REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA



Faculté de **T**echnologie

Mémoire de fin d'études de Master

Filière : Génie Civil

Spécialité : Matériaux de construction

Valorisation des granulats recyclés dans la fabrication des bétons autoplacants

---

Présenté par

Said oussama

Lakrib aissa

Proposé et Dirigé par

M^{me} BACHENE Sara

P^{r} BOUKENDAKDJI Othman

Promotion Juin 2021

Remerciements

Nos sincères remerciements vont aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail et de l'enrichir par leurs propositions.

Nous adressonsnos sincères remerciements à nos promoteurs Mme BACHEN SARAet
M***r Boukendakdji .O, qui sans eux se mémoire n'aboutira jamais. Nous les remercions énormément de nous avoir encadré, de nous avoir prêté main forte durant cette période difficile, de nos avoir consacré tout son temps, de nos avoir fait part de ses précieux conseils. Nous lui adressons toute notre profonde gratitude et notre reconnaissance pour toute l'aide qu'ilsnous ontapportée pour la réalisation de ce travail.***

Nous tenons à remercier particulièrement nos parents sans lesquelsnous n'existerions pas et qui nous ont conduit jusqu'à l'âge adulte, pour leur patience à notre égard sans jamais douter de nos capacités.

Nous adressonsnos remerciements à tous les enseignants ainsi qu'aux techniciens du Laboratoire du Génie Civil qui par leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils, et leurs critiques ont guidé nos réflexions et ont accepté de répondre à nos questions durant toute la période de ce mémoire.

Résumé

Actuellement, l'utilisation de BAP contenant du GR est souvent limitée au grade inférieur et application non structurelle. Ce chapitre a passé en revue les caractéristiques de GR et leurs impacts correspondants sur les propriétés fraîches et durcies du BAP telles que maniabilité, performances mécaniques, durabilité qui aiderontpour les futurs progrès de la recherche dans ce domaine.En général, les GR ont une densité plus faible, une résistance plus faible, une porosité plus élevée et uneabsorption d'eau que GN.

ABSTRACT

Currently, the use of SCC containing RCA is often limited to the lower gradeand non-structural application. This chapter has reviewed the features of ACR andtheir corresponding impacts on the fresh and hardened properties of SCC such asmaneuverability, mechanical performance, durability which will help for the future progress of research in this field. In general, RCAs have lower density, lower strength, higher porosity, and water absorption than NA.

Key words: Self compacting concrete, Recycled aggregates

الملخص

حاليًا ، غالبًا ما يقتصر استخدام الخرسانة ذاتية التماسك المحتوي على الركام المعاد تدويره على الدرجة الأدنى والتطبيق غير الهيكلي. استعرض هذا الفصل ميزات الركام المعاد تدويره وتأثيرها المقابل على الخصائص الطازجة والمتصلبة لـ الخرسانة ذاتية التماسك مثل المناولة والأداء الميكانيكي والمتانة التي ستساعد في تقدم البحث المستقبلي في هذا المجال. بشكل عام ، تتميز الركام المعاد بكثافة أقل وقوة أقل ومسامية أعلى وامتصاص للماء من الركام الطبيعي...

TABLE DES MATIERES

Résumé.....

Remerciement.....

Table desmatières .....

Liste des figures.....

Liste destableaux.....

Liste des abréviations etdes notations……...

Introduction générale……1

Chapitre 1 : Revue bibliographique béton autoplaçant : formulation et performances.....

1-1 Introduction……4

1-2 Historique de béton Autoplaçant.....…4

1-3 Définition du béton Autoplaçant.....4

1-4 Particularités de la composition des BAP.....4

1-4-1 Les granulats 4

1-4-2 Ciment et fines 5

1-4-3 Les adjuvants.....5

1-4-3-1 Les superplastifiants 5

1-4-3-2 Les agents de viscosité.....7

1-4-4 L'eau de gâchage.....8

1-4-5 Additions minérales.....8

1-4-6 Autres additions.....8

1-5 Caractéristique des BAP à l'état frais.....9

1-5-1 La capacité au remplissage : 10

1-5-2La capacité de passage.....10

1-5-3La résistance à la ségrégation.....10

1-5-4La rhéologie.....11

1-6 Caractéristique des BAP à l'état durci 13

1-6-1 Résistances mécaniques.....13

1-6-1-1 La résistance à la compression.....13

1-6-1-2 La résistance à la traction .....:……14

1-6-2 Durabilité.....14

1-6-2-1 Carbonatation.....14

1-6-2-2Absorption capillaire.....15

1-6-2-3 Résistance de gel-dégel 17

1-6-2-4 Diffusion des ions de chlorure.....17

1-7 Méthode de formulation des BAP.....19

1-7-1 Méthodes basées sur l'optimisation des mortiers (Méthode Japonaise).....19

1-7-2 Méthodes basées sur l'optimisation du squelette granulaire (LCPC).....20

1-7-3 Approche CBI (suédoise).....21

1-7-4 Approche de la JSCE.....22

1-8 Domaines d'utilisation privilégie des BAP.....23

1-9 CONCLUSION.....25

Chapitre 2 : LES GRANULATS RECYCLÈS……...

2-1 Introduction.....27

2-2 Les Granulats recyclés.....27

2-3 Intérêt du recyclage dans le génie civil.....29

2-4 Le recyclage en Algérie.....30

2-5 Elaboration des granulats recyclés.....31

2-6Caractéristiques des granulats recyclés.....32

2-6-1 Composition des granulats recyclés.....32

2-6-2 Zone de transition interfaciale.....33

2-6-1 Granulométrie.....34

2-6-2 Masse volumique.....34

2-6-3Absorption et porosité.....35

2-6-4 Dureté.....36

2-7 L'effet des granulats recyclés sur le béton.....37

2-7-1 Etat frais.....37

2-7-1-1 Ouvrabilité.....37

2-7-1-2 L'air occlus.....38

2-7-1-3Densité.....39

2-7-2 Etat durcis.....39

2-7-2-1 Absorption du béton durci.....39

2-7-2-2La porosité.....40

2-7-2-3 La résistance à la compression.....40

2-7-2-4 la résistance à la traction.....42

2-8 Conclusion.....43

Chapitre 3 : Matériaux et formulation.....

3-1 Matériaux de base utilisés.....45

3-1-1 ciment.....45

3-1-2 Granulats.....46

3-1-2-1 sable 46

3-1-2-2 Gravier 47

3-1-3 Le super-plastifiant.....48

3-1-4 Eau de gâchage.....50

3-2 Formulation adoptée.....50

3-3 Fabrication du mortier.....50

3-3-1 Essais réalisés sur mortier.....51

3-3-1-1 Essai d'étalement au mini cône.....51

3-4 Fabrication du béton.....52

3-5 Essai sur le beton autoplaçant 52

3-5-1 A l'état frais.....52

3-5-1-1 Essai évaluant la fluidité (Étalement).....52

3-5-1-2 Essai de boite en L.....53

3-5-1-3 Essai de la boite en «U».....54

3-5-1-4 Essai de stabilité au tamis.....54

3-5-1-5 Essai à l'entonnoir en V (V-Funnel test).....55

3-5-2 L'état durci.....56

3-5-2-1 Essais de résistance à la compression.....56

3-5-2-2 Essai de flexion 3 points.....57

3-5-2-3 Essais d'auscultation sonore (ultra-son).....58

3-5-2-4 Essai d'absorption par capillarité.....59

Chapitre 4 : Résultats et discussion……

4- 1 Introduction.....62

4-2 Formulation des mortiers.....62

4-3 Résultats de caractérisation des BAP à l'état frais 63

4-3-1 Besoin en superplastifiants.....63

4-5) Résultats de caractérisation des BAP à l'état durci.....65

4-5-1) La résistance à la compression :.....65

4-5-2 Résistance à la traction.....66

4-5-3 relation entre la résistance à la traction et la résistance à la compression.....67

4-5-4 vitesse ultrasonique.....68

4-5-5 Relation entre la vitesse ultrasonique et la résistance à la compression… 69

4-5-6 Absorption d'eau par capillarité……..……...70

4-6 conclusion……..……72

LISTE DES FIGURES

Figure 1-1 : Action des superplastifiants - Défloculation des grains de ciment ……6

Figure 1- 2: Etalement et viscosité en fonction du dosage en superplastifiant……...7

Figure 1-3: Interaction entre l'eau et les polysacchar……..7

Figure 1-4 : Courbe de comportement rhéologique pour les corps de Bingham……12

Figure 1-5 : Profondeur de carbonatation des BAP (SCC) et des bétons vibrés de même rapport E/C …….15

Figure 1-6 : Absorption capillaire des bétons en fonction de la résistance ……..16

Figure 1-7 : Le total et l'absorption capillaire d'eau en (%) …….16

Figure 1-8: Perte de masse de deux BAP et d'un béton vibré pendant un test d'écaillage…17

Figure 1-9 : Coefficient effectif de diffusion aux ions de chlore en fonction de la résistance mécanique…….18

Figure 1-10 : Coefficient effective de diffusion de chloride……..18

Figure 1-11 : Pénétration des ions de chlorure à 28 et 91 jours pour les différents mélanges du BAP……...19

Figure 1-12:Composition d'un béton ordinaire (BO) et d'un BAP. Aspect à l'état frais d'un BO plastique et d'un BAP……21

Figure 1.13 :Le pont Akashi Kaikyo……23

Figure1.14:LatourLandmark Tower. ……..…..24

Figure 2-1 : granulats de débris de béton.……27

Figure 2-2 : granulats de débris de maçonnerie……..……28

Figure 2-3 :granulats de débrishydrocarboné……..28

Figure 2-4 : granulats mixte…….28

Figure 2-5 : Déchets des chantiers de BTP……..30

Figure 2-6 : Exemple des Sept étapes de recyclage pour le projet C2 C…….32

Figure 2.-7 : Compositions des granulats recyclés de béton ……..32

Figure 2-8 Vue en coupe du granulat recyclé (gauche) et du granulat naturel (droite) ……..33

Figure 2-9 : Courbes granulométriques des granulats recyclés……...34

Figure 2-10 : Variation de la demande en eau en fonction du taux de substitution en granulats recyclés de béton ……..37

Figure 2-11: Rapport E/C des bétons à base de granulats recyclés…….38

Figure 2-12 : Variation de l'air occlus en fonction du taux de substitution en granulats recyclés de béton ……..38

Figure 2-13 : Variation de la densité du béton frais en fonction du taux de substitution en granulats recyclés de béton ……..…….39

Figure.2-14 : Porosité des bétons à granulats recyclés……40

Fig.2.15 : Résistance à la compression du béton à base de granulats recyclés de béton Pour les troisdosages à 28j ……41

Figure.2-16 : Résistance à la compression des bétons à granulats recyclés……41

Figure 2. 17 Évaluation de la résistance à la compression en fonction de temps……...42

Figure 2-18 : Evolution de la résistance en traction par fendage à l'âge de 28 jours pour les bétons à différentes combinaisons granulaires…….43

Figure 3-1 : sable d'ouedsouf…….47

Figure 3-2 : sable recyclé de béton de démolition…….…….47

Figure 3-3 : analyse granulométrique des sables naturel et recyclé…….47

Figure 3-4 : gravier de boughezoul……..48

Figure 3-5 : gravier recyclé……48

Figure 3-6: Super plastifiant MEDAFLOW SP 30……49

Figure 3-7 : Mini cône pour mortier…….……..51

Figure 3-8 : Représentation schématiques de l'essai d'étalemen……..…53

Figure 3-9: Représentation schématique de l'essai à la boite en L……53

Figure 3-10 : Schéma descriptif de la boite en «U» ……..54

Figure 3-11 : Essai de la stabilité au tamis……..55

Figure 3-12: L'entonnoir en V……56

Figure 3-13: Essais de résistance à la compression…….57

Figur : 3-14.: Dispositif de traction par flexion……..57

Figure 3-15.: Différents types de dispositions des transducteurs……58

Figure 3-16: Dispositif expérimental de mesure d'absorption d'eau par capillarité……59

Figure 3-17 : Essai d'absorption d'eau par capillarité…….60

Figure 4-1 : variation du dosage SP……64

Figure 4-2 :la résistance à la compression à 3, 7, 28 jour……65

Figure 4-3 :la résistance à la traction à 3, 7, 28 jour…….…..67

Figure 4-4 :relation entre la résistance à la traction et la résistance à la compression……68

Figure 4-5 :les vitesses de propagations des ondes à différente âge……...69

Figure 4-6 corrélation entre la résistance à la compression et la vitesse ultrasonique…….69

Figure 4-7 : Absorption en fonction de la racine carrée du temps……...70

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1. Les propriétés et les essais essentiels des BAP à l'état frais……9

Tableau 2.1 : estimation théorique du déchet de C&D en Algérie en 1996…….30

Tableau 2-2 : Masse volumique apparente et absolue des granulats naturels et recyclés….34

Tableau 2-3 : Masse volumique apparente et absolue des granulats naturels et recyclés …35

Tableau 2-4 : Caractéristiques mécaniques des granulats naturels et recyclés……..36

Tableau 2 -5 : Absorption de l'eau pour bétons contenant les granulats recyclés…….40

Tableau 2-6 : Caractéristiques mécaniques des granulats naturels et recyclés [49]……..42

Tableau 3-1: Caractéristiques chimiques de CEM I 42.5 R…….45

Tableau 3-2: Caractéristiques physiques et mécaniques de CEM I 42.5 R……..45

Tableau 3-3 : Caractéristiques des sables recyclé et naturel…….46

Tableau 3-4 : Caractéristiques des graviers recyclé et naturel…….48

Tableau 3-5 : les caractéristiques de super plastifiant MEDAFLOW 30…….50

Tableau 4-1 : Composition des différents mortiers réalisés……...63

Tableau 4-2 : résultat test bap de référence……63

Introduction Générale

Dans le domaine de construction et de géniecivil, l'utilisationdes granulats naturels est très indispensable, car ces derniers constituent l'ossature du béton et ils représentent environ 80 % du poids total du béton. Selon les statistiques, le bâtiment et les travaux publics nécessitent chaque année 560 millions de tonnes de granulats et de matériaux assimilés Ainsi, leur extraction des rivières et des oueds ou bien des roches massives des montagnes a une grande nuisance sur l'environnement, cela peut provoquer l'épuisement des ressources naturelles et affecter négativement la faune et la flore, Pour ces raisons, environnementales et économiques, il est devenu indispensable de trouver de nouvelles sources de granulats qui peuvent apporter des solutions alternatives. Les granulats de recyclage semblent être une des solutions. Les matériaux de démolition ou de chantier provenant de la démolition ou 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 un impact sur l'environnement. Pour cela la valorisation des déchets du bâtiment est l'une des solutions.

L'utilisation de ces granulats recyclés de béton de démolition doit être généralisée sur tous les types de béton, et précisément sue les bétons autoplaçant qui ont une large utilisation dans nos jours. Ce type de béton se met en place par simple versement quel que soit la forme de l'élément à réaliser, il permet donc de ne pas utiliser les engins de vibration et donc élimination des perturbations sonores afférentes. Par leur fluidité le BAP occupe tousles volumes, il permet d'avoir des aspects de parements meilleurs, porosité de surface moindre et donc une meilleure durabilité. Par ailleurs, il permet de réduire des effectifs sur chantier…

L'objectif principal de ce travail est d'étudier en particulier les granulats recyclés de different classe granulaire provenant de concassage du béton, leurs propriétés (granulométrie, masse volumique absolue et apparente, absorption…) et l'influence de ces dernières sur les paramètres de formulation du BAP et ses propriétés à l'état frais et durci, basant sur une comparaison avec un BAP de référence à base de granulats naturel.

Ce travail est composé de quatre chapitres :

I. Le premier chapitre est une synthèse bibliographique des propriétés du béton autoplaçant, de ses performances à l'état frais et durci.

II. Le chapitre deux présente les propriétés des granulats recyclés et leur origine ainsi le recyclage en génie civil et en Algérie et ces intérêt

III. Le troisième chapitre expose les matériaux utilisés et les méthodes de formulation et fabrication des BAP.

IV. Le quatrième chapitre est consacré pour la formulation des bétons et la discussion des résultats des essais à l'état frai et durci.

Nous terminerons par uneconclusion générale

CHAPITRE 1

REVUE BIBILOGRAOHIQUE BETON AUTOPLACANTFORMULATION ET PERFORMANCE

1-1 INTRODUCTION

Cette partie présente un aperçu détaillé sur le béton autoplaçant en tant que nouveau matériau. Il expose d'abord l'historique de son développement ainsi que sa définition, ce chapitre fait une synthèse sur les Particularités de la composition des BAP et les caractéristiques à l'état frais et durci, et sa Durabilité ensuit les Méthodes de formulation des BAP, finalement les Domaines d'utilisation privilégies des BAP.

1-2Historique de béton Autoplaçant

Les chercheurs K. OZAWA ET K. MAEKAWA de Université de Kochi (Tokyo) ont développé le premier prototype de BAP pendant l'été de 1988. Ces résultats ont été présentés par K. OZAWA pour la première fois au 2ème Congrès de l'Asie de l'Est et Pacifique sur le Génie Civil et la Construction, tenu en Janvier 1989 à Chiangmai (Thaïlande). Trois années plus tard, en Mai 1992, au 4ème Congrès International CANMET& ACI à Istanbul, l'intervention du K. Ozawa a accéléré la diffusion mondiale du concept de cette nouvelle génération de béton [1].

1-3 Définition du béton Autoplaçant

Le béton autoplaçant «self compacting concrete SSC » désigne des bétons très fluides, homogènes et stables, caractérisés par une mise en place sans vibration (la compaction des BAP s'effectuant par le seul effet gravitaire)et conférant à lastructure une qualité au moins équivalente à celle correspondant aux bétons classiques misen œuvreparvibration.

1-4 Particularités de la composition des BAP

1-4-1 Les granulats :

Il est possible d'utiliser des granulats concassés ou roulés pour la formulation des BAP. Toutefois, comme les gravillons sont à l'origine du blocage du béton en zone confinée, il faut en limiter le volume [2]. D'un autre côté, la présence de gravillons permet d'augmenter la compacité du squelette granulaire du béton et donc de limiter la quantité de liant nécessaire pour obtenir l'ouvrabilité et la résistance souhaitées. En général, ces considérations conduisent à adopter un rapport gravillon/sable de l'ordre de 1 dans les BAP [3].

Le mélange granulaire pour béton autoplaçant est caractérisé par une teneur élevée en sable et en éléments fins. Le passant au tamis de 2 mm devrait être idéalement compris entre 38 et 42%. De même, la proportion de farines (<0,125 mm²) ne devrait pas être trop faible, l'optimum tant situ entre 4 et 8% [4]. Le choix d'une granularité continue appropriée est trés important étant donné la forte incidence du volume des vides sur la quantité nécessaire de pâte de ciment. Afin d'assurer une bonnestabilité du BAP (éviter toute ségrégation), il est recommandé de choisir un sable spécialement optimisé, au besoin recomposé partir de plusieurs fractions.

Toutou et Roussel en, 2006 [5] ont montré que d'une manière générale la fluidité des bétons detype autoplaçants augmente lorsque le volume des inclusions granulaires diminue car lescontacts granulaires ont diminué.

1-4-2Ciment :

Pour leur assurer une maniabilité suffisante tout en limitant les risques de ségrégation et de ressuage, les BAP contiennent une quantité de fines de l'ordre de 500 kg/m^3 supérieure à celle des bétons conventionnels. Ces fines proviennent du ciment, des additions minérales et des granulats [6].

La quantité de pâte joue un rôle important dans la fluidité car l'ajout de fines réduit les interactions entre les plus gros grains. Il est donc nécessaire dans le cas des BAP de remplacer une partie du ciment par des additions minérales. Le choix des additions et leur teneur respective dans les BAP est réalisé pour répondre aux exigences de résistance à la compression à 28 jours et aux exigences de durabilité[7].

1-4-3 Les adjuvants :

1-4-3-1 Les superplastifiants :

Les superplastifiants sont des produits organiques souvent de synthèse. Ce sont des composéssolides ou sous forme de solutions aqueuses à base de polymère formaldéhyde naphtalène sulfonate, polymère formaldéhyde mélamine sulfonate, carboxylates, polysaccharides[.8.]

.Le mode d'action des superplastifiants est extrêmement complexe. Il peut être expliqué comme suit :

Les superplastifiants en s'adsorbant à la surface des grains de ciment brisent cette dynamique. Ils neutralisent les différentes charges et donnent la même charge électrostatique à chaque grain de ciment. Ces charges de même signe vont créer des forces répulsives entre les particules et, par conséquent, la dispersion des grains de ciment libèrede l'eau qui est maintenant disponible à la lubrification du mélange d'où l'augmentation de la maniabilité.

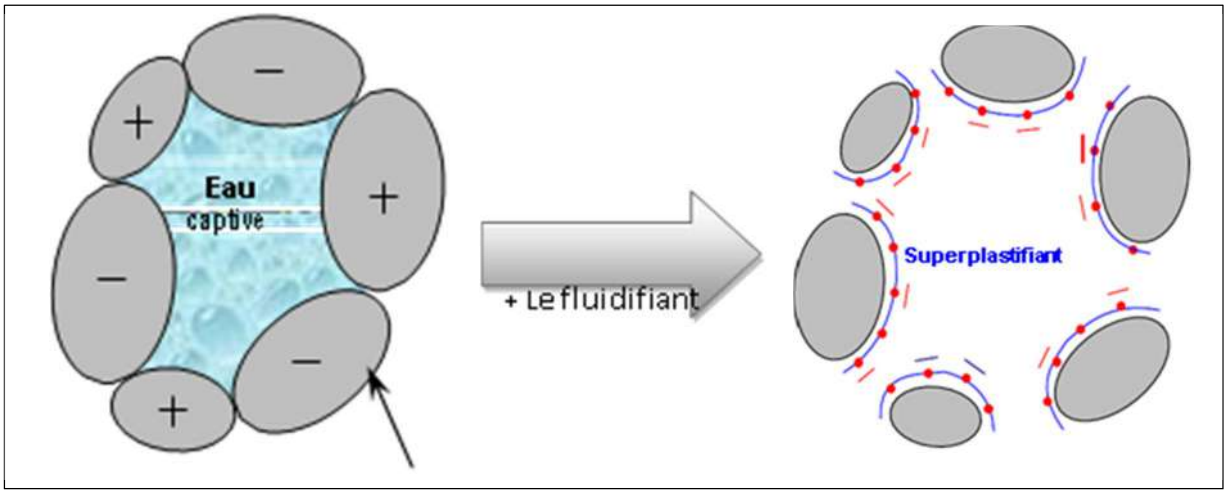


Figure 1-1 : Action des superplastifiants - Défloculation des grains de ciment [8].

Dans le cas des BAP, l'utilisation des superplastifiants a pour objet d'améliorer l'ouvrabilité du béton, en diminuant son seuil de cisaillement et sa viscosité [9**].La figure 1- 2** est un exemple représentatif de l'effet d'introduction d'un superplastifiant sur l'ouvrabilité du béton ; plus le dosage en superplastifiant est grand plus le béton devient fluide jusqu'à une certaine valeur où l'augmentation du dosage en superplastifiant n'a plus d'effets sur l'étalement. De la même manière, la viscosité du BAP change faiblement jusqu'à un dosage à partir duquel elle commence à baisser d'une manière significative.

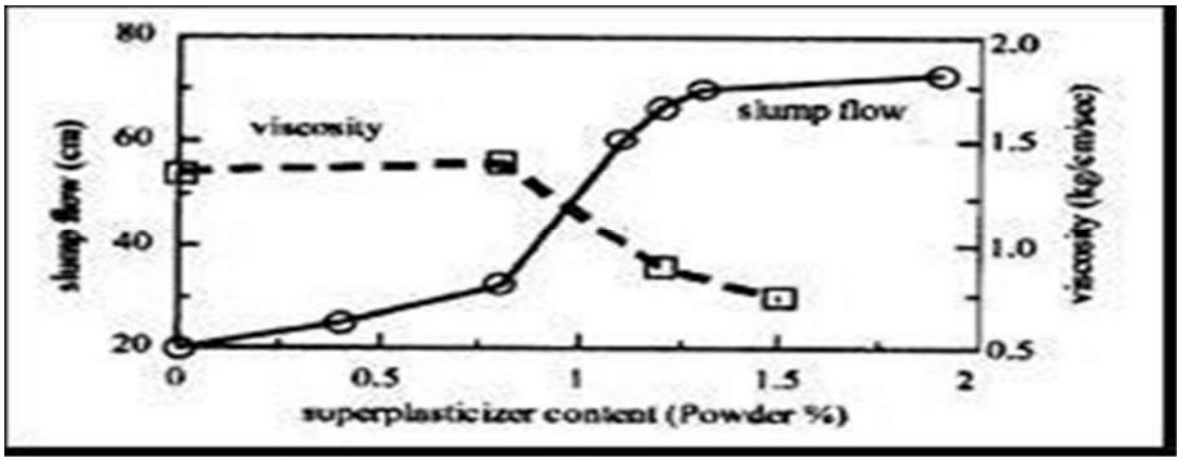


Figure 1- 2 : Etalement et viscosité en fonction du dosage en superplastifiant [10].

1-4-3-2 Les agents de viscosité

Les agents de viscosité Ce sont généralement des dérivés cellulosiques, despolysaccharides, des colloïdes naturels ou des suspensions de particules siliceuses, quiinteragissent avec l'eau et augmentent la viscosité de celle-ci (figure 1-3).

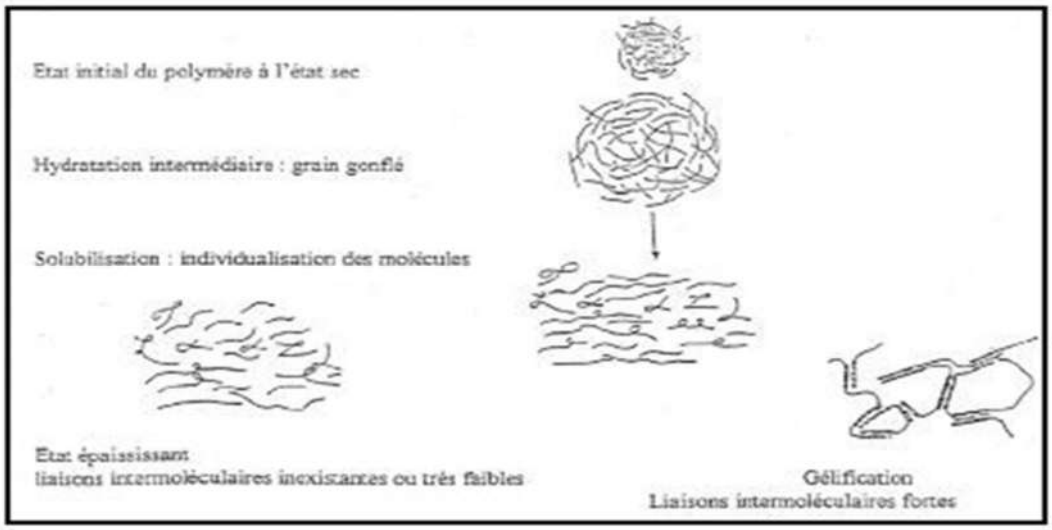


Figure 1-3: Interaction entre l'eau et les polysaccharides [11].

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 contient souvent un agent de viscosité.

1-4-4L’eau de gâchage :

Toute eau du réseau public d'eau potable convient pour la fabrication de béton Autoplaçant. Les eaux recyclées de gâchage et de lavage ne conviennent que sous certaines conditions restrictives en raison d'éventuels effets indésirables sur les propriétés du béton. Etant donné que le dosage en eau influence de manière considérable la viscosité et la capacité d'autoplaçant du béton, il est indispensable de s'écarter le moins possible de la valeur planifiée. Il est ainsi très important de mesurer et de prendre en compte l’humidité des granulats et tout spécialement du sable. Cas échéant, on tiendra également compte de la teneur en eau des adjuvants.

1-4-5Additions minérales

L'emploi des pouzzolanes minérales pour faire des bétons est connu depuis l'Antiquité. Ces pouzzolanes désignent un grand nombre d’additions minérales aux origines diverses, mais qui présentent tous, le fait d’êtrefins et de réagir en présence d'eau et de chaux. De nos jours, des quantités considérables de plusieurs types de ces additions continuent d’être utilisées.Nous présentons ci-dessous les différentes additions minérales éventuelles qu’on peut incorporer dans les compositions des BAP :

- Les fillers calcaires
- Les pouzzolanes naturelles
- Le laitier de haut fourneau
- La fumée de silice
- Les cendres volantes,…

1-4-6 Autres additions

En plus des additions minérales indispensables caractérisant la composition de la pâte de ciment du BAP, les additions inertes suivantes sont aussi parfois utilisées :

- les pigments pour la coloration d'éléments architectoniques
- les fibres d'acier comme armature constructive
- les fibres de polyéthylène (fibres PE) pour améliorer la résistance au feu
- les fibres de polyéthylène ne (fibres PP) pour empêcher les fissures de retrait plastique.

1-5 Caractéristique des BAP à l'état frais :

Un béton est qualifié d'autoplaçant s'il satisfait les propriétés citées ci-dessus, pour avoir toutes ces propriétés presque contradictoires, il faut bien choisir les matériaux et trouvées la bonne composition en suite vérifier le béton par les essais nécessaires, Le tableau I.1 résume ces étapes.

Tableau 1.1. Les propriétés et les essais essentiels des BAP à l'état frais[12].

	Moyen d'obtention	Les précisions dans la formulation	Les essais à réalisé
Capacités au remplissage	Réduction des frictions intergranulaires	Augmentation du volume de pate (diminution de volume de gros granulat)	• Etalement au Cône d'Abrams • Temps à T50 au cône d'Abrams • Temps d'écoulement à l'entonnoir en V • Etalement au cône d'Abrams en présence d'anneau de bars • Etalement au Tube Orimet • Essai du caisson
		Utilisation d'un liant de granularité continu	
		Optimisation du rapport G/S	
	Augmentation de la fluidité de la pate	Utilisation d'un superplastifiant	
		Optimisation du rapport E /C, S/M.	
Capacités de passage	Réduction de blocage des granulats	Réduction de volume de gravier	• Etalement au J-Ring • Temps à T50 au J-Ring • Différence d'Hauteurs au J-Ring • Essai de la Boite en L Mesure de H2/H1 • Essai de la boite en U
		Réduction la taille maximal des granulats	
	Accroitre la cohésion pour réduire le tassement des granulats	Adoption d'un petit rapport Eau/Liant	
		Utilisation d'un agent de viscosité	
Stabilité	Réduction de la séparation de phases	Réduction de rapport E/C	• Essai de stabilité au tamis de 5 mm • Essai de tassement
		Utilisation d'agent de viscosité	
		Réduction de la taille maximale des granulats	
		Limitation de la teneur en granulat	
	Minimisation de ressuage	Réduction de rapport E/C	• Essai à l'aéromètre modifié
		Utilisation de matériaux de grandes surfaces spécifique	
		Utilisation d'agent de viscosité	

1-5-1 La capacité au remplissage :

La capacité de remplissage définit la capacité du béton à s'écouler sous son propre poids et à se remplir complètement le coffrage [13]. La capacité de remplissage est une propriété critique d'un BAP de qualitécar le béton ne s'intégrerait pas suffisamment sans lui [14].Avoir une capacité de remplissage optimale est essentiel pour les membres avec des espaces proches tels quelargeurs étroites ou renfort surchargé. Au-dessus et au-delà ; applications oùle béton doit couler sur de longues distances horizontales peut nécessiter une capacité de remplissage plus élevée.

D'autre part, une énergie de placement plus élevée étant générée par pompage ou par gravité.

Ils agissant sur une masse démesurée de béton peut diminuer la demande de capacité de remplissage. Globalementle flux d'affaissement et le débit décrivent la capacité de remplissage du béton qui sont con-lié aux constantes de Bingham de la limite d'élasticité et de la viscosité plastique, en conséquence[15]

1-5-2 La capacité de passage :

La Capacité de passage définie comme la capacité du béton à s'écouler à travers et autour de l'espace confiné, telles que les ouvertures étroites entre les barres d'armature sans ségrégationou bloquant [16]. Même si l'élargissement de la capacité de remplissage augmente généralementcapacité de passage, une capacité de remplissage plus élevée ne garantit pas la capacité de passage [14]. Semblable à la capacité de remplissage, le passage du BAP change largement en fonction de sonapplication.

De plus, il n’est pas nécessaire de déterminer la capacité de passage des éléments non renforcés ou légèrement renforcés [14].La diminution de la taille maximale de l’agrégat peut améliorer la capacité de passage ; cependant, ces avantages devraient être évalués par rapport à toute augmentation nécessaire du volume de pâte et aux effets directs ou secondaires connexes sur les caractéristiques durcies [17]

1-5-3 La résistance à la ségrégation :

La résistance à la ségrégation désigne la capacité du béton à rester homogène dans la composition et pendant le transport, pendant le placement et après le placement [16]La résistance à la ségrégation tient compte de la stabilité statique et dynamique. La stabilité statique souligne la résistance à la ségrégation lorsque le béton est au repos. Stabilité

dynamiquedésigne la résistance à la ségrégation pendant le mélange et le placement du béton [14] Comme il a été expliqué pour le cas de la capacité de remplissage, la capacité de passagedont la résistance à la ségrégation peut différer largement en fonction de l'application [16]; en plus d'accroître la résistance à la ségrégationcoûts gonflés. La résistance à la ségrégation devrait être évaluée indépendamment de la capacité de passage et capacité de passage des BAP.

En fait, lorsque la rhéologie de la pâte est mesurée en s'assurant que le fluxT500 sont dans les gammes accompagnant avec la résistance de ségrégation appropriée pendant la pré-qualification de mélange, essais supplémentaires de la résistance de ségrégation estnon requis.[15]

1-5-4La rhéologie :

Elle étudie l'écoulement des BAP à l'état frais. Il est généralement admis que le comportement du béton frais est bien représenté par le modèle de Binghamien après qu'un cisaillement ait été imposé pendant un certain temps.Les prochaines tentatives présentent les principaux de ces tests suivant un classement définissant les paramètres rhéologiques.

La rhéologie, branche de la science de la physique étudie les écoulements et les déformations de la matière sous l'effet des contraintes, considère que le comportement du béton frais, même extrêmement fluide comme le BAP, correspond au corps viscoplastique (modèle de Bingham) [18]

Les corps Binghamiens ne peuvent s'écouler tant que la contrainte de cisaillement n'est pas supérieure à la contrainte minimale d'écoulement, soit le seuil de cisaillement. Lorsque cette contrainte minimale est vaincue, le taux de cisaillement appliqué sur le matériau devient alors proportionnel à la contrainte de cisaillement (relation linéaire).

La constante de proportionnalité, qui caractérise l'existence d'une résistance à l'écoulement,est la viscosité plastique. La courbe d'écoulement d'un corps Binghamien est une droite (figure 1.4) dont l'équation prend la forme suivante :

$$\tau = \tau_0 + \mu \varepsilon$$

Avec :

$\dot{\varepsilon}$: Taux de cisaillement (s^{-1}).
τ : Contrainte de cisaillement (Pa).
τ_0 : Seuil de cisaillement (Pa).
μ : Viscosité plastique (Pa.s).

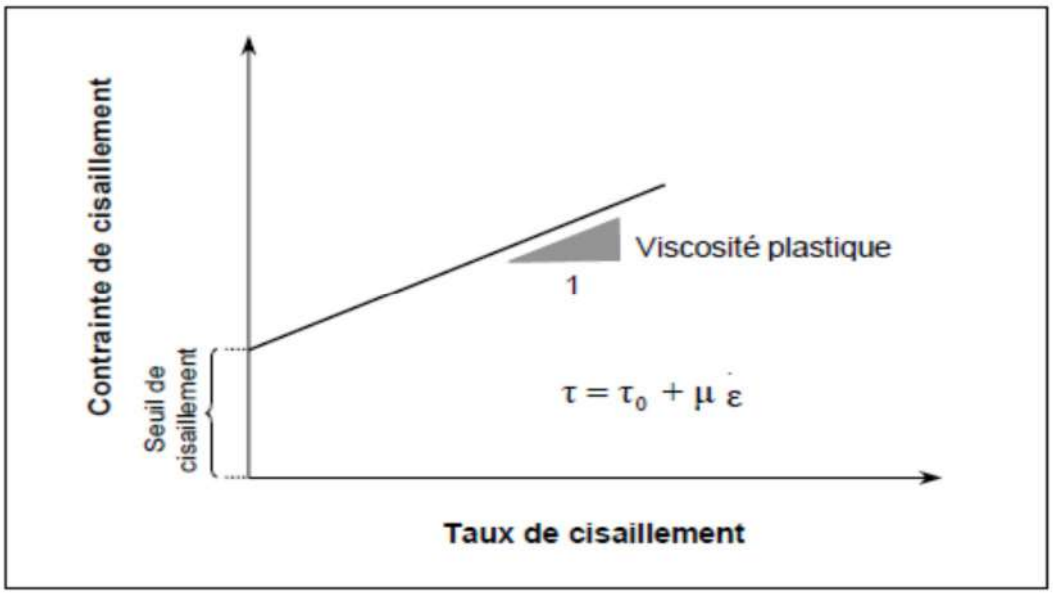


Figure 1-4 : Courbe de comportement rhéologique pour les corps de Bingham[18].

Par conséquent, il faut donc deux constantes physiques pour définir l'écoulementdu BAP à l'état frais .Il s'agit des deux propriétés rhéologiques intrinsèques au comportement du béton frais. Il reste maintenant à trouver la méthode la plus appropriée pour les mesurer Plus précisément, il faut déterminer les deux paramètres fondamentaux du modèle Binghamien à partir de la mesure des contraintes de cisaillement pour des conditions connues de cisaillement [9]19. Pour cela, les scientifiques utilisent plusparticulièrement les rhéomètres à béton.

Les rhéomètres à béton sont généralement plus complexes que les rhéomètres traditionnels, destinés aux corps liquides ou solides, parce que le béton est en fait un matériau composite constitue de pâte et de granulats. C'est G.H. Tattersall qui fut le premier à proposer des appareils mieux adaptés à la suspension granulaire en introduisant des rhéomètres de type malaxeur [20]. Par la suite, plusieurs chercheurs ont amélioré ce modèle avec le même principe. Entre autres, on peut citer les rhéomètres les plus connus au monde :

– Rhéomètre BML : développé par O.H. Wallevik et O.E. Gjorv [21].

– Rhéomètre BT-Rhéom : développé au LCPC de Paris par une équipe multidisciplinaire [22]

– Rhéomètre IBB : développé par D. Beaupré à l'Université de British Columbia en 1994 [21].

1-6 Caractéristique des BAP à l'état durci :

Lorsque le BAP est formulé et mis en oeuvre de manière adéquate, ses propriétés à l'état durci (résistance, déformation, durabilité) ne se différencient guère de celles d'un béton ordinaire vibré. Généralement ces propriétés d'après plusieurs chercheurs, sont meilleures, en particulier lorsque le béton spécifié doit répondre à des exigences courantes, ce qui est généralement le cas dans le domaine du bâtiment.

1-6-1 Résistances mécaniques

1-6-1-1La résistance à la compression :

Les BAP peuvent présenter une gamme étendue derésistances à la compression en jouant sur la nature du liant qui les compose (ciment,additions) et le rapport E/L [23]. Il faut, toutefois, s'attendre à des résistances au jeune âgemodérées lorsque les bétons contiennent de grosses proportions d'additions ou lorsquel'usage d'un agent colloïdal nécessite un fort dosage en superplastifiant .

Domone **[24]**a analysé 68 cas à travers le monde où le BAP a été utilisé. Cet auteur a rapporté que la résistance à la compression des BAP est comprise entre 20 et 100 MPa, et que plus de 80% des mélanges testés ont des résistances supérieures à 40MPa. Ceci montre qu'en utilisant des BAP, il est possible d'obtenir une gamme de résistances allant de faible (20 MPa) à haute (100 MPa).

1-6-1-2La résistance à la traction :

Les spécificités de composition des BAP permettentd'anticiper une légère différence de rapport entre la résistance à la traction et celle à lacompression par rapport aux BO [25]. En effet, les résultats obtenus confirment que pourles mêmes résistances à la compression les BAP possèdent des résistances à la tractionlégèrement supérieures à celles des BO [26] [27].

Contrairement Klug **[28]**a trouvé que la résistance à la traction des BAP est nettement supérieure à celle des bétons vibrés, elle peut aller jusqu'à 40%. Ce qui implique une nécessité de revoir la section minimale de ferraillage.

1-6-2 Durabilité

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,le premier est relatif 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, et la seconde est relative au déplacement d'une espèce chimique à l'échelle moléculaire sous l'effet d'un gradient de concentration.

1-6-2-1 Carbonatation

Dans le même esprit de comparaison des BAP et des bétons traditionnels, de caractéristiques totalement différentes, les conclusions sont difficiles à dégager.

L'étude de la référence [29] sur les BAP et les bétons traditionnels montre qu'il n'y a pas de différence notable entre les cinétiques de carbonatation des deux types de bétons. On retrouve des résultats classiques de type plus le rapport E/C est important plus la profondeur de carbonatation est importante (figure 1-5).

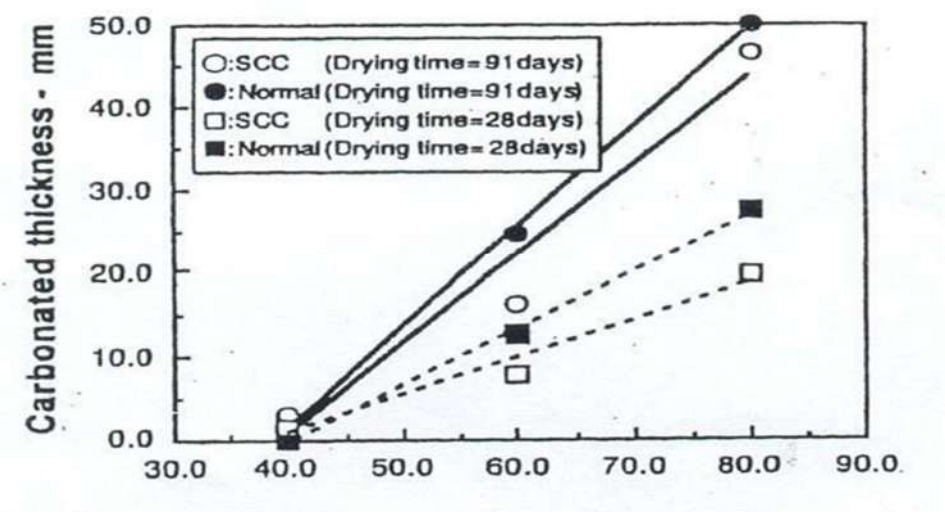


Figure 1-5 : Profondeur de carbonatation des BAP (SCC) et des bétons vibrés de même rapport E/C [11].

1-6-2-2 Absorption capillaire

L'absorption d'eau à l'intérieur du béton est connue pour dépendre de deux paramètres : la porosité du béton et la vitesse d'absorption par remontée capillaire (absorptivité). L'absorptivité est influencée par le rapport E/C, plus le taux d'humidité du béton est élevé, plus la valeur mesurée d'absorptivité est faible [30].

L'absorption d'eau par capillarité est équivalente pour le BAP que pour le BO (Figure 1-6). Les différences du volume de pâte entre les deux types de bétons semblent peu influer sur les propriétés de transfert lorsque la résistance à la compression est équivalente [30]. Par contre ZHU et BARTOS [31] ont trouvé que les valeurs de l'absorption du BAP sont inférieures à celles du BV.La valeur du coefficient d'absorption du béton dépend aussi de la durée et les conditions de la cure [32]. Une cure humide diminue l'absorption capillaire (Figure 1-7).

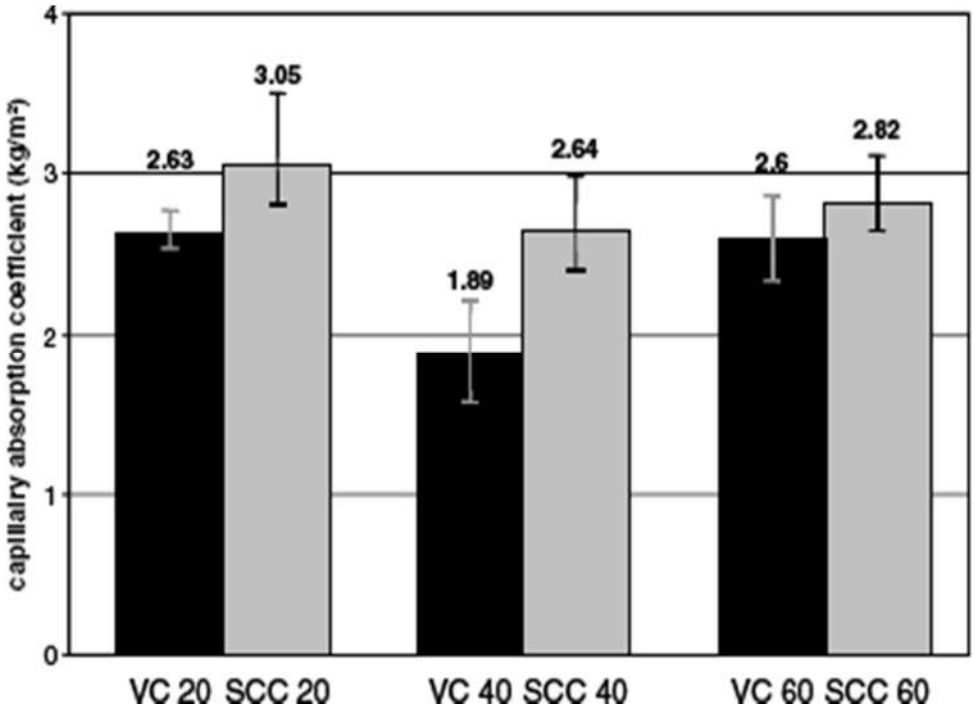


Figure 1-6 : Absorption capillaire des bétons en fonction de la résistance **[33].**

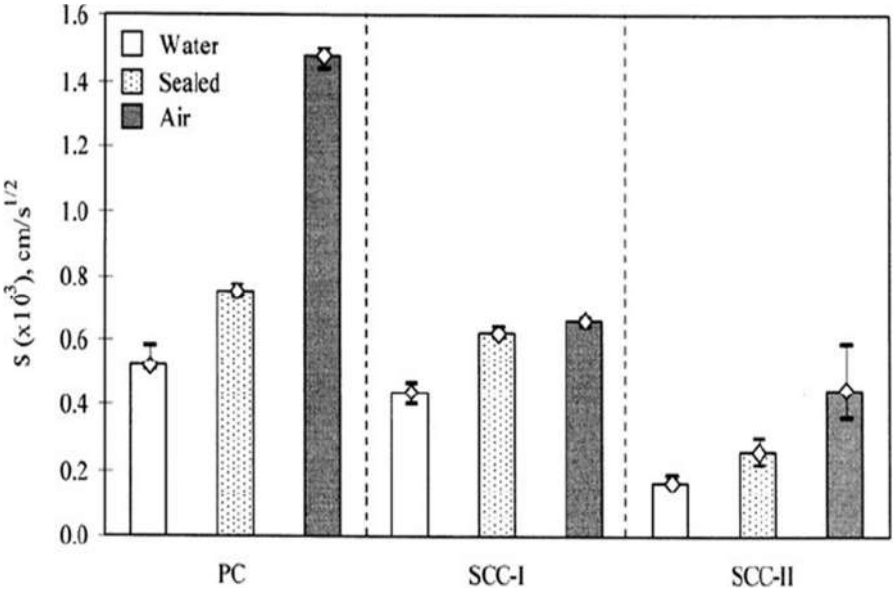


Figure 1-7 :l'absorption capillaire des bétons dans diffèrent type de cure [34]

1-6-2-3 Résistance au gel-dégel :

La résistance de gel-dégel du béton dépend de ses différentes propriétés, résistance de la pâte de ciment durci, capacité de déformation et des caractéristiques de son réseau poreux.

La résistance d'un béton vis-à-vis du gel-dégel est liée à la quantité d'air entraîné et à la répartition des bulles d'air.

Comme nous l'avons vu précédemment, les formulations de BAP comportent des quantités importantes de superplastifiants dont les effets secondaires peuvent être l'entraînement d'air dans le béton. D'autre part, l'utilisation complémentaire d'un agent de viscosité peut avoir comme effet de stabiliser ce réseau de bulles d'air.

Les résultats présentés dans la littérature montrent nettement que les BAP, formulés sans entraîneur d'air, sont plus résistants au gel-dégel que les bétons vibrés (de même rapport E/C, avec ou sans entraîneur d'air) [11].

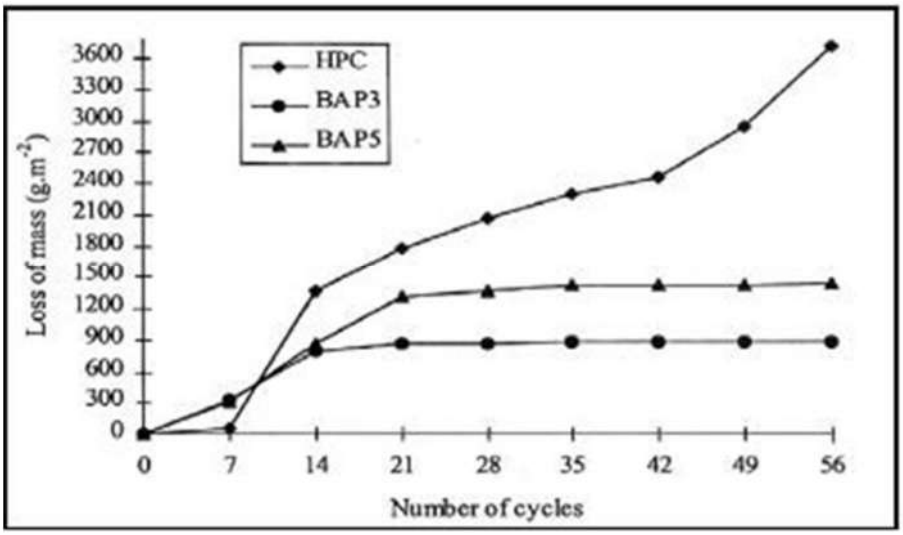


Figure 1-8 : Perte de masse de deux BAP et d'un béton vibré pendant un test d'écaillage [35]

1-6-2-4 Diffusion des ions de chlorure

Pour certains chercheurs, la diffusion des ions de chlorures est équivalente pour les BAP et pour les bétons ordinaires (Figure 1-9 et 1-10). La substitution du volume élevé de ciment portland ordinaire par des ciments ternaire et quaternaire dans le BAP diminue sensiblement la pénétration des ions de chlorure (Figure 1-11)

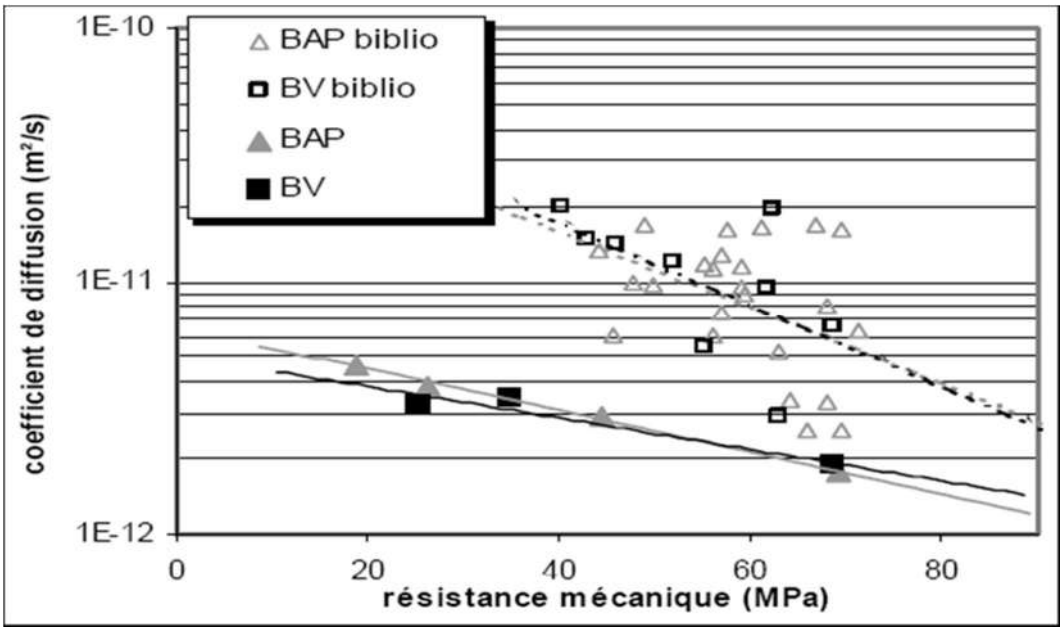


Figure 1-9 : Coefficient effectif de diffusion aux ions de chlore en fonction de la résistance mécanique [36]

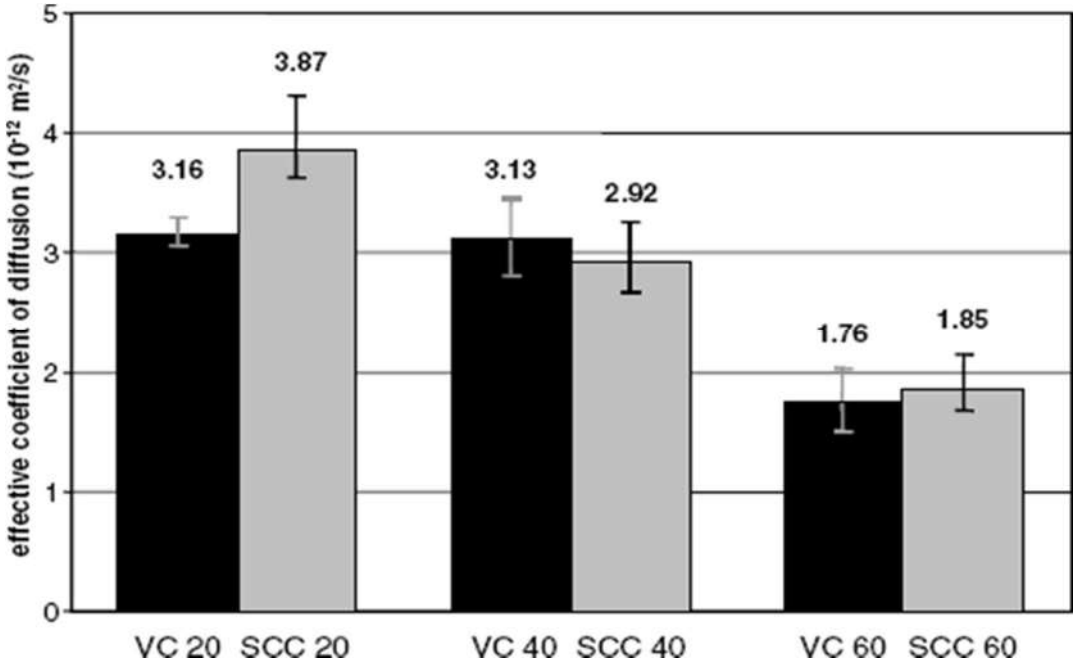


Figure 1-10 : Coefficient effective de diffusion de chloride [37]

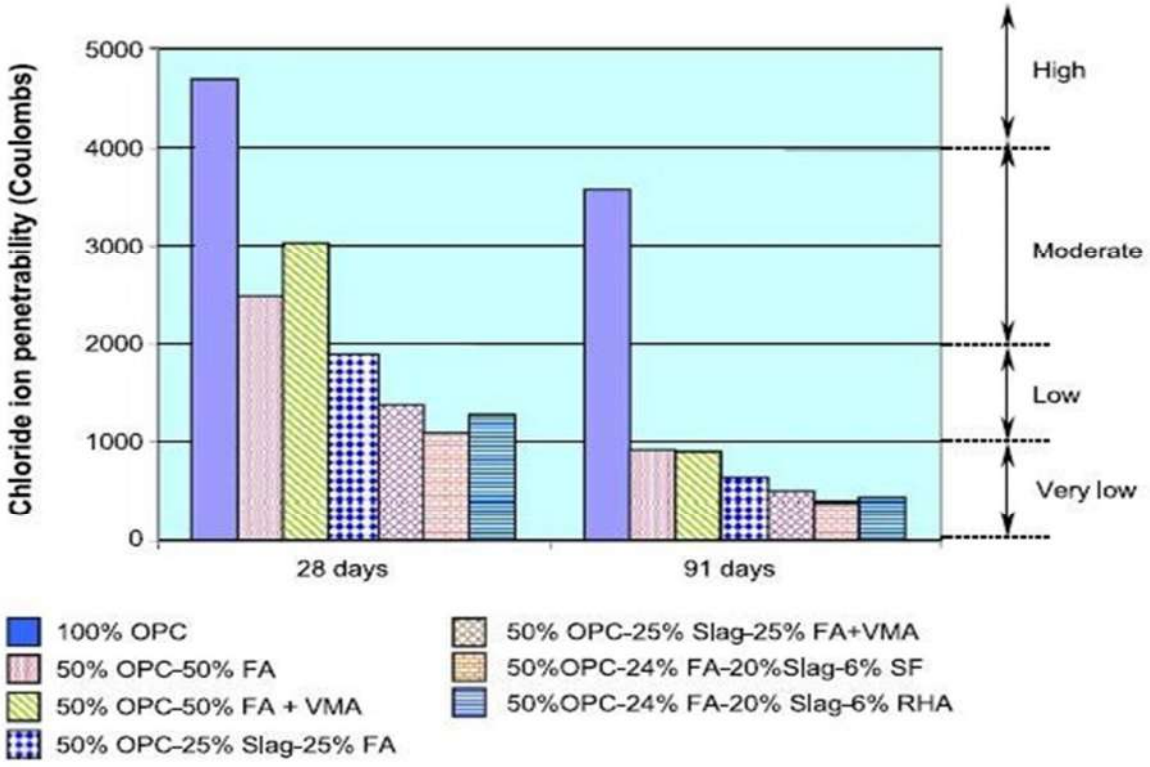


Figure 1-11 : Pénétration des ions de chlorure à 28 et 91 jours pour les différents mélanges du BAP [38]

1-7 Methode de formulation des BAP

Le béton autoplaçant est un béton fabriqué à partir de sable, gravillons (≤20mm), un ciment, des adjuvants et des additions minérales, plusieurs méthodes de formulations existent, dont notamment :

- Méthode Japonaise
- Formulation CBI (Suède)
- Formulation LCPC (France)
- Méthode JSCE

1-7-1 Méthodes basées sur l'optimisation des mortiers (Méthode Japonaise)

OKAMURA [39] propose de formuler le BAP en composant en premier lieu le mortier du béton. Dans le mortier, la proportion de sable est posée arbitrairement. Il reste ensuite à trouver expérimentalement les dosages en eau et en superplastifiant, pour un liant donné (rapport massique ciment sur addition fixé), et suivant certains critères de rhéologie. La formule finale est obtenue en ajoutant au mortier un volume de gravillons limité, de manière sécuritaire, à la moitié de leur compacité [40].

A la suite d'une optimisation identique du mortier, OUCHI et al [41] proposent de doser les gravillons en cherchant expérimentalement leur volume limite menant à un blocage. Ce volume est évalué en comparant l'écoulement du mortier dans un entonnoir avec et sans gravillons [42]

1-7-2 Méthodes basées sur l'optimisation du squelette granulaire (LCPC)

La formulation des bétons peut passer par une optimisation de la porosité du système formé par les grains solides, du ciment aux gravillons. La résistance à la compression augmente avec la compacité de la pâte, et l'ouvrabilité est elle-aussi tributaire de l'arrangement du squelette granulaire. Si on considère sur la figure 1-1 que la phase interstitielle est l'eau de gâchage, et non plus la pâte le lien entre compacité et rhéologie peut être montré. Plus la quantité d'eau qui écarte les grains (2) est importante, plus la suspension est fluide. A quantité d'eau constante, si on minimise la porosité (1) de l'empilement de grains, on maximise en conséquence le volume d'eau disponible pour fluidifier le mélange. Un modèle décrivant mathématiquement un empilement a été développé par SEDRAN et DE LARRARD [43]à partir des caractéristiques des grains qui le composent (forme, granulométrie). Le modèle permet le calcul de la compacité du bétonet d'un indice représentatif de son degré de serrage. A l'aide de ces variables sont modélisées la viscosité et le seuil de cisaillement du béton [42] La formulation des BAP fait appel à :

- des superplastifiants pour obtenir la fluidité souhaitée et quelques fois des agents de viscosité pour maîtriser la ségrégation et le ressuage ;
- une quantité de fines (ciments, fillers calcaires, cendres volantes) élevée pour assurer une bonne maniabilité tout en limitant les risques de ségrégation et de ressuage (~500 kg/m3) ;
- un volume de pâte élevé (350 à 400 l/m3) ;
- un faible volume de gravillons afin d’éviter le « blocage du béton » dans les zones confinées (rapport gravillon/sable de l’ordre de 1 voir inférieur). Les granulats ont en général un Dmax compris entre 10 et 16 mm afin d’améliorer l’écoulement ;
- du ciment (dosage à optimiser pour obtenir les performances souhaitées) ;
- un rapport E/C faible et un dosage en eau limité ;
- éventuellement un agent entraîneur d’air pour assurer la protection contre les effets du gel dégel.

- L’optimisation du squelette granulaire est indispensable pour obtenir les caractéristiques nécessaires à la fluidité et à l’écoulement en milieu confiné.

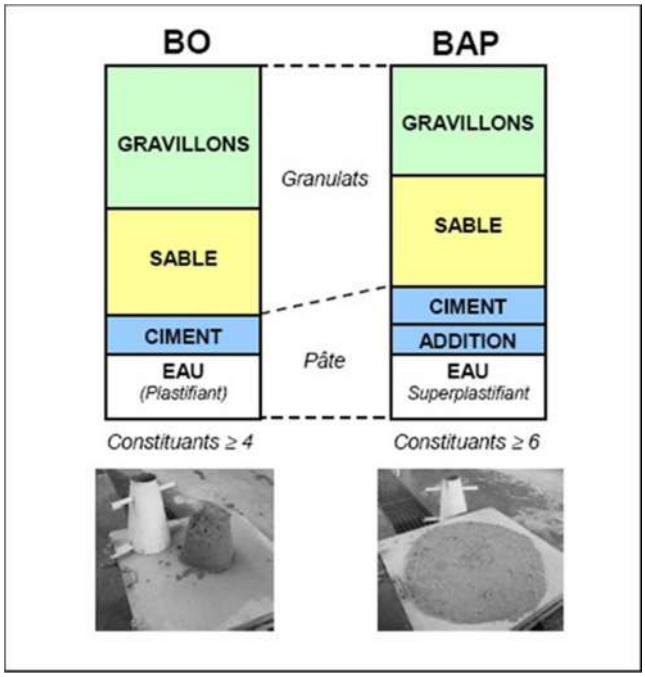


Figure 1-12 :Composition d'un béton ordinaire (BO) et d'un BAP. Aspect à l'état frais d'un BO plastique et d'un BAP [42]

1-7-3 Approche CBI (suédoise)

La méthode de formulation suédoise est développée par CBI (Cement och BetongInstitutet) [44].[45].[46] et se caractérise par la prise en compte des conditions des chantiers. En effet, cette approche est basée sur l’évaluation des risques de blocage des granulats dans les milieux ferraillés. Elle permet d’optimiser la taille maximale des granulats par rapport à l’espacement entre les armatures, et le volume des granulats dans le béton.

Le principe de cette méthode s’appuie sur des tests effectués par différents auteurs [47],[48],[49] - cités par [50] sur des mélanges de pâte de ciment et de granulats de différentes tailles,passant à travers différents espacements d’armatures. Pour chaque taille de granulats, ils ont montré qu’il existe une teneur volumique critique de granulats en deçà de laquelle le risque de blocage est nul et au-dessus de laquelle le blocage est systématique. Cette teneur volumique critique est fonction de l’espacement entre les armatures (par rapport à la taille des granulats), et de la forme des granulats (roulés ou concassés).

Cette méthode suppose que le phénomène de blocage est indépendant de la nature de la pâte, pourvu que celle-ci soit suffisamment fluide.

Les principales modifications et extensions de la méthode CBI sont apportées par Buiet al[51], qui a proposé un critère supplémentaire pour obtenir un béton autoplaçant. Il s'agitd'ajouter un volume de pâte pour assurer un espacement minimal suffisant entre les granulatsafin de réduire les frictions et les frottements entre les granulats.

1-7-4) Approche de la JSCE

Cette méthode a été proposée par la Japenese Society of Civil Engineers en 1998, aprèsplusieurs recherches et applications pratiques.

Pour cette méthode la quantité d'eau, le rapport eau/poudre, et la teneur en poudre, varienten fonction de l'emploi ou non d'un agent de viscosité.

Les quantités de différents constituants sont déterminées comme suit :

- quantité de gros granulats varie selon l'autocompactibilité recherchée et le diamètremaximum est limité à 20 mm voire 25 mm ;

- Lors de l'utilisation d'un agent de viscosité, la quantité d'eau se situe sous les 180kg/m3 dans les conditions d'exposition normales. Cas particulier, lorsque ladurabilité du béton n'est pas une contrainte majeure, on peut aller jusqu'à 190 kg/m3En l'absence d'agent de viscosité, la quantité d'eau est réduite à 155 jusqu'à 175 kg/m
- Le rapport eau/poudre est basé sur les performances du béton à l'état durci. Lorsque lafluidité n'est pas atteinte on peut augmenter la quantité du liant. Le rapport massiqueeau/poudre doit être entre 28 et 37%, et le rapport volumique entre 85 et 115 % ;

- La quantité de poudre se déduit du rapport eau/poudre. Dans le cas d'un agent de viscosité de type polysaccharide, la quantité de poudre est de 0,13 m3 /m3 .dans les autres cas la valeur prise doit être entre 0,16 et 0,19 m3 /m
- Le volume d'air dépend du diamètre maximum des gros granulats, de la résistance souhaitée et des conditions d'exposition du béton. La valeur type s'élève à 4,5% d'air .
- La quantité des fines est déduite des quantités précédentes

- Le dosage en adjuvant est évalué expérimentalement. Pour le superplastifiant, son dosage dépend du rapport eau/poudre ainsi que de la nature des poudres. Il est généralement de 1 à 2 kg d'extrait sec par m3, pour une solution aqueuse de 35% c'est l'équivalent de 3 à 6 litres. En ce qui concerne l'agent de viscosité, son dosage varie selon la nature de l'agent, aussi selon le type de béton (avec ou sans ajouts de fines).

1-8) Domaines d'utilisation privilégies des BAP

Les BAP sont utilisables aussi bien pour la réalisation d'ouvrages horizontaux que verticaux, sur tous les types de chantier, de bâtiments ou de génie civil et pour la réalisation de nombreux produits préfabriqués en béton. La plupart des ouvrages peuvent être réalisés en BAP (voiles, poteaux, piles, poutres, planchers, dalles, dallages, fondations, éléments de façade, mobiliers urbains, etc.).Les BAP sont particulièrement adaptés à la réalisation de structures pour lesquelles la mise en œuvre d'un béton classique est délicate, c'est-à-dire, présentant des :

- formes et géométries complexes : voiles, courbes, ... ;
- voiles minces et de grande hauteur : piles de ponts, … ;
- oiles complexes avec de nombreuses réservations ou de grandes ouvertures ;
- exigences architecturales et qualité de parement particulière.

A titre d'exemple, nous citons quelques réalisations avec les BAP, le pont Akashi Kaikyo (figure 1.13), le plus long pont suspendu au monde (3910 m) où 390 000 m^3 de béton autoplaçant ont été versés dans les coffrages des fondations et des piliers très congestionnés sans vibration [52].



Figure 1.13 :Le pont Akashi Kaikyo.

La tour Landmark Tower (figure 1.14), où un béton autoplaçant d'une excellente déformabilité a été mis en place avec succès dans 66 colonnes de 40 m de hauteur chacune [53].



Figure 1.14: La tour Landmark Tower.

1-9 CONCLUSION

Cette synthèse bibliographique a été menée afin de se familiariser avec les bétons autoplaçants, l'objectif étant de les définir, ainsi que leurs multiples propriétés, les caractériser, et résumer les principales méthodes de leur formulation.

Ce béton extrêmement fluide présente plusieurs avantages qui font de lui une révolution très importante dans le monde de la construction et celui du génie civil pondant les deux dernières décennies. Ses avantages sont définis du point de vue rhéologique, par un seuil de cisaillement assez faible permettant une facilité de mise en oeuvre sans vibration et une viscosité suffisante pour maintenir un niveau de stabilité et d'homogénéité correct.
La formulation des BAP est relativement complexe et nécessite de trouver un bon compromis pour assurer la capacité au remplissage et au passage, la résistance à la ségrégation et la stabilité qui sont les caractéristiques qui définissent l'autoplaçance de ces bétons. Par conséquence de ses spécifications de formulation qui nécessite un faible rapport Eau/poudre et un volume de fines élève, les BAP possèdent des résistances relativement élevées et une durabilité améliorée par rapport aux bétons usuels.

CHAPITRE 2

LES GRANULATS RECYCLÈS

CHAPITRE 2 : LES GRANULATS RECYCLÈS

2-1 Introduction

Tout au long de son évolution, l'Homme a cherché à développer et choisir ses matériaux en fonction de ses besoins. De nos jours, le secteur de la construction nécessite la mise en œuvre de grandes quantités de matériaux.

Comme les granulats conventionnels s'épuisent de plus en plus avec les années, et les infrastructures routières et urbaines vieillissent très vite et nécessiteront des travaux de réfection ou de démolition, des quantités importantes de résidus sont générés. Ces matériaux de démolition peuvent être une source altérative des granulats (granulats recyclés) pour béton [54]. La majorité des applications de granulats recyclés issus de produits de démolition trouvent essentiellement des débouchés dans le domaine routier, mais une meilleure connaissance du comportement des bétons incluant de tels granulats (béton recyclé) peut contribuer au développement de cette application [55].

2-2 Types de granulats recyclés

Les Granulats recycles sont issus de bétons recyclés ou de matériaux inertes recyclés. Enrègle générale, on distingue quatre classes principales de granulats recyclés [56] :

- GRANULATS DE DEBRIS DE BETON :

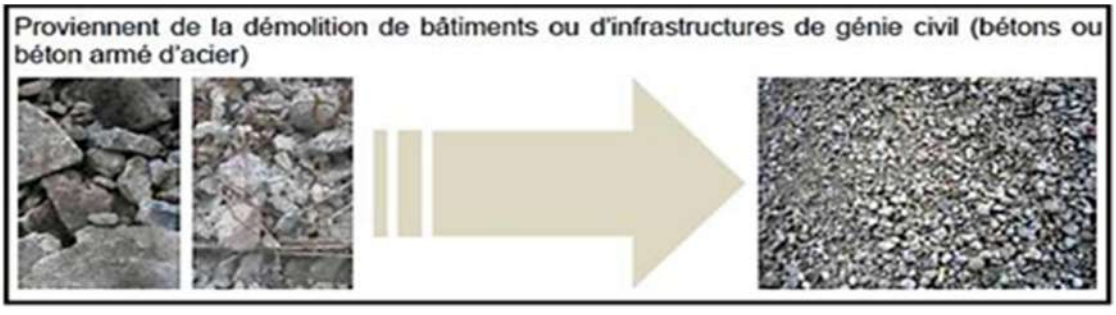


Figure 2-1 : granulats de débris de béton

❖ **GRANULATS DE DEBRIS DE MACONNERIES :**

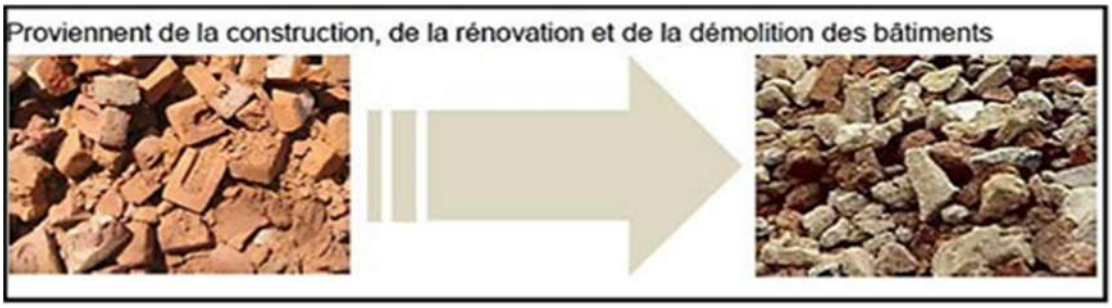


Figure 2-2: granulats de débris de maçonnerie

❖ **GRANULATS DE DEBRIS HYDROCARBONNES :**

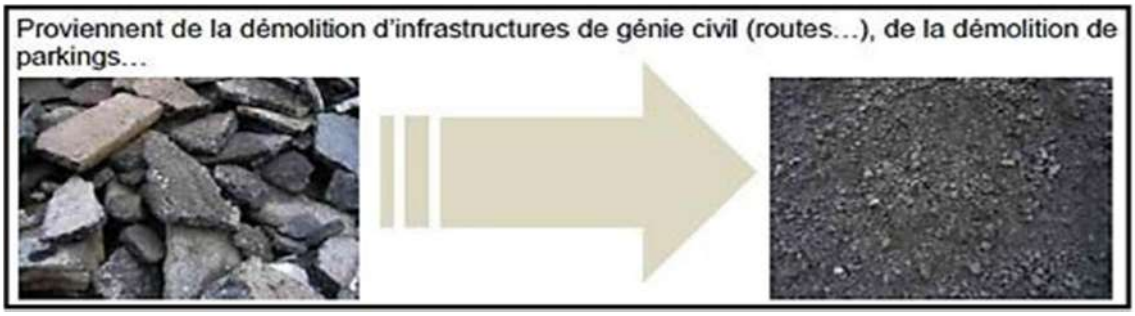


Figure 2-3 :granulats de débrishydrocarboné

❖ **GRANULATS DE DEBRIS MIXTES** :

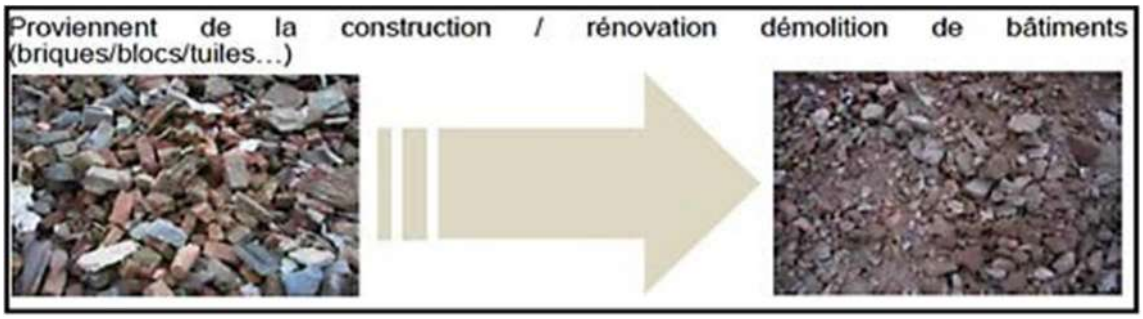


Figure 2-4 : granulats mixte

2-3Intérêt du recyclage dans le génie civil

La réutilisation des déchets de démolition a été effectuée la première fois après la deuxième guerre mondiale en Allemagne. Sensibilisés à la problématique du traitement des débris provenant de la construction, de la rénovation et de la démolition ,des intervenants de tous les pays industrialisés sont à l'affût de solutions pour en réduire les quantités, les traiter adéquatement et identifier des applications afin de leur donner une plus grande valeur ajoutée.

La formulation d'éco-matériaux c'est-à-dire de béton avec des granulats recyclés « BETON RECYCLES » est l'un des objectifs de tous ces chercheurs. Ces déchets de démolition se composent pour près de 95% de débris. Les 'débris' deviennent 'granulats recyclés' après tri et concassage.

La valorisation dans le domaine du génie civil peut couvrir plusieurs types de déchets, de sources et de qualités différentes, citons les déchets des chantiers de BTP (bâtiment et travaux publics). Les déchets de chantiers proviennent de trois sources principales, la démolition, la construction et la réhabilitation.

La démolition des ouvrages en béton et l'industrie des matériaux de construction sont toujours accompagnées par des produits secondaires ou des déchets ; le stockage de tels déchets solides dans des dépôts pollue l'environnement et comme les réserves en granulats sont encours d'épuisement, il est donc nécessaire de trouver un moyen pour valoriser ces produits et les réutiliser de nouveau comme granulats dans les bétons et les mortiers.

Le béton recyclé est simplement du vieux béton broyé pour produire des granulats. Il peut être utilisé dans les couches de fondation comme dans du béton maigre et comme seule source de granulats ou remplacement partiel des granulats dans du béton neuf.

Les granulats de béton recyclé sont généralement plus absorbants et moins denses que les granulats ordinaires. La forme des particules est semblable à celle de la pierre concassée. Le béton fabriqué avec des granulats provenant du recyclage, présente généralement de bonnes qualités de maniabilité, durabilité et résistance à l'action du gel-dégel. La résistance en compression varie selon la résistance du béton initial et le rapport eau/liants du nouveau béton



Figure 2-5 :Déchets des chantiers de BTP.

2-4 Le recyclage en Algérie

En Algérie le secteur d'activité œuvre en effet à renforcer ses actions en matière de valorisation des déchets et sous-produits industriels notamment les pneus usagés dans les travaux routiers et de génie civil. Cette démarche consiste évidemment à développer et appuyer l'utilisation de ce déchet industriel dans ces divers travaux ce qui contribuera d'une part, à la préservation de l'environnement, et d'autre part, à la réduction des coûts induits par l'utilisation des matériaux de plus en plus rares notamment dans certaines régions du pays.

En Alger ils existent trois sites pour l'enfouissement des déchets inertes. Deux à l'ouest de la capitale : « Staouéli », fermé en 2010 pour cause de saturation, la deuxième à « Douéra » qui est aussi fermé après le lancement des travaux de la liaison ferroviaire entre « Zéralda » et « Birtouta » et elle reste fermé jusqu'à aujourd'hui, la décharge se trouvant non loin du tracé de cette ligne. À l'est de Alger y a le site de « Bordj El-Kiffan », lui aussi saturé depuis le séisme de Boumerdasse 21/05/2003. D'une manière réelle n'existe aucune décharge des déchets de construction, malheureusement.

Selon Debieb.F[57]l'estimation des déchets de construction et de démolition en Algérie dans l'année de 1996 est résumée dans le (tableau I.3) ci dessue :

Tableau 2.1 : estimation théorique du déchet de C&D en Algérie en 1996.

Types des déchets mise en décharges	**QNTT**	
	Mt/an	%
Déchets issue de chantier des bâtiments	1.33	49
Déchets issue de transformation des logements	0.11	27
Déchets issue de démolition et de réhabilitation	0.40	15

Déchets issue de la fabrication des matériaux de constructions	0.35	9

2-5Elaboration des granulats recyclés

L'élaboration des granulats recyclés est réalisée dans des installations fixes ou mobiles qui comprennent les mêmes grandes phases d'élaboration que les installations pour les granulats naturels (concassage, criblage et éventuellement lavage). Un prétraitement spécifique doit cependant être exécuté. Il consiste à réaliser le cisaillage des ferrailles et la réduction des plus gros éléments.

Généralement, les différentes phases d'élaboration des produits issus du recyclage des matériaux de démolition sont :

- Sélection, stockage et traitement des produitsbruts.
- **Préparation des matériaux** avant concassage : cette étape consiste à réduire les plus gros éléments l'aide d'un brise roche hydraulique (BRH) et à retirer les impuretés les plusgrosses.
- Tri manuel
- Déferrageélectromagnétique.
- Concassage et criblage: étape destinée à éliminer les matériaux de faibles caractéristiques.
- Concassage secondaire :éventuel de la fraction supérieure issue du concassageprimaire.
- Stockage
- Analyses éventuelles avantutilisation.

Exemple de procédé développé dans le cadre du projet de coopération transnational C2CA, qui a testé la possibilité de recycler 20 000 tonnes de vieux bétons voir figure 2-6.



Figure 2-6 : Exemple des Sept étapes de recyclage pour le projet C2 CA

2-6 Caractéristiques **des granulats recyclés**

2-6-1Composition des granulats recyclés

Les granulats recyclés de béton diffèrent des granulats naturels par leur composition. En effet, le granulat recyclé de béton est un matériau composite (figure 2-7), dont les deux constituants sont [55], [56], [57]:

- des granulats naturels concassés partiellement
- de la pâte de ciment hydraté concassée, enrobant les granulats naturels.
- Le ciment anhydre qui n'a pas subi une hydratation dans sa première utilisation

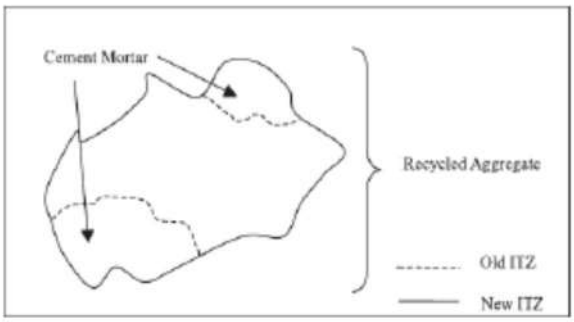


Figure 2.-7 : Compositions des granulats recyclés de béton [58]

2-6-2)Zone de transition interfaciale

Il n'est pas tout à fait exact de considérer le matériau béton comme étant un composite à deux phases ; granulat et matrice cimentaire. En réalité, la pâte de ciment n'est pas complètement homogène et sa microstructure est modifiée à proximité des granulats. Cette zone est généralement appelée « zone de transition interfaciale » ou ITZ (Interfacial Transition Zone). Bien que la zone de transition à l'interface granulat-pâte soit relativement étroite, elle occupe une proportion relativement grande du volume de la pâte de ciment. Pour une zone de transition de 40 μm d'épaisseur, ce volume se situe entre 20 % et 40 % du volume de la matrice cimentaire [59]. Cette zone de transition a beaucoup d'influence sur les propriétés du béton et représente le maillon faible et la source de faiblesse pour le béton [60]. Pour cette raison, la zone de transition est généralement la cause de rupture du béton à des contraintes inférieures à la résistance individuelle de ses deux composantes (matrice de mortier et granulat grossier).

En particulier dans le béton de granulat recyclé, il y a plus d'une zone de transition par rapport au béton de granulat naturel. (La Figure 2-.8) (gauche) montre une vue en coupe d'un granulat recyclé. Cette figure indique la vieille zone de transition entre le granulat d'origine et le mortier résiduel, ainsi que la zone de transition entre le mortier résiduel et la nouvelle matrice de mortier. Par ailleurs,(la Figure 2-.8) (droite) présente aussi la zone de transitionpour un granulat naturel conventionnel. La configuration dans ce cas ne dispose que d'une seule zone de transition entre le granulat et le nouveau mortier. [61]

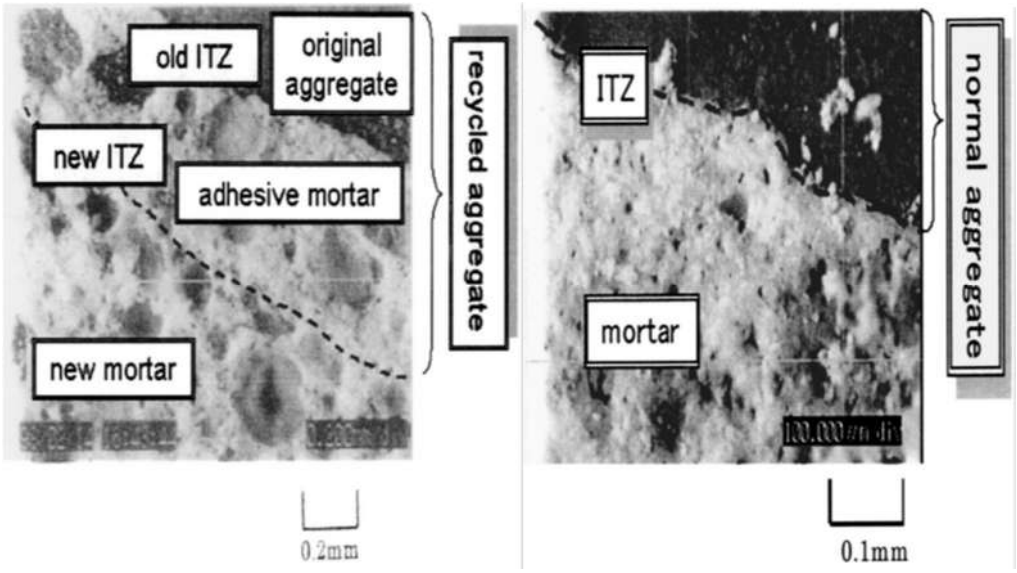


Figure 2-8 Vue en coupe du granulat recyclé (gauche) et du granulat naturel (droite) [62].

2-6-1 Granulométrie

Les courbes granulométriques des granulats recyclés ont la même distribution granulaire que les granulats naturels (Figure 2-9).

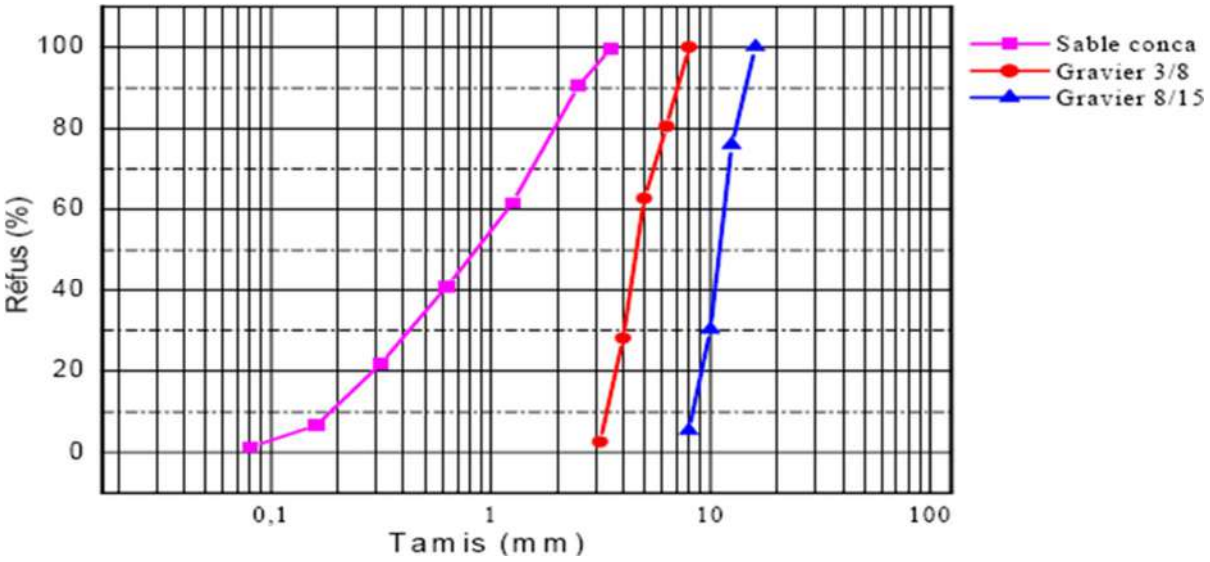


Figure 2-9 : Courbes granulométriques des granulats recyclés [56]

DEBIEB [36] a trouvé que le sable recyclé est grossier par rapport au sable naturel et il est constitué en majorité de petit gravillon et une faible proportion de sable moyen ainsi qu'une quantité importante du ciment dans ces fines.

DOUARA et al [56] ont trouvé que le module de finesse du sable recyclés (2,69) est inférieur à celui de sable naturel (3,47). Par contre, DEBIEB [57] a constaté que le module de finesse de sable recyclé est supérieur à celui de naturel (3,33 et 2,72) respectivement. Des résultats similaires ont été reporté par GASTI [63], dont un module de finesse de 5,80 a été trouvé pour le sable recycle et de 2,59 pour le sable naturel.

2-6-2 Masse volumique

Une chute de la masse volumique des granulats recyclés qui sont assez peu compacte et par conséquent beaucoup plus poreux par rapport au gravier naturel a été reporté (Tableau 2-2).

Tableau 2-2 : Masse volumique apparente et absolue des granulats naturels et recyclés [59]

	Granulats naturels	**Granulats de béton recyclés**
Mv apparente (kg/m3)	1600	1244
Mv absolue (kg/m3)	2650	2500

Les masses volumiques (apparente et absolue) diminuent avec l'augmentation de la fraction granulaire [56]. Aussi, les granulats naturels et les granulats recyclés ayant des masses volumiques absolues semblables. Par contre, les masses volumiques apparentes des granulats recyclés sont inférieures à celles des granulats naturels (Tableau 2-2).

Tableau 2-3 : Masse volumique apparente et absolue des granulats naturels et recyclés [56]

	Granulats Naturels			*Granulats Recyclés*		
	8/15	*3/8*	*S.C.N*	*8/15*	*3/8*	*S.C.R*
Mv_a	1.33	1.36	1.30	1.18	1.22	1.18
Mv_s	2.46	2.54	2.65	2.43	2.56	2.52

Les masses volumiques des granulats recyclés sont nettement plus faible que celles des granulats naturels [57]. Des résultats similaires ont été rapportés par GASTI [63] et PANI et al [60]. Cette diminution peut être expliquée par la présence des pores dans les granulats recyclés. Selon HADJIEVA.Z [61], la masse volumique du béton source des granulats recyclés peut influencer la masse volumique de ces dernières, avec un rapport E/C inférieur à 0,70.

2-6-3Absorption et porosité

L'absorption d'eau des granulats recyclés est comprise entre 3 et 12% [64] [65] [66], la valeur précise dépendant du béton à partir duquel ont été produits les granulats, dit béton« parent ». Il est important de noter que cette valeur est bien plus élevée que celle des granulatsnaturels, qui ont une absorption d'eau comprise entre 0.5 et 3%. Cette différence est principalementdue aux résidus de mortier adhérant au granulat naturel de départ, qui est plus **poreux** que la pierreen elle-même, ce qui augmente globalement l'absorption d'eau du nouveau granulat. Plusieursautres paramètres régissent l'absorption d'eau des granulats recyclés [67] :

- Le type de granulat dans le béton parent
- Les performances mécaniques du béton parent
- La taille maximale de granulat utilisé dans le béton parent

Padmini [67] a montré que le pourcentage d'absorption d'eau du granulat recyclé augmente avec la performance mécanique du béton parent, à cause de la plus grande quantité de mortier attachée dans ce cas-là. Son étude a également prouvé que la taille des granulats utilisés dans le béton parent influence l'absorption d'eau des granulats produits à partir de ce béton : en

effet, plus le granulat naturel initial est petit, plus la surface spécifique totale disponible est grande, et donc plus les granulats recyclés sont riches en ancien mortier, autrement dit, plus ils sont poreux [68].

D'autres études ont mis en évidence l'influence du béton parent sur la qualité des granulats recyclés,avec notamment une attention particulière à accorder à la provenance du béton parent, et desprécautions à prendre si celui-ci vient d'un ouvrage utilisé dans des conditions spécifiques, commepar exemple une utilisation sous-marine [69]. Il a été constaté que la résistance du bétonrecyclé peut être aussi bonne que celle du béton parent, pourvu que le rapport E/C de la pâteentourant les granulats (soit celui du béton parent) soit identique ou inférieur à celui du bétonrecyclé [70] [71].

2-6-4 Dureté

La résistance à la fragmentation (dureté) est déterminée par le coefficient Los Angeles. Le principe de cet essai est la détermination de la résistance à la fragmentation par chocs et à l'usure par frottements réciproques. L'essai consiste à faire tourner les granulats dans un tambour fermé contenant des boulets métalliques. Le coefficient Los Angeles représente la proportion d'éléments finis produits au cours de l'essai. Plus le coefficient LA est faible, plus la résistance des gravillons est élevé. Le coefficient de Los Angeles trouvé pour les granulats recyclés est supérieur à celui des granulats naturel (Tableau 2-6). Même résultats ont été rapporté par DEBIEB [57], GASTI [63] ET PANI et al [60]. HACHANA et al [59] ont aussi remarqués que la valeur du coefficient de Los Angeles des granulats du béton concassé (31,62%) est supérieure à celle des granulats naturels (23,50%). Par conséquent, les granulats recyclés sont moins résistant que les granulats naturels, mais acceptable selon la norme qui exige LA<40%.

Tableau 2-4 : Caractéristiques mécaniques des granulats naturels et recyclés [55]

	Essai Micro-Deval (MDE)		*Essai Los-Angeles (L.A)*	
	G. Naturel	*G. Recyclé*	*G. Naturel*	*G. Recyclé*
Fraction (4 - 6,3)	18,4	36,5	--	--
Fraction (6,3 - 10)	24,04	38,6	31,4	38,88
Fraction (10 - 14)	--	--	30,58	36,52

2-7 L'effet des granulats recyclés sur le béton

2-7-1 Etat frais

2-7-1-1 Ouvrabilité

Bourmatte N. [72] a étudié l'influence de substitution de granulats naturels par des granulats recyclés sur l'ouvrabilité de béton ordinaire (Fig.2-.10). Elle a constaté une augmentation du besoin en eau de tous les bétons étudiés avec le taux de substitution en granulats recyclés, par conséquent une augmentation du rapport Eau/Ciment est inévitable.

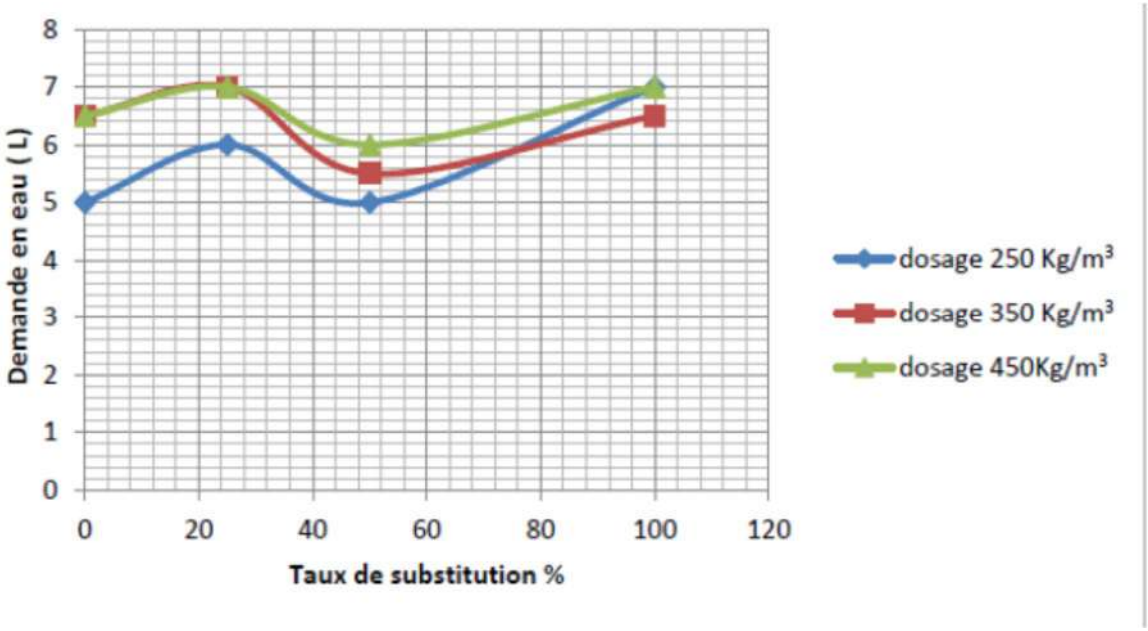


Figure 2-10 : Variation de la demande en eau en fonction du taux de substitution en granulats recyclés de béton [72].

Matar et El Dalati [73] ont trouvé aussi que l'affaissement diminué et l'ajout d'eau augmente avecl'augmentation de substitution de granulats naturel par de granulats recyclés (Fig.2.11). Ils ont expliqué cette diminution d'ouvrabilité par l'absorption d'eau par les granulats recyclés qui sont la conséquence de la présence d'une structure alvéolaire de l'ancien mortier collé aux granulats.

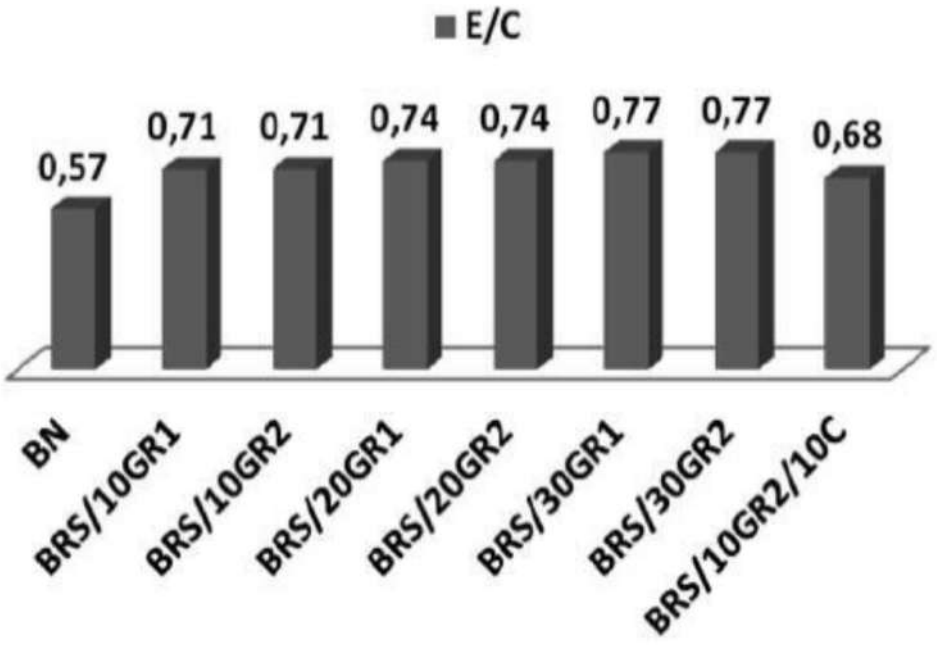


Figure 2-11 :. Rapport E/C des bétons à base de granulats recyclés [73].

2-7-1-2 L'air occlus

La variation de l'air occlus des bétons en fonction du taux de substitution en granulats recyclés debéton étudié par Bourmatte N. [72] est présentée dans la figure 2.12 :

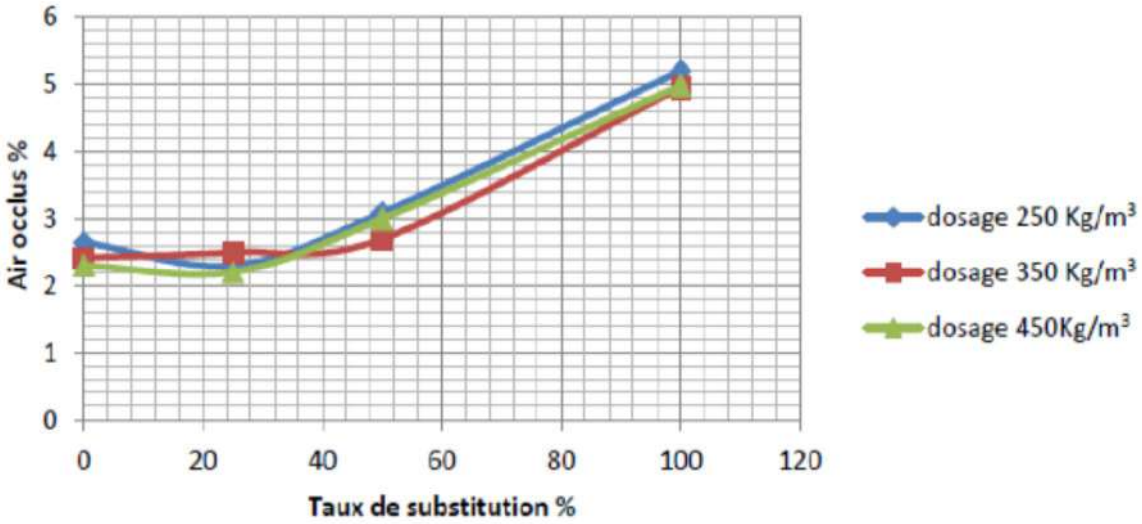


Fig.2-12 : Variation de l'air occlus en fonction du taux de substitution en granulats recyclés de béton[72].

Les résultats obtenus montrent que l'air occlus du béton augmente avec l'augmentation du pourcentage de substitution de granulat naturel par les granulats recyclés. Bourmatte N. [72] a expliqué cette augmentation de la quantité d'air par la forme et la rugosité des granulats

recyclés, qui peuvent impliquer une plus grande difficulté pour les bulles d'air à s'extraire du béton pendant la vibration.

2-7-1-3Densité

Bourmatte N.[72] a étudié l'influence du remplacement de granulats naturels par des granulats recyclés sur la densité de béton ordinaire (Fig.2-13). Elle a trouvé que la densité est diminuée avec l'augmentation du pourcentage de granulats recyclés. Et expliqué cette diminution par la faible densité de granulats recyclés par rapport à la densité des granulats naturels.

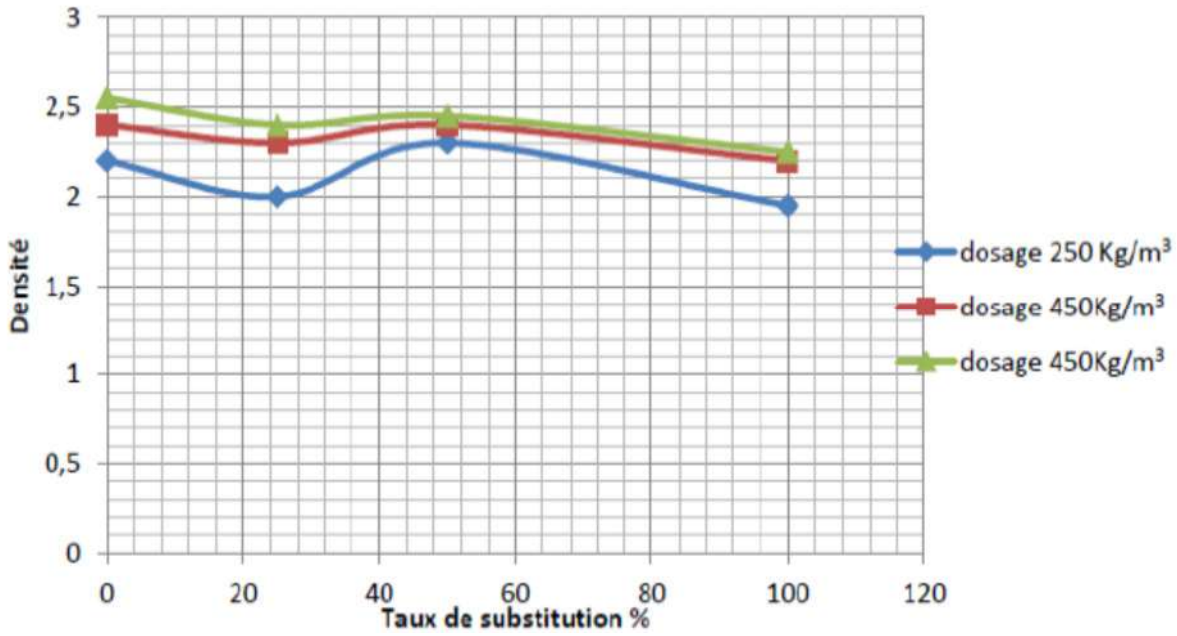


Fig :2-13 : Variation de la densité du béton frais en fonction du taux de substitution en granulats recyclés de béton [72].

2-7-2 Etat durcis

2-7-2-1 Absorption du béton durci

Dans le béton contenant des granulats recyclés, il y a une forte croissance de l'absorption de l'eau. Le Tableau 2.5 présente les résultats d'absorption d'eau obtenus par [74] dans différents types de béton. Les mélanges témoins avec granulat naturel sont ceux marqués avec RC et RCS. Les valeurs d'absorption ont augmenté avec le pourcentage de granulats recyclés mixtes, et plus fortement dans les bétons contenant des granulats recyclés mélangés avec des particules flottantes. Ce comportement a été principalement attribuable aux différences dans l'absorption d'eau de granulats recyclés et granulats naturels [75].

Tableau 2 -5 : Absorption de l'eau pour bétons contenant les granulats recyclés[74]

Concrete	Total water absorption (wt%)	% Increase
RC	3.64 ± 0.084	0.00
RCF-25	4.13 ± 0.030	13.39
RCF-50	4.65 ± 0.008	27.63
RC-25	3.94 ± 0.010	8.27
RC-50	4.53 ± 0.086	26.18
RCS	2.91 ± 0.147	0.00
RCFS-50	3.96 ± 0.025	36.19
RCS-50	3.80 ± 0.137	30.82

2-7-2-2La porosité

Matar et El Dalati [73] ont trouvé que la porosité de béton ordinaire augmente avec l'augmentation d'incorporation de granulats recyclés (Fig.2.14). Ils ont expliqué cette augmentation par la porosité des granulats recyclés et elle augmente avec l'augmentation du rapport E/C.

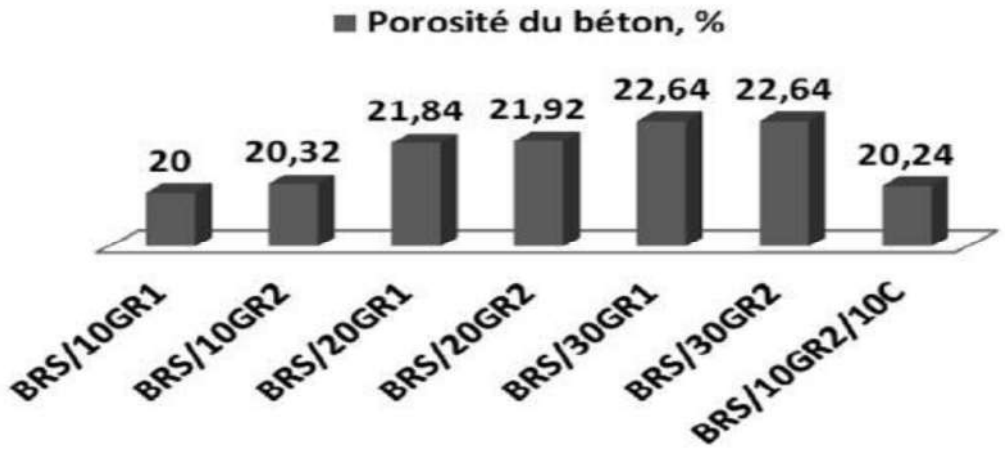


Fig.2-14 : Porosité des bétons à granulats recyclés [73].

2-7-2-3 La résistance à la compression

Bourmatte N. [72] constaté que la résistance à la compression des bétons diminue lorsque le pourcentage en granulats recyclés augmente (Fig.2.15). Ils ont lié cette diminution à la mauvaiseadhérence entre la pâte cimentaire et les granulats recyclés. Ces résultats confirment les résultats deMatar et El Dalati [73] (Fig.2.16).

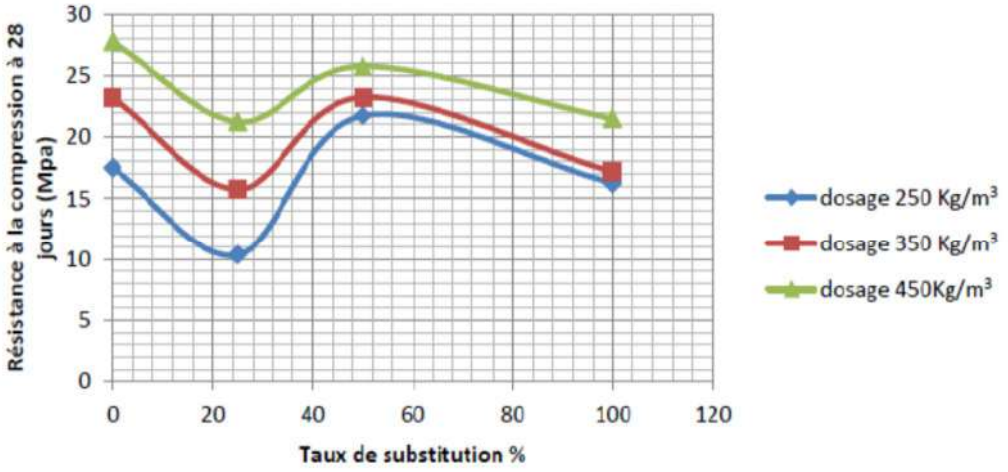


Fig.2.15. Résistance à la compression du béton à base de granulats recyclés de béton Pour les troisdosages à 28j [72].

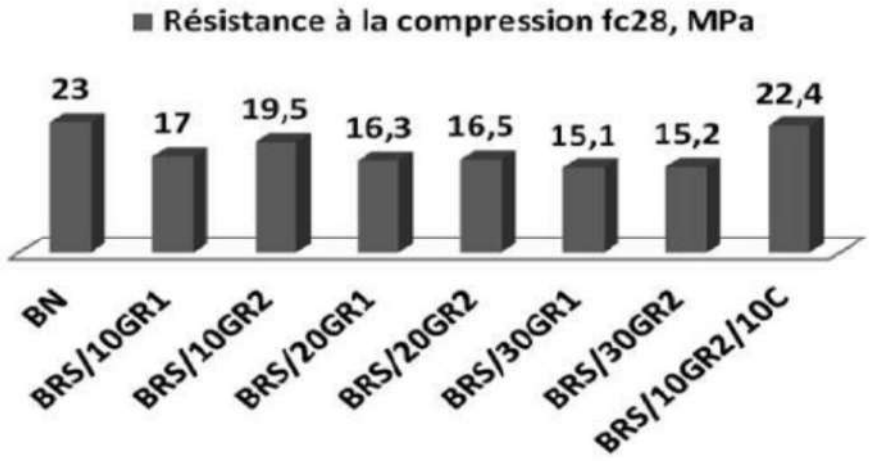


Fig.2.16. Résistance à la compression des bétons à granulats recyclés [73].

D'après l'étude de Berrdjeme.L et all [76]larésistance à la compression des bétons recyclés évolue au cours du temps d'une façon similaire que le béton témoin (figure 2.17). Cependant, elle chute en fonction du remplacement en granulats recyclés, sables B2 et gravier B3 et les deux en même temps B4. A 28 jours le béton B5, composé de 75 % de granulats naturels et 25% de granulats recyclés présente une meilleure résistance que ce soit en compression ou en traction par fendage. Pour le béton B4 constitué de 100% granulats recyclé, la chute de résistance est de l'ordre de 23% par rapport au béton B5 et 16% par rapport au béton témoin B1 100% granulats naturelles.

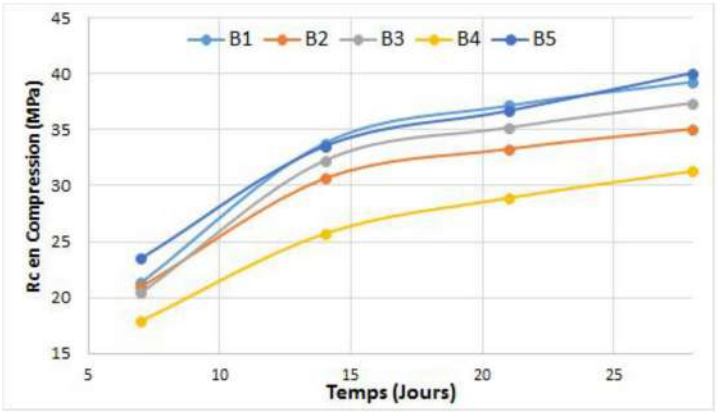


Figure 2. 17 Évaluation de la résistance à la compression en fonction de temps.

2-7-2-4 la résistance à la traction

L'écart de résistance en traction entre les bétons naturels et recyclés est assez faible par rapport à celui observé en compression. Il semble aussi que l'état de surface des granulats a un rôle important dans la résistance à la traction car la rugosité des granulats recyclés est très importante et par conséquent a amélioré l'adhérence pâte granulat (Tableau 2.6 et Figure 2-18).

Tableau 2-6 : Caractéristiques mécaniques des granulats naturels et recyclés [55]

Composants	*Unité*	*Types de Béton*				
		BT	*B1*	*B2*	*B3*	*B4*
CEM II 42,5	kg/m^3	350	350	350	350	350
Sable Roulé	kg/m^3	627	--	--	--	--
Sable Naturel		--	837	--	818	--
Sable Recyclé		--	--	667	--	588
Gravier Naturel 5/12,5	kg/m^3	565	400	--	--	493
Gravier Naturel 12,5/20		630	542	--	--	720
Gravier Recyclé 5/12,5		--	--	380	317	--
Gravier Recyclé 12,5/20		--	--	620	571	--
Eau: Calculée	litres	193	163	163	193	193
Ajoutée		0	63	52	22	43
Totale		193	226	215	215	236
Affaissement au cône	cm	6,5	7,5	6,5	8,0	7,5

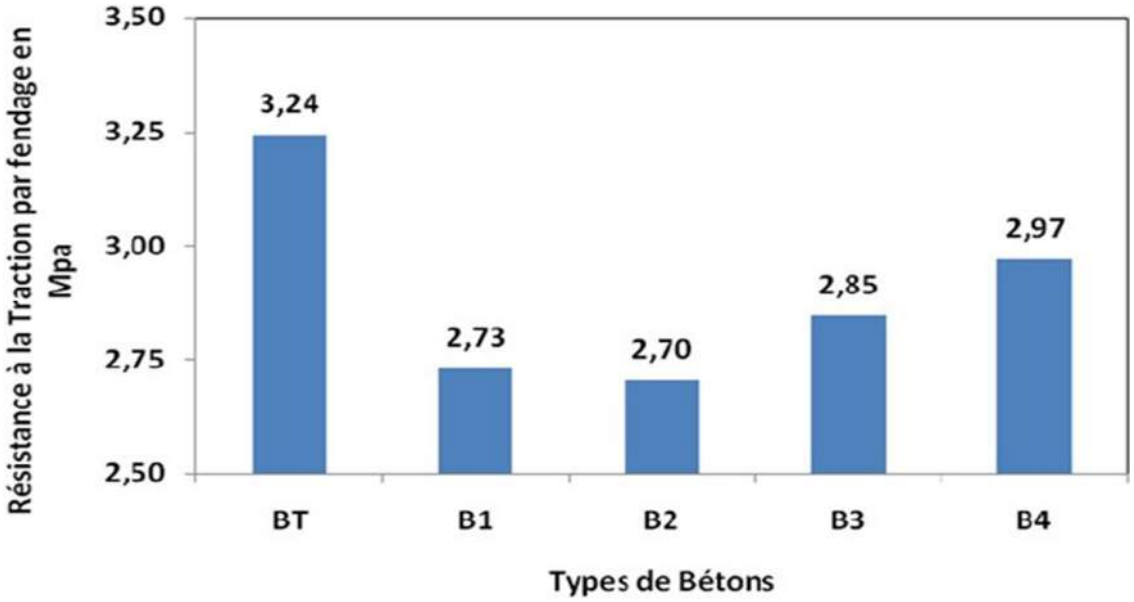


Figure 2-18 : Evolution de la résistance en traction par fendage à l'âge de 28 jours pour les bétons à différentes combinaisons granulaires [55].

2.8. Conclusion

Le domaine de recyclage et la valorisation des déchets est important, en particulier ces dernières années où les émissions de CO_2 sont importante, dues aux industries lourdes et transformative, c'est pourquoi nous devons préserver l'environnement en exploitant les déchets de démolition et les déchets industrielles pour éviter de les rejeter dans la nature.

Dans cette partie de l'étude bibliographique certains rapports ont été mentionnés concernant l'utilisation des granulats recyclés sur le comportement des bétons autoplaçant à l'état frais et durci, ainsi que leurs avantages économique, écologique et technique

CHAPITRE 3

Matériaux et formulation

CHAPITRE 3

Matériaux et formulation

3-1 Matériaux de base utilisés

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

3-1-1 Le ciment

Le type de ciment utilisé est un ciment du type CEM I 42.5 R (BISIKRIA), « une résistance minimale à la compression à 28 jours de 42,5 MPa » et une surface spécifique de Blaine (SSB) de 2900 cm²/g.et des Caractéristiques chimiques donne aux tableaux (3-1) et Caractéristiques physiques et mécaniques auxtableau (3-2) .

Tableau (3-1): Caractéristiques chimiques de CEM I 42.5 R.

SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	K_2O	Na_2O	P_2O_5	Cl	PAF	Humidité
19.286	4.516	3.168	61.710	2.565	2.406	0.537	0.262	0.187	0.035	2.55	0.548

Tableau (3-2) : Caractéristiques physiques et mécaniques de CEM I 42.5 R

Physique						Mécanique					
Refus (%)	SSB (cm^2/g)	La consistence (%)	Début de prise (min)	Fin de prise (min)	Expansion à chaude (mm)	Résistance a flexion (MPa)			Résistance à compression (MPa)		
						2J	7J	28J	2J	7J	28J
4.5	3246	25	180	270	0.5	4.8	6.5	8	30.1	44.5	54.3

3-1-2Granulats

Les granulats utilisés dans cette étude sont de deux catégories : les granulats naturels et les granulats de béton de démolition.

3-1-2-1 sable

Dans cette étude nous avons utilisé deux types de sable :Celui de **ouedsouf**(figure3-1)et le sable recycle(figure 3-2) dont la classe granulaire est délivrées sous l'appellation commerciales sable 0/3. Les paramètres de caractérisations de ces types de sable sont dans le tableau (3-3) et la granulométrie dans la figure (3-3).

Tableau(3-3) : Caractéristiques des sables recyclé et naturel

Propriétés	Types de sable		**Normes**
	Naturel	Recyclé	
provenance	Oued souf	Béton concassé	
Classe granulaire	0/3	0/3	_
Module de finesse	1.9	3.14	NA 2607 et EN 933-1
Mv absolue (g/cm³)	2.63	2.47	_
Mv Apparente(g/cm³)	1.58	1.29	_
Taux d'absorption (%)	0.5	7	NF P 18-554et18-555
Équivalent de sable(%)	79.35	70.64	NF P 18-598



Figure 3-1 :sablenaturel deouedsouf



figure 3-2 :sable recyclé de béton de Démolition

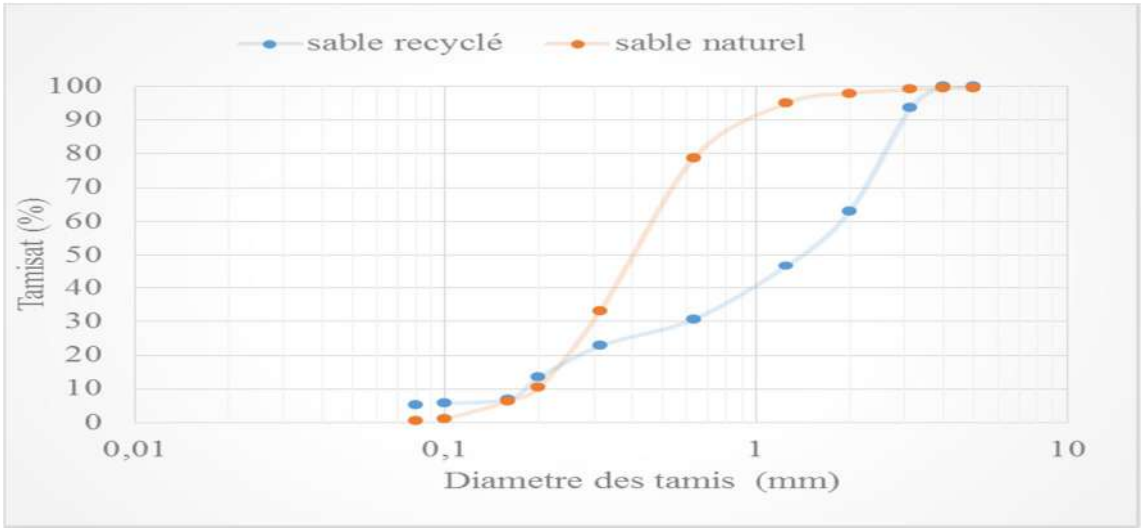


Figure3-3 : analyse granulométrique des sables naturel et recyclé.

3-1-2-2 Gravier

Concernant le gravier naturel de boughzoul (figure 3-4) nous avons utilisé deux types de classe granulaire 3/8 et 8/15 pour faire un gravier 3/8 d'une classe granulaire similaire à celle du gravier recyclé(figure 3-5) qui est obtenu par le concassage des éprouvettesobtenue des différents chantiers de la wilaya de Médéa . Les paramètres de caractérisations de ces types de sable sont dans le tableau (3-4) et la granulométrie dans la figure (3-3).

Tableau3-4 : Caractéristiques des graviers recyclé et naturel

Caractéristiques	Graviers naturel	Gravier recyclé	Normes
Classe granulaire (mm)	3/15	3/15	
Masse volumique absolue (g/cm^3)	2.73	2,43	NF EN 1097-6 **[184]**
Masse volumique apparente (g/cm^3)	1,65	1,24	NF EN 1097-3**[185]**
Taux d'absorption d'eau (%)	1	10	NF EN 1097-6 **[184]**

D'après les résultats du tableau 3.4, il parait que les gros granulats sont de bonne qualité et peuvent être utilisés pour la confection du béton autoplaçant.



figure 3-4 :gravier de boughezoul **figure 3-5 :**gravier recyclé

3-1-3 Le super-plastifiant

Dans notre étude on a utilisé le Super plastifiant MEDAFLOW SP 30(figure 3-6), produit par Granitex. Ce super-plastifiant est aussi un haut réducteur d'eau. 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 SP 30 permet également un maintien d'ouvrabilité sur une longue période (2heures). Voir fiche technique en annexe 4 pour plus d'indications sur ce produit.



Figure 3-6 : Super plastifiant MEDAFLOW SP 30.

Grâce à ses propriétés le MEDAFLOW 30 permet :

a) Sur béton frais

- Obtention d'un rapport E/C très faible

- Amélioration considérable de la fluidité

- Une très bonne maniabilité

- Éviter la ségrégation

- Faciliter la mise en œuvre du béton

b) Sur béton durci

- Augmenter les résistances mécaniques à jeune âge et à long terme.

- Diminuer la porosité

- Augmenter la durabilité

- Diminuer le retrait et le risque de fissuration

Tableau 3. 51: les caractéristiques de super plastifiant MEDAFLOW 30.

Aspect	Couleur	PH	Densité	Teneur en chlore	Extrait sec
Liquide	Brun clair	6-6.5	1.07±0.01	< 0,1 g/l	30%

3-1-4 Eau de gâchage

L'eau utilisée est l'eau du robinet de laboratoire.

3-2FORMULATION ADOPTEE

La formule utilisée est une formule appelée méthode universelle, qui est une méthode de formule proposée par Okamura. Le rapport (S/M) a été pris sur la base de la thèse de doctorat de Boukendakdji [77] qui à étuvé la formulation des bétons autoplaçant à base des matériaux algérien. Le rapport E/P est fixé à 0,40, et la quantité d'agent réducteur d'eau est optimisée grâce au test du mortier pour obtenir un mortier autoplaçant uniforme et stable (sans ressuage). Obtenir le pourcentage de réducteur d'eau obtenu sur le béton sur le mortier.

3-3 FABRICATION DU MORTIER

Le but est de réaliser les essais sur mortier et d'optimiser le dosage en superplastifiant, en gardant les rapports S/M et E/P constants (S/M=0,50 et E/P=0,38) et faire varier le pourcentage du superplastifiant de 0,60 à 0,90% afin d'avoir un mortier autoplaçant satisfaisant ayant un diamètre d'étalement entre 270 et 330 mm[53]. sans ségrégation et sans ressuage. Les quantités des constituants du mortier (ciment, sable, eau et superplastifiant) ont été calculées à l'aide d'un programme Excel.

La procédure du malaxage du mortier adoptée est celle de DOMONE et JIN [78] où ils proposent d'introduire le superplastifiant à partir de la 2ème minute après le commencement du malaxage.

La procédure est comme suit :

•Malaxer à sec le ciment et le sable pendant environ une (1) minute afin d'homogénéiser le mélange (on a utilisé un malaxeur à mortier de 5 litres de capacité)

•Malaxer pendant une (1) minute avec la première quantité d'eau (Eau1 = 70% Eau)

•Malaxer pendant une (1) minute avec le restant de l'eau de gâchage (Eau2 = 30% Eau) mélangé avec le superplastifiant

•Malaxer le mélange pendant 3 minutes.

•Laisser le mélange reposer pendant 5 minutes pour donner le temps nécessaire àl'absorptiondes granulats recycles.

•malaxer pendant 30 secondes

3-3-1 Essais réalisés sur mortier

Les essais réalisés sur le mortier à l'état frais sont comme suit

3-3-1-1 Essai d'étalement au mini cône

L'essai d'étalement consiste à remplir un moule tronconique placer sur une surface horizontale Lisse, une fois le moule soulevé et la galette stabilisée, le diamètre d'étalement est mesuré suivant deux directions perpendiculaire, la moyenne est retenue. La Figure 3.7montre les étapes de l'essai d'étalement au mini cône.

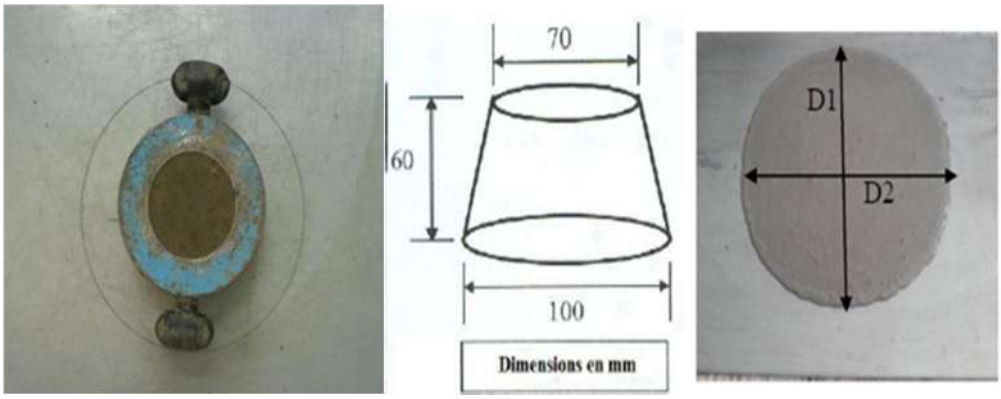


Figure 3-7 : Mini cône pour mortier.

D'après les résultats des expériences réalisées sur des matériaux japonais par Nawa et al.

[81], L'étalement doit être compris entre 250 et 280 mm, Quant à Chai [82], qui a travaillé avec des matériaux anglais, a suggéré une valeur d'étalement minimale de 300 mm, un autre intervalle pris par Domone entre 270 et 330mm [83].

3-4) FABRICATION DU BETON

Une fois le dosage en superplastifiant est optimisé à partir des essais sur mortier, on procédera aux essais sur le béton à l'état frais. La fabrication du béton a été basée sur la méthode japonaise dite la méthode générale, le calcul de dosage des différents constituant (ciment, sable, gravier, eau et superplastifiant) a été fait à l'aide d'un programmeExcel basé sur cette méthode en tenant compte des caractéristiques des granulats (absorption,humidité…etc.)).La méthode du malaxage adopté est celle de DOMONE etJIN[78]

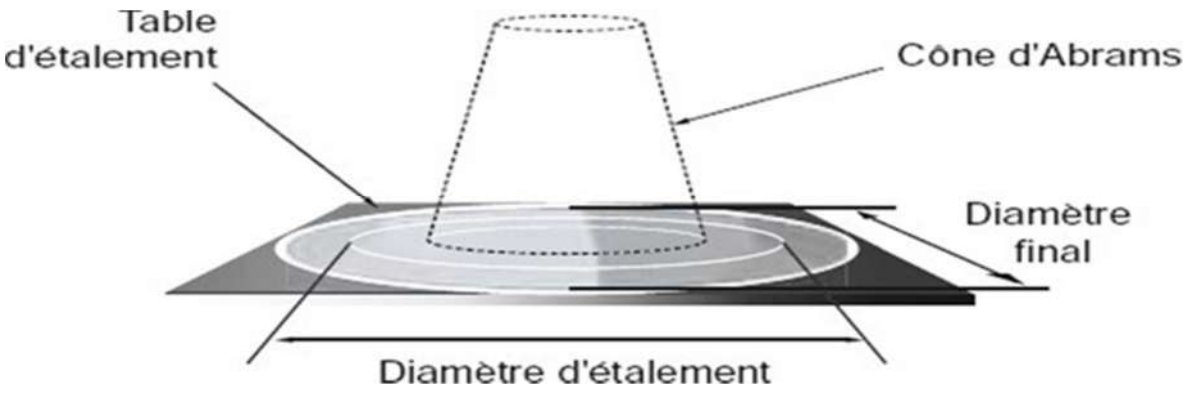
- Malaxer le gravier (3/15), le sable, le ciment pendant 1 minutepour homogénéiser le mélange
- Ajouter pendant 1 minute la première quantité d'eau (Eau1 = 70% Eau)
- Ajouter le superplastifiant dilué dans le restant de l'eau de gâchage (Eau2 = 30% Eau)
- Malaxer pendant 5 minutes ;
- Arrêter le malaxeur et laisser le mélange au repos pendant 5 minutes
- Remalaxer pendant 30 secondes.

3-5 ESSAI SUR LE BETON AUTOPLAÇANT

3-5-1A L'ETAT FRAIS

3-5-1-1 Essai évaluant la fluidité (Étalement)

L'essai d'étalement est utilisé pour caractériser la fluidité des BAP. Il s'effectuecomme un essai d'affaissement au cône d'Abrams. Cependant, l'affaissement est toujourssupérieur à 25 cm, on mesure le diamètre moyen (moyenne sur deux diamètresorthogonaux) de la galette de béton obtenue au bout d'une minute [79]. Ce diamètre,appelé étalement D, donne une indication sur la mobilité du BAP dans un milieu nonconfiné. Les valeurs ciblées d'étalement sont généralement fixées dans la fourchette 60à 75 cm [80]. Il est possible aussi de mesurer le temps d'écoulement du béton pouratteindre un étalement de 50 cm (noté T50) ce qui donne un indice sur la viscositéd'un mélange de béton . La figure (3-8) représente schématiquement l'essai d'étalement



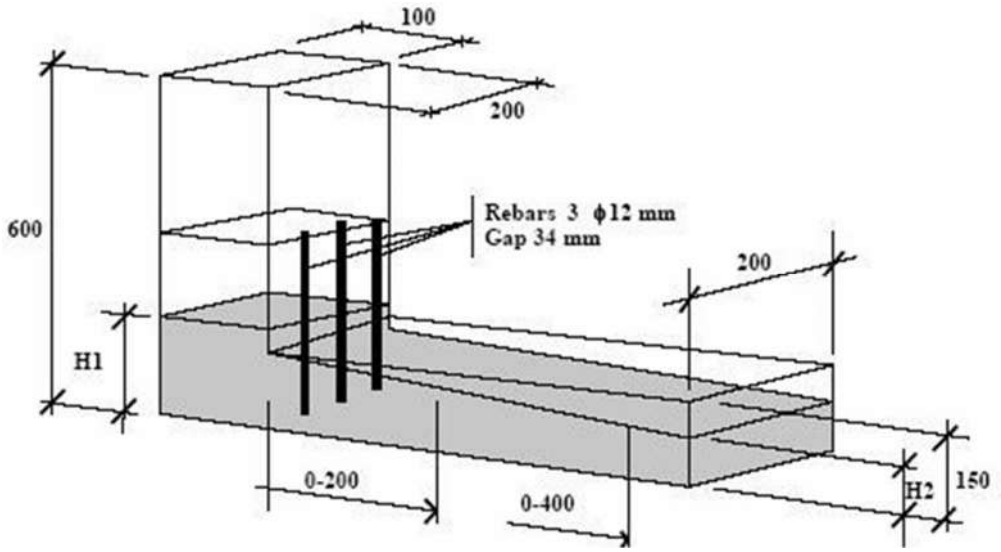
La figure 3-8 : Représentation schématiques de l'essai d'étalement

3-5-1-2 Essai de boite en L

La boîte en L permet de tester la mobilité du béton en milieu confiné et de vérifier que la mise en place du béton ne sera pas contrariée par des phénomènes de blocage inacceptables.Le mode opératoire est exprimé d'après l' [AFGC] comme suit :

La partie verticale de la boîte est entièrement remplie de béton (le volume nécessaire est d'environ 13 litres). Après arasement, onlaisse le béton reposer pendant une minute. Puis on lève la trappe et on laisse le béton s'écouler dans la partie horizontale de la boîte à travers le ferraillage. La distance libre entre les barres est de 39 mm.

Quand le béton ne s'écoule plus, on mesure les hauteurs H1 et H2 et on exprime le résultat en terme de taux de remplissage H2/H1.Lorsque le béton s'écoule mal à travers le ferraillage et qu'il se produit un amoncellement de granulats en aval de la grille, c'est le signe d'un problème de blocage ou de ségrégation.



La figure 3-9 : Représentation schématique de l’essai à la boite en L

3-5-1-3) Essai de la boite en «U»

Cet essai sert à mesurer la capacité de remplissage du BAP dans un coffrage confiné et fortement ferraillé. La boite «U» divisé en deux parties symétriques R1 et R2 par une cloison centrale dont le fond est doté d’une trappe coulissante qui peut libérer la grille d’armatures (figure 3-.10). L’essai de boite en «U» nécessite 16 l de béton et s’appuie sur la mesure de la hauteur H de béton dans la partie R2, après remplissage de la partie R1 et ouverture de la trappe. Dans ce cas, les auteurs estiment qu’un béton sera "autoplaçant" si la hauteur deremplissage H est supérieure à 30 cm [79].

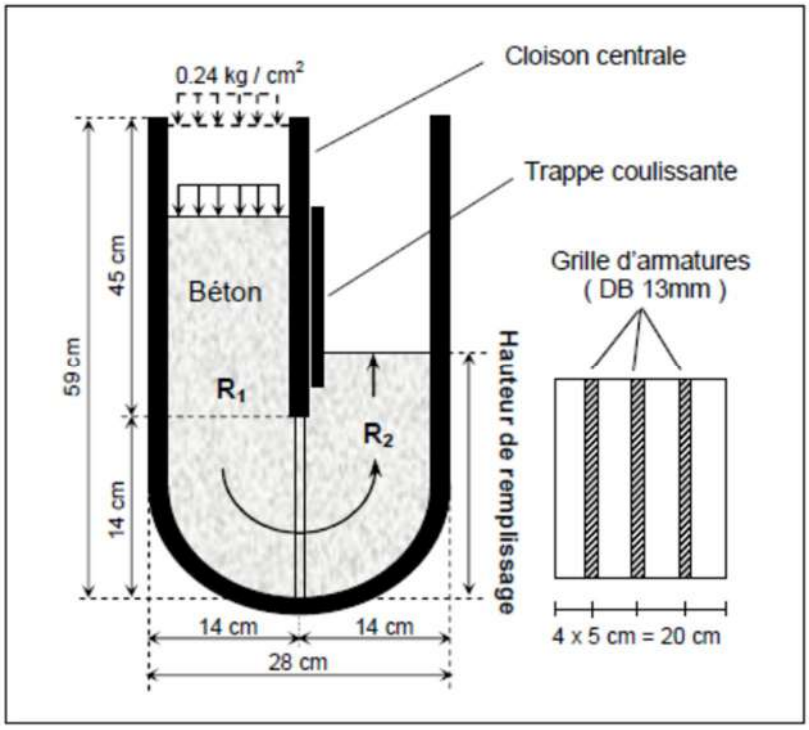


Figure3-10 : Schéma descriptif de la boite en «U» [84].

3-5-1-4) Essai de stabilité au tamis

Cet essai vise à qualifier les bétons autoplaçant vis-à-vis du risque de ségrégation. Il peut être utilisé en phase d’étude de formulation d’un béton autonivelant en laboratoire, ou pour le contrôle de la stabilité du béton livré sur chantier. Cet essai complète les essais permettant d’apprécier la mobilité en milieu confiné ou non, en caractérisant la stabilité [AFGC].

Cet essai consiste à l'utilisation d'un seau de 10 L avec un couvercle, un tamis de 5 mm de diamètre de 315 mm plus fond et une bascule de portée minimale de 20 kg et de précision de 20 g.Le mode opératoire d'après les recommandations de l' [AFGC] est le suivant : A la fin du malaxage, dix litres de béton sont versés dans le seau. Après quinze minutes, un échantillon de 4,8 kg est versé du seau sur le tamis, deux minutes plus tard, on pèse la quantité de pâte (laitance) ayant traversé le tamis. Le pourcentage en poids de laitance par rapport au poids de l'échantillon donne l'indice de ségrégation

la mesure de cet indice conduit à classer les formules de BAP de la façon suivante :

- entre 0 % et 15 % stabilité satisfaisante.
- entre15 % et 30 % stabilité critique, l'essai à refaire in situ.
- > 30 %stabilité très mauvaise, béton inutilisable.



Figure3-11 : Essai de la stabilité au tamis

3-5-1-5) Essai à l'entonnoir en V (V-Funnel test)

Parmi les essais permettent d'évaluer la mobilité du béton en milieu confiné l'essai de l'entonnoir en forme de V (V funnel) est le plus utilisé [85]. Le dispositif d'essai est montré dans la figure (3-12). La quantité du BAP nécessaire pour l'essai est de 12 litre, et les dimensions maximale des agrégats utilisés est de 20 mm. Grâce à la mesure du temps d'écoulement à l'entonnoir, cet essai permet d'évaluer la capacité du béton à passer à travers les zones confinées. Il permet aussi de mesurer la viscosité du béton et il nous renseigne sur la

stabilité du mélange Le temps d'écoulement du béton autoplaçant à l'entonnoir doit être généralement inférieur à 12 secondes. Quelques recommandations visent un temps compris entre 5 et 12 secondes pour obtenir un béton de viscosité suffisante

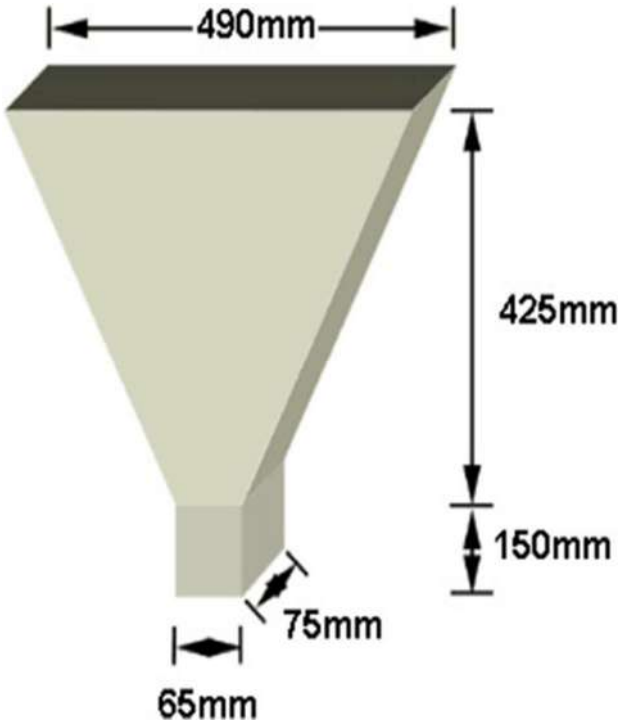


Figure3-12 : L'entonnoir en V

3-5-2 à l'état durci

3-5-2-1Essais de résistance à la compression

La résistance à la compression a été mesurée selon la norme EN 196- par compression Axiale pour demi-prisme d'éprouvettes prismatiques après rompre en flexion a l'âge de 3, 7 et 28 jours, à l'aide d'une presse de capacité de 2000 KN (Figure3-.13). La résistance à la Compression correspond à la contrainte moyenne d'écrasement de trois (03)Demi-prismes des trois éprouvettes.



Figure 3-13 : Essais de résistance à la compression

3-5-2-2)Essai de traction par flexion

Les essais de flexion trois points sont réalisés à 3, 7, 28 et 90 jours de mûrissement du béton sur des éprouvettes prismatiques 7×7×28 cm. Les échantillons sont soumis à un moment de flexion par application d'une charge constante et continue au moyen de rouleaux supérieurs et inférieurs en trois points sur une presse à vérin hydraulique.

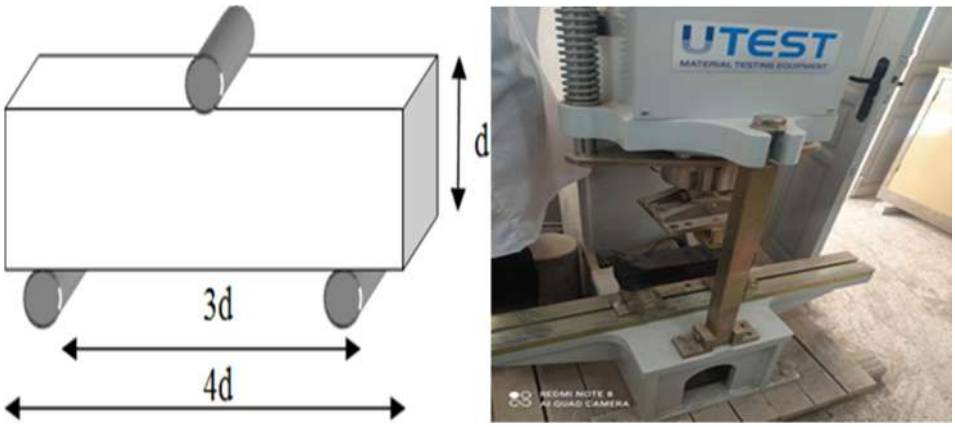


Figure3-14 : Dispositif de traction par flexion.

La mesure est quasi-statique et la vitesse d'asservissement du compactage est très faible, de 0,1 kN/s ±1% suivant la norme l'EN 12390-5. Les faces des éprouvettes sur lesquelles on applique la charge sont apprêtées et présentent des surfaces planes.

3-5-2-3 Essais d'auscultation dynamique

L'appareil ultra-sonique génère des ondes ou des impulsions "ultra-soniques" qui sont transmises au béton par un transducteur mis au contact avec la zone à évaluer. Le temps de propagations des ondes à travers le béton est visualisé sur un afficheur digital de l'appareil.

Avant de commencer, l'essai il faut régler l'appareil de mesure. Cela se fait comme suit :

- Remise à zéro en utilisant la barre de calibrage (elle doit se faire régulièrement si la fréquence du transducteur est modifiée ou si les câbles sont changés). La valeur de calibrage (µs) est celle marquée sur la barre de calibrage, elle est de 25,4µs. Il faudra donc coupler les transducteurs avec la barre de calibrage en appliquant le couplant sur les transducteurs et les deux extrémités de la barre et en appuyant fermement comme illustrés ci- dessous. (Figure 3-15.).
- il faudra régler la fréquence du transducteur à 25,4µs, la largeur d'impulsion et les paramètres de calibrage

Après tous ces ajustements il faut préparer les éprouvettes comme suit :

- Poncer et égaliser la partie de la surface des éprouvettes à ausculter où le transducteur sera fixé, cette étape est très importante pour que les transducteurs soient en contact avec l'éprouvette ;
- Préparer les point de mesures, cette opération consiste à marquer les point d'essai afin de centrer les transducteurs dessus ;
- Employer un matériau intermédiaire entre les deux faces et en prenant soin de vérifier que l'appareil est bien appliqué contre la surface à tester à l'aide d'un matériau d'interposition comme du gel.

Trois types de dispositions des transducteurs sont communément utilisés.

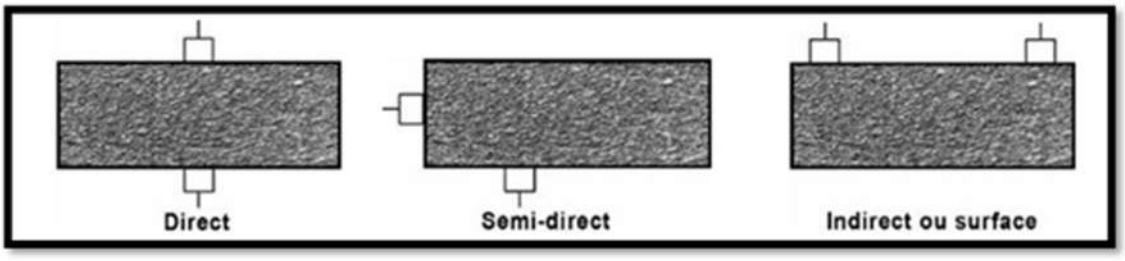


Figure 3-15. : Différents types de dispositions des transducteurs

3-5-2-4Essai d'absorption par capillarité

Conformément à la norme NF EN 1015-18 [86], l'essai consiste à mesurer la masse d'eau absorbée par une éprouvette de mortier préalablement conditionnée par un étuvage à 80°C jusqu'à poids constatant. A l'issue du sortir en étuvage, la surface latérale des éprouvette est alors enduite de résine (ou de papier aluminium autocollant) pour éviter l'évaporation latérale de l'eau absorbée durant l'essai, puis conservée environ 12 heures dans un dessiccateur à 20 ± 2°C pour permettre le durcissement complet de la résine. L'essai d'absorption capillaire est réalisé à la suite et consiste à suivre l'évolution de masse des éprouvettes plongées de 5 mm dans de l'eau (figure3-15), (figure 3-16). Augmentation de la masse de l'échantillon a été mesurée à intervalles de temps (0 min, 12 min, 30 min, 1h, 2h, 4h et 24h) on procède à la pesée des morceaux (mx). La différence de poids entre (mx) et (m0) est le poids de l'eau absorbée (mx- m0).Le coefficient d'absorption capillaire Ca est alors calculé par l'équation suivante.

$$C_a \left(\frac{kg}{m^2}\right) = \frac{(M_x - M_o)}{A}$$

Où Mx : masse de l'éprouvette à une échéance donnée (kg), M0 : masse initiale de l'éprouvette (kg), A : section de l'éprouvette (m^2)

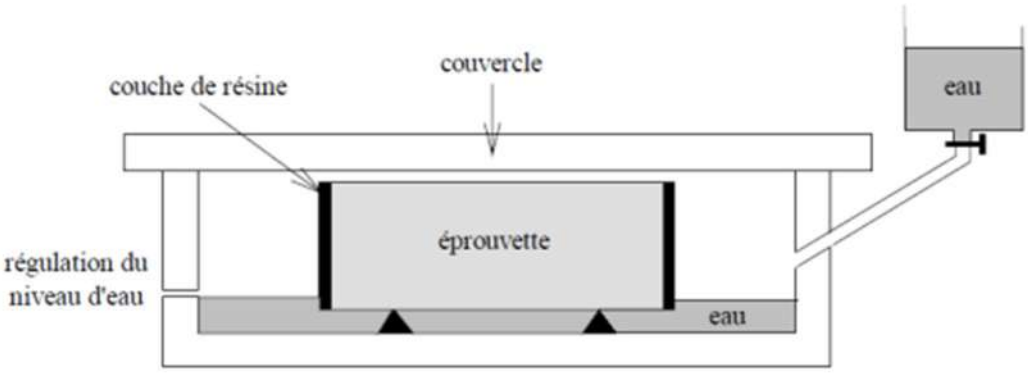


Figure 3-16: Dispositif expérimental de mesure d'absorption d'eau par capillarité



Figure 3-17: Essai d’absorption d’eau par capillarité.

Chapitre 4 : Résultats et discussion

Chapitre 4 : Résultats et discussion

4- 1 Introduction

L'utilisation des granulats recyclés influent sur les propriétés et les performances globales des BAP. En fait, le remplacement du AN par AG affecterait généralement la maniabilité, la résistance mécanique et la morphologie du BAP en raison de la porosité plus élevée, de la densité inférieure et de la résistance inférieure des granulats recyclés [87].

L'étude expérimentale a pour objectif principal d'étudier l'effet des déchets de béton de démolition de diffèrent classe granulaire (0/3 et 3/15) avec des taux varie de 0,25 et 50% de chaque granulat sur **diverses propriétés du BAP, y compris la fluidité, les résistances mécaniques, la durabilité**. Pour cela, différents BAP ont été réalisés et comparés à un BAP témoin sans granulats recyclé. Les résultats expérimentaux obtenus sont présentés et discutés ci-après.

4-2 Formulation des mortiers

L'objectif de la formulation est de déterminer la quantité nécessaire de chaque matériau afin d'obtenir un mortier fluide sans ségrégation ni ressuage et sans nuire ses caractéristiques à l'état durci et restons toujours dans un contexte économique. Afin de déterminer les quantités des matériaux : sable, ciment, eau et adjuvant, la formulation du MAP est basée sur la méthode japonaise (JSCE). Avec une modification au niveau du rapport S/M qui devenue 0.5 pour s'adapter avec les exigences des matériaux locaux basant sur les recherches de Boukendakdji [77]. Le rapport E/C est fixé à 0.38 pour que les résultats ne soient pas affecter par la variation de ce rapport qui peut modifier considérablement les caractéristiques des mortiers à l'état durcis. le rapport superplastifiant/liant (SP/L) ont été évalués expérimentalement de manière à avoir des valeurs d'étalement au mini cône d'Abrams de (290 ± 10mm) pour toutes les familles des mortiers, les différentes compositions sont présentées dans le tableau (III.1).

Tableau 4-1 : Composition des différents mortiers réalisés

	Sable recyclé (%)	**Ciment (g)**	**Sable (g)**	**E/C**	**Eau(g)**		**SP**		**Sable recyclé (g)**
					1	2	(%)	(g)	
MAP 1	0	501,1	915,9	0.38	134,6	57,7	0.90	4.5	0
MAP2	25	501,1	686,9	0.38	143,8	61,6	0.85	4.3	186,3
MAP3	50	501,1	457,9	0.38	156,0	66,8	0.70	3.5	368,7

4-3Résultats de caractérisation des BAP à l'état frais

4-3-1 Besoin en superplastifiants

Pour ce qui s'en suit, et pouvoir comparer les résultats obtenus à l'état durci, on a varié la quantité d'adjuvant (figure 4.1) pour avoir des caractéristiques a l'état frais comparables à celles du béton de référence (0SR0GR), Le tableau 4.2 présente la fourchette des résultats à l'état frais.

Tableau 4-2 : Les résultats des essais à l'état frais

essai	*Etalement D (mm)*	*T50 (sec)*	*T (Vfunnel) (sec)*	*L-Box*
	760±40	4±1	5±2	0,9±0.1

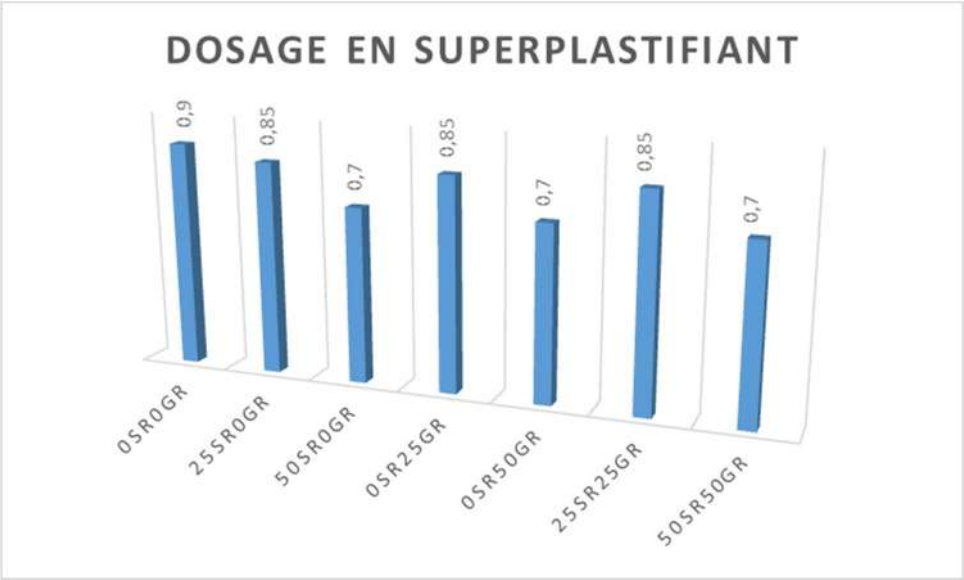


Figure 4-1 : variation du dosage SP

La faisabilité d'utiliser des granulats recyclés fin avec différents pourcentages de remplacement dans les BAP a été étudiée par [88] et il a été rapporté que le diamètre de l'écoulement d'affaissement et le rapport de ségrégation des BAP augmentaient en augmentant la teneur en RCA fin.

Aslani et al[89] ont étudié la maniabilité du BAP contenant des AR fin et ont conclu que son impact est significatif sur les résultats de j-ring plutôt que sur les résultats de l'écoulement d'affaissement. Cependant, toutes les valeurs d'affaissement des échantillons testés satisfaisaient à la plage suggérée comprise entre 600 et 700 mm, qui est définie par les directives européennes [90].

Pour le de temps d'écoulement d'entonnoir en V, les mélanges à haute teneur en AR (60%) appartiennent à la classe VF2 et les autres mélanges appartiennent à la classe VF1 selon EFNARC. De plus, il a été observé que les valeurs de capacité de passage augmentaient avec l'augmentation du dosage de superplastifiant.

Singh et Singh [91] ont signalé que les taux de blocage de l'entonnoir en V et de la boîte L de SCC contenant un pourcentage élevé de RCA (50 à 100 %) ont donné les classes VF1 et PA2. De plus, la déformabilité du béton frais, mesurée par le test de la boîte en U, se situait dans la plage acceptable de 0 à 30 mm [90] .

Tuyan et al. [92] ont observé l'augmentation significative de la viscosité des BAP avec l'augmentation du taux des AR de 20 % à 60 %. En revanche, ils ont constaté que la capacité de passage des BAP, déterminée par le test de la boîte L, n'était pas influencée par l'augmentation du remplacement de RCA.

Les résultats de Mohseni et al. [93] ont démontré une homogénéité et une cohésion appropriées dans les mélanges contenant 20 % d' AR par rapport aux échantillons sans agrégats recyclés alors qu'aucun signe de ségrégation et de saignement n'a été observé.

4-5) Résultats de caractérisation des BAP à l'état durci

4-5-1) La résistance à la compression :

Les résultats de la résistance à la compression à 3, 7, 28 jours des différents BAP réalisés en fonction du pourcentage de substitution de sable recyclé et gravier recyclé ainsi que leur combinaison sont présentés dans le Figure (4-2) Suivante.

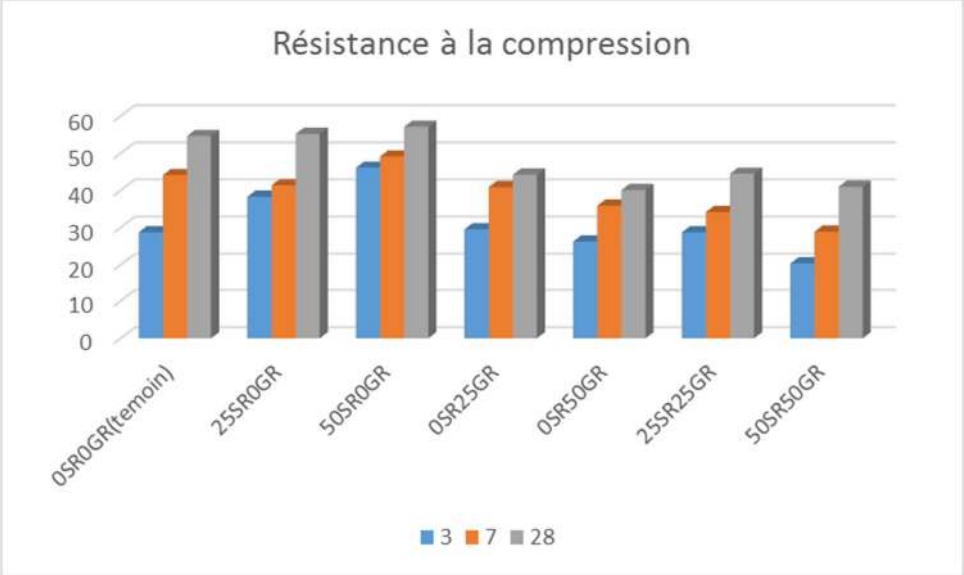


Figure 4-2 :la résistance à la compression à 3, 7, 28 jour

La figure III.6 montre la variation de la résistance à la compression des BAP à base de sable recyclé (SR) et gravier recycle (GR) et leur combinaison et le BAP de référence (0SR0GR). Selon les résultats obtenus, il est clair que l'utilisation des granulats recyclés a un effet sur la résistance à la compression qui varie selon la classe granulaire et le taux de substitution. L'utilisation des granulats recyclés de classe granulaire 0/3 ne mène à aucun changement significatif des valeurs de résistances à 28jours où une augmentation de résistance de 1 et 4% est enregistré pour un taux de 25 et 50% respectivement, contrairement à l'utilisation de granulat recyclé de classe granulaire 3/15 a mené à une baisse de résistance de 19 à 26% pour un taux de 25 et 50% respectivement de granulat recyclé.

De même la combinaison des deux types de granulats sable et gravier avec des taux de 25 et 50% ont aussi diminué la résistance à la compression, mais reste les valeurs très proches de celui d'un BAP avec 25 et50% de graviers recyclé, ce qui prouve que l'utilisation de sable

recyclé n’affecte par la résistance à la compression quel que soit-on présence de granulats recyclés ou naturel.

Ces résultat prouve que l'effet de l'incorporation des granulats recyclés sur les propriétés mécaniques des BAP dépend de différents paramètres tels que la proportion du mélange et le taux de substitution des AR, ainsi que la taille. Selon TANG[94] un faible taux de substitutions d’agrégat recyclé fin (jusqu'à 50 %) n'influence pas significativement les propriétés mécaniques du SCC (Omrane et al.,] ; Kebaı¨li et al., ; Gesoglu et al., ; Grdic et al.,)[104]. Ses résultats sont confirmés par **[jiang],** dont les résistances à la compression des CCPUH avec le sable recyclé sont similaires à celles du mélange de référence avec uniquement du sable naturel. Lorsque le pourcentage de remplacement du sable recyclé est inférieur à 50%, il se produit même une légère augmentation de la résistance à la compression.

D’autres part il y ‘a plusieurs recherches qu’ont observé une augmentation de 18% de larésistance à 28j dans le béton a haute performances avec 20% de sable recyclé.

Pour le cas des graviers recyclés Alengaram et al. [103]ont signalé une diminution de 12,2 % et 17,7 % de la résistance à la compression et du module d'élasticité respectivement pour le BAP contenant des graviers recyclés par rapport à l'échantillon témoin.Panda et Bal [105] ont aussi étudié l'effet du gravier recyclé sur les propriétés durcies des BAP. Il est indiqué que les résistances à la compression ont diminué avec une augmentation du pourcentage de remplacement de 10 % à 40 %.

Modani et Mohitkar [99] ont observé une corrélation inverse entre le pourcentage de gravier recyclé et la résistance mécanique. Ils ont conclu que la baisse des résistances à la compression et à la traction était due au mortier collé à la surface des granulats. La réduction maximale d'environ 16% des résistances à la compression Revathi et al., [106]

4-5-2 Résistance à la traction

Les résultats de la résistance à la traction des différents BAP réalisés en fonction de l’âge 3 , 7 et 28 jour et le pourcentage de substitution de sable recyclée, et le gravier recycle et la combinaison entre les deux sont présentés dans la figure 4-3 Suivantes **.**

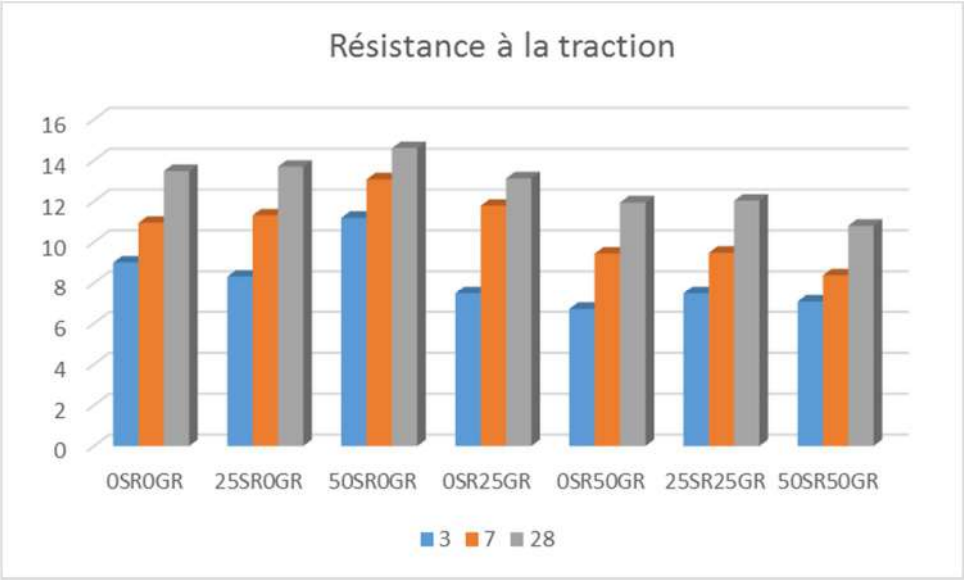


Figure 4-3 :la résistance à la traction à 3, 7, 28 jour

Selon la variation de la résistance à la traction des BAP en fonction des différentes substitutions, on peut constater que l'évolution de la résistance suit la même cinétique de la résistance mécanique pour les différents âges, la résistance s'améliore pour les mélanges qui contiennent 25 %et50% de sable recycle qui donne une amélioration à la résistance de la traction. Contrairement aux BAP qui contiennent le GR et la combinaison des deux, on voit qu'il y a une diminution de 1% à 3% pour un taux de 25 et 50% respectivement. Ces résultats sont similaire à celui de Modani et Mohitkar [99]

4-5-3 relation entre la résistance à la traction et la résistance à la compression.

La résistance à la compression peut être directement liée à la résistance à la compression, en effet, la figure 4-4 présente les valeurs de la résistance à traction en fonction de la résistance à la compression à différente âge d'essais. Les résistances mécaniques sont bien corrélées linéairement avec un coefficient supérieur à 8. Ce qui qui est le cas pour les bétons ordinaire et les bétons autoplaçant avec granulat naturels.

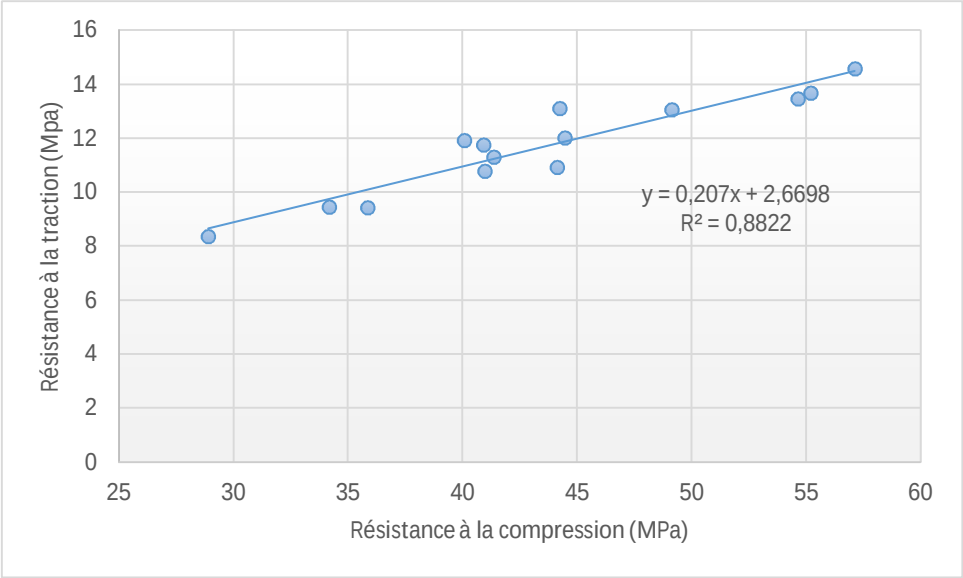


Figure 4-4 :relation entre la résistance à la traction et la résistance à la compression

4-5-4 vitesse ultrasonique

Les valeurs des vitesses de propagations des ondes de tous les mélanges à différentes âge sont présentées dans la figure 4-5.D'après les résultats obtenus, on remarque que la vitesse ultrasonique dans tous les BAP est en augmentation jusqu'au 28jours ce qui est en corrélation avec l'évolution de la résistance à la compression en fonction du temps.

La vitesse ultrasonique n'a pas été très affectée par l'utilisation des granulats recyclés quel que soit la classe granulaire.

Whitehurst [95] a classifié les bétons selon leurs qualités : excellente, bonne, modérée, mauvaise et très mauvaise pour des Vitesses de 4500 et plus. A partir de cette classification on peut affirmer que tous les BAPqui contiennent le GR, le SR ou la combinaison des deux sont modérés par rapport aux BAP temoin.

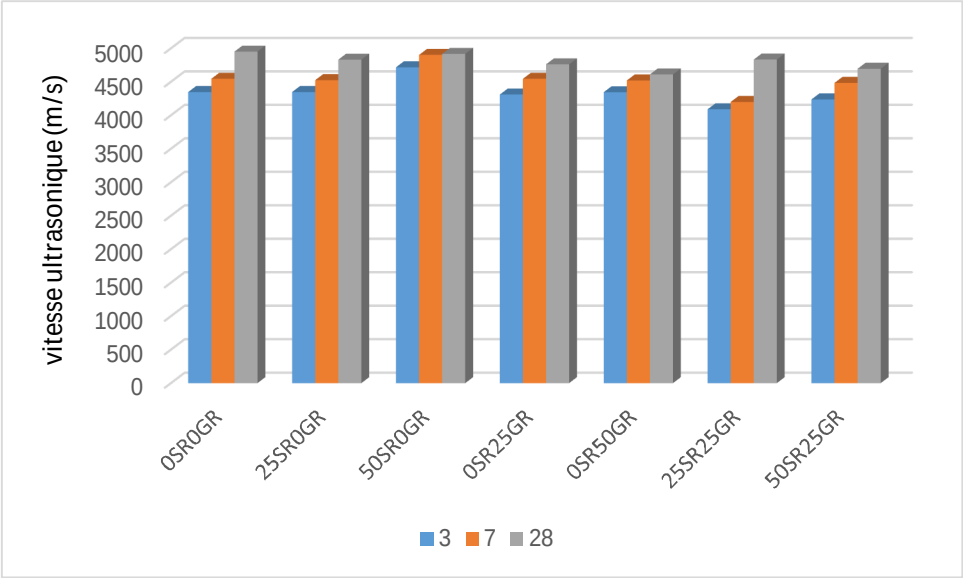


Figure 4-5 :les vitesses de propagations des ondes à différente âge.

4-5-5 Relation entre la vitesse ultrasonique et la résistance à la compression

La figure 4-6 présente une corrélation entre la résistance à la compression et la vitesse de propagation d'ondes des différents BAP à différente âge d'essai.

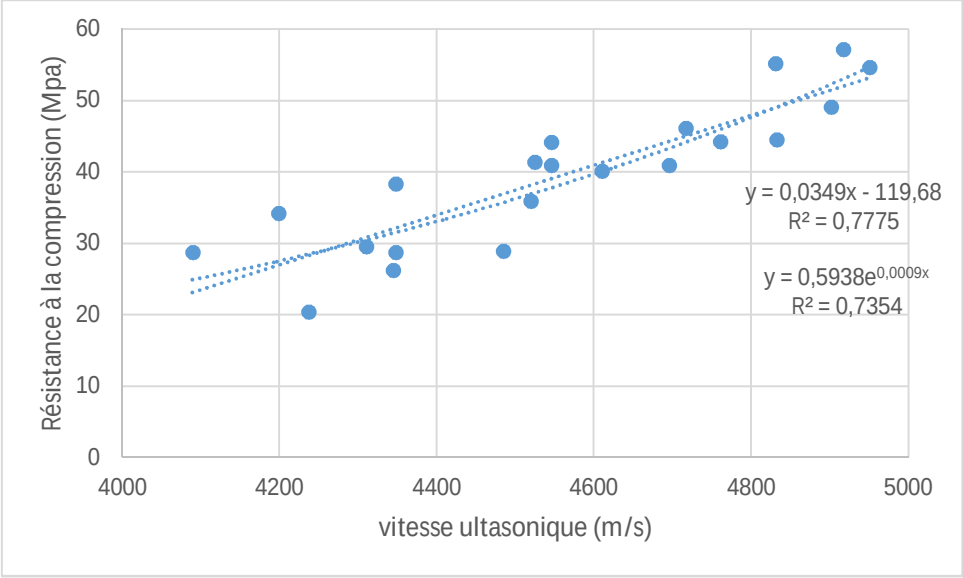


figure 4-6 présente une corrélation entre la résistance à la compression et la vite

Il est a noté que la vitesse de propagation des ondes permet d'évaluer non seulement la qualité du béton (homogénéité, la présence des fissures et vides) mais de déterminer aussi la résistance à la compression d'une structure existante sans avoir recours à des essais qui peuvent affaiblir l'élément en béton tel que le carottage [bachene].

Selon Tharmaratram et al. **[96]**, le meilleur modèle mathématique reliant la résistance à la compression et la vitesse d'onde ultrasonore des bétons courants est de forme exponentielle

$f_c = ae^{bv}$ Equation 3.1

Où fc : la résistance à la compression en MPa ;

V : vitesse d'onde ultrasonore en m/s;

a et b : sont des constantes.

Le même modèle est approprié aux BAP contenant des cendres volantes **[226]**, la fumée de silice et la poudre de marbre **[23]** avec différentes constantes, respectivement les équations et les coefficients de détermination sont :

$f_c = 0{,}0015e^{2{,}1121v}$, $R^2 = 0{,}88$ Equation 3.2

$f_c = 0{,}0031e^{2{,}0714v}$, $R^2 = 0{,}74$ Equation 3.3

$f_c = 0{,}0681e^{0{,}0014v}$, $R^2 = 0{,}97$ Equation 3.4

4-5-6 Absorption d'eau par capillarité

Les résultats de l'absorption capillaire en fonction de la racine carrée du temps de tous les bétons sont présentés dans la figure 4-7.

Il est à noter que le coefficient d'absorption caractérise la capacité d'absorption d'un béton dans le temps. Plus le réseau poreux est fin, plus la cinétique d'absorption et par conséquent le coefficient d'absorption sont faible.

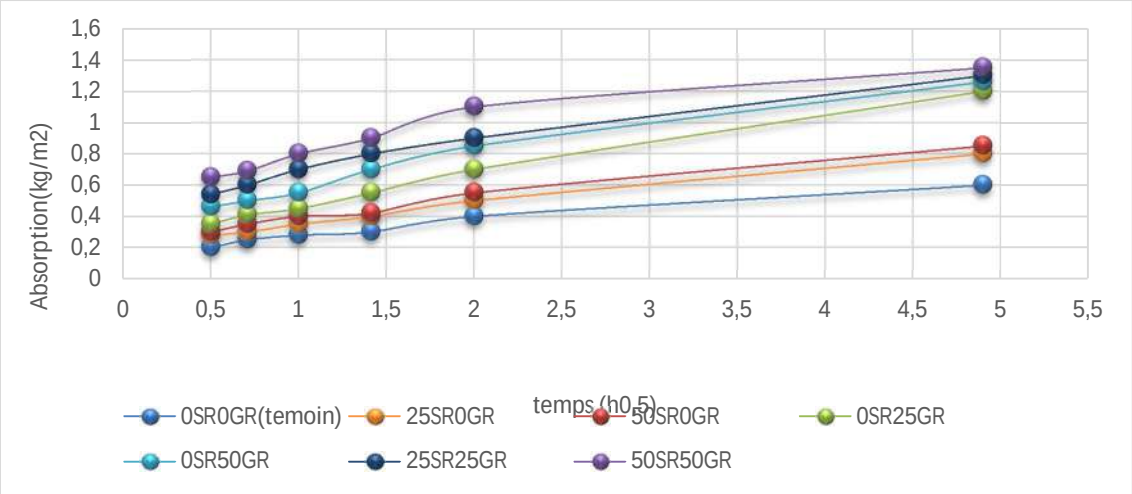


Figure 4-7 : Absorption en fonction de la racine carrée du temps.

L’utilisation des granulats recyclés à une influence sur l’absorption des BAP, cette influence est variable selon le taux et la classe granulaire, L’augmentation de l’absorption est très importante dans le cas d’utilisation des granulats de classe granulaire (3/15) que des granulats de classe granulaire (3/8), où l’utilisation de 25% de sable a donné une absorption de 0.8 Kg/m^2 cette valeur est proche de celle du béton témoin sans granulat recyclé. Contrairement au BAP à base de 25% de gravier recyclé a engendré une absorption de 1.2Kg/m^2 qui est le double de l’absorption de béton témoin. L’augmentation du taux de substitution de 25 à 50% de granulats recyclés a engendré une légère augmentation d’absorption quel que soit la classe granulaire.

Les BAP qui contient les de types de granulats recyclés (fin et grossier) ont dévoilé les valeurs les plus importantes d’absorption mais reste proche à celle des BAP à base de gravier recyclé.

De nombreux chercheurs ont évalué l'effet du RCA sur la durabilité du béton conventionnel et il a été constaté que l'absorption d'eau, la pénétrabilité des ions chlorure, le retrait de séchage, le fluage et la profondeur de carbonatation augmentaient avec l'augmentation du RCA grossier [97] ; [98].

Modani et Mohitkar [99] ont constaté que le BAP préparé avec du RCA présentait des valeurs de perméabilité plus élevées associées à l'absorption d'eau élevée du RCA.

Tuyan et al. [100] ont constaté que la sorptivité de l'eau des BAP avec un rapport eau/liant de 0,43 n'était pas significativement affectée par l'augmentation du remplacement de RCA (jusqu'à 60 %).

Kapoor et al. [101] ont constaté que le taux d'absorption en surface du BAP contenant desAR grossier est 40 % plus élevé que celui du BAP contenant des AN. Il a été conclu que la profondeur de pénétration de l'eau du BAP augmentait avec l'augmentation des teneurs en AR grossier. Il a également été constaté que lesAR grossier avaient une influence significative sur le taux d'absorption d'eau du SCC plutôt que sur l'utilisation desAR fin.

Silva et al. [102] ont observé une diminution de la résistance à la pénétration et une augmentation de la porosité effective ainsi que de la perméabilité en augmentant le pourcentage de remplacement du RCA dans les mélanges SCC

Conclusion

Actuellement, l'utilisation des BAP contenant du granulat recyclé de béton de démolition est souvent limitée et sourtous dans le cas des BAP à cause du manque de recherche et les résultats différents obtenus et cela due à la variété de granulat étudié et donc la variation des caractéristique des granulats .

En général, le RCA a une densité plus faible, une résistance plus faible, une porosité plus élevée et une absorption d'eau plus élevée que le NA

REFERENCES

[1] YAGOUB M., « Evaluation de la qualité du béton de fibres in situ cas de béton autoplaçantavec des fibres mixtes », Mémoire de Magister, Université Mohamed khider , Biskra, 2009.2015.

[2] Okamura H., Ozawa K., and Ouchi M., “Self-compacting concrete”, Structural Concrete, 2000, Vol. 1, PP. 3-17.

[3] Fares H., « Propriétés mécaniques et physico-chimiques des bétons autoplaçants exposés à une température élevée », Thèse de Doctorat de l’Université de Cergy Pentoise, 2009, 206 pages.

[4] HOLCIM ., « Le béton autocompactant ». Recommandation étudiée par la société Holcim. Suisse, 2004.

[5] (Toutou et Roussel, 2006) Toutou Z., Roussel N. " Multi scale experimental study of concrete rheology : from water scale to gravel scale ", RILEM Mater. and Struct.,vol. 37, No. 2, pp. 167-176, 2006.

[6] EL-fodil Abdelatif, Elaboration d'un béton autoplaçant à base de fillers de calcaire, thès

[7] JOL 98, AIT 01, RAM 98C. JOLICOEUR, M. A. SIMARD, « Chemical Admixture-Cement Interactions: Phenomenology and Physico-chemical Concepts », CCC Vol 20, pp 87-101, 1998.

[8] BAALBAKI M., « Influence des interactions du couple ciment/adjuvant dispersant sur les propriétés des bétons : Importance du mode d’interaction des adjuvants». Thèse de Doctorat.Université de Sherbrooke, Québec 1998.

[9] JOL 98: C. JOLICOEUR, M. A. SIMARD, « Chemical Admixture-Cement Interactions: Phenomenology and Physico-chemical Concepts », CCC Vol 20, pp 87-101, 1998.

[10]HAD 07 : O.HADDAD, « 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, France, 2007.

[11] (Hasni, 1999) Hasni L., "Bétons Autoplaçants", Rapport de recherche n˚98-004/98-006

du CEBTP présenté aux journées du PN BAP, juillet 1999

[12] Khayat 99 : workability , trstiog and performece of self consolidating concret ACI materl journal

[13] Goodier, C.I., 2003. Development of Self-Compacting Concrete.

[14] Koehler, E.P., Fowler, D.W., 2007. Inspection manual for self-consolidating concrete in precast members (No. 0-5134-P1). Center for Transportation Research, University of Texas at Austin.

[15] Panesar, D.K., Shindman, B., 2012. The effect of segregation on transport and durability prop erties of self consolidating concrete. Cem. Concr. Res. 252–264.

[16] Shi, C., Wu, Z., Lv, K., Wu, L., 2015. A review on mixture design methods for self-compactingconcrete. Constr. Build. Mater. 387–398.

[17] Habibi, A., Ghomashi, J., 2018. Development of an optimum mix design method for selfcompacting concrete based on experimental results. Constr. Build. Mater. 113–123.

[18] G.H. TATTERSALL & P.F.G. BANFILL: «The rheology of fresh concrete». Pitman.

London, p 365. 1983.

[19] J. AMBROISE, J. PERA & S. ROLS: «Les bétons autonivelants». Annales du Bâtiment et des Travaux Publics. V 1, pp 37-41. 1997.

[20] M. BAALBAKI: «Influence des interactions du couple ciment/adjuvant dispersant sur les propriétés des béton : Importance du mode d'interaction des adjuvants».Thèse de Doctorat. Université de Sherbrooke, Québec. Septembre 1998.

[21] D. BEAUPRÉ: «Rheology of high performance shotcrete». Ph D Thesis. University of

British Columbia. 1994.

[22] V.K. BUI & D. MONTGOMERY: «Drying shrinkage of self-compacting concrete containing milled limestone». Proceedings of the First International RILEM Symposium of Self-Compacting Concrete. Stockholm. 13-15 September 1999.

[23]: T. SEDRAN: «Les bétons autonivelants (BAN) : Synthèse bibliographique». Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées. N° 196, pp 53-60. Mars-Avril 1995.

[24] DOMONE P.L., CHAI H.W., JIN J. , 1999 « Optimum mix proportioning of selfcompacting concrete »Proceeding on international conference on 'innovation in concrete structures: design and construction,University of Dundee, ed. Dhir RK and Jones MR, Thomas Telford, London, pp. 277-285.

[25] T. FUKUTE, A. MORIWAKE, K. SANO & K. HAMASAKI: «Development of superworkable concrete for multi-functional port structures». 2nd International Symposium of CANMET/ACI. Las Vegas, pp.335-336. 1995.

[26] J.C. GIBBS & W. ZHU: «Strength of hardened of self-compacting concrete». Proceedingsof the First International RILEM Symposium of Self-Compacting Concrete. Stockholm.13-15 September 1999.

[27] C. HU & B. BARBIERI: «Comparaison des retraits des ban et d'un béton fluide traditionnel». Science des matériaux et propriétés des bétons - Premières RencontresInternationales. INSA. 1998.

[28] KLUG Y., HOLSCHEMACHER K., 2003« Comparison of the hardened properties ofSelf-Compacting and Normal Vibrated Concrete » 3rd International Symposium onSelf-Compacting Concrete, Reykjavik,Iceland, pp. 596-605.

[29] SAKATA K. (1998). "Durability of self-compacting concrete and low heat high performanceconcrete", CONSEC 98, International Conference 2, pp.2057-2064, Tronso, GB

[30] Assié S., « Durabilité des bétons autoplaçants », Thèse de Doctorat de l'Institut National Des Science Appliquées de Toulouse, Octobre 2004, 254 pages.

[31] Zhu W. and Bartos P.J.M., "Permeation properties of self compacting concrete", Cement and Concrete Research, 2003, Vol. 33, pp. 921-926.

[32] Turkmen I. and Kantarci A., "Effect of expanded perlite aggregate and different curing condition on the physical and mechanical properties of SCC", Building and Environment, 2007, Vol. 42, pp. 2378-2383.

[33] Assié S., Escadeillas G. and Waller V., « Estimates of self compacting concrete 'potentiel' duraility », Construction and Building Materials, 2007, Vol. 21, pp. 1909-1917.

[34] Turk K., Caliskan S. and Yazicioglu S., "Capillary water absorption of self compacting concrete under different curing conditions", Indian Journal of Engineering & Materials Sciences, Octobre 2007, Vol. 14, pp. 365-372.

[35]e (NF P 18-420) D'après Rougeau 99

[36] Assié S., « Durabilité des bétons autoplaçants », Thèse de Doctorat de l'Institut National Des Science Appliquées de Toulouse, Octobre 2004, 254 pages.

[37] Assié S., Escadeillas G. and Waller V., « Estimates of self compacting concrete 'potentiel' duraility », Construction and Building Materials, 2007, Vol. 21, pp. 1909-1917.

[38]Nehdi M., Pardhan M. and Koshowski S., "Durability of self-consolidating concrete incorporating high-volume replacement composite cement", Cement and Concrete Research, 2004, Vol. 34, pp. 2103-2112.

[39] Okamura H., Ozawa K., and Ouchi M., "Self-compacting concrete", Structural Concrete, 2000, Vol. 1, PP. 3-17.

[40]Turcry P., « Retrait et Fissuration des Bétons autoplaçants Influence de la formulation », Thèse de Doctorat de l'Ecole Centrale de Nantes, 2004, 213 pages.

[41] Ouchi M. et Edamastu Y., "A simple evaluation method of interaction between coarse aggregate and mortar particles in self compacting concrete", Proceedings of the first international RILEM symposium on self compacting concrete, 1999, pp. 121-130.

[42]Turcry P., « Retrait et Fissuration des Bétons autoplaçants Influence de la formulation », Thèse de Doctorat de l'Ecole Centrale de Nantes, 2004, 213 pages.

[43]Sedran T. et de Larrard F., « Manuel d'utilisation de RENE-LCPC », Logiciel d'optimisation granulaire, version 6.1d. LCPC 2000.

[44] Petersson.O, Billberg.P, Van.B.K, "A model for self-compactingconcrete", Proceedings of RILEM International Conference on Production Methods and Workability of Fresh Concrete, Paisley, Ecosse, 1996.

[45]-Petersson.O, Billberg.P, "Investigation on blocking of self-compacting with different maximum aggregate size and use of viscosity agent instead of filler",Proceedings of the First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Stockholm, Suède, pp. 333-344, 1999.

[46] Billberg.P, "Self-compacting concrete for civil engineering structures – the Swedish experience", Report 2: 99, Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm, 1999.

[47] Ozawa.K, Tangtermsirikul.S, Maekawa. K, "Role of powder materials on the filling capacity of fresh concrete", Proceedings of the 4th CANMET/AI Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Istanbul, Turquie, pp. 121-137, 1992.

[48] -Van.B.K., "A method for the optimum proportioning of the aggregate phase of highly durable vibration-free concrete", MSc thesis, Asian Institute of Technology, Bangkok, 1994.

[49] - Tangtermsirikul.S, Van.B.K, "Blocking criteria for aggregates phase of Selfcompacting high performance concrete", Proceedings of Regional Symposium on Infrastructures Development in Civil Engineering, Bangkok, pp. 58-69, 1995.

[50] Skarendahl.A , Petersson.O, "Self-Compacting Concrete: State-of-the-art report of RILEM Technical Commite 174-SCC", RILEM Publications, France, 2001.

[51] Bui .V.K, Akkaya .Y, Shah .S.P, "Rheological Model for self-consolidating concrete", ACI Materials Journal, 99, 6, pp. 549-559, novembre-décembre2002.

[52]Okamura, H., Ozava, K., Sakata, N., 1994. Evaluation of self compatibility of fresh concreteusing funnel test. Proc. JSCE 59–759.

[53]Hayakawa, M., Matsuoka, Y., Yokota, K., 1995. Application of superworkable concrete in theconstruction of 70-story building in Japan. Spec. Publ. 381–398.

[54] Cimpelli C., « Guide technique pour l'utilisation des matériaux régionaux d'ile de France : les bétons et produits de démolition recycléd », Décembre 1996, 43 pages.

[55]Berredjem L. et Arabi N., « Les matériaux de démolition une source de granulats pour béton : Formulation et caractérisation d'un béton à base de ces recycles », SBEIDCO – 1st International Conference of Sustainable Built Environment Infrastructure in Developing Countries ENSET Oran (Algeria), Octobre 12-14, 2009, pp. 255-262.

[56] Douara T.H., Benhouna M. et Nezergui B., « Caractéristiques physiques et chimiques des granulats recyclés et des granulats naturels », SBEIDCO – 1st International Conference of Sustainable Built Environment Infrastructure in Developing Countries ENSET Oran (Algeria), Octobre 12-14, 2009, pp. 289-294.

[57] Debieb F., "Performance et durabilité du béton à base de granulats recycles contaminés par les chlorures et les sulfates", Thése de Doctorat de l'USTHB, 2007, 163 pages.

[58] Boulay, 2014; Vivian W.Y. Tam et al., 2005

[59] Hachana AK., Benaichi E., Mezguiche B. et Melles M., « Etude des bétons à base des agrégats des déchets de démolition », Université Mohamed Khider Biskra, 2008.

[60] Pani L., Francesconi L. and Concu G., « Influence of replacement percentage of recycled aggregate on recycled aggregate concrete properties », fib Symposium PRAGUE 2011, pp.1-10.

[61] Hadjieva Zaharieva R., "Durabilité des bétons à base de granulats recycles", Thèse de Doctorat de l'Université d'Artois, France, 1998.

[62] Otsuki et al., 2003

[63] Gasti T., « Caractérisations et formulation d'un béton compacté au rouleau à partir de granulats recyclés », Mémoire de Magister de l'Université Yahia Fares – Médéa, 2010, 112 pages.

[64] Jose M. (2002). Porosity of recycled concrete with substitution of concrete aggregate: an experimental study, Cem Concr Res, 32: 1301-11.

[65] Katz A. (2003). Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete. Cem Concr Res, 33: 703-11.

[66] Rao A. (2005), Experimental Investigation on Use of Recycled Aggregates in Mortar andConcrete, Thèse du Department de Génie Civil, Institut indien de Technologie, Kanpur.

[67] Padm 2009

[68]Zhao, Z., Remond, S., Damidot, D., Xu, W., 2015. Influence of fine recycled concrete aggregates on the properties of mortars. Constr. Build. Mater. 81, 179–186.

[69] Debieb, Farid, Courard, Luc, Kenai, Said and Degeimbre, Robert (2010). Mechanical anddurability properties of concrete using contaminated recycled aggregates. Cement and Concrete Composites- Vol 32 (6).

[70] Hansen, T.C., Narud, H (1 983). Strength of recycled concrete made frorn mrshed concretecomse aggregate, Concrete International, Vol. 5, No. 1, pp. 79-83.

[71]Poon, C.S., Shui, Z., Lam, L., 2004. Effect of microstructure of ITZ on compressive strength ofconcrete prepared with recycled aggregates. Constr. Build. Mater. 18, 461–468.

[72] Bourmatte Nadjoua, Granulats recycles de substitution pour bétons hydrauliques, Thèse de doctorat en sciences, Universite des freres metouri Constantine, 2017

[7 3] Pierre Matar, Rouba A. R. El Dalati, Caractéristiques du béton à base de granulats recyclés. Etude expérimentale, Annales du bâtiment et des travaux publics, Septembre 2012, pp32-

[74]C Medina, W Zhu, T Howind, MIS de Rojas… - Journal of Cleaner …, 2014 - Elsevier This article discusses the findings of a feasibility study on the partial replacement of natural coarse aggregate with a poor quality recycled aggregate from construction and demolition waste in the manufacture of concrete of 30 MPa strength grade.

[75] González- Fonteboa et al., 2008; Levy et al., 2004; C. Medina et al., 2013]

[76] Bui .V.K, Akkaya .Y, Shah .S.P, "Rheological Model for self-consolidating concrete", ACI Materials Journal, 99, 6, pp. 549-559, novembre-décembre2002.

[77]] Boukendakdji O., « Etude de l'influence des paramètres de formulation sur les propriétés d'un béton autoplaçant. Optimisation des conditions opératoires », Thèse de Doctorat de l'Université Saad Dahled Blida, 2010, 199 pages

[78] Domone P.L.J. and Jin J., « Properties of mortar for self compacting concrete », Proceedings of International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 07), 1999, pp. 109-120.

[79] T. SEDRAN: «Les bétons autonivelants (BAN) : Synthèse bibliographique». Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées. N° 196, pp 53-60. Mars-Avril 1995.

[80] Groupe de travail «BAP»: «Bétons auto-plaçants : Recommandations provisoires». Association Française de Génie Civil. Juillet 2000.

[81] NAWA T., IZUMI T., EDAMATSU Y., 1998 «State- of- the-art- report on materials and design of self-compacting concrete» Proc. of Int. Workshop on Self-compacting Concrete, Kochi University of Technology, Japan, pp. 166-190.

[82] GIRISH S., RANGANATH R.V., VENGALA J., 2010 « Influence of powder

[83] paste on flow properties of SCC », Construction and Building Materials J., Vol. 24, pp. 2481–8DOMONE P.L., JIN J., 1999« Properties of mortar for self-compacting concrete », Proceedings of RILEM International Symposium on Self-Compacting Concrete,Stockholm, Sweden, 13-15 September, 109-120

[84] M. HAYAKAWA, Y. MATSUOKA & T. SHINDOH: «Development and application of super workable concrete». Special Concretes : Workability and Mixing. RILEM Proceedings. N° 24. 1994.

[85] Assié S., « Durabilité des bétons autoplaçants », Thèse de Doctorat de l'Institut National Des Science Appliquées de Toulouse, Octobre 2004, 254 pages.

[86] Norme européenne décrit une méthode de détermination du coefficient d'absorption d'eau par capillarité des mortiers durcis à base de liants minéraux et de granulats courants et légers.

[87]Ortiz, J., De La Fuente, A., Sebastia, F.M., Segura, I., Aguado, A., 2017. Steel-fibre-Reinforced elf-compacting concrete with 100% recycled mixed aggregates suitable for structural applications. Constr. Build. Mater. 156, 230–241.

[88] Kou, S., Poon, C., 2009. Properties of self-compacting concrete prepared with coarse and fine recycled concrete aggregates. Cem. Concr. Compos. 31, 622–627.

[89] Aslani, F., Ma, G., Wan, D.L.Y., Muselin, G., 2018. Development of high-performance Selfcompacting concrete using waste recycled concrete aggregates and rubber granules.

[90]EFNARC, 2005. Specification Guidelines for Self-Compacting Concrete. European

Federationof Producers and Applicators of Specialist Products for Structures.

[91]Singh, R.B., Singh, B., 2018. Rheological behaviour of different grades of self-compactingconcrete containing recycled aggregates. Constr. Build. Mater. 161, 354–364.

[92]Tuyan, M., Mardani-Aghabaglou, A., Ramyar, K., 2014. Freeze–thaw resistance, mechanicaland transport properties of self-consolidating concrete incorporating coarse recycled concrete aggregate. Mater. Des. 53, 983–991.

[93]Mohseni, E., Saadati, R., Kordbacheh, N., Parpinchi, Z.S., Tang, W., 2017. Engineering and microstructural assessment of fibre-reinforced self-compacting concrete containing recycled coarse aggregate. J. Clean. Prod. 168, 605–613.

[94]Tang, W., Wang, Z., Liu, Y., Cui, H., 2018. Influence of red mud on fresh and hardened properties

[95]Whitehurst, E.A, 1951 « Soniscope tests concrete structures », Journal of the ACI; 47:

443–4.

[96]Tam, V.W.Y., Tam, C.M., Le, K.N., 2007. Removal of cement mortar remains from recycled aggregate using pre-soaking approaches. Resour. Conserv. Recycl. 50, 82**–101.**

[97]Kou, S.C., Poon, C.S., 2012. Enhancing the durability properties of concrete prepared withcoarse recycled aggregate. Constr. Build. Mater. 35, 69–76.

[98]Sagoe-Crentsil, K.K., Brown, T., Taylor, A.H., 2001. Performance of concrete made with commerciallyproduced coarse recycled concrete aggregate. Cem. Concr. Res. 31, 707–712.

[99]Modani, P.O., Mohitkar, V.M., 2014. Self-compacting concrete with recycled aggregate: a solutionfor sustainable development. Int. J. Civ. Struct. Eng. 4, 430–440.

[100]Tuyan, M., Mardani-Aghabaglou, A., Ramyar, K., 2014. Freeze–thaw resistance, mechanicaland transport properties of self-consolidating concrete incorporating coarse recycled concreteaggregate. Mater. Des. 53, 983–991.

[101]Kapoor, K., Singh, S., Singh, B., 2016. Durability of self-compacting concrete made withRecycled Concrete Aggregates and mineral admixtures. Constr. Build. Mater. 128, 67–76.

[102]Silva, T., Vicente, R., Soares, N., Ferreira, V., 2012. Experimental testing and numerical modellingof masonry wall solution with PCM incorporation: a passive construction solution.Energy Build. 49, 235–245.

[103] Alengaram, U.J., Salam, A., Jumaat, M.Z., Jaafar, F.F., Saad, H.B., 2011. Properties of highworkabilityconcrete with recycled concrete aggregate. Mater. Res. 14, 248–255.

[104]Omrane, M., Kenai, S., Kadri, E.H., Aı̈t-Mokhtar, A., 2017. Performance and durability of selfcompacting concrete using recycled concrete aggregates and natural pozzolan. J. Clean.Prod. 165, 415–430.

[105]Panda, K.C., Bal, P.K., 2013. Properties of self compacting concrete using recycled coarseaggregate. Procedia Eng. 51, 159–164.

[106]Revathi, P., Selvi, R., Velin, S., 2013. Investigations on fresh and hardened properties ofrecycled aggregate self compacting concrete. J. Inst. Eng. (India) Ser. A 94, 179–185.