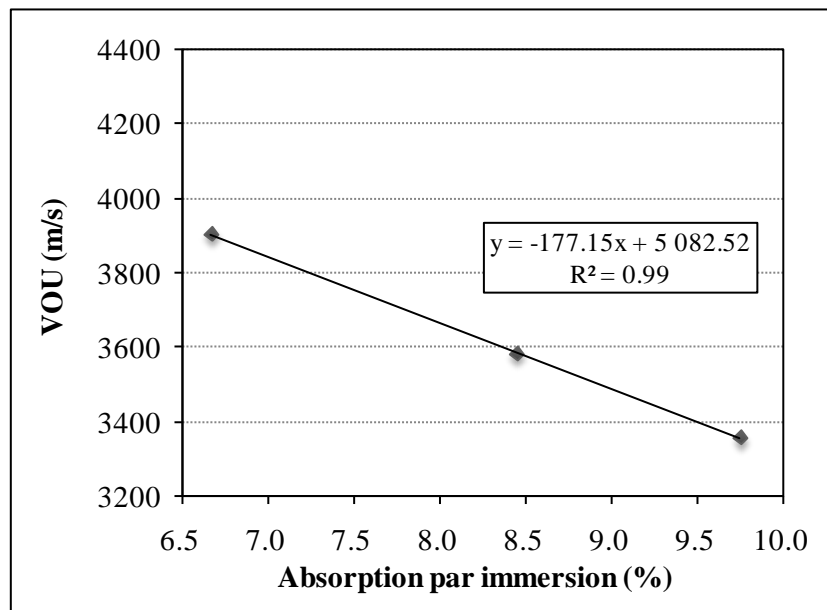


Figure III. 46: VOU en fonction de l'absorption par immersion.

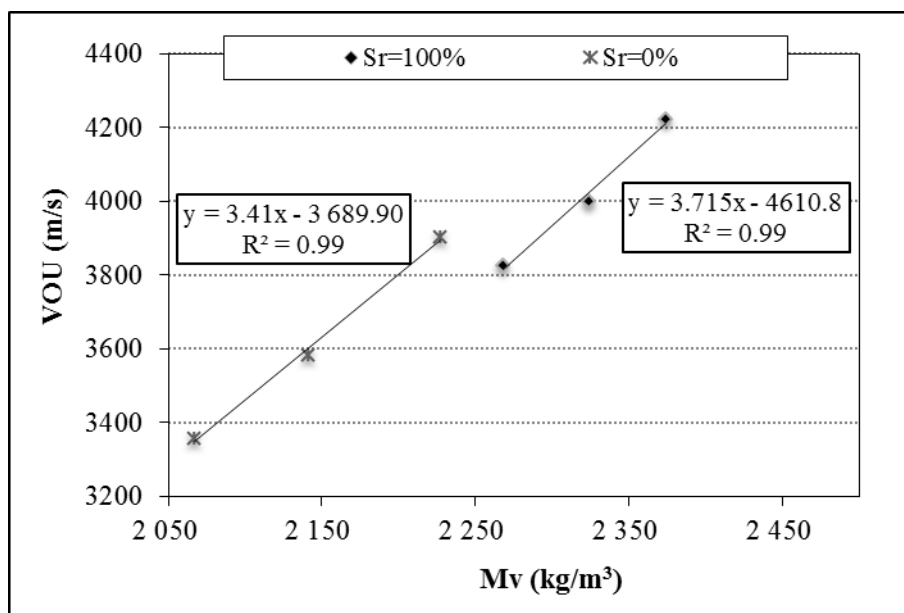


Figure III. 47: VOU en fonction de la masse volumique.

La relation entre les propriétés de résistance et de durabilité est illustrée aux Figures III.48 à III.53. Une équation linéaire était la meilleure correspondance avec la valeur du coefficient de corrélation (R^2) varie de 0.74 à 0.99. Une valeur plus élevée du coefficient de corrélation indique une forte liaison entre les propriétés de résistance et physiques.

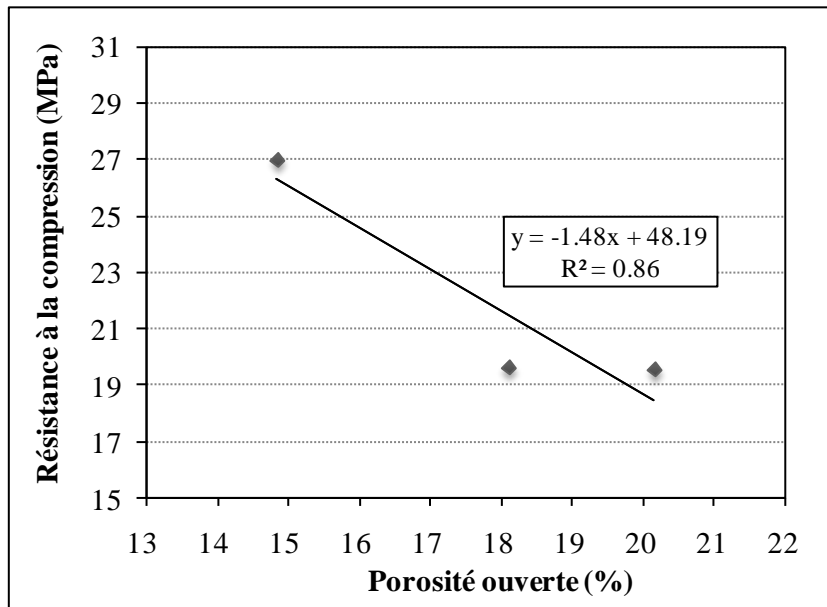


Figure III. 48: Résistance à la compression en fonction de la porosité ouverte.

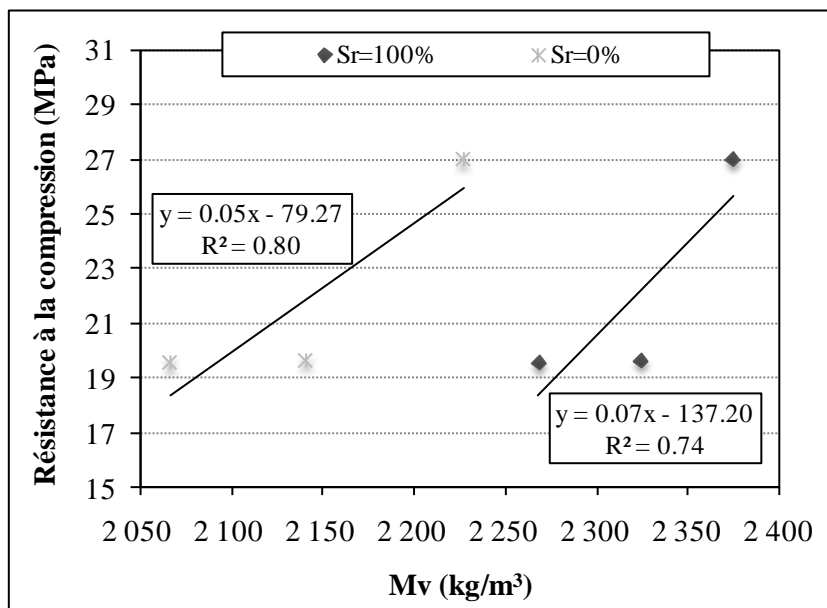


Figure III. 49: Résistance à la compression en fonction de la masse volumique.

