

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR - ANNABA
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY



مختار

باجي

جامعة

عنابة

Faculté : Sciences de l'ingénieur
Département : Génie civil
Domaine : Sciences et techniques
Filière : Génie civil
Spécialité : Matériaux du Génie Civil

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème :

Effet des granulats de béton recyclés et du laitier granulé
sur le comportement des bétons autoplaçants

Présenté par : *OUILANI Mohamed Abd el Aziz*

Encadrant : *ALI-BOUCETTA Tahar*

MCB

Université d'Annaba

Jury de Soutenance :

BEHIM Mourad	Pr	Université d'Annaba	Président
ALI-BOUCETTA Tahar	MCB	Université d'Annaba	Encadrant
KHELIFI Walid	MCB	Université d'Annaba	Examineur

Année Universitaire : 2020/2021

REMERCIEMENTS

AU NOM D'ALLAH, LE TOUT MISERICORDIEUX, LE TRES MISERICORDIEUX

*En premier lieu je tiens à remercier ma famille pour leurs existences près de moi tout au long de ma vie, mes remerciements les plus profonds notamment à ma plus belle étoile qui puisse exister dans l'univers, ma chère mère, qui a été à mes côtés et m'a soutenu durant toute ma vie afin de me voir devenir ce que je suis. A mon cher père qui n'a pas cessé de m'encourager et de se sacrifier pour que je puisse franchir tout obstacle durant toutes mes années d'études. Je tiens à remercier mon directeur de mémoire **Mr ALI-BOUCETTA TAHAR**, pour nous avoir donné la chance de réaliser ce travail, pour son aide précieuse, pour ses conseils constructifs et pour le temps qu'il nous a consacré. En fin, nous avons été extrêmement sensibles à ses qualités humaines d'écoute et de compréhension tout au long de ce travail.*

*Nous tenons à remercier fortement **Mlle HAMZA FADHILA**, dont nous n'oublierons jamais son aide, sa présence permanente pour nous, ses conseils et son soutien morale.*

*Nos vifs remerciements aux membres de jury, à **Mr BEHIM MOURAD** et à **Mr KHELIFI WALID**, pour l'honneur qu'ils nous font d'examiner ce travail.*

A ceux que j'aime et respecte :

*Ma mère mon père et mes frères et sœurs et tous ma famille (**OUILANI et CHAKOURI**)*

À mes collègues pour leur encouragement, leur aide et l'ambiance Agréable qu'ils m'ont donné de bonne foi et avec joie

À tous ceux que j'ai oubliés qui m'ont apportés l'aide et le soutien durant ces années de formation.

Merci à tous...

OUILANI MOHAMED ABD EL AZIZ

RÉSUMÉ

AUTEUR	DEROUICHE Malik Aimen OUILANI Mohamed Abd el Aziz
TITRE	EFFET DES GRANULATS DE BETON RECYCLES ET DU LAITIER GRANULE SUR LE COMPORTEMENT DES BETONS AUTOPLAÇANTS
ENCADREUR	Mr. Tahar ALI-BOUCETTA, Maître de conférences à l'Université Badji Mokhtar – Annaba, Algérie

Ce travail a pour objectif d'étudier l'influence de la substitution des granulats naturels par des granulats de béton recyclé sur les propriétés des bétons autoplaçants. Dans ce travail nous avons utilisé les matériaux de démolition, le gravier issus de ce recyclage et ainsi que les laitier des haut fourneaux broyés en tant qu'addition dans la composition.

La démarche de cette étude expérimentale est le remplacement du gravier naturel par différents pourcentages de graviers recyclés de 25, 50, 75 et 100 %. Pour cela, des essais d'étalement au cône d'Abrams, le T_{500} , la boîte en L, la stabilité au tamis et l'air occlus ont été réalisés à l'état frais et la mesure de la résistance à la compression à l'état durci.

Les résultats obtenus montrent qu'il est possible de fabriquer un BAP qui vérifie les critères d'autoplaçances avec une résistance à la compression acceptable avec des granulats de béton recyclé en substitution aux granulats naturels pour un taux jusqu'à 75 %. Au-delà de ce taux, une correction du dosage en eau est nécessaire afin de compenser l'absorption d'eau des granulats recyclés.

Mots clés : Béton autoplaçant (BAP), granulats de béton recyclés, béton de démolition, laitier granulé.

ABSTRACT

AUTHOR DEROUCHE Malik Aimen
OUILANI Mohamed Abd el Aziz

TITLE EFFECT OF RECYCLED CONCRETE AGGREGATES AND GRANULATED SLAG ON THE BEHAVIOR OF SELF-COMPACTING CONCRETE

FRAMER Mr. Tahar ALI-BOUCETTA, Maître de conférences à l'Université Badji Mokhtar – Annaba, Algérie

The aim of this work is to study the influence of the substitution of natural aggregates by recycled concrete aggregates on the properties of self-compacting concrete. In this work we used demolition materials, gravel from this recycling and crushed blast furnace slag as an addition in the composition.

The approach of this experimental study is the replacement of natural gravel by different percentages of recycled gravel of 25, 50, 75 and 100%. For this purpose, Abrams cone, T500, L-box, sieve stability and air occlusion tests were carried out in the fresh state and compressive strength measurements in the hardened state.

The results obtained show that it is possible to produce a SCC that verifies the self-compacting criteria with an acceptable compressive strength with recycled concrete aggregates in substitution of natural aggregates for a rate up to 75%. Above this level, a correction of the water content is necessary to compensate for the water absorption of the recycled aggregates.

Keywords : Self-compacting concrete (SC), recycled concrete aggregates, demolition concrete, granulated slag.

ملخص

AUTEUR	DEROUICHE Malik Aimen OUILANI Mohamed Abd el Aziz
TITRE	EFFET DES GRANULATS RECYCLES ET DU LAITIER GRANULE SUR LE COMPORTEMENT DES BETONS AUTOPLAÇANTS
ENCADREUR	Mr. Tahar ALI-BOUCETTA, Maître de conférences à l'Université Badji Mokhtar – Annaba, Algérie

الهدف من هذا العمل هو دراسة تأثير الاستعاضة عن المجاميع الطبيعية بمجاميع الخرسانة المعاد تدويرها على خصائص الخرسانة ذاتية القوية. وقد استخدمنا في هذا العمل مواد الهدم والحصى الناتج عن إعادة التدوير هذه وكذلك مسحوق الخبث الناتج عن أفران كإضافة إلى التكوين.

ويتلخص نهج هذه الدراسة التجريبية في استبدال الحصى الطبيعي بنسب مختلفة من الحصى المعاد تدويرها تبلغ 25% ، و50% ، و75% ، و100%. لهذا ، تم تحقيق اختبارات الانتشار في مخروط أبرامز ، T500 ، مربع L ، استقرار الخرسانة والهواء المغمور في الحالة السائلة وقياس قوة الضغط في الحالة الصلبة.

وتظهر النتائج التي تم الحصول عليها أنه من الممكن تصنيع الخرسانة ذاتية القوية تحقق معايير ذاتية القوية بقوة ضاغطة مقبولة مع مجاميع الخرسانة المعاد تدويرها كبديل للمجاميع الطبيعية بمعدل يصل إلى 75%. وفي إطار هذا المعدل ، يلزم تصحيح جرعة المياه للتعويض عن امتصاص المياه من المجاميع المعاد تدويرها.

الكلمات المفتاحية: حصى المعاد تدويره، حصى طبيعي، الخرسانة ذاتية القوية، خبث أفران الصهر المحبب ، الخصائص.

Table des matières

Résumé

Abstract

ملخص

Table des matières

Table des figures

Liste des tableaux

INTRODUCTION GÉNÉRALE 2

CHAPITRE I

ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

1. INTRODUCTION	7
2. GÉNÉRALITÉS SUR LES BÉTONS AUTOPLAÇANTS	7
2.1. Définitions des BAP.....	7
2.2. Les constituants des BAP.....	8
3. FORMULATION ET APPROCHE DES BAP	12
3.1. Méthode japonaise.....	12
3.2. Méthode suédoise.....	13
3.3. Méthode française.....	13
4. CARACTERISATION DES BETONS AUTOPLAÇANTS	14
4.1. Caractérisations a l'états frais.....	14
4.2. Caractérisations a l'états durci.....	14
5. LES GRANULATS DE BÉTON A BASE DE DÉCHETS	15
5.1. Granulats de béton recyclé.....	16
5.2. Propriétés chimiques.....	15
5.3. Granulats issus des déchets de verre.....	17
5.4. Granulats issus des déchets de bois.....	18
5.5. Granulats issus des déchets d'asphalte.....	19
5.6. Granulats d'argile expansés.....	20
6. CARACTERISTIQUES DES GRANULAT DE BÉTON RECYCLÉS	20
6.1. Granulométrie.....	20
6.2. Masse volumique.....	21
6.3. Porosité.....	21

6.4. Densité	22
6.5. Absorption d'eau.....	22
6.6. Résistances a l'abrasion	23
6.7. Résistances a l'abrasion	23
6.8. Résistance a l'usure.....	23
6.9. La teneur en chlorures	24
7. INFLUENCE DES GRANULATS RECYCLÉS SUR LES PROPRIETES DES BAP	24
7.1. Influence de l'ancien mortier de granulat de béton recyclé	24
7.2. Influence à l'états frais	25
7.3. Influence à l'états durci	27
8. CONCLUSION	29

CHAPITRE II

CARACTÉRISATION MATÉRIAUX ET PROCÉDURES EXPÉRIMENTALES

1. INTRODUCTION	34
2. MATÉRIAUX UTILISÉS	34
2.1. Le ciment.....	34
2.2. Laitier granulé	35
2.3. Superplastifiant.....	35
2.4. Les granulats	36
3. MÉTHODE DE FORMULATION, CONFECTION ET CONSERVATION DES EPROUVETTES	38
3.1. Procédure de formulation	38
3.2. Séquences de malaxage de BAP	40
3.3. Conservation des éprouvettes.....	40
4. MÉTHODES EXPÉRIMENTALES	40
4.1. Essai sur BAP à l'état frais.....	40
4.2. Essai sur BAP à l'état durci.....	46
5. CONCLUSION	46

CHAPITRE III

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

1. INTRODUCTION	50
2. CINÉTIQUE D'ABSORPTION DES GRANULATS RECYCLÉS : MÉTHODE DE PYCNOMETRE (EN 1097-6) FRACTION (4/10)	50
3. CARACTÉRISATION A L'ÉTAT FRAIS	51
3.1. L'étalement au cône d'Abrams.....	51
3.2. Temps d'étalement (T ₅₀₀)	52

3.3. Ecoulement à la Boite en L	53
3.4. Stabilité au tamis	54
3.5. Mesures de la masse volumique sur béton frais	55
3.6. Mesures de la teneur en air occlus	55
4. CARACTÉRISATION À L'ÉTAT DURCI	56
5. CONCLUSION	57
CONCLUSION GÉNÉRALE	60
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	62
ANNEXES	66
Annexe A : Fiche technique du ciment	67
Annexe B : Fiche technique du superplastifiant.....	69

Table des figures

I.1	Composition d'un béton ordinaire (BO) et d'un BAP (Turcry, 2004)	9
I.2	Effet du superplastifiant dans une matrice cimentaire	11
I.3	Granulats de verres	18
I.4	Granulats de copeau de bois	19
I.5	Granulats déchets d'asphalte	19
I.6	Granulats argile expansée	19
I.7	Interface granulat naturel/pâte de ciment d'un granulat recyclé de béton	22
I.8	Variation de l'étalement de BAP avec des granulats recyclés en fonction de la quantité des fines (Benhoua et al., 2009)	25
I.9	Comparaison entre l'étalement d'un BAP (GN) et BAP (GR) (Benhoua et al., 2009)	26
I.10	Comparaison entre le taux de remplissage des BAP ordinaires et recyclés (Benhoua et al., 2009)	27
I.11	Comparaison entre la résistance à la compression à 7 et 28 jours pour les deux types du BAP (Benhoua et al., 2009)	28
I.12	Résistance à la compression pour des BAP avec (0, 50 et 100%) de granulats recyclés (Grdic Z.J et al,2010)	28
I.13	Résistance à la traction pour des BAP avec (0, 50 et 100%) de granulats recyclé (Grdic et al., 2010)	29
II.1	Le concasseur à mâchoire	36
II.2	Courbe granulométrique des granulats	37
II.3	Essai d'étalement	41
II.4	Méthode de essai boite e L	42
II.5	Essai de stabilité au tamis	44
II.6	Mesure de la teneur en air occlus du béton par la méthode du manomètre	45
II.7	Mesure de la masse volumique du béton frais	45
II.8	Essai de compression	46
III.1	Cinétique d'absorption des granulats recyclés	50
III.2	Influence du taux de substitution en granulats recyclé sur l'étalement	51
III.3	Influence du taux de substitution en granulats recyclé sur le T ₅₀₀	52
III.4	Influence du taux de substitution en granulats recyclé sur l'écoulement à la boite en L	53
III.5	Influence du taux de substitution en granulats recyclé sur la stabilité au tamis ...	54
III.6	Influence du taux de substitution en granulats recyclé sur la masse volumique réelle du béton	55
III.7	Influence du taux de substitution en granulats recyclé sur la teneur en air occlus	56
III.8	Influence du taux de substitution en granulats recyclé sur les résistances mécaniques en compression	57