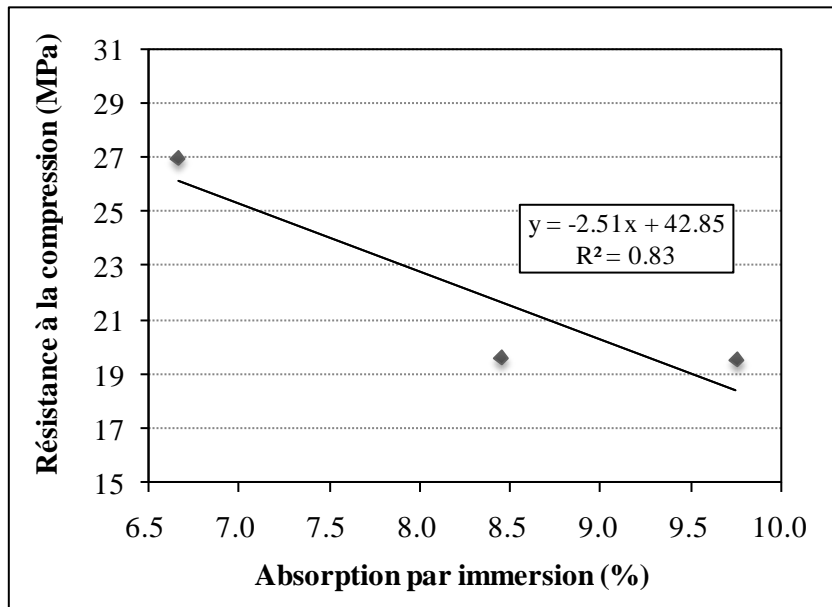


Figure III. 50: Résistance à la compression en fonction de l'absorption par immersion.

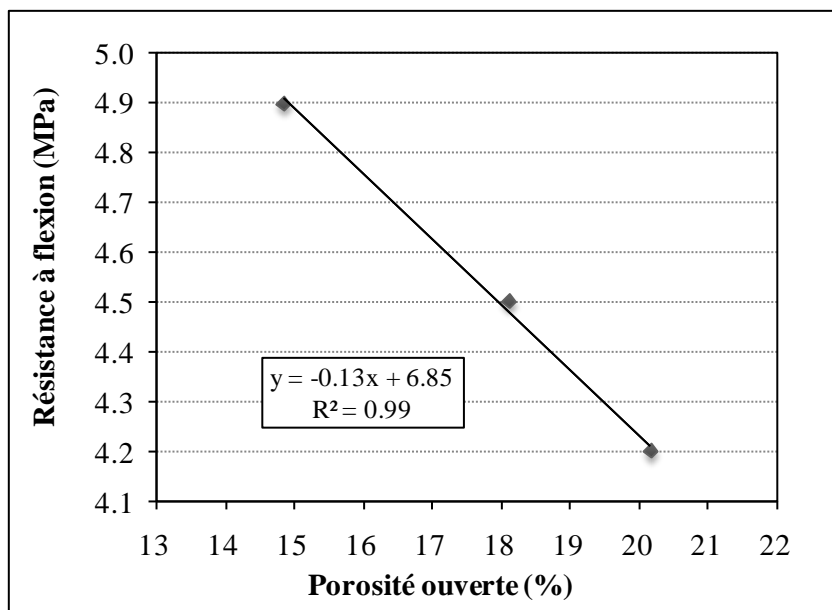


Figure III. 51: Résistance à la flexion en fonction de la porosité ouverte.

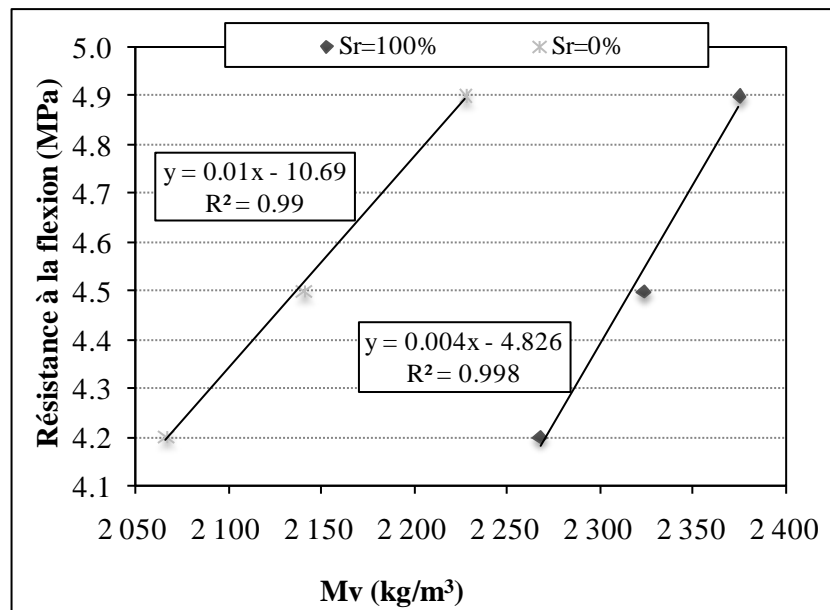


Figure III. 52: Résistance à la flexion en fonction de la masse volumique.

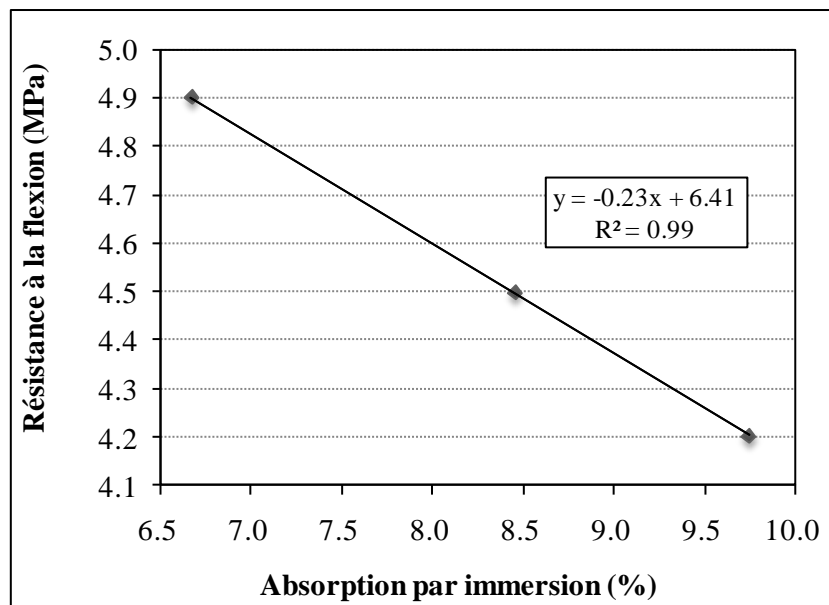


Figure III. 53: Résistance à la flexion en fonction de l'absorption par immersion.

Les Figures III.54 à III.59 montrent la relation entre les valeurs de ces différentes propriétés et le taux de substitution des GN par les GBR. Une relation linéaire sous la forme de $y = ax + b$ semble correspondre le mieux aux données avec la valeur R^2 la plus élevée (0.85 à 0.99). Cela signifie que l'inclusion de GBR dans le béton donne une influence significative sur les différentes propriétés de durabilité et de résistance.

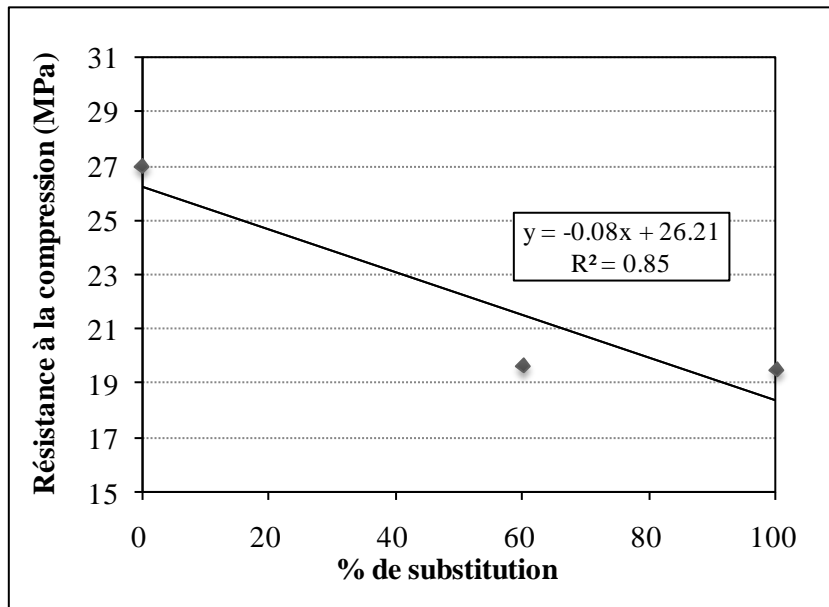


Figure III. 54: Résistance à la compression en fonction de % de substitution.

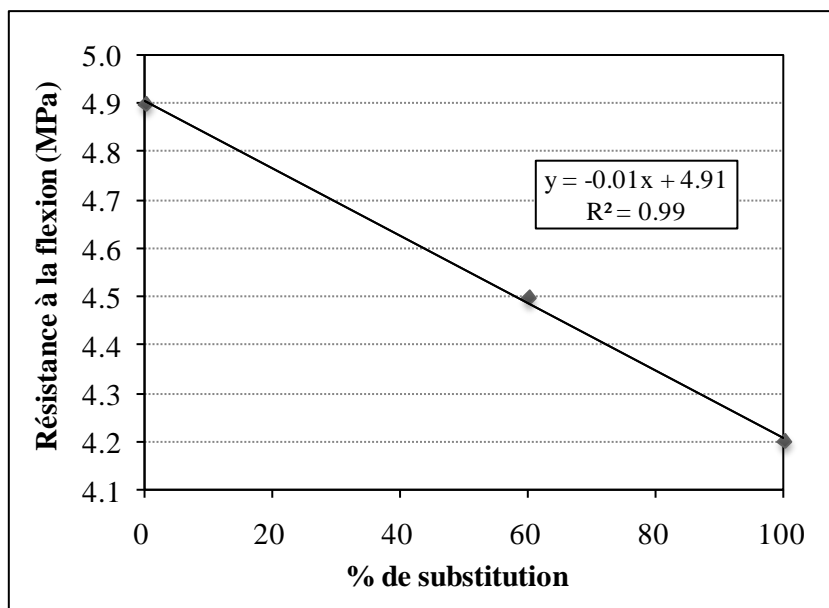


Figure III. 55: Résistance à la flexion en fonction de % de substitution.

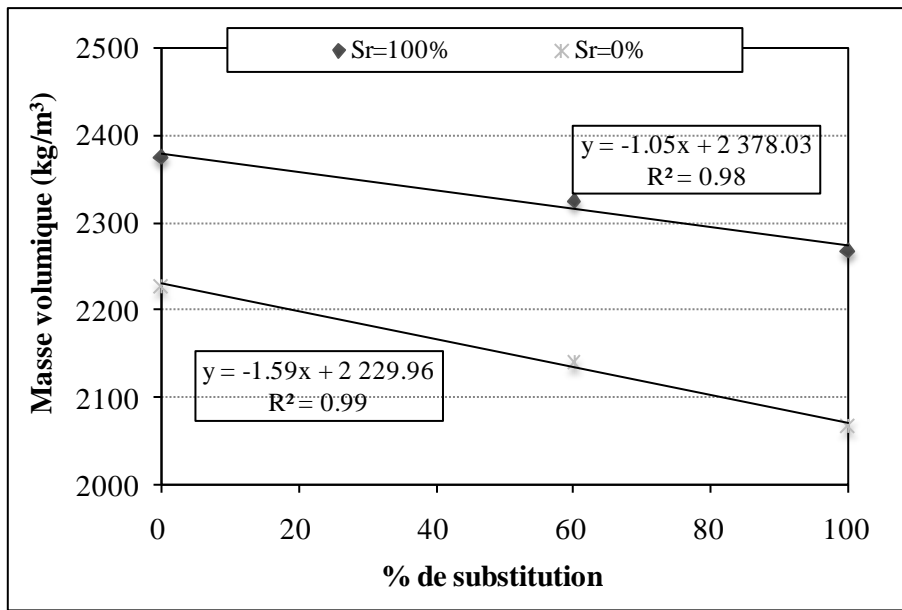


Figure III. 56: Masse volumique en fonction de % de substitution.

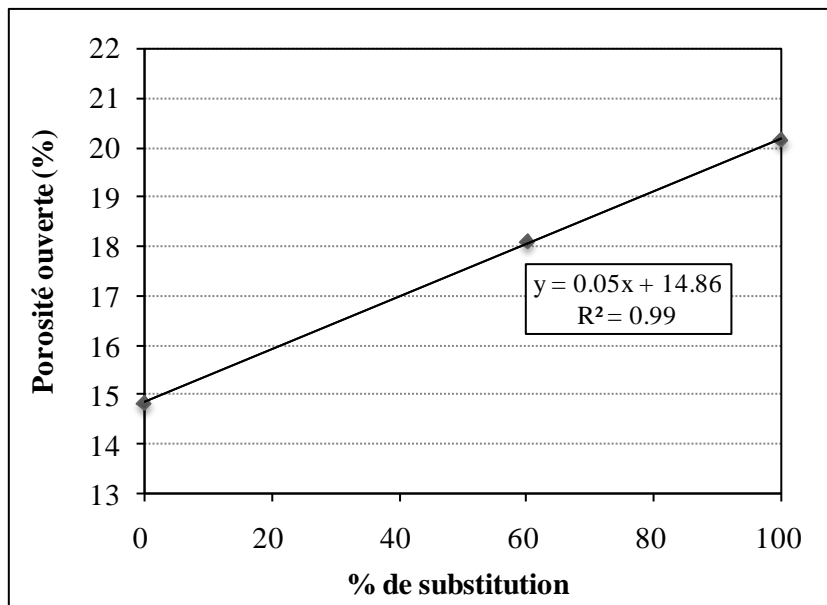


Figure III. 57: Porosité ouverte en fonction de % de substitution.

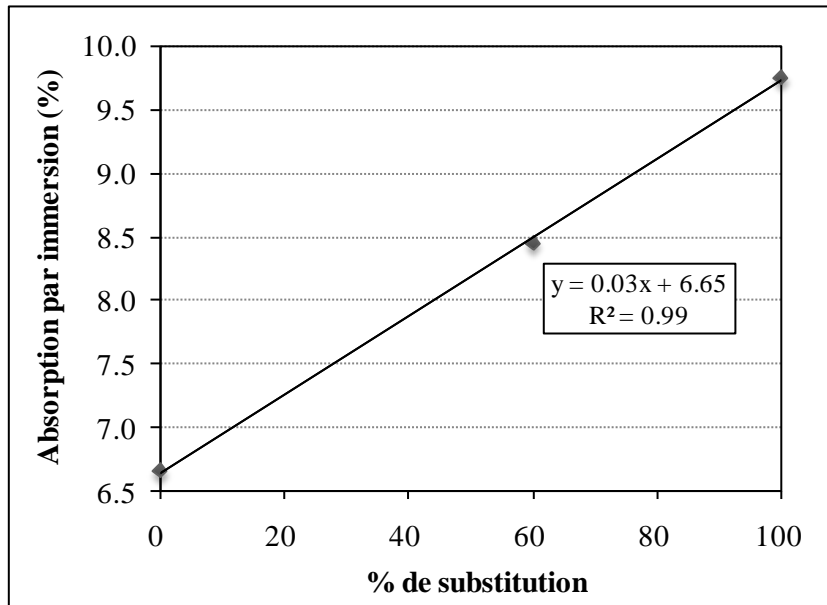


Figure III. 58: Absorption par immersion en fonction de % de substitution.

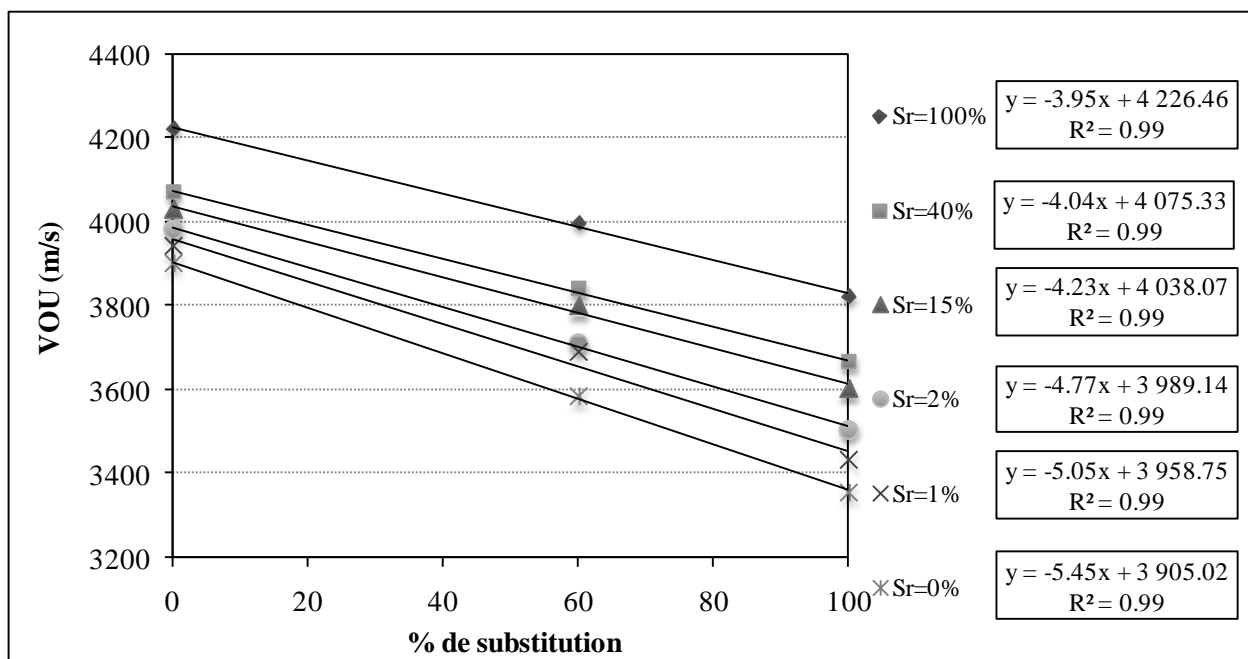


Figure III. 59: VOU en fonction de % de substitution.

L'amplitude de la VOU est en fonction de l'état de saturation (voir Figure III. 59). La pente des équations de régression augmente avec le degré de saturation. Pour les valeurs de Sr de 100%, de 40%, de 15%, de 2%, de 1%, et 0%, la pente était -3.95, -4.04, -4.23, -4.77, -5.05, et -5.45, respectivement. Ainsi, la valeur absolue augmente de 3.95% pour les bétons entièrement saturés

à 5.45 % pour ceux dans l'état entièrement séché. Ces valeurs sont plus importantes en comparaison à celles obtenues sur les bétons fluides à base de GBR8/16. Cette augmentation est liée à cette la taille des GBR utilisée dans ces bétons (4/16), qui a entraîné un volume et un nombre de porosité plus importants dans le béton et par conséquent une connectivité des pores plus importante. Par conséquent, la propagation des ondes ultrasoniques est retardée plus, ainsi la teneur en eau de ces pores jouant un rôle également significatif en cela.

III.4.3 Comparaison statistique des différentes propriétés de béton à base de GBR8/16

Une étude statistique consiste à évaluer l'effet du taux de substitution des GN par les GBR sur les différentes propriétés du béton. Les résultats précédemment discutés seront comparés.

Le Tableau III.7 résume l'analyse statistique de l'effet du taux de substitution sur la résistance à la compression, porosité ouverte et vitesses des ondes ultrasoniques.

Tableau III. 7: Analyse statistique de l'effet du taux de substitution sur quelques propriétés de béton.

Propriété		B réf	BR20	BR40	BR60	BR80	BR100
Résistance à la compression (MPa)	Sd (MPa)	0.6	0.1	0.97	0.93	0.75	0.22
	LSD (MPa)	2.72					
Porosité ouverte (%)	Sd (MPa)	0.63	0.23	0.18	0.63	0.24	0.06
	LSD (MPa)	1.05					
VOU à Sr =100% (m /s)	Sd (m/s)	21.08	55.2	16.17	31.18	46.09	39.69
	LSD (m/s)	111.65					
VOU à Sr =40% (m /s)	Sd (m/s)	21.94	17.58	16.07	17.47	16.17	24.38
	LSD (m/s)	57.17					
VOU à Sr =15% (m /s)	Sd (m/s)	5.51	13.80	15.01	7.64	29.44	22.65
	LSD (m/s)	51.80					
VOU à Sr =2% (m /s)	Sd (m/s)	27.59	13.23	12.58	2.89	15.95	21.50
	LSD (m/s)	51.88					
VOU à Sr =1% (m /s)	Sd (m/s)	11.55	25.79	12.66	16.50	22.00	23.26
	LSD (m/s)	57.77					
VOU à Sr =0% (m /s)	Sd (m/s)	25.01	14.43	25.48	8.08	27.75	32.32
	LSD (m/s)	70.53					

Le LSD à 5% représente la plus petite différence significative entre deux moyennes dans l'ensemble des valeurs données. Pour les différents tests montrés sur le Tableaux III.7, les

différences observées entre les taux de substitution étaient statistiquement significatives à 95% de confiance.

Basant sur les données recueillies, pour les différentes propriétés montrées ci-dessus, la seule composition qui ne présente pas un changement statistiquement significatif entre les taux de substitution, tel que mesuré par le test-t avec un degré de confiance de 95%, est le BR20 de fraction 8/16. Au-delà de 20% de substitution, les propriétés de béton deviennent statistiquement différentes de celle de B réf.

Des études antérieures ont montré que le niveau de substitution 30% avait des effets acceptables sur les propriétés du béton, tout en remplaçant encore une proportion significative de l'agrégat naturel.

Cependant, selon les résultats obtenus dans cette étude, l'utilisation du GBR de classe 8/16 jusqu'à 60% de substitution ne sont pas considérablement préjudiciable aux propriétés de durabilité du béton en termes de porosité ouverte, résistance mécanique et de VOU.

III. 5 Conclusions

Le GBR a montré une réduction des propriétés de résistances (résistance à la compression et résistance à la flexion) et de durabilité (absorption par capillarité, porosité ouverte et absorption par immersion) des bétons étudiés.

Comparativement au béton composé uniquement de GN, l'introduction des GBR dans les bétons réduit proportionnellement à leur volume, les propriétés mécaniques de ces bétons. Une baisse de près de 23% et de 10.2 % pour la résistance à la compression et à la flexion respectivement, sont obtenues sur le béton formulé avec 100 % de GBR de fraction 8/16. Dans le cas où le GN de classe 4/16 a été complètement substitué par le GBR de classe 4/16 (substitution à 100%), il y avait une diminution de 27.5% et 14.3% de la résistance à la compression et à la flexion.

Les porosités ouvertes mesurées pour les différentes compositions varient d'environ 14% à environ 21%. Les valeurs d'absorption des bétons contenant les GBR sont plus élevées que celle du béton de référence et montrent une tendance croissante vers une teneur plus élevée en GBR. L'absorption d'eau de béton avec 100% de GBR de classe 8/16 était de 8.85%, contrairement à celle du B réf qui était de 6.66%, la différence étant de 32.88%.

Les bétons composés de GBR 8/16 et de GBR 4/16 présentent une absorption capillaire et une cinétique d'absorption plus élevée que celle du B réf. Ainsi, Les bétons fluides de GBR de classe 4/16 absorbent d'avantage d'eau que les bétons fluides composés de GBR de classe 8/16 (+1.68 et +1.07 pour les taux de substitution 100% et 60%, respectivement).

Ces augmentations de porosité ouverte et donc l'absorption d'eau sont attribuables à la structure poreuse du GBR, qui à son tour est liée au fait que l'agrégat présente une fissuration résiduelle dû au processus du concassage et à la porosité intrinsèque de la pâte de ciment durcie qui affecte la porosité finale du béton fait avec ces agrégats.

Une technique à l'ultrason a été développée pour évaluer le paramètre de durabilité tel que la porosité ouverte des bétons et cela à différents états de saturation. Par l'analyse des VOU obtenus sur les bétons formulés à des volumes en GBR variables on peut conclure que la porosité ouverte des bétons augmente avec le taux de substitution des GN par les GBR.

Par l'analyse des VOU obtenus sur les bétons testés à différents états de saturation, les changements des VOU sont inversement proportionnels à la diminution du degré de saturation. Pour le B réf, la VOU diminue de 4222 m/s au $S_r = 100\%$ à 3903 m/s au $S_r = 0\%$. Pour BR100, la VOU diminue de 3893 m/s au $S_r = 100\%$ à 3515 m/s au $S_r = 0\%$. Les valeurs les plus élevées de la VOU ont été obtenues au $S_r = 100$ et les valeurs les plus basses de la VOU sont obtenues sur les bétons avec $S_r = 0\%$, où les pores ouverts sont totalement séchés.

Pour les différents états de saturation, des corrélations linéaires sont obtenues avec des pentes de plus en plus accentuées en passant de l'état complètement saturé aux états partiellement saturés puis complètement séché. Cela peut s'expliquer par le réseau de pores capillaires, plus le volume de GBR dans le béton est grand, plus la connectivité des pores est importante. La perméabilité du béton se trouve alors augmentée car il y a plus de chemins d'accès pour l'eau. L'analyse des corrélations a montré qu'il existe de bonnes corrélations entre les différentes propriétés des bétons étudiés.

Conclusion générale et **perspectives**

Conclusion générale et perspectives

Le nombre croissant de structures en béton présentant des symptômes de détérioration prématurée due à l'action environnementale exigent des procédures pour estimer la durabilité de ce type de composant. La capacité des fluides agressifs à pénétrer dans le béton est liée à la porosité du béton et la connectivité de la structure des pores capillaires. Ainsi, les bétons produits à base de GBR doivent être testés avec soin pour s'assurer qu'ils présentent des propriétés mécaniques et de durabilité souhaitables. Les objectifs de ce travail de thèse étaient donc d'évaluer et de comparer les propriétés mécaniques et de durabilité des bétons à base de granulats recyclés à celles d'un béton composé uniquement de granulats naturels, puis de développer une technique d'évaluation par ultrasons de la porosité ouverte des bétons recyclés pour élucider les corrélations entre la vitesse des ondes ultrasoniques, la teneur en GBR et la porosité ouverte. Pour estimer la variation de degré de connectivité des pores du béton en fonction du taux des GBR, nous avons testé les différents bétons à différents états de saturation.

Sur la base des résultats de la présente étude, les conclusions suivantes sont tirées.

1. Résistances mécaniques

i. La résistance à la compression des deux catégories de bétons fluides (bétons de GBR8/16 et bétons de GBR4/16) avec le taux de substitution de granulats naturels par des GBR. Ainsi, la taille du GBR a un effet sur la résistance à la compression, le taux de perte de résistance pour les bétons fluides à base de GBR de taille 4/16 (27.5%) est plus important que celui des bétons de GBR de taille 8/16 (23%). Cependant, la résistance à la compression observée jusqu'à 60% de substitution de GBR8/16 reste appropriée pour des utilisations structurales.

ii. La résistance à la flexion semble être équivalente pour les bétons recyclés et le béton de référence. Néanmoins, le béton contenant 100% de GBR4/16 présente une résistance légèrement faible.

2. Propriétés de durabilité

i. Les valeurs de masses volumiques diminuent avec l'augmentation du taux des GBR dans le béton. Cela peut être un avantage dans la conception de structures où le béton léger est préféré.

ii. La porosité ouverte des compositions de béton augmente avec l'augmentation de la teneur en GBR pour les deux catégories de béton, notamment celles des bétons à base de GBR4/16. En outre, l'augmentation de la quantité de GBR substitué, augmente l'absorption d'eau par immersion et par capillarité. Ces paramètres sont influencés par la structure poreuse du GBR, qui a induit une porosité plus importante dans le béton et par conséquent une connectivité des pores plus importante.

Les résultats des essais concernant toutes les formulations des bétons étudiés permettent de conclure que le béton produit en utilisant jusqu'à 60% de granulats recyclés de classe 8/16 (obtenus à partir de bétons concassés avec une classe de résistance de 20 MPa) ont montré des résultats satisfaisants en termes de résistances mécanique et de durabilité en comparaison avec le béton de référence. Ainsi, les GBR provenant des bétons d'origine de résistance légèrement faible, peuvent être utilisés avec succès dans les bétons fluides. Les producteurs devraient être encouragés à optimiser l'utilisation des granulats de béton recyclés.

3. Vitesses des ondes ultrasoniques

Dans cette étude, la méthode de vitesse des ondes ultrasoniques a été utilisée pour estimer la porosité ouverte et la connectivité des pores des bétons de GBR et de déterminer les corrélations entre les VOU, le taux des GBR, et la porosité ouverte de ces bétons et cela à différents états de saturations.

Les résultats ont montré que la vitesse des ondes ultrasoniques diminue avec l'introduction des GBR. Egalement, l'amplitude de la VOU diminue avec la diminution du niveau de saturation.

Ainsi la taille des GBR a un effet sur les VOU, plus le béton contient du GBR plus petit et plus la vitesse est réduite, car la teneur en mortier dans un GBR plus petit est plus importante que dans un GBR plus gros et par conséquent une porosité plus élevée.

Les valeurs les plus élevées de la VOU sont obtenues sur les bétons avec $S_r = 100\%$, et les valeurs les plus basses sont obtenues avec $S_r=0\%$. Cela signifie que la VOU diminue pendant que l'eau présente dans les pores s'évapore. Par conséquent, elle diminue avec l'augmentation de la porosité séchée. L'eau dans les pores constitue un lien entre les phases solides pour le déplacement des ondes. On peut conclure également que le degré de connectivité des pores et les fissures influencent la VOU.

Les mesures de la VOU ont permis de détecter les différences dans les porosités ouvertes des différents bétons. Ainsi, la mesure de la VOU est une méthode non destructive très prometteuse pour analyser la porosité ouverte des bétons recyclés. C'est-à-dire que les mesures de la VOU peuvent être utilisées pour prédire la durabilité des structures en béton produites en utilisant des GBR à différents niveaux de saturation.

4. Analyse des corrélations

Dans cette analyse, la corrélation entre les propriétés de résistance et de durabilité a été étudiée. Il a été observé qu'il existe une bonne corrélation entre les propriétés de résistance et de durabilité pour les deux catégories de béton. Une relation linéaire sous la forme de $y = ax + b$ semble mieux correspondre aux données avec les valeurs de R^2 .

i. Le coefficient de corrélation entre les propriétés de résistance (résistance à la compression, résistance à la flexion) est très élevé (de 0.8 à 0.99). Ces propriétés de résistance ont également une très forte liaison avec la vitesse des ondes ultrasoniques (VOU).

ii. Une relation a été observée entre la masse volumique, absorption par immersion et la porosité ouverte. La valeur du coefficient de corrélation varie de 0.80 à 0.99. Cela signifie que l'introduction de GBR dans le béton donne une influence significative sur les propriétés de durabilité. Le GBR augmente la porosité du béton et devient plus absorbant aux liquides que le béton de référence. Il diminue de sa masse volumique et augmente la connectivité des pores. Ainsi, pour tous les bétons, il y avait une relation inverse entre la VOU et la porosité ouverte séchée avec des valeurs de R^2 très élevées. Une analyse des résultats de mesure de la VOU a montré que la porosité ouverte totale augmente avec une augmentation du taux de substitution de GN par GBR. En outre, la VOU diminue avec la quantité de GBR dans le béton; ceci est vrai pour tous les niveaux de saturation.

iii. En comparant les pentes des équations de régression obtenue entre la VOU et le taux de substitution, on a constaté que la valeur absolue de la pente augmente avec une diminution du niveau de saturation (de l'état complètement saturé à l'état partiellement saturé et finalement à l'état complètement sec). Ceci peut s'expliquer par la présence d'un réseau capillaire, qui augmente avec le remplacement de GN par les GBR, conduisant à une augmentation de la connectivité des pores. Par conséquent, la perméabilité du béton augmente parce que plus de pores sont accessibles à l'eau.

Les travaux réalisés dans le cadre de cette thèse offrent différentes perspectives que l'on peut regrouper comme suit :

Les mesures des VOU ont été utiles pour détecter les différences de porosités ouvertes, montrant ainsi un fort potentiel en tant que méthode non destructive en permettant l'analyse de la porosité des échantillons de béton recyclés et cela à différents états de saturation. Néanmoins, ces essais devront être approfondis pour expliquer et justifier ces résultats en considérant d'autres paramètres de durabilité.

Les mesures de la VOU sont très influencées par l'état d'humidité. Toutefois, pour les six cas d'humidité, on constate la même tendance, à savoir l'augmentation des vitesses avec l'augmentation de la résistance mécanique, soit une augmentation du taux des GN dans le volume des bétons. Ce qui peut être envisagé en perspective, c'est de rechercher une formule qui permettrait d'estimer la résistance mécanique en fonction des vitesses de propagation des ondes ultrasoniques et la porosité du béton ainsi que son état d'humidité.

Dans l'étude des VOU, nous avons mis en évidence l'effet de la saturation en eau du béton. Une étude de ces mêmes essais à des températures variables serait intéressante. Elle apporterait des compléments d'informations sur les effets de la température sur les VOU.

Par ailleurs, l'effet des différents taux de substitution a été étudié. En termes de perspectives, concevoir un modèle prédictif de la durabilité du béton dépendant de quelques paramètres comme le rapport E/C, G/S, le pourcentage des granulats recyclés, et l'état de saturation seraient également intéressants d'étudier.

Références bibliographiques

- AFGC, Association Française du Génie Civil. 2000. Bétons autoplaçants : Recommandations provisoires. ABTP.
- AFPC-AFREM.1997. Concrete durability: determination of apparent density and water accessible porosity (in French), 121–5.
- Almeida, N., Branco, F., de Brito, J., and Santos, J. R. 2007. High-performance concrete with recycled stone slurry. *Cement and Concrete Research*, 37(2), 210-220.
- Alexander, MG., Ballim, Y., and Maketchine, JR. 1999. Guide to use of durability indexes for achieving durability in concrete structures, Research monograph no. 2, collaborative research by Universities of Cape Town and Witwatersrand, p 33
- Baron, J., and Ollivier, J. P. 1992. La durabilité des Bétons. Presse de l'école nationale des ponts et chaussées.
- Baron, J., and Ollivier, J. P. 1996. Les bétons- bases et données pour leur formulation. Editions Eyrolles, Paris.
- Breyse, D., and Gérard, B. 1997. Modeling of permeability in cement-based materials: Part 1. Uncracked medium. *Cement and Concrete Research*, 27 (5), 761–775.
- Çakır, Ö. 2014. Experimental analysis of properties of recycled coarse aggregate (RCA) concrete with mineral additives. *Construction and Building Materials*, 68, 17–25.
- Casuccio, M., Torrijos, MC., Giaccio, G., and Zerbino, R. 2008. Failure mechanism of recycled aggregate concrete. *Constr Build Mater* 22(7):1500–1506
- Chanvillard, G.1999. Le matériau béton : connaissances générales. Aléas.
- Chen, H. J., Yen, T., and Chen, K. H. 2003. Use of building rubbles as recycled aggregates. *Cement and concrete research*, 33(1), 125-132.
- Corinaldesi, V.2011. Structural concrete prepared with coarse recycled concrete aggregate: from investigation to design, advances in civil engineering, advances in civil engineering vol. 2011, Article ID 283984, p 6
- Debieb, F., Courard, L., Kenai, S., and Degeimbre, R. 2010. Mechanical and durability properties of concrete using contaminated recycled aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 32(6), 421–426.
- Debieb, F., and Kenai, S. 2008. The use of coarse and fine crushed bricks as aggregate in concrete. *Construction Building Materials*, 22(5), 886–893.

- Dhir, RK., Limbachiya, MC., and Leelawat, T. 1999. Suitability of recycled concrete aggregate for use in BS 5328 designated mixes. *Struct Buildings* 134(3):257–274.
- De Juan MS. 2004. Study on the use of recycled aggregates in structural concrete production (in Spanish), PhD thesis, Polytechnic University of Madrid, Madrid.
- Dreux, G., and Festa, J. 1998. *Nouveau guide du béton et de ses constituants*. 8^o édition Eyrolles.
- EN12504-4.2004. Testing concrete-Part 4: Determination of pulse velocity, European Committee for Standardization CEN.
- Etxeberria, M., Vázquez, E., Marí, A., and Barra, M. 2007. Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. *Cement and Concrete Research*, 37(5), 735–742.
- Evangelista, L., and de Brito, J. 2010. Durability performance of concrete made with fine recycled Concrete Aggregates. *Cem Concr Compos* 32(1):9–14
- Ferreira, L., de Brito, J., & Barra, M. 2011. Influence of the pre-saturation of recycled coarse concrete aggregates on concrete properties. *Magazine of Concrete Research*, 63(8).
- Gómez-Soberón, J. M. 2002. Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate: an experimental study. *Cement and concrete research*, 32(8), 1301-1311.
- Gomes, M., and de Brito, J. 2009. Structural concrete with incorporation of coarse recycled concrete and ceramic aggregates: durability performance. 42(5):663–675.
- Gonçalves, A., Esteves, A., and Vieira, M. 2004. Influence of recycled concrete aggregates on concrete durability, Abstract ID number: 279, <http://congreso.cimne.com/rilem04/admin/Files/p279.pdf>. Accessed 11 April 2012.
- Gonzalez, A., and Etxeberria, M. 2014. Experimental analysis of properties of high performance recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 52, 227-235.
- Gonzalez-Fonteboa, B., and Martinez-Abella, F. 2008. Concretes with aggregates from demolition waste and silica fume: materials and mechanical properties. *Build Environ* 43(4):429–437.
- Haddad, O. 2002. « Etude du couplage chemo-poromécanique des milieux poreux », application aux matériaux cimentaires » Mémoire de DEA , l'école polytechnique de Lille (France).
- Haddad, O. 2007. Contribution au développement d'outils d'aide à la formulation des BAP relatifs à la rhéologie à l'état frais et à la résistance au jeune âge, Thèse de doctorat, Université de Cergy Pontoise, France.
- Hansen, T. C., and Narud, H. 1983. Strength of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate. *Concrete International*, 5(1), 79-83.

- Hearn, N., Hooton, RD., and Nokken, MR. 2006. Pore structure, permeability and penetration resistance characteristics of concrete. In: Lammond JF, Pielert JH. (Eds.), Significance of tests and properties of concrete and concrete-making materials. Bridgeport: ASTM International STP 169D; p. 238–52.
- Huda, S. B., and Alam, M. S. 2014. Mechanical behavior of three generations of 100% repeated recycled coarse aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 65, 574-582.
- Huda, S. B., and Alam, M. S. 2015. Mechanical and freeze-thaw durability properties of recycled aggregate concrete made with recycled coarse aggregate. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27(10), 04015003.
- Katz, A. 2003. Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete. *Cement and Concrete Research*, 33(5), 703–711.
- Kantro, D.L. 1980. Influence des superplastifiants réducteurs d'eau sur les propriétés de la pâte de ciment – unslump test miniature », *cement and concrete aggregate Vol 2*, pp 95-102.
- Khelidj, A., Baroghel-Bouny, V., Bastian, G., Godin, J., and Villain, G. 2002. Transferts dans les bétons et durabilité des ouvrages : Détermination expérimentale des gradients résultant d'une interaction hydratation-séchage dans une dalle de béton (OA. No 39).
- Khatib, JM. 2005. Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate. *Cem Concr Res* 35(4):763–769.
- Kou, S., Poon, C., Agrela, F. 2011. Comparisons of natural and recycled aggregate concretes prepared with the addition of different mineral admixtures. *Cement Concr Compos* 33(8):788–795
- Kou, Srao, C., Poon, CS., and Wan, HW. 2012. Properties of concrete prepared with low-grade recycled aggregates. *Constr Build Mater*, 36, 881–9.
- Kwan, W. H., Ramli, M., Kam, K. J., and Sulieman, M. Z. 2012. Influence of the amount of recycled coarse aggregate in concrete design and durability properties. *Construction and Building Materials*, 26(1), 565-573.
- López-Gayarre, F., Serna, P., Domingo-Cabo, A., Serrano-López, MA., López-Colina, C. 2009 Influence of recycled aggregate quality and proportioning criteria on recycled concrete properties. *Waste Manage (Oxf)* 29(12):3022–3028.
- Li, J., Xiao, H., and Zhou, Y. 2009. Influence of coating recycled aggregate surface with pozzolanic powder on properties of recycled aggregate concrete. *Constr Build Mater* 23(3):1287–1291
- Malhotra, V. M. 1978. Use of recycled concrete as a new aggregate. In *Symposium on Energy and Resource Conservation in the Cement and Concrete Industry*, CANMET, Report N. 76–8 (39 p). Ottawa.

- Nan, SU., Kung-chung, HSU., and His-wen CHAI. 2001. A simple mix design method for self-compacting concrete. *CCR* 31, 1799–1807.
- Neville, A. M. 2000. *Propriétés des bétons*. Paris: Edition Eyrolles.
- NF EN 12390-3 AFNOR. Février. 2003. Essai pour béton durci – Partie 3: résistance à la compression des éprouvettes, IDC P18-455.
- NF EN 12390-5 AFNOR. Octobre 2001. Essai pour béton durci – Partie 5: Résistance à la flexion des éprouvettes, IDC P 18-433.
- NF EN 933-1. Mai 2012. Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats, Partie 1, détermination de la granularité, Analyse granulométrique par tamisage.
- NF EN1097-2.2010, Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats, Partie 2, Méthodes pour la détermination de la résistance à la fragmentation , Los Angeles.
- NF EN 1097-1.2011, Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats, Partie 1, Détermination de la résistance à l'usure, micro-Deval.
- NF EN 1097-6.2014, Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats, Partie 6, détermination de la masse volumique réelle et du coefficient d'absorption d'eau, Janvier 2014.
- Okamura, H., and Ouchi, M.2003. Self compacting concrete. *Journal of advanced concrete technology*, Vol1, N°1, 5-15.
- Park, SB., Seo, DS., Lee, J.2005. Studies on the sound absorption characteristics of porous concrete based on the content of recycled aggregate and target void ratio. *Cem Concr Res* 35(9):1846–1854.
- Poon, CS., Shui, ZH., and Lam, L.2004. Effect of microstructure of ITZ on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates. *Construction Building Materials*, 18(6), 461–468.
- Rao, CM., Bhattacharyya, SK., Barai ,SV. 2011. Influence of field recycled aggregate on properties of concrete. *Mater Struct*, 44(1), 205–220.
- Regourd, RM.1982. *L'hydratation du ciment portland. Le béton hydraulique P.E.N.P.*
- Safiuddin, M., Alengaram, UJ., Salam, MA., Jumaat, MZ., Jaafar, FF., and Saad, HB. 2011. Properties of high-workability concrete with recycled concrete aggregate. *Mater Res* 14(2):248–255
- Salesa, Á., Pérez-Benedicto, J. A., Colorado-Aranguren, D., López-Julián, P. L., Esteban, L. M., Sanz-Baldúz, L. J., and Olivares, D.2017. Physico–mechanical properties of multi–recycled concrete from precast concrete industry. *Journal of Cleaner Production*, 141, 248-255.

- Salih, S.A. 1987. Permeability and pore structure of cementitious composites. PhD thesis, University of Sheffield.
- Schwerzenbach. 2012. Operating Instructions Pundit Lab/ Pundit Lab+ Ultrasonic Instrument. Proceq SA.
- Silva, R.V., de Brito, J., and Saikia, N. 2013. Influence of curing conditions on the durability-related performance of concrete made with selected plastic waste aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 35(1), 23–31.
- Singh, SK., and Sharma, PC.2007. Use of recycled aggregates in concrete—a paradigm shift, *NBM&CW* October (no page) (<http://nbmcw.com/articles/concrete/waste-material-byproduct/576-use-of-recycled-aggregates-in-concrete-a-paradigm-shift.html>). Accessed 28 Feb 2012
- Skarendahl,a and Petersson,O. 1999. Self compacting concrete. state of the art report of RILEM Technical committee 174-SSC. Report 23.
- Soares, D., de Brito, J., Ferreira, J., and Pacheco, J. 2014. In situ materials characterization of full-scale recycled aggregates concrete structures. *Construction and Building Materials*, 71, 237–245.
- Tavakoli, M., and Soroushian, P. 1996. Strengths of recycled aggregate concrete made using field-demolished concrete as aggregate. *Materials Journal*, 93(2), 182-190.
- Teg.Mai.2005. The European Guidelines for Self-Compacting Concrete. *BIBM, CEMBUREAU, EFCA, EFNARC, ERMCO*;
- Thomas, C., Setién, J., Polanco, J. A., Alaejos, P., and De Juan, M. S. 2013. Durability of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 40, 1054-1065.
- Topçu, IB., and Sengel, S. 2004. Properties of concretes produced with waste concrete aggregate. *Cem Concr Res* 34(8):1307–1312.
- Tu, T-Y., Chen, Y-Y., and Hwang, C-L. 2006. Properties of HPC with recycled aggregates. *Cem Concr Res* 36(5):943–950.
- Vieira, JPB., Correia, JR., De Brito, J.2011. Post-fire residual mechanical properties of concrete made with recycled concrete coarse aggregates. *Cem Concr Res* 41(5):533–541.
- Yang, j., Du, Q., and Bao, y. 2011. Concrete with recycled concrete aggregate and crushed clay bricks. *constr build mater* 25(4):1935–1945
- Yen, T., Tang, C.W., Chang, C.S., Chen, K.H 1999. Flow behaviour of high strength high-performance concrete », *Cement and concrete composites*, vol 21, pp 413-424.
- Zaharieva, R., Buyle-Bodin, F., Skoczylas, F., and Wirquin, E.2003. Assessment of the surface permeation properties of recycled aggregate concrete. *Cement & Concrete Composites* 25, pp. 223–232.

- Zega, C.J., and Di Miao, A.A. 2011. Use of recycled fine aggregate in concretes with durable requirements. *Waste Manage* 31(11):2336–2340.
- Zhu, P., Zhang, X., Wu, J., and Wang, X. (2016). Performance degradation of the repeated recycled aggregate concrete with 70% replacement of three-generation recycled coarse aggregate. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, 31(5), 989-9.

Exemple de calcul :

Considérez les valeurs de vitesses des ondes ultrasoniques suivantes pour les compositions de bétons contenant les GBR de fraction 8/16. La variable comparée est le taux de substitution qui varie de 0%, 20%, 40%, 60%, 80% et 100%.

VOU en (m/s)	B réf	BR20	BR40	BR60	BR80	BR100
1	3928	3853	3739	3712	3568	3527
2	3878	3853	3735	3698	3547	3539
3	3902	3878	3781	3712	3602	3478
Moyenne	3903	3861	3752	3707	3572	3515

Pour déterminer la valeur de 5% du LSD:

1. Définissez le niveau de signification $b = 0.05$ pour une signification de 5% (confiance de 95%).
2. Définissez $k = 6$ comme le nombre total de niveaux de substitution (0%, 20%, 60%, 40%, 20, 0%).
3. Définissez $N = 18$ comme le nombre total de résultats pour les six taux de substitution.
4. Calculez $n = 3$ comme le nombre moyen de résultats pour chaque taux de substitution.
5. Calculer « α » pour l'utiliser dans le calcul du t- test:

$$\alpha = \frac{b}{k(k-1)/2} = \frac{0.05}{6(6-1)/2} = 0.0033334$$

6. Calculer la statistique t comme:

$$\alpha_{\frac{\alpha}{2}, N-K} = t_{0.001615} = 3.649$$

7. Calculer la moyenne carrée dans les taux de substitution comme la somme des carrés (SC = 6726) divisés par les degrés de liberté avec les types de béton (c'est-à-dire $N - k = 12$).

Remarque: une analyse ANOVA unidirectionnelle ou mono-facteur a été réalisée en utilisant EXCEL pour calculer ces valeurs:

ANOVA

Source	DDL	SC	MC	F	Pr > F
Modèle	5	355368	71073.600	126.804	< 0.0001
Erreur	12	6726	560.500		
Total	17	362094			

8. Calculez l'erreur standard de la différence entre deux moyennes:

$$SE = \sqrt{\frac{2(MS)}{k}} = \sqrt{\frac{2(560.5)}{3}} = 19.33$$

9. Calculez le 5% de LSD :

$$5\% LSD_a = t_{stat} \times SE = (3.649)(19.33) = 70.535 \text{ m/s}$$

Ce LSD 5% représente la plus petite différence significative entre les deux moyennes dans l'ensemble des valeurs données. Par conséquent, les vitesses dans le BR40, BR60, BR80 et BR100 sont significativement différentes puisque la différence de leurs moyennes est 151, 195, 330, 388 m/s respectivement ce qui est supérieur à 5% du LSD.

RESUME

Le recyclage des déchets issus de la construction est une voie prometteuse menant vers la construction durable. Le granulats de béton recyclé (GBR) est l'idée la plus répandue. Les GBR sont composés d'une partie de granulats naturels (GN) et d'une partie non négligeable de pâte de ciment durcie. Cette dernière apporte une porosité additionnelle au béton, porosité qui est un élément déterminant pour les propriétés mécaniques et de durabilité des bétons. En effet, une faible porosité constitue le meilleur moyen de défense des bétons contre les agents agressifs. Les objectifs de cette étude expérimentale visent à valoriser quelques matériaux de recyclage (déchets de marbre, granulats de béton recyclés, granulats de déchet de brique) et développer une technique à ultrason pour estimer la porosité et la connectivité des pores du béton.

Différentes formulations de bétons ont été composées en faisant une substitution volumique à différents pourcentages des GN par des GBR, le béton de référence est formulé avec uniquement des GN ; les autres paramètres de composition des bétons sont maintenus constants. Des essais de compression et de flexion ont été effectués pour évaluer les propriétés de résistance du béton. La durabilité a été approchée par des essais de porosité ouverte et d'absorption capillaire. Dans le test de vitesse des ondes ultrasoniques (VOU) les bétons ont été testés aux différents états de saturation pour étudier la connectivité des pores en fonction de l'évolution de la VOU. Une analyse statistique a été réalisée pour déterminer les corrélations entre ces différentes propriétés.

Les résultats des essais ont montré qu'il y a une diminution dans les propriétés de résistances (à la compression et à la flexion) et de durabilité (absorption par capillarité, porosité ouverte et absorption par immersion) des bétons étudiés. Cependant, les bétons produits en utilisant jusqu'à 60% de GBR ont atteint des propriétés satisfaisantes par rapport au béton de référence. L'analyse statistique a montré qu'il existe de bonnes corrélations entre le taux de substitution des GBR, la VOU, la porosité ouverte et l'état de saturation des bétons.

Mots clés : granulats de béton recyclé, porosité ouverte, VOU, état de saturation, résistance mécanique, connectivité, analyse statistique.

ABSTRACT

The recycling of construction waste is the promising way towards sustainable construction. Recycled concrete aggregates granulate (RCA) is the most common idea. RCA are composed of natural aggregate (NA) and a significant part of hardened and aged cement paste. This paste brings an additional porosity to the concrete, porosity that is a determining agent concerning the concrete mechanical strength and durability. Indeed, a weak porosity constitutes the best means to protect concretes against the aggressive agents. The purpose of this experimental study is to upgrade the use of some recycling materials (marble waste, recycled concrete aggregates, recycled brick aggregates) and to develop an ultrasonic technique to estimate the concrete porosity and pores connectivity.

For this purpose, different concrete compositions were formulated by varying the RCA content, the reference concrete is made only of NA; the other composition parameters are kept constants. Compressive test and flexural strength test were carried out to evaluate the strength properties of concrete. In case of durability property, open porosity and capillary absorption were evaluated. In the ultrasonic pulse velocity test (UPV), the concretes are examined at different saturation level to estimate the concrete pores connectivity according to the UPV evolution. Statistical analysis was carried out to determine the correlations between these different properties.

Test results showed that there is a decrease in the strength properties (compressive strength and flexural strength) and durability properties (capillarity absorption, open porosity and absorption by immersion) of the concretes studied. However, the concretes produced using up to 60% of RCA achieved satisfactory properties to conventional concrete. Statistical analysis showed that there is a strong correlation between RCA content, UPV, open porosity and the saturation state of concretes.

Keywords: recycled concrete aggregate, open porosity, UPV, saturation state, mechanical strength, connectivity, statistical analysis.