Liste des tableaux

I.1	Classes d'étalement des BAP (NF EN 12350-8 ,2010)	8
I.2	Classe de stabilité au tamis (NF EN 12350-11, 2010)	8
I.3	Les différents essais à l'états frais	14
I.4	Les différents essais à l'états durci	15
I.5	Taux d'émission de CO2 durant un cycle de vie d'un bâtiment	17
I.6	Evaluation et classification des granulats recyclés	23
I.7	Résultats d'essai de la boîte en L (Benhoua et al., 2009)	26
I.8	Résultats de l'essai de stabilité au tamis (Benhoua et al., 2009)	27
II.1	Propriétés physiques du ciment	34
II.2	Composition chimique du ciment	34
II.3	Composition minéralogique calculée par les formules de Bogue	35
II.4	Propriétés physiques du laitier granulé	35
II.5	Composition chimique du laitier granulé	35
II.6	Caractéristiques techniques	36
II.7	Caractéristiques des granulats	37
II.8	Composition des BAP	39

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Le béton est un matériau utilisé depuis des millénaires à cause de la facilité de sa fabrication, de sa simple mise en place à l'état frais, de ses propriétés mécaniques et de durabilité à l'état durci. Actuellement, la production mondiale atteint une moyenne annuelle d'un mètre cube de béton par habitant et par an. L'idée du développement d'un béton très fluide qui ne nécessite pas lors de sa mise en place de moyens de serrage a été lancée en premier lieu par des chercheurs de l'université de Tokyo vers 1980. Leur objectif était de supprimer les opérations coûteuses liées à la vibration afin d'accroître la productivité du chantier. Ces bétons sont connus sous la dénomination « BAP » comme Bétons Autoplaçants ou « SCC » comme Self Compaction Concrete.

Le béton autoplaçant (BAP) est encore en cours d'émergence dans le domaine de la construction civile, bâtiment et travaux publics. Le BAP est un béton qui se met en place par gravité sans apport extérieur ou intérieur de vibration. Ce matériau est notamment employable pour la réalisation d'ouvrages d'art. Cette mise en place, sous le seul effet de la gravité, nécessite une très grande fluidité du matériau mais il est aussi indispensable que le béton conserve une stabilité satisfaisante et une parfaite homogénéité. Ces deux propriétés contradictoires sont obtenues par l'ajout et le dosage adéquat de superplastifiant et de fines et/ou l'emploi d'agents de viscosité. Parallèlement à cela, les BAP présentent des particularités de compositions comparativement aux bétons vibrés, parmi ces particularités un volume élevé de fines et de pâte qui est d'ailleurs responsable de leur comportement rhéologique.

La démolition des anciennes constructions génère d'énormes quantités de déchets de béton. La réutilisation de ces déchets de démolition a été effectuée la première fois après la deuxième guerre mondiale en Allemagne. Depuis cette date, plusieurs recherches ont été menées dans beaucoup de pays pour développer l'utilisation des déchets de démolition comme constituants de nouveau béton. Ces déchets peuvent être du béton démolé (déchets des éprouvettes écrasées dans les laboratoires, déchets du bâtiment, des plates formes des aéroports en béton, chaussées des routes en béton etc.) ou déchets des éléments de trottoir. Les granulats fabriqués par ces déchets sont dits : « *Granulats Recyclés* », et le béton fabriqué à base de ces granulats est dits : « *Béton Recyclé* ».

Au 21^{ème} siècle, la protection de l'environnement et la gestion des déchets prennent une place de plus en plus importante, d'où la nécessité de l'emploi de matériaux recyclés dans le domaine du BTP.

Ce mémoire se compose en trois chapitres :

- Le premier chapitre présente une synthèse bibliographique de la littérature spécialisée. Il englobe des généralités sur les BAP, les méthodes de caractérisations correspondantes, les approches de formulation existantes ainsi que le rôle joué par les différents constituants des BAP. En outre, un aperçu sur les différents essais auxquels doivent être testés ces bétons à l'état frais et durci est également développés. Ce chapitre est consacré aussi aux granulats recyclés, un aperçu général sur les déchets (leur origine, types, et leur recyclage) est présenté, ensuite on mentionne les granulats recyclés et leur processus de fabrication, leurs avantages et leurs inconvénients sont aussi exposés et pour finir une synthèse des travaux menés sur les bétons recyclés est inscrite.
- Le deuxième chapitre contiens une caractérisation des matériaux utilisés dans cette étude. Par la suite, une description des différents essais menés sur les BAP et leurs caractérisations est également mentionnée. Ce chapitre englobe également une description de la formulation ainsi que la préparation de béton autoplaçant à base des graviers naturels et recyclés. Ces bétons sont validés par une série d'essais selon les normes recommandées.
- Le dernier chapitre comprend les résultats obtenus au cours de cette étude, qui seront détaillés et discutés, suivi de leurs interprétations qui va nous éclaircir sur l'influence de la substitution des granulats naturels par les granulats recyclé sur les propriétés des BAP à l'état frais et durci.

Ce mémoire s'achève par une conclusion générale, dont laquelle ont rappellent les principaux résultats obtenus durant cette étude.

CHAPITRE I

ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE I

ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Dans ce premier chapitre, on a présenté le béton autoplaçant, ces caractéristiques, leur avantage dans le domaine de la construction et les différentes formulations et approches des BAP. Ensuite, on a abordé le recyclage des déchets sous forme granulaire dans le béton et plus particulièrement celui des granulats de béton de démolition et leurs effets sur les BAP à l'état frais et durci.

Sommaire

1. INTRODUCTION	7
2. GÉNÉRALITÉS SUR LES BÉTONS AUTOPLAÇANTS	7
2.1. Définitions des BAP.....	7
2.2. Les constituants des BAP.....	8
2.1.1. Ciment.....	9
2.1.2. Additions minérales.....	10
2.1.3. Superplastifiants.....	10
2.1.4. Les granulats.....	11
2.1.5. L'eau de gâchage.....	12
3. FORMULATION ET APPROCHE DES BAP	12
3.1. Méthode japonaise.....	12
3.2. Méthode suédoise.....	13
3.3. Méthode française.....	13
4. CARACTERISATION DES BÉTONS AUTOPLAÇANTS	14
4.1. Caractérisations a l'états frais.....	14
4.2. Caractérisations a l'états durci.....	14
5. LES GRANULATS DE BÉTON A BASE DE DÉCHETS	15
5.1. Granulats de béton recyclé.....	16
5.1.1. Avantages.....	16
5.1.2. Matériaux de construction et développement durable.....	16
5.2. Granulats issus des déchets de verre.....	17
5.3. Granulats issus des déchets de bois.....	18
5.4. Granulats issus des déchets d'asphalte.....	19

5.5. Granulats d'argile expansés.....	20
6. CARACTERISTIQUES DES GRANULAT DE BÉTON RECYCLÉS	20
6.1. Granulométrie.....	20
6.2. Masse volumique.....	21
6.3. Porosité.....	21
6.4. Densité	22
6.5. Absorption d'eau.....	22
6.6. Résistances a l'abrasion.....	23
6.7. Résistance a l'usure	23
6.8. La teneur en chlorures	24
7. INFLUENCE DES GRANULATS RECYCLÉS SUR LES PROPRIETES DES BAP	24
7.1. Influence de l'ancien mortier de granulat de béton recyclé	24
7.2. Influence à l'états frais	25
7.3. Influence à l'états durci	27
8. CONCLUSION	29

Chapitre I Étude bibliographique

1. INTRODUCTION

Le béton autoplaçant (BAP) aussi nommé béton auto-nivelant (BAN) ou bien béton auto-compactant (en anglais Self-Compacting Concrete), est un béton se différenciant des autres bétons par son **importante fluidité**. Une caractéristique ayant longtemps été recherchée dans le domaine de la construction afin de faciliter la mise en œuvre du béton sur les chantiers. Il était fréquent de rajouter de l'eau au mélange afin d'obtenir un béton plus fluide mais cela le **fragilisait**. C'est pourquoi le BAP est une véritable révolution. Si le béton autoplaçant possède une telle fluidité, c'est grâce aux divers **adjuvants, notamment, les superplastifiants** qui le composent. Ceci a rendu la mise en œuvre du béton plus facile et a grandement réduit les délais d'excursions des ouvrages en béton (guidebéton.com).

Des lors, les BAP sont passés d'une nouveauté de laboratoire à des applications pratiques dans le monde entier, mais hélas peu utilisé dans le secteur de la construction en Algérie (Ali-Boucetta, 2014)

Ces bétons se développent maintenant dans le monde et semblent être prises pour remplacer le béton vibré conventionnel dans de nombreuses applications. En fait, ils présentent des intérêts techniques et économiques : réduction des nuisances sonores dans les zones urbaines, possibilité de spécifier des zones hautement abandonnées ou de la géométrie complexe, d'obtenir une meilleure qualité du béton (pratiquement indépendamment des compétences des travailleurs) et de diminuer le temps de travail du personnel (Bethmot, 2005).

2. GÉNÉRALITÉS SUR LES BÉTONS AUTOPLAÇANTS

2.1 Définitions des BAP

Un béton autoplaçant est un béton très fluide, homogène et stable, mis en œuvre sans vibration (la compaction des BAP s'effectuent par le seul effet gravitaire) et conférant à la structure une qualité au moins équivalente à celle correspondant aux bétons classiques mis en œuvre par vibration .

Les BAP se distinguent des bétons ordinaires principalement par leurs propriétés à l'état frais

Les critères caractérisant un béton autoplaçant sont :

- Étalement au cône d'Abrams il y a trois classes SF1, SF2, SF3,

Tableaux I.1 Classes d'étalement des BAP (NF EN 12350-8 ,2010).

Classes de consistance	Etalement en (mm)
SF1	550 à 650
SF2	660 à 750
SF3	760 à 850

- le taux de passage à la boîte en L entre les trois barres doit être supérieur au égale à 0,8.
- L'absence de ségrégation visuelle lors de l'essai d'étalement au cône d'Abrams n'est pas suffisante (Nécira, 2006).
- le béton doit être stable sous l'effet de la gravité (pas de ségrégation) et présenter une capacité de ressuage limitée selon la norme (NF EN 12350-11) les classes de stabilité au tamis

Tableaux I.2 classe de stabilité au tamis (NF EN 12350-11, 2010).

Classes	Stabilité en (%)
SR1	$\leq 20\%$
SR2	$\leq 15\%$

2.2 Les constituants des BAP

Le béton autoplaçant est composé des mêmes matériaux que le béton ordinaire qui sont ; le ciment, les gravillons et l'eau, avec une différence de taille c'est l'ajout d'une proportion d'additions minérales (addition calcaire, fumé de silice, cendre volante...). Ces ajouts dans certains cas peuvent être déduits du dosage en ciment. Habituellement, les mélanges chimiques (adjuvant) utilisés sont des réducteurs d'eau de haute gamme (superplastifiant) et agents de viscosité, qui changent les propriétés rhéologiques du béton. Le Figure I.1 donne les compositions d'un béton ordinaire (BO) et d'un béton autoplaçant (BAP) (Turcry, 2004).

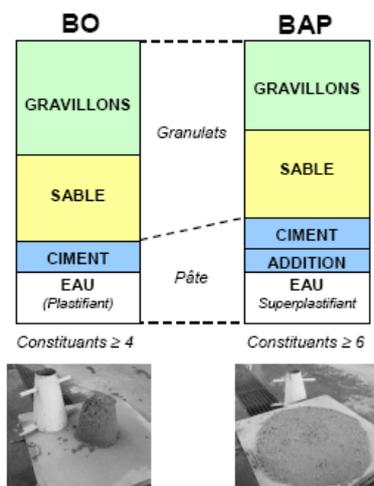


Figure I.1. Composition d'un béton ordinaire (BO) et d'un BAP (Turcry, 2004)

De nombreux travaux ont été consacrés à l'étude des formulations appropriées aux BAP. Les compositions tirées de la littérature (Turcry, 2004) soulignent deux particularités :

- Ces bétons contiennent un volume de fines plus important que les bétons classiques et souvent un agent de viscosité ;
- Les différents constituants, en plus du ciment et de l'eau dosée de manière à obtenir une résistance mécanique donnée, qui est proposés pour composer les bétons autoplaçant sont : Les granulats, les fines, les adjuvants et l'agent de viscosité.

2.2.1 Ciment

Le ciment est un liant hydraulique qui durcit tant à l'air que sous l'eau. Il est obtenu par broyage fin du clinker avec une quantité nécessaire de gypse et un/ ou des ajout(s) minéraux actif (ciment composé), faite simultanément ou par malaxage minutieux des mêmes matériaux broyés séparément, Les principaux composés du ciment portland sont :

- Les silicates tricalciques (alite) : $3 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2$ [C_3S]
- Les silicates bicalciques (belite) : $2 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2$ [C_2S]
- Les aluminates tricalciques : $3 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ [C_3A]
- Les alumino-ferrites tétracalciques : $4 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ [C_4AF]
- Autres : (sulfates, alcalins, impuretés, . . .).

Selon la teneur des constituants autres que le gypse ajouté ou non au clinker, la norme européenne (NF EN 197-1,2012), donne 27 ciments courants, qui sont regroupés en cinq types principaux à savoir :

- CEM I – CPA Ciment Portland Artificiel ;

- CEM II – CPJ Ciment Portland composé;
- CEM III – CHF Ciment de haut fourneau;
- CEM IV –CPZ Ciment pouzzolanique;
- CEM V –CLC Ciment aux laitiers et aux cendres.

2.2.2 Additions minérales

L'emploi des pouzzolanes minérales pour faire des mortiers et 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'être fins 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 poudre de verre
- La fumée de silice
- Les cendres volantes

2.2.3 Superplastifiants

Ce sont des réducteurs d'eau à haute efficacité, et se présentent généralement sous forme de liquide. Ils sont composés de longues molécules organiques de masse élevée. Les plus couramment utilisés sont les sels de sodium ou de calcium du poly naphthalène sulfoné, et les sels de sodium de la poly mélamine sulfonée. Les copolymères acrylate-ester ou polyacrylates ont récemment été introduits sur le marché. Le mode d'action des superplastifiants est extrêmement complexe. Il peut être expliqué comme suit : lorsqu'ils sont en contact avec un milieu aussi polaire que l'eau, les grains de ciment, qui présentent un grand nombre de charges opposées (positives et négatives) sur leur surface, tendent à s'agglomérer sous forme d'amas (floculation). Par conséquent, cette floculation piège un certain volume d'eau entre les grains de ciment (eau captive) qui n'est plus disponible pour assurer une bonne maniabilité au béton. 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 libère de l'eau qui est maintenant disponible à la lubrification du mélange d'où l'augmentation de la maniabilité.

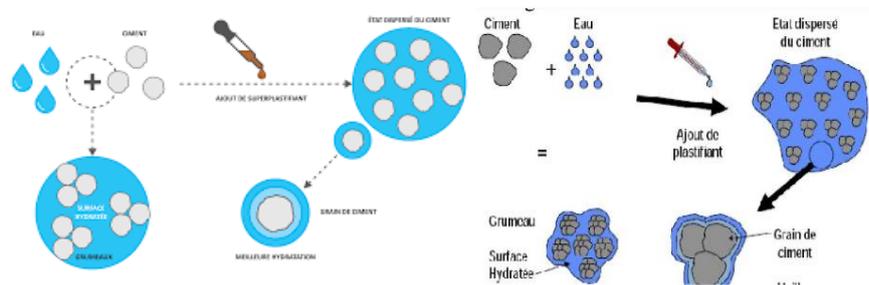


Figure I.2. Effet du superplastifiant dans une matrice cimentaire

2.2.4 Les granulats

qu'on appelle aussi agrégat, est un fragment de roche, d'une taille inférieure à 125 mm (sables, gravillons et graviers), destiné à entrer dans la composition des matériaux destinés à la fabrication d'ouvrages de travaux publics, de génie civil et de bâtiment. C'est la première ressource du sous-sol exploitée en France avec 379 millions de tonnes extraites en 2011. C'est la ressource minérale la plus utilisée par un citoyen américain moyen (avec 562 tonnes par personne).

Les granulats sont définis comme l'ensemble de grains inertes compris entre 0 mm et 40 mm (sable, graviers et cailloux) dont l'origine peut être naturelle ou artificielle. Nous distinguons les granulats roulés extraits de ballastières naturelles ou de rivières, et les granulats concassés, obtenus à partir des roches concassées exploitées en carrières. Les granulats sont classés selon les dimensions des grains qui les constituent et la courbe granulométrique représente la distribution, en pourcentage, des poids des matériaux passants dans des tamis de dimensions normalisées. Pour faciliter l'écoulement du mélange, la confection d'un bon béton autoplaçant utilise généralement des granulats roulés de rivières et un apport de fines (par exemple des fillers calcaires) plus importants. Du fait que les frottements entre les granulats limitent l'étalement et l'aptitude au remplissage des bétons, la quantité de granulats est donc limitée, en général le rapport gros granulat / sable exprimé en masse est de 1 dans un BAP.

Le risque de blocage dans un milieu fortement ferrailé augmente lorsque le D_{\max} augmente. Ainsi, le D_{\max} des granulats doit être compris entre 10 et 20 mm.

2.2.5 L'eau de gâchage

L'eau de gâchage est un élément essentiel pour la fabrication du béton. Elle est ajoutée lors du mélange afin d'hydrater le ciment et permettre de lier les constituants du béton entre eux. L'eau rend également le mélange bien plus maniable, ce qui facilite l'application du béton. Élément indispensable pour obtenir du béton, l'eau utilisée doit absolument être propre et ne doit pas être ajoutée avec excès. Si ces deux conditions ne sont pas respectées, le béton risque d'être fragile et ses performances seront altérées.

3. FORMULATION ET APPROCHE DES BAP

De multiples approches se sont développées à travers le monde pour la formulation d'un béton autoplaçant. Dans ce qui suit, quelques approches sont présentées (guidebéton.com, 2021).

3.1 Méthode japonaise

La formulation des BAP par l'approche développée à l'Université de Kochi se fait de manière sécuritaire, en privilégiant le volume de pâte au détriment des granulats. Les bétons obtenus sont sur-dosés en granulats et par conséquent loin d'un optimum économique. Le surcoût engendré sur le matériau est compensé, au Japon, par les économies sur la main d'œuvre. (guidebéton.com, 2021). Cette méthode tient compte des points suivants :

1. Dosage des gravillons : Les chercheurs japonais ont montré que le risque de blocage est minimisé lorsque le volume du gravillon pour 1 m³ de béton est limité à la moitié de sa compacité. A défaut d'indication, nous avons choisi de la mesurer en suivant la procédure du LCPC. La compacité est pour chaque gravillon d'environ 0,57. Dans le cas de la formule de granulométrie 0/10 mm, le volume du gravillon est donc posé à 285 l/m³.
2. Dosage du sable : Le volume du sable est posé forfaitairement à 40 % du volume de mortier² du béton. La fluidité du béton est garantie par la réduction des frictions granulaires.
3. Dosage du liant : La méthode ne précise pas comment doser le liant. Néanmoins la quantité de ciment peut être fixée, par exemple, en respectant la donnée des normes (soit ici une masse minimale de ciment de 350 kg/m³).
4. Dosage de l'eau et du super plastifiant : Les dosages en eau et en super plastifiant sont déterminés au moyen d'essais sur mortiers, dont le volume de sable est fixé à 40 %. On réalise

des mesures d'étalement avec un cône à mortier et des mesures d'écoulement à l'entonnoir (guidebéton.com, 2021).

3.2 Méthode suédoise

En fait, ils ont repris l'approche d'évaluation du risque de blocage et l'ont intégrée dans le processus de formulation. Le rapport G/S final est celui qui donne le même volume de pâte pour avoir les propriétés recherchées. Les fines, l'eau et le superplastifiant sont ajustés par la suite pour obtenir une viscosité suffisante, un faible seuil de cisaillement et la résistance à la compression visée. Cette méthode propose une meilleure optimisation du squelette granulaire mais, le critère de blocage n'est pas général pour tout type de granulat.(guidebéton.com, 2021).

3.3 Méthode française

Méthode française (LCPC) : proposée par De Larrard a 1994 : Au LCPC, un modèle mathématique a été développé à partir d'un modèle de suspension solide (RENE LCPC). Ce modèle est basé sur les interactions granulaires entre les différents constituants du mélange. Il permet de prévoir la compacité d'un mélange granulaire avec une précision inférieure à 1% à partir des constituants ci-après :

- les distributions granulaires
- les proportions du mélange
- la compacité propre
- la densité apparente
- La procédure à adopter pour déterminer les proportions des divers constituants est la suivante:
 - la proportion de liant est fixée a priori (70% de ciment, 30% d'addition par exemple),
 - le dosage, à saturation, du superplastifiant est déterminé. Selon l'expérience du LCPC, ce dosage pourrait conférer au béton une viscosité élevée, la moitié de ce dosage serait plus pertinent.,
 - le besoin en eau de ce mélange (en présence du superplastifiant) est déterminé,
 - les calculs sont effectués avec le logiciel en tenant compte du confinement (Effet de paroi). La viscosité est fixée de manière arbitraire à 5.104 (Pa.s). La teneur en eau est réduite en conséquence et la proportion liant/filler est maintenue constante,
 - Une formulation de béton autoplaçant est donc proposée basée sur les prévisions du modèle (Guidebéton.com, 2021).

4. CARACTERISATION DES BETONS AUTOPLAÇANTS

4.1 Caractérisations a l'états frais

Les propriétés générales d'un béton autoplaçant frais sont la fluidité et homogénéité. Ces propriétés sont étudiées sur plusieurs aspects, et peuvent se diviser en trois critères mesurables par des tests empiriques : le remplissage, la résistance à la ségrégation, et la capacité à passer à travers les obstacles que nous appellerons capacité de passage (Bethmont, 2005).

Tableaux I.3 Les différents essais à l'états frais

Essais	Définition
L'étalement	L'essai est utilisé pour caractériser la fluidité des BAP
Boite en L (L-box)	La boite en L permet de tester la mobilité du béton en milieu confiné et vérifier que la mise en place du béton ne sera pas contrariée par des phénomènes de blocage inacceptable
V-entonnoir(v-funnel)	L'essai est réalisé en mesurant le temps que met le béton a s'évaluer a travers l'entonnoir sous son propre poids il y a deux classes VF1<9s , VF2= 9s a 25s
Stabilité au tamis	Appelé aussi essai de caractérisations de la ségrégations des BAP et il y a deux classe $P \leq 20\%$, $P \leq 15\%$

4.2 Caractérisations a l'états durci

Le comportement à l'état durci se rapporte essentiellement aux essais concernant les performances mécaniques (résistance à la compression, résistance à la traction) et le retrait est la durabilité des bétons autoplaçants.

Tableaux I.4 Les différents essais à l'états durci

Essais	Définition
Résistance à la compression	La résistance à la compression est la caractéristique la plus importante recherchée pour le béton durci. C'est sur elle que se basent le calcul et le dimensionnement d'une structure en béton.
Résistance à la traction	Pour simplifier, on considère généralement que la résistance à la traction est égale au 1/10ème de la résistance à la compression de ce même béton
Module d'élasticité	Les différents matériaux de BAP peuvent montrer un différent comportement de relation contrainte-déformation si les BAP contiennent une baisse quantité de gros granulats on se réfère à la formule réglementaire du module ($E_{ij} = 11000 f_{cj}^{1/3}$)
Durabilité	La pérennité d'un ouvrage en béton et sa durabilité dans le temps, dépend de plusieurs paramètres liés d'une part à l'environnement (nature, concentration et renouvellement ou non des éléments agressifs) et d'autre part au matériau lui-même (nature et dosage des constituants, conditions de fabrication et de cure).

5. LES GRANULATS DE BÉTON A BASE DE DÉCHETS

Actuellement, la plupart des granulats utilisés sur le marché sont des granulats issus des carrières ou de l'extraction des fleuves et des mers. Ces produits offrent l'avantage d'une qualité relativement constante et d'un approvisionnement continu. L'extraction des granulats naturels à un impact direct sur la faune et la flore, ce qui a mené à un durcissement des critères d'exploitation. La loi sur l'extraction des graviers alluvionnaires en est le meilleur exemple. Rappelent qu'ont Algérie l'exploitation des granulats des mers est strictement

interdit par la loi. Ces facteurs favorisent de plus en plus l'usage des granulats à base de déchets.

5.1 Granulats de béton recyclé

La réutilisation de ces déchets de démolition a été effectuée la première fois après la deuxième guerre mondiale en Allemagne. Depuis cette date, plusieurs recherches ont été menées dans beaucoup de pays pour développer l'utilisation des déchets de démolition comme constituants de nouveau béton. Ces déchets peuvent être de béton démolé (déchets des éprouvettes écrasées dans laboratoire, déchets du bâtiment, des plates formes des aéroports en béton, chaussées des routes en béton etc.) ou déchets des éléments de trottoir. Les granulats fabriqués par ces déchets sont dits : « *Granulats Recyclés* », et le béton fabriqué à base de ces granulats est dits : « *Béton Recyclé* ».

Au 21^{ème} siècle, la protection de l'environnement et la gestion des déchets prennent une place de plus en plus importante, d'où la nécessité de l'emploi de matériaux recyclés dans le domaine des BTP (Rao et al., 2006).

5.1.1 Avantages

L'utilisation des granulats recyclés peut être bénéfique en terme :

- L'économie des décharges dont on cherche à réduire le nombre et l'usage et la préservation des sols et l'environnement,
- L'économie des carrières des matériaux naturels,
- Des économies de transport puisqu'il s'agit de matériaux "locaux".

5.1.2 Matériaux de construction et développement durable

La construction fait malheureusement partie des secteurs qui génèrent le plus d'émission de CO₂ dans l'atmosphère. Aujourd'hui, le rythme du développement de cette industrie est en perpétuelle croissance particulièrement dans les pays en voie de développement. L'Inde peut être citée comme exemple où l'industrie de la construction est classée deuxième au niveau des investissements, ce qui représente près de 11 % du produit intérieur brut . De même, l'industrie de la construction en Chine a connu une croissance constante pendant une longue période, elle consacre chaque année près de 16 % de son produit intérieur brut pour ce secteur. Au sein de l'Union européenne, l'industrie de la construction emploie 7 % de la population active (chambre de commerce indo-italiy, 2008).

Sur le plan énergétique, le secteur de la construction est, partout dans le monde, le plus grand consommateur d'énergie. Une grande partie de cette énergie est consommée par l'extraction et la production des matériaux de construction.

Pour évaluer l'impact des matériaux de construction sur l'environnement, plusieurs questions se posent sur les points suivants : le traitement et la production des matières premières, la construction, la durée de vie des matériaux, la démolition et l'élimination. Les différentes étapes de la construction depuis l'extraction des matières premières jusqu'au traitement des déchets consomment une quantité énorme d'énergie. Elles sont également responsables de l'émission d'une grande quantité de CO₂ dans l'atmosphère. Le Tableau II-2 montre un exemple de la quantité de CO₂ émise dans l'atmosphère pour un cycle de vie d'un bâtiment (Autumn, 2010).

Tableau I.5 Taux d'émission de CO₂ durant un cycle de vie d'un bâtiment

Étapes	Quantité de CO ₂	Émis
	La quantité (Mt)	Totale de CO ₂ en (%)
Conception	1.3	0.5
Fabrication	45.2	1.5
Distribution	2.8	1
Opération sur site	2.6	1
A utiliser	246.4	83
Remise à neuf / démolition	1.3	0.4
Totale	298.4	100

5.2 Granulats issus des déchets de verre

Beaucoup de recherches et d'études ont prouvé que le verre (Figure I.3) peut efficacement être employé dans le béton sous forme de granulats afin de remplacer les granulats fins naturels sans changement dimensionnel du béton lié à la réaction alcali-silice. L'incorporation du verre dans le secteur de construction est très avantageuse et utile, notamment :

- ce type de béton léger fournit de faible densité ce qui réduit les charges dans les constructions, en plus de la bonne conductivité thermique ;

- pour un certain nombre de raisons, les granulats en verre améliorent les propriétés d'écoulement du béton frais de sorte que des résistances très hautes puissent être obtenues même sans utilisation des superplastifiants ;
- la quantité de verre de rebut a graduellement augmenté au cours des années dues à une utilisation toujours croissante des produits de verre. En raison de ceci, il y a un potentiel énorme pour l'usage du verre de rebut dans le secteur de la construction.

Néanmoins, la réaction alcali-silice est une pathologie interne très agressive qui peut apparaître dans le cas d'utilisation des granulats de verre due à la présence en quantités importantes en oxyde de sodium (Na_2O). Les conséquences d'une telle réaction peuvent mener à des déformations inacceptables, déformations au niveau du parement et des pertes excessives de la résistance et la stabilité de l'ouvrage.

L'emploi du verre dans le béton ne se limite pas uniquement à la substitution des granulats naturels par des granulats de verre. En effet, plusieurs études et recherches affirment que l'emploi du verre sous forme de poudre, au même titre qu'une addition minérale en remplacement du ciment Portland, se révèle prometteur sur plusieurs aspects pour la fabrication de ciment ou de béton (Cours MDC2, Ali boucetta, 2020).



Figure I.3. Granulats de verres

5.3 Granulats issus des déchets de bois

Les granulats de bois voire (Figure I.4), (fibres, copeaux, baguette ... etc) possèdent des qualités exceptionnelles de légèreté d'isolation thermique, et d'absorption phonique et de régulation hygrométrique qui font de lui de choix pour la construction de logements, bâtiments, bâtiments industriels ... ect ; les techniques de construction à base de béton de bois sont relativement anciennes. Les bétons de bois dépendent de certains critères qui favorisent leur utilisation :

- le bois est une matière première renouvelable,

- le béton de bois permet de valoriser des déchets de bois non utilisable dans le fabrication de papier,
- le béton de bois est matériau qui possède de bonnes caractéristique physique et thermiques (Achoura, 2021).



Figure I.4. Granulats de copeau de bois

5.4 Granulats issus des déchets d'asphalte

Les granulats asphaltiques voire (Figure I.5), sont obtenus par le recyclage des routes. On les obtient par planage, décohesionnement de la chaussée ou par technique de concassage en usine. Les granulats obtenus par l'une de ces deux méthodes donnent des fractions de granulométries comprises entre 0 et 40 mm. D'après les récents résultats tirés des travaux de Pelierin (Pellerin, 1997), les granulats issus des résidus de planage sont moins denses et moins absorbants que les granulats naturels. Ce phénomène s'explique bien par la présence du bitume, un hydrocarbure léger et hydrofuge. Contrairement aux granulats issus de ces bétons recyclés, les granulats naturels possèdent de meilleures performances mécaniques (essai Los Angeles et essai Micro-Deval). En conclusion, ces granulats recyclés sont moins adaptés, mais ils résistent bien aux cycles de gel/dégel, selon l'essai Ontarien (LS-614) (laboratoire canada ,1997).



Figure I.5. Granulats déchets d'asphalte

5.5 Granulats d'argile expansés

La première fabrication d'argile expansée est due à Stephen hayde qui déposa un brevet le 12 février 1918 (Arnauld, 1986) . Il est probablement le matériau le plus fabriqué au monde. La cause de l'expansion des granulats et la réduction des oxydes de fer par les matières organiques. En effet, les argiles utilisées dans les industries contiennent à la fois des matières organiques et du fer en proportion non négligeable. En l'absence de l'un de ces composants, il n'y a pratiquement pas d'expansion. Cependant, toutes les argiles ne gonflent pas. Il y en a seulement celles qui contiennent de la pyrite, de l'hématite ou de la dolomie. L'argile traitée (1150-1200°C) gonfle à la suite de dégagement de gaz et parallèlement une peau extérieure se forme par vitrification de la surface du matériau. Au refroidissement on a un granulats léger dur, soit des particules de forme arrondie avec peau brune rougeâtre enveloppant une texture alvéolaire noirâtre. Par concassage, on obtient des granulats de tailles variées et dont la masse volumique apparente varie entre 300 et 1000 kg/m³ (Herihiri, 2010) .

Les bétons confectionnés à partir d'argile expansée ont une bonne résistance à la compression de l'ordre de 30 à 35 MPa avec des masses volumiques se situant autour de 1650 kg/m³ et 1200 kg/m³ pour les bétons légers de structure et les bétons légers isolants respectivement (Herihiri, 2010) .



Figure I.6. Granulats argile expansée

6 CARACTERISTIQUES DES GRANULAT DE BÉTON RECYCLÉS

6.1 Granulométrie

Comme les graviers naturels, les granulats recyclés sont classés en fonction de leurs tailles : fins (sable) et grossiers (gravillons). Le mélange obtenu est composé de particules de forme différentes. Ces dernières constituent le squelette granulaire et garantissent la résistance mécanique du béton.

La distribution des dimensions des particules a une influence directe sur la demande en eau, également sur la maniabilité et la durabilité. La répartition continue des grains fins et grossiers produit un béton cohérent, stable et durable avec moins de vides entre les éléments.

Le contrôle de la qualité du squelette se fait au travers des courbes granulométriques. Une forme linéaire et inclinée de celles-ci montre une bonne répartition recommandée par la norme (norme NF X 11-501,1992). Un décalage horizontal ou vertical à l'écart des formes linéaires montre un manque ou un excès de pourcentage d'une dimension .

6.2 Masse volumique

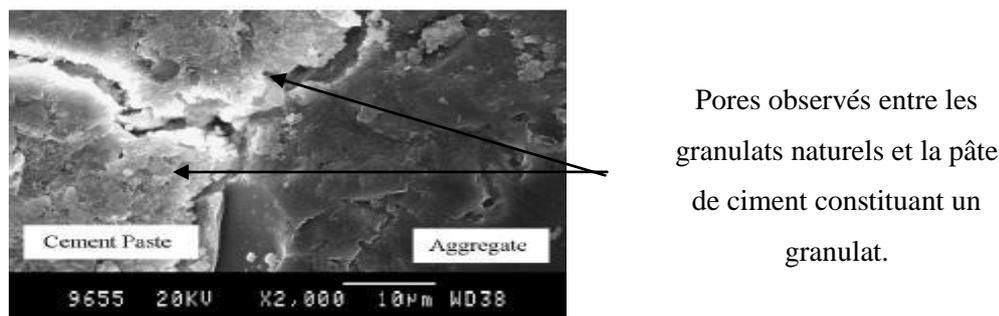
La densité relative du granulat recyclé est moins grande que celle du granulat naturel . La littérature à ce sujet indique que la densité relative des granulats recyclés se situe généralement entre 2,4 et 2,5 (2400 à 2500 kg/m³) alors que les granulats naturels ont généralement une masse volumique de l'ordre de 2,75 (2750 kg/m³). La masse volumique plus faible du granulat recyclé est causée par la présence du mortier résiduel qui a une masse volumique plus faible que celle du granulat naturel et diminue par conséquent la masse volumique totale du granulat recyclé. Cette réduction de la densité est fonction de la teneur en mortier résiduel (De Juan et al., 2009).

6.3 Porosité

La porosité des granulats est généralement corrélée à leur capacité d'absorption. La forte capacité d'absorption des granulats recyclés est liée à une forte porosité de ce matériau. Le taux de ciment dans le béton parent influe également sur la porosité des granulats recyclés. Celle-ci augmente significativement avec l'augmentation de la quantité de pâte de ciment De (Juan ,al,2009).

Grâce à des analyses microscopiques, Tam et al. ont décrit la géométrie de la porosité de granulats recyclés. Selon les auteurs, des pores sont présents entre les granulats naturels et la pâte de ciment. Ces pores fragilisent le matériau et limitent l'emploi de ces granulats recyclés dans la fabrication des bétons (Tam, al ,2008).

Ces pores engendrent une forte porosité des bétons de granulats recyclés. L'absorption des bétons recyclés augmente proportionnellement avec le taux de granulats recyclés, tandis que la densité des bétons décroît légèrement (Padmini et al., 2008).



Pores observés entre les granulats naturels et la pâte de ciment constituant un granulat.

Figure I.7. Interface granulat naturel/pâte de ciment d'un granulat recyclé de béton

6.4 Densité

La densité est le paramètre de classification le plus fondamental. Le densité plus faible des granulats recyclés est due à l'existence des morceaux ou des particules résiduels poreux et moins denses de mortier adhérant à la surface des plus grandes particules du grain. La densité de granulat constitue un paramètre très important pour la conception en un mélange de béton, qui est influencée par des variations de la composition des matériaux recyclés.

6.5 Absorption d'eau

L'absorption d'eau des granulats recyclés se situe entre 3 et 12%. Cette caractéristique dépend de la matière première. Il est à noter que ces valeurs sont plus grandes en comparaison aux valeurs des granulats naturels qui sont entre 0.5 et 2 %. La forte porosité des granulats recyclés peut être attribuée à la présence de la pâte de ciment qui adhère aux granulats originaux.

Ce critère influe considérablement sur le comportement rhéologique des bétons frais. Les compositions des bétons recyclés nécessitent une quantité d'eau supplémentaire pour l'obtention d'une ouvrabilité plastique similaire à celle d'une composition de béton de granulats naturels.

En effet, les bétons recyclés requièrent approximativement 15% d'eau supplémentaire pour un même affaissement qu'un béton classique (Berredjem, 2009).

Cette absorption est bien évidemment la conséquence de la présence de la pâte de ciment, mais plus particulièrement de sa structure alvéolaire (Berredjem, 2009). En effet, la pâte de ciment est reconnue pour être un matériau poreux. Les interstices ont tendance à capter l'eau et à la retenir. Il n'y a donc pas suffisamment d'eau libre pour hydrater les grains de ciment.

6.6 Résistances a l'abrasion

Les valeurs acceptables des résistances à l'abrasion des granulats recyclés sont comprise dans un intervalle de 25 à 45% dans des conditions générales, 25% sont spécifiés pour les éléments de béton lourd, 35% pour les applications de base et 30% pour les applications de degré inférieur. La classification des granulats recyclés est donnée par le tableau suivant :

Tableau I.6. Evaluation et classification des granulats recyclés

Propriétés	Classification						
	A	B	C	D	E	F	G
Densité	> 2.50	2.49 ÷ 2.40	2.39 ÷ 2.30	2.29 ÷ 2.20	2.19 ÷ 2.10	2.09 ÷ 2.00	< 2.00
Absorption d'eau	< 1	1.10 ÷ 3.00	3.00 ÷ 5.00	5.10 ÷ 7.00	7.10 ÷ 9.00	9.00 ÷ 10.0	> 10.0
Valeur des résistances à l'abrasion	< 20	21 ÷ 23	24 ÷ 26	27 ÷ 28	29 ÷ 31	32 ÷ 35	> 35

Lors de l'essai de résistance à l'abrasion (essai de dureté Los Angeles) tout le mortier résiduel lié au granulat d'origine se détache de celui-ci sous l'effet de l'abrasion (De Juan, et al., 2014). On observe ainsi une grande perte de masse pour le granulat recyclé ce qui explique des valeurs du coefficient Los Angeles plus élevés que ceux généralement relevés pour des granulats naturels (Chakradharar et al., 2014). La résistance à l'abrasion est donc directement liée à la quantité du mortier résiduel (De Juan et al., 2014).

6.7 Résistance a l'usure

L'essai micro-Deval a pour but la détermination de la résistance à l'usure par le frottement réciproque des éléments d'un granulat. La norme européenne EN 1097-1[51] permet de déterminer le coefficient micro-Deval.

La valeur du MDE doit être $\leq 35\%$ pour les granulats naturels selon la norme (NF EN 1097-1) et compris entre 15 et 50 (%) pour les granulats recyclés selon XP P 18-540 L'expression suivante peut être utilisée pour calculer le coefficient « Micro-Deval.

$$\text{MDE} = \frac{m}{M} \times 100\%$$

- MDE : Coefficient de Micro – Deval, (%)
- m : Masse du tamisât sur le tamis 1,6 mm, (gr)
- M : Masse total de l'échantillon

6.8 La teneur en chlorures

Il a été constaté sur des cas de béton à base de granulats recyclés la présence de chlorures dépassant les limites recommandées. Ceci est vraisemblablement lié à la contamination des ouvrages par les chlorures au cours leurs exploitations avant démolition. Le pourcentage d'ions chlore acceptable dans les granulats doit être $\leq 0,02$ selon la norme XP P 18-540 (XP P 18-540 ,1997).

7. INFLUENCE DES GRANULATS RECYCLÉS SUR LES PROPRIETES DES BAP

7.1 Influence de l'ancien mortier de granulat de béton recyclé

Les granulats recyclés de béton diffèrent principalement des granulats naturels en ce qu'ils sont composés de deux fractions de nature différente : le granulat naturel et le mortier de ciment qui y est accroché. ce mortier de ciment est la cause de la baisse des caractéristiques des granulats recyclés : densité plus faible, absorption d'eau plus élevée, teneurs en sulfates et en alcalins plus élevées. la teneur en mortier dépend du cycle de concassage du béton et est directement liée à la taille du granulat. aussi, certaines études ont été réalisées pour caractériser ce mortier. l'ancien mortier colle au granulat ne peut être éliminé facilement et sa quantité est aléatoire et dépend de la qualité d'adhérence granulat-pâte de ciment et ainsi que de la puissance de concassage lors de la fabrication des recyclés. l'effet de la pâte cimentaire n'influe pas beaucoup la résistance à long terme. néanmoins, la quantité du mortier attaché aux granulats recyclés influe la résistance à la flexion et l'énergie de rupture qui diminuent avec l'augmentation de la quantité du mortier. aussi, ils influent sur le rapport e/l parce que les granulats recyclés absorbent beaucoup l'eau occasionnée par une forte porosité au sein des granulats recyclés et principalement contenue dans l'ancien mortier. les bétons à base de granulats recyclés se caractérisent par une densité faible, une plus forte capacité d'absorption d'eau élevée et une forte porosité que le béton naturel (Sanchez et al., 2004).

la recherche sur le BAP à base de gros granulats recyclés montre la possibilité d'utiliser du sable recyclé dans ces BAP, et la résistance à la compression montre que le béton fabriqué à partir d'agrégats recyclés (gravier et sable) est comparable au BAP naturel. une étude sur l'utilisation d'agrégats recyclés à grande échelle dans les compositions de BAP a montré qu'il n'y avait pas beaucoup de différence entre les caractéristiques du BAP naturel et du BAP recyclé. l'effet du remplacement des granulats naturels à grande échelle par des matériaux recyclés dans la composition a été étudié. BAP à un état frais sous l'influence des

caractéristiques, tout en conservant les mêmes paramètres de composition. ils ont montré que ces granulats recyclés peuvent être utilisés à un taux de remplacement allant jusqu'à 50% sans affecter les performances du BAP. capables d'incorporer du sable récupéré dans la formulation du BAP, ils ont formulé le BAP à plusieurs taux de substitution. Leurs recherches montrent que l'incorporation de sable récupéré affectera les performances du béton, mais conserve toujours la qualification d'autoplaçant.

7.2 Influence à l'états frais

Le critère d'ouvrabilité pour un BAP ou le critère d'écoulement non confiné représente le paramètre le plus important pour caractériser un BAP. (Benhoua et al., 2009) ont étudié l'effet des granulats recyclés sur l'écoulement non confiné. Ils ont constaté que les fines ayant une influence significative sur l'étalement du béton avec 100% de granulats naturels qui contient 22,5% de fines recyclés présentent un bon étalement sans ségrégation et sans ressassage et avec un temps d'écoulement T_{50} inférieur à 5 secondes. (Figure I.8). Une comparaison entre l'étalement d'un BAP à base de granulats naturels et un BAP à base granulats recyclés est donnée sur la (Figure I.9).

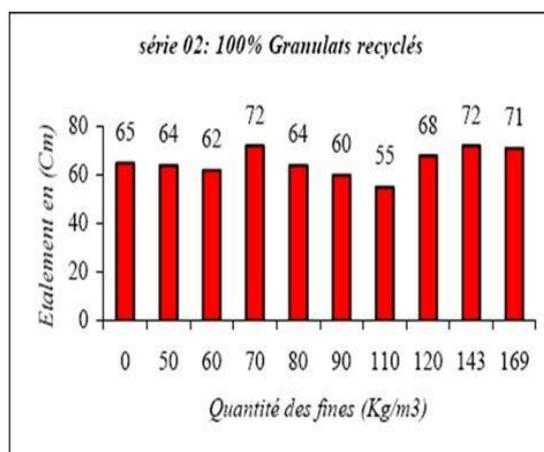


Figure I.8. Variation de l'étalement de BAP avec des granulats recyclés en fonction de la quantité des fines (Benhoua et al., 2009).

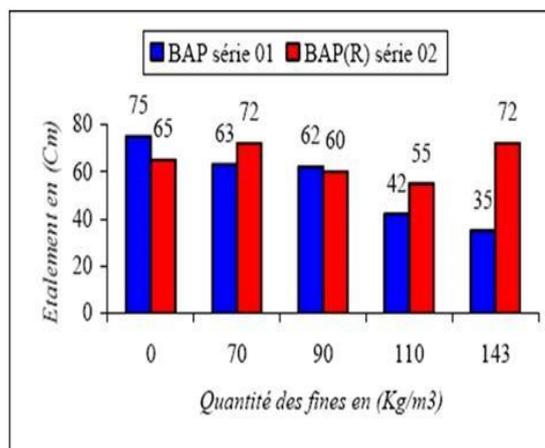


Figure I.9 Comparaison entre l'étalement d'un BAP (GN) et BAP (GR) (Benhoua et al., 2009)

L'essai à la boîte en L a aussi montré que le BAP contenant des granulats fins recyclés a une fluidité suffisante, ainsi qu'une viscosité et une résistance à la ségrégation adéquate (Corinaldesi et al., 2004). Cependant, (Benhoua et al., 2009) ont trouvé que les résultats des essais de la boîte en L ne satisfait pas les exigences requises pour un BAP avec un rapport E/L = 0,45 à 0,47 et 100% de granulats recyclés (Tableau I.5). Pour un BAP avec un mélange de granulats naturels et recyclés. (50% des granulats naturels, 50% des granulats recyclés), ils ont constaté que pour un rapport E/L égal à 0,46 le béton présente un taux de remplissage pareil au BAP ordinaire $H_2/H_1 = 0,86$ (limite minimale) (Figure I.10). D'autre part, Grdic et al, ont trouvé un taux de remplissage équivalent pour les BAP avec granulats naturels et 50, 100% granulats recyclés (0,94, 0,95 et 0,98) respectivement (Grdic et al., 2010).

Tableau I.7 : Résultats d'essai de la boîte en L (Benhoua et al., 2009)

Compositions		E/L	Fine (kg)	H ₂ (cm)	H ₁ (cm)	H ₂ /H ₁	Temps d'écoulement(s)		
							T20	T40	T60
GN	BAP3-1	0.45	90	8.5	11	0.77	1.10	2.41	3.66
	BAP3-2	0.46	90	9	10	0.90	1.01	1.82	2.66
GR	BAP(R)6-1	0.45	90	8.5	13.5	0.63	2.13	3.06	4.37
	BAP(R)6-2	0.46	90	8.5	12.5	0.68	1.95	2.80	4.02
	BAP(R)6-3	0.47	90	8	11	0.73	1.13	2.46	3.79

GN – Granulat Naturel

GR – Granulat Recyclé

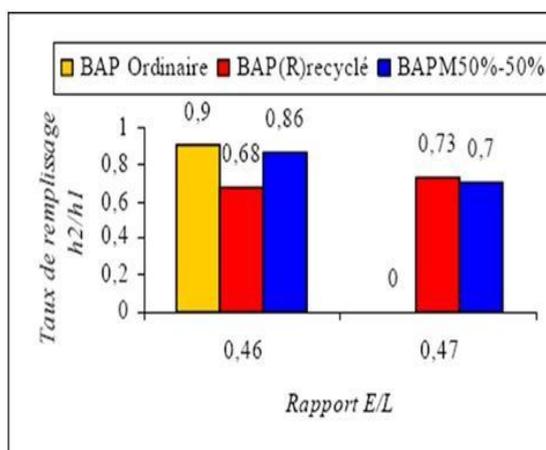


Figure I.10. Comparaison entre le taux de remplissage des BAP ordinaires et recyclés (Benhoua et al., 2009)

La substitution de 50 et 100% de granulats naturels par des granulats recyclés a donné un béton avec une stabilité satisfaisante pour un rapport E/L=0,46, mais il est moins stable pour un rapport E/L=0,47 (Tableau I.2) (Benhoua et al., 2009). Par contre Grdic et al, ont constaté que le BAP à base de granulats naturels est moins stable vis-à-vis de la ségrégation par rapport aux BAP avec 50 et 100% de granulats recyclés (Grdic et al., 2010).

Tableau I.8 Résultats de l'essai de stabilité au tamis (Benhoua et al., 2009)

Composition	BAP3-1	BAP(R) 6-2	BAPM-1	BAP(R) 6-3	BAPM-2
Granulats	100%GN	100%GR	50%-50%	100%GR	50%-50%
E/L	0.46	0.46	0.46	0.47	0.47
laitance (%)	6.98	10.23	9.84	12.40	16.56

7.3. Influence à l'états durci

Résistance en compression : La résistance à la compression à 7 jours et à 28 jours pour le BAP à 100% de granulats recyclés est similaire à celle d'un BAP de granulats naturels lorsqu'une quantité de fines de 22.5% est utilisée (Figure I.11).

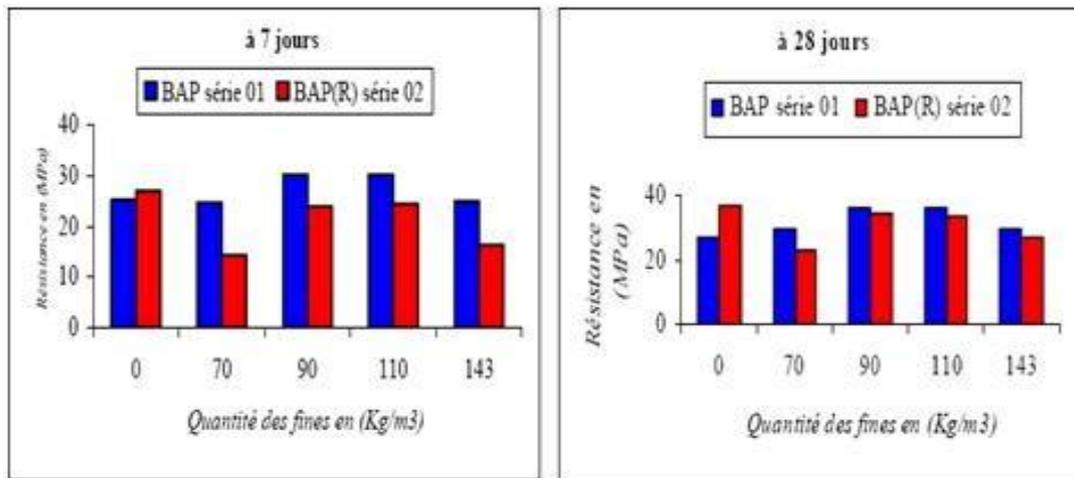


Figure I.11 Comparaison entre la résistance à la compression à 7 et 28 jours pour les deux types du BAP (Benhoua et al., 2009)

D'autres chercheurs, ont montré que la qualité des granulats recyclés a un effet direct sur la résistance à la compression ainsi que la substitution de 50% et 100% de gravier naturel par un gravier recyclé réduit la résistance de 3,88% et de 8,55% respectivement (Figure I.12).

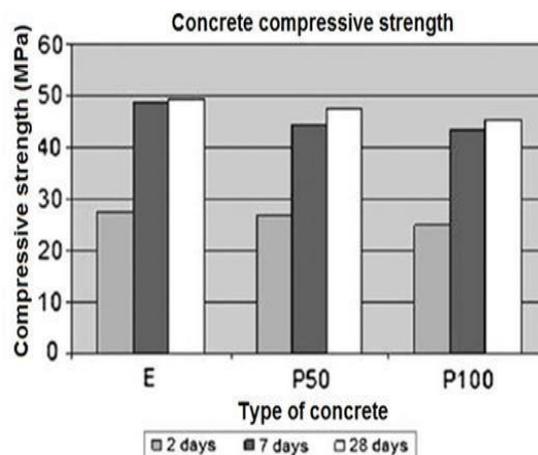


Figure I.12 Résistance à la compression pour des BAP avec (0, 50 et 100%) de granulats recyclés (Grdic Z.J et al,2010).

Résistance en traction : Une diminution de la résistance à la traction avec l'augmentation du pourcentage des granulats recyclés a été observée avec BAP.

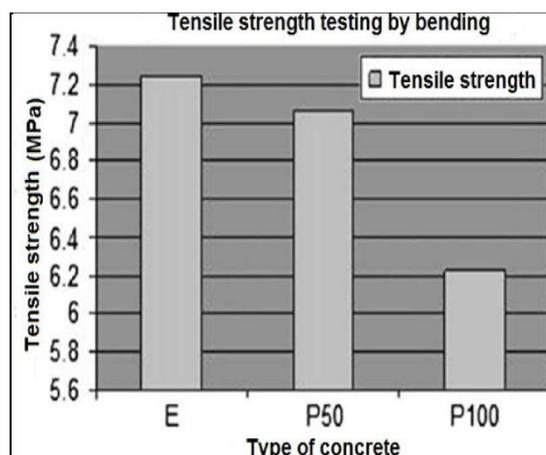


Figure I.13. Résistance à la traction pour des BAP avec (0, 50 et 100%) de granulats recyclé (Grdic et al., 2010).

La durabilité du béton est conditionnée par les phénomènes de transport, car ils sont les forces motrices qui vont entrainer la pénétration des agents agressifs extérieurs du béton par capillarité et par perméabilité .

La propriété la plus importante qui différencie les granulats recyclés des granulats naturels est leur forte absorption d'eau. L'augmentation de la quantité de granulats recyclés augmente l'absorption d'eau

La perméabilité du BAP avec les granulats recyclés est affectée en même temps par les pores capillaires de l'ancien mortier recouvrant les granulats recyclés et par les pores capillaires du nouveau mortier. Si les agrégats obtenus à partir du béton concassé ont une faible porosité, l'absorption d'eau du nouveau béton dépendra de la structure du ciment obtenu.

La résistance à la pénétration de chlorure d'un BAP basé sur des granulats recyclé augmente avec l'augmentation de la teneur en granulats recyclés (Kou et al., 2009).

8. CONCLUSION

Les bétons autoplaçants sont connus par leurs caractéristiques à l'état frais telle que fluides qui nécessitent un dosage très élevé du mélange liant (ciment + ajout) afin d'assurer cette fluidité et aussi d'éviter le phénomène de ségrégation. Cependant, les travaux réalisés sur ce type des bétons sont à la base des sables naturels ou concassés ou des granulats obtenus à partir des déchets et des sous-produits. Il existe d'autre type des granulats ayant des caractéristiques très intéressants pour les bétons autoplaçants, comme les cas des granulats de béton recyclé. Dans la littérature, très peu des études qui ont été réalisées sur les bétons

autoplaçants contenant des granulats de granulats recyclés. Pour cela, la seconde partie de ce chapitre sera consacré à présenter des généralités sur les granulats recyclés ainsi que les déchets de démolition et leurs applications dans la fabrication des granulats pour BAP.

CHAPITRE II

CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX ET PROCÉDURES EXPÉRIMENTALES

CHAPITRE II

CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX ET PROCÉDURES EXPÉRIMENTALES

Le deuxième chapitre porte sur la caractérisation des matériaux qui seront utilisés dans cette étude et en particulier celles des granulats recyclés. On présente également les différentes méthodes expérimentales sur lesquelles on s'appuiera pour la caractérisation des effets de la substitution des granulats naturels par les granulats recyclés sur le comportement des BAP à l'état état frais et durci.

Sommaire

1. INTRODUCTION	34
2. MATÉRIAUX UTILISÉS	34
2.1. Le ciment	34
2.2. Laitier granulé	35
2.3. Superplastifiant.....	35
2.4. Les granulats.....	36
3. MÉTHODE DE FORMULATION, CONFECTION ET CONSERVATION DES EPROUVETTES	38
3.1. Procédure de formulation	38
3.2. Séquences de malaxage de BAP	40
3.3. Conservation des éprouvettes	40
4. MÉTHODES EXPÉRIMENTALES	40
4.1. Essai sur BAP à l'état frais.....	40
4.1.1. Essai d'étalement	40
4.1.2. Le temps d'étalement (T_{500})	42
4.1.3. Essai de la boîte en L (L-box Test)	42
4.1.4. Essai de stabilité au tamis.....	43
4.1.5. Mesures de la teneur en air occlus	44
4.1.6. Mesures de la masse volumique sur béton frais	45
4.2. Essai sur BAP à l'état durci.....	46
4.2.1. Résistances à la compression	46

5. CONCLUSION

46

Chapitre II Caractérisation des matériaux et procédures expérimentales

1. INTRODUCTION

Dans ce chapitre, on s'intéresse à la présentation des matériaux utilisés pour réaliser les différents essais. Les matériaux utilisés dans cette étude sont d'origine locale. Il est connu que la connaissance des caractéristiques de ces matériaux est impérative à toute recherche puisque chacune de leurs caractéristiques pourrait influencer considérablement sur les résultats de l'étude.

2. MATERIAUX UTILISÉS

2.1 Le ciment

Le ciment utilisé dans ce travail est un ciment Portland CEM I 42.5 R, fabriqué par la cimenterie de Biskra (SPA BISKRA CIMENT). Les propriétés physiques ainsi que la composition chimico-minéralogique sont présentées dans les tableaux II.1 et II.2, II.3.

Tableau II.1. Propriétés physiques du ciment

Propriétés	Unités	Résultats
Masse volumique absolue	g/cm ³	3,10
Masse volumique apparente	g/cm ³	0,98
Refus au tamis 80µm	%	1,05
Refus au tamis 40µm	%	13,14
Consistance normale	%	25
Début de prise	min	150-190
Fin de prise	min	220-250
SSB	Cm ² /g	3728

Tableau II.2. Composition chimique du ciment

Composition chimique (%)										
Cao	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	Cl ⁻	SO ₃	Cao libre	PAF
62,63	20,00	3,62	4,30	2,37	0,19	0,47	0,019	2,70	0,60	2,92

Tableau II.3. Composition minéralogique calculée par les formules de Bogue

Minéraux	Désignation	Teneur en (%)
Silicate tricalcique	C ₃ S	68,79
Silicate bicalcique	C ₂ S	8,33
Aluminate tricalcique	C ₃ A	5,57
Ferroaluminate tétracalcique	C ₄ AF	11,00

2.2 Laitier granulé

Le laitier granulé utilisé dans cette étude provient du complexe sidérurgique d'El Hadjar – Annaba. Le laitier est broyé finement à l'aide d'un broyeur à boulets jusqu'à l'obtention d'une poudre de finesse supérieure à celle du ciment. Les propriétés physiques et la composition chimique du laitier granulé sont données dans les tableau II.4 et II.5.

Tableau II.4. Propriétés physiques du laitier granulé

Propriétés	Unités	Résultats
Masse volumique absolue	g/cm ³	2,90
Masse volumique apparente	g/cm ³	0,94
Refus au tamis 80	%	2,3
Refus au tamis 40	%	12,17
SSB	Cm ² /g	5357

Tableau II.5. Composition chimique du laitier granulé

Composition chimique (%)									
CaO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	Cl ⁻	SO ₃	PAF
44,73	6,80	1,60	36,37	3,21	0,24	0,68	0,01	0,35	-

2.3 Superplastifiant

Pour maintenir un état de fluidité adéquat pour les BAP, on a utilisé un superplastifiant haut réducteur d'eau de dénomination commerciale POLYFLOW LSR 8800. C'est un superplastifiant polyvalent de nouvelle génération non chloré à base de polycarboxylate commercialisé par l'entreprise SOLU EST (Annaba). Les caractéristiques techniques de l'adjuvant sont données dans le tableau II.6.

Tableau II.6. Caractéristiques techniques

Densité	1,07 ± 0,02
PH	5 à 5,5
Teneur en ions CL^-	≤ 0,1 %
Teneur en Na_2O	≤ 1 %
Extrait sec	29% à 2%

2.4 Les granulats

Deux sables naturels ont été utilisés dans ce travail, le premier est un sable roulé (0/2) qui provient de la région de Tébessa. Le deuxième, est un sable de carrière (0/4) provenant de l'entreprise nationale des granulats (ENG) d'El-khrroub-Constantine.

Pour les gros granulats, nous avons utilisés un gravier naturel (4/10) provenant de la carrière de Ain Abid (Constantine) et un gravier recyclé issu du recyclage d'un ancien béton de démolition. Les différentes opérations permettant l'obtention de ces granulats sont les suivantes :

- Des blocs de béton ont été récupérés et triés tout en s'assurant de l'élimination des polluants tels que les débris de bois, aciers et autres,
- les blocs triés sont concassés à l'aide d'un marteau à fragments à des dimensions adaptées à l'ouverture du concasseur à mâchoires (figure II.1) disponible au laboratoire de génie civil à l'université d'Annaba,
- Séparation des pierres concassés en classe granulaires identiques à celles du gravier naturel (4/10) mm.



Figure II.1 Le concasseur à mâchoire

Les caractéristiques physiques des différents granulats sont données dans le (tableau II.7) et les courbes granulométriques sont présentées sur (la figure II.2).

Tableau II.7. Caractéristiques des granulats

Caractéristiques	Unités	Sable de dune	Sable de carrière	Gravier naturel (4/10)	Gravier recyclé (4/10)
Masse volumique apparente	g/cm ³	1,48	1,61	1,50	1,18
Masse volumique absolue	g/cm ³	2,62	2,68	2,67	2,42
d/D	Mm	0/2	0/4	4/10	4/10
Module de finesse	-	2,1	3,2	-	-
Eq de sable	%	78,90	66,20	-	-
Bleu de méthylène	%	0,75	0,75	-	-
Coef d'absorption (24h)	%	1,72	2,15	1,5	5
Coef d'aplatissement	%	-	-	14,70	10,83
Micro Deval	%	-	-	19	38,6
Los Angeles	%	-	-	24	40

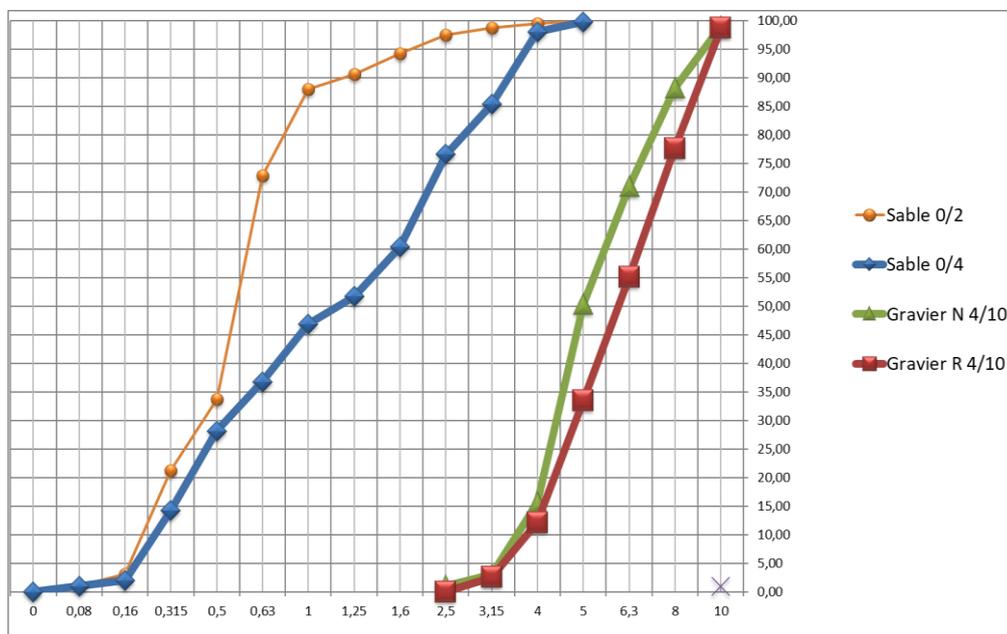


Figure II.2. Courbe granulométrique des granulats

3. MÉTHODE DE FORMULATION, CONFECTION ET CONSERVATION DES EPROUVETTES

3.1. Procédure de formulation

L'approche de formulation qui a servi à la confection des différents mélanges de cette étude est empirique basée sur une méthodologie expérimentale s'appuyant sur les recommandations de l'AFGC (AFGC, 2008) :

- Le dosage en ciment est fixé en fonction de la classe de résistance visée qui est la classe C 30/37, ce dosage est de 350 kg/m^3 en respectant les normes en vigueur (NF EN 206-1, 2012).
- Le volume de pâte retenu est de 330 à 400 litres/ m^3 , permet de favoriser l'écoulement du béton tout en réduisant les frottements entre les granulats.
- Le dosage en fluidifiant est déterminé de façon expérimentale, sur la base d'essais d'étalement sur béton, de telle sorte que lorsqu'on varie le dosage en adjuvant, on obtient un étalement supérieur ou égal à 650 mm.
- La quantité de particules inférieures à $125\mu\text{m}$ (ciment compris) doit être de l'ordre de 500 kg/m^3 . Le dosage retenu en laitier granulé est de 150 kg/m^3 , pour un liant équivalent constant est égale a 395 kg/m^3 , sachons que le coefficient d'activité (k) du laitier est de 0,30.
- L'optimisation du squelette granulaire a été réalisée à l'aide de la méthode de Dreux-Gorisse avec la prise d'un rapport G/S (proche de 1).

Le tableau II.8 résume l'ensemble des formulations étudiées dans ce travail.

Tableau II.8. Composition des BAP

BAP	Ciment	Laitier granulé	Liant éq	Eau effi	Eau totale	SP (1,1%)	Volume de pâte	Eeff/C	Eeff/L	G/S	S 0/2	S 0/4	GN 4/10	GR 4/10	Volume TOTAL
Unité	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	l/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	l/m ³
Béton T	350	150	395	189	-	5,5	360,61	0,54	0,48	0,92	525,52	315,60	784,446	-	972,70
BAP 25%GR	350	150	395	189	-	5,5	360,61	0,54	0,48	0,92	525,52	315,60	588,33	177,76	972,70
BAP 50%GR	350	150	395	189	-	5,5	360,61	0,54	0,48	0,92	525,52	315,60	392,223	355,79	972,70
BAP 75%GR	350	150	395	189	-	5,5	360,61	0,54	0,48	0,92	525,52	315,60	196,11	533,68	972,70
BAP 100%GR	350	150	395	189	-	5,5	360,61	0,54	0,48	0,92	525,52	315,60	-	711,58	972,70
BAP100% GR-Corrigé	350	150	395	-	196	5,5	360,61	0,54	0,48	0,92	525,52	315,60	-	711,58	979,70

GN : granulats naturels

GR : granulats recyclés

Remarque : pour la dernière formulation (BAP avec 100% granulats recyclés) la quantité d'eau totale a été modifiée comme suit :

$$189 + 189(4,38\%) = 196 \text{ l/m}^3 \text{ avec :}$$

189 = quantité d'eau initiale

4,38% = quantité d'eau qui a été absorbé par les granulats à t= 20 minutes.

3.2. Séquences de malaxage de BAP

Le malaxage des bétons a été fait dans une bétonnière électrique à axe incliné, de capacité 30 litres, au laboratoire de génie civil de l'université d'Annaba. Le temps de malaxage est de 5 minutes. La séquence de malaxage est la suivante :

- Introduction des matériaux dans la bétonnière, en commençant par l'ordre suivant (gros granulats naturels ou recyclés, sable carrière, sable de dune, ciment, addition minérale et malaxage à sec pendant 1 min ;
- Ensuite, on rajoute 75 % de la quantité d'eau et on malaxe le mélange pendant 2 min ;
- Pour finir, on ajoute les 25 % d'eau restante mélangé avec la totalité du superplastifiant et on malaxe pendant 2 min.

3.3. Conservation des éprouvettes

Les éprouvettes sont coulées dans des moules métalliques sans vibration. En effet, le BAP est capable de s'écouler sous son propre poids. Pour cela, on utilise des moules de dimensions :

- Cubiques (10 x 10 x 10) cm destinés pour les essais de compression ;
- Cylindriques (11 x 22) cm destinés pour les essais d'absorption capillaire.

Le démoulage s'effectue après 24h \pm 4h et les éprouvettes sont conservées dans l'eau jusqu'au échéancier des essais de caractérisation à l'état durci.

4. MÉTHODES EXPÉRIMENTALES

4.1. Essai sur BAP à l'état frais

4.1.1 Essai d'étalement

L'essai d'étalement au cône d'Abrams (ou Slump-Flow) est utilisé pour caractériser la fluidité du béton autoplaçant en milieu non confiné (Figure II.3). L'essai sur béton se fait avec le cône d'Abrams selon la norme (NF EN2069, 2010). Il existe trois classes d'étalement définies comme suit :

- Classe SF1 : étalement compris entre 550 à 650mm,
- Classe SF2 : étalement compris entre 660 à 750mm,
- Classe SF3 : étalement compris entre 760 à 850mm.



Figure II.3. Essai d'étalement

Les étapes de réalisation de l'essai sont énumérées ci-dessous :

- Placer le plateau sur une surface horizontale plane exempte de toute vibration ou de tout choc extérieur. Vérifier l'horizontalité de la surface supérieure à l'aide du niveau à bulle. Nettoyer la plaque et le cône, puis les humidifier immédiatement avant d'effectuer les essais, tout en les préservant d'une humidité excessive ;
- Placer le cône au centre du cercle de 210 mm sur la plaque et le maintenir en position par appui vertical sur les deux pattes de bases, en s'assurant que la laitance ne peut pas s'écouler de la partie inférieure du cône ;
- Remplir le cône en une seule fois sans le soumettre à aucune agitation ou aucun compactage mécanique, et araser le surplus de béton au niveau du sommet du cône. Laisser reposer le cône rempli pendant une durée maximale de 30s ; au cours de ce délai, retirer de la plaque tout déversement de béton ;
- Soulever le cône verticalement en un mouvement de 1s à 3s sans faire obstacle à l'écoulement du béton ;
- Une fois que l'écoulement du béton est stabilisé sans déplacer la plaque ou le béton, mesurer le plus grand diamètre d'étalement et consigner sous la forme d_1 à 10mm près. Mesurer ensuite le diamètre d'étalement perpendiculaire à D_1 et consigner sous la forme D_2 à 10 mm près. Si la différence entre D_1 et D_2 est supérieure à 50 mm, prélever un autre échantillon et répéter le mode opératoire.

4.1.2 Le temps d'étalement (T_{500})

L'essai d'étalement peut éventuellement être associé à une mesure du temps écoulé pour obtenir un étalement de 500 mm ou 50 cm (t_{500} ou t_{50}), à partir du moment où on soulève le cône pour que la galette de béton atteigne un diamètre de 500 mm. Pour un même étalement final, plus la pâte sera visqueuse, plus le béton mettra de temps à s'étaler et plus la valeur t_{500} sera élevée. On s'attend donc à ce que cette valeur soit reliée à la viscosité du béton (Sedran, 1999 ; Emborg, 1999). Ce qui fournit une indication sur le caractère visqueux du matériau. Suivant le t_{500} obtenu, deux classes de BAP sont définies (NF EN206-9, 10) :

- Classe vs1 : temps d'étalement < 2 secondes ;
- Classe vs2 : temps d'étalement ≥ 2 secondes.

4.1.3 Essai de la boîte en L (L-box Test)

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. La partie verticale de la boîte est entièrement remplie de béton (le volume nécessaire est d'environ 13 litres), (Figure II.4). Après arasement, on laisse 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 ferrailage. La distance libre entre les barres est de 39 mm.



Figure II.4. Méthode de essai boîte e L

Le mode opératoire est décrit d'après l'AFGC (AFGC,2008) comme suit :

- Poser la boîte en L sur une surface plane et vérifier son horizontalité à l'aide du niveau à bulle ;
- Nettoyer la boîte en L et l'humidifier immédiatement avant d'effectuer les essais, tout en la préservant d'une humidité excessive ;
- Fermer la trappe entre les parties verticale et horizontale ;
- Déverser le béton, contenu dans le récipient, dans partie verticale de la boîte en L, sans aucune agitation ou aucun compactage mécanique ;
- Araser le sommet de la boîte en L de sorte que le niveau de béton corresponde au sommet de la partie verticale de la boîte en L, puis laisser reposer pendant (60 ± 10) s. vérifier les signes de ségrégation avant et après le remplissage de la boîte en L ;
- Ouvrir complètement la trappe coulissante en une action souple et continue pour permettre au béton de s'écouler dans la section horizontale ;
- Mesurer les hauteurs du béton H1 dans la partie horizontale et H2 dans la partie verticale de la boîte en L ;
- Calculer le taux de remplissage PL, à l'aide de l'équation (II.1) :

$$PL = \frac{H1}{H2} \quad \text{(II.1)}$$

Les valeurs recommandées par la norme EN 206-9 (EN 206-9,10) pour l'essai de la boîte en L, varient entre 0,8 et 1 et cela quelque soit la configuration de la boîte en L (2 ou 3 barres).

4.1.4 Essai de stabilité au tamis

Appelé aussi essai de caractérisation de la ségrégation des bétons autoplacants, il vise à qualifier les bétons autoplacants vis-à-vis du risque de ségrégation (figure II.5). Il peut être utilisé en phase d'étude de formulation d'un béton autoplacant en laboratoire, ou pour le contrôle de réception 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. Il consiste à évaluer le pourcentage en masse de laitance (P_{laitance}) d'un échantillon de béton ($4,8 \pm 0,2$ kg) passant à travers un tamis de 5 mm. Les critères d'acceptabilité d'une formulation d'un béton autoplacant sont divisés en deux classes :

- Classe SR1 ≤ 20 %,
- Classe SR2 ≤ 15 %.



Figure II.5. Essai de stabilité au tamis

L'essai est réalisé comme suit :

- Placer (10 ± 5) litres de béton dans un seau et recouvrir ce dernier pour prévoir toute évaporation ;
- Laisser reposer pendant ($15 \pm 0,5$) minutes ;
- Placer le fond de tamis sur la balance et consigner sa masse, m_p en grammes ;
- Placer ensuite le tamis sec sur le récipient et consigner une nouvelle fois la masse ou régler la balance à zéro ;
- Retirer le couvercle du récipient à échantillon et noter si l'eau de ressuage est apparue à la surface du béton ;
- Déverser la masse de béton ($4,8 \pm 0,2$) kg, y compris l'eau de ressuage éventuelle ;
- Consigner la masse réelle du béton en grammes sur le tamis ;
- Le tamis et le fond de tamis se trouvant toujours sur la balance, et la partie supérieure du récipient à échantillon étant à (500 ± 50) mm au-dessus du tamis. Laisser le béton reposer dans le tamis pendant (120 ± 5) s, puis retirer ce dernier verticalement sans aucune agitation. Consigner la masse du fond de tamis, y compris la laitance qui s'est écoulée à travers le tamis, en grammes ;

Le pourcentage de la laitance SR est calculé à partir de l'équation (II.2) suivante :

$$SR = \frac{\text{Masse de laitance}}{\text{Masse l'échantillon}} \times 100\% \quad (\text{II.2})$$

4.1.5 Mesures de la teneur en air occlus

En plus des essais spécifiques à la caractérisation des BAP à l'état frais, un autre essai a été réalisé, afin d'estimer la teneur en air occlus emprisonné au sein du béton en phase frais. L'essai à l'aéromètre a été réalisé sur les BAP selon la norme NF EN 12350-7 (NF EN

123507, 2012). Cet essai est basé sur le principe de la compressibilité et présume que l'air occlus dans le béton est le seul élément à être comprimé. Moins le béton contient d'air occlus et plus ses performances mécaniques et sa durabilité sont élevées. Expérimentalement, la teneur en air est réalisée par la méthode du manomètre avec un aéromètre à béton présenté à (la figure II.6).



Figure II.6. Mesure de la teneur en air occlus du béton par la méthode du manomètre

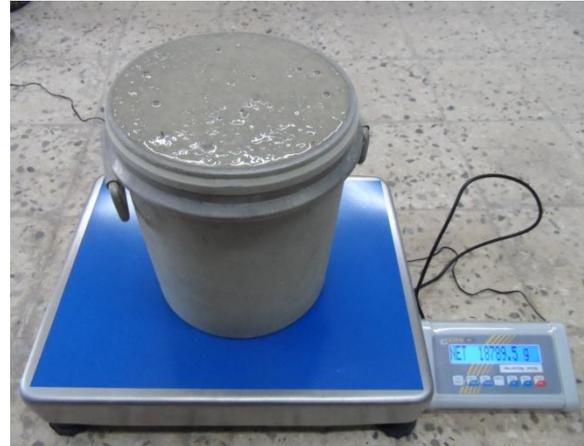


Figure II.7. Mesure de la masse volumique du béton frais

Après l'arrêt du malaxage, un échantillon de BAP d'un volume de 8 litres est versé dans le récipient de l'appareil. Il est constitué de deux éléments, une cuve recevant l'échantillon de béton et un couvercle rigide muni d'un cadran gradué. L'ensemble couvercle-cuve est fixé par un mécanisme étanche et le tout est rempli d'eau. Une pression est ensuite appliquée sur l'échantillon en utilisant une pompe à air intégré au dispositif et installée en partie supérieure du couvercle. Cette pression provoque une baisse du niveau d'eau proportionnelle à la diminution des vides d'air. La valeur lue sur le manomètre du cadran correspond au pourcentage apparent d'air.

4.1.6 Mesures de la masse volumique sur béton frais

Les mesures de masses volumiques réelles ont été réalisées suivant la norme NF EN 12350-6 (NF EN 12350-6, 2012). Cette caractéristique permet de vérifier le rendement volumétrique de la formulation en la comparant à celle obtenue théoriquement. L'essai a été réalisé dans la cuve de l'aéromètre dont la capacité volumique est importante (8 litres) de telle sorte que l'échantillon soit représentatif de l'ensemble du matériau (figure II.7), Aucune vibration ou piquage n'a été appliqué pour la mise en œuvre des BAP dans le récipient. Après pesage de la cuve, vide et remplie, la différence des deux pesées divisées par le volume du contenant nous

donne la masse volumique des BAP exprimée en kg/m^3 et qui doit être plus ou moins égale à la masse volumique théorique.

4.2. Essai sur BAP à l'état durci

4.2.1 Résistances à la compression

Les essais de résistance à la compression ont été effectués sur des éprouvettes cubiques de $10 \times 10 \times 10$ cm, à l'aide d'une presse hydraulique de capacité de 2000 KN (Figure II.8), au laboratoire de génie civil de l'université d'Annaba. L'éprouvette est placée et centrée entre les deux plateaux de la presse puis chargée progressivement jusqu'à la rupture. La résistance est déterminée aux échéances de 2,7 et 28 jours. La résistance à la compression correspond à la contrainte moyenne d'écrasement de trois éprouvettes à chaque âge d'essai.



Figure II.8. Essai de compression

5. CONCLUSION

Ce chapitre a permis de présenter les caractéristiques des différentes matières premières qui entrent dans la composition des BAP développés dans cette étude et plus particulièrement les granulats recyclés issus des bétons de démolitions. L'introduction de ces granulats recyclés dans la composition des BAP peut changer de façon significative le comportement des BAP à l'état frais (propriétés rhéologiques) et à l'état durci (propriétés mécanique et durabilité).

De plus, on a passé en revue les différentes méthodes expérimentales permettant la détermination des différents propriétés rhéologiques et mécaniques issues de la substitution des granulats naturels par les granulats recyclés.

CHAPITRE III

RÉSULTATS ET DISCUSSION

CHAPITRE III

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

Ce chapitre est consacré à l'étude de l'influence des granulats de béton recyclé en substitution des granulats naturels sur le comportement des BAP à l'état frais et à l'état durci. Pour cela plusieurs taux de substitution volumiques ont été étudiés de 25, 50, 75 et 100 %.

Sommaire

1. INTRODUCTION	50
2. CINÉTIQUE D'ABSORPTION DES GRANULATS RECYCLÉS : MÉTHODE DE PYCNOMETRE (EN 1097-6) FRACTION (4/10)	50
3. CARACTÉRISATION À L'ÉTAT FRAIS	51
3.1. L'étalement au cône d'Abrams.....	51
3.2. Temps d'étalement (T_{500})	52
3.3. Écoulement à la Boîte en L	53
3.4. Stabilité au tamis	54
3.5. Mesures de la masse volumique sur béton frais	55
3.6. Mesures de la teneur en air occlus	55
4. CARACTÉRISATION À L'ÉTAT DURCI	56
5. CONCLUSION	57

Chapitre III Résultats et discussions

1. INTRODUCTION

Dans ce chapitre, on présente les résultats obtenus sur les BAP à base de granulats recyclés à l'état frais et durci. Dans l'état frais on a traité les caractéristiques de mobilité dans le milieu confiné et non confiné, le temps d'écoulement (viscosité), la stabilité, la masse volumique, l'air occlus. Et à l'état durci on a traité la résistance mécanique à la compression.

2. CINÉTIQUE D'ABSORPTION DES GRANULATS RECYCLÉS : METHODE DE PYCNOMETRE (EN 1097-6) FRACTION (4/10)

L'étude de la cinétique d'absorption d'eau des granulats recyclés permet de déterminer l'évolution de l'absorption d'eau des granulats depuis l'état initial sec jusqu'à l'état final saturé avec la méthode de pycnomètre. Les résultats obtenus sont présentés dans la figure III.1.

D'après ces résultats on constate que le coefficient d'absorption des granulats de béton recyclé augmente proportionnellement avec le temps. Néanmoins, on remarque qu'au-delà de 20 minutes d'immersion, l'évolution de l'absorption est faible et tend à se stabiliser. En effet, l'absorption à 20 minutes est estimée à 4,38% tandis que celle à 24 et 48 heures sont respectivement de 4,9% et 5%.

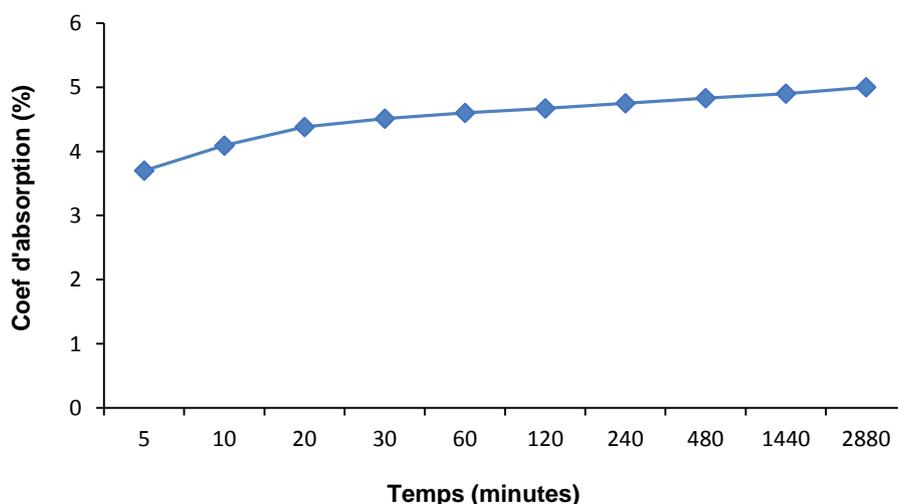


Figure III.1. Cinétique d'absorption des granulats recyclés

3. CARACTERISATION A L'ETAT FRAIS

Les propriétés générales d'un béton autoplaçant à l'état frais sont la fluidité et l'homogénéité. Ces propriétés sont étudiées sur plusieurs aspects.

3.1 L'étalement au cône d'Abrams

Afin d'identifier l'effet de la substitution des granulats naturels par des granulats de béton recyclé sur l'étalement des BAP, un essai d'étalement au cône d'Abrams a été réalisé et les résultats obtenus sont présentés dans la Figure III.2.

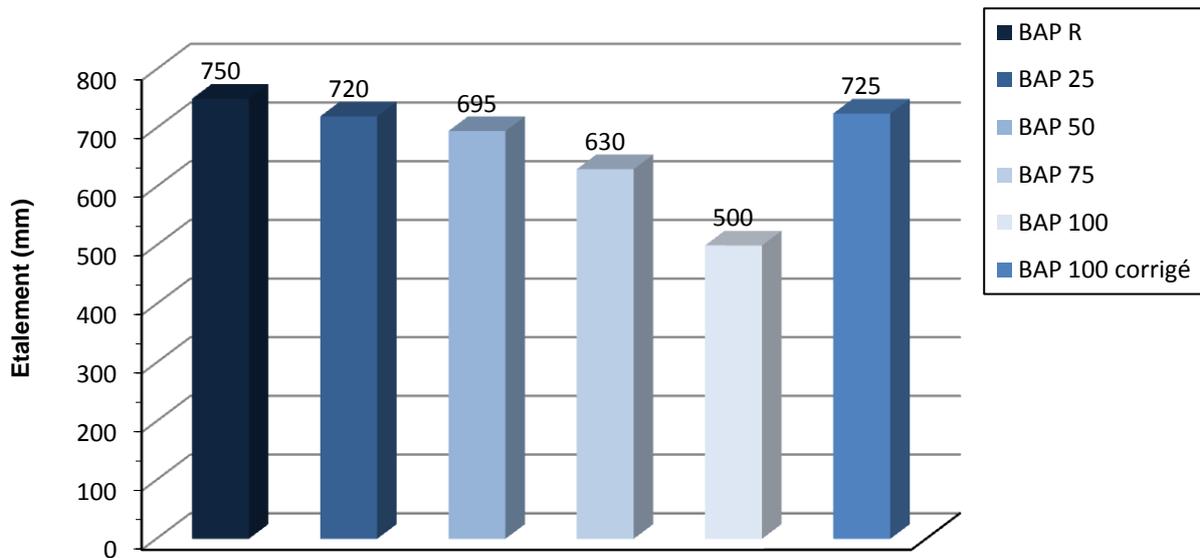


Figure III.2. Influence du taux de substitution en granulats recyclé sur l'étalement

Le BAP de référence (BAP R) présente un bon étalement qui s'inscrit dans le domaine des valeurs normalisées des BAP et qui est supérieur aux autres BAP à base de granulats recyclé. On constate d'après la figure III.2 que la substitution des granulats naturels par des granulats recyclé réduit l'étalement des BAP par rapport au BAP R et cela proportionnellement au taux de substitution. Cependant, pour des taux jusqu'à 75 % de substitution, la perte de la fluidité reste acceptable puisque le BAP 75 enregistre un étalement de 630 mm ce qui est d'après les normes, un étalement appréciable pour un BAP. Néanmoins, au-delà de 75 %, une chute remarquable de l'étalement est constaté pour une substitution totale. En effet, pour un taux de 100 % enregistre une diminution de l'étalement de 33 % ce qui rend la mise en œuvre du BAP très difficile.

La diminution de l'étalement en fonction de l'augmentation du taux de substitution des granulats naturel par des granulats recyclé est dû à l'absorption d'eau plus élevée en raison de la porosité qui est plus élevée dans les granulats recyclé (Khodair et Bommareddy, 2017).

Le BAP 100 se caractérise par un faible étalement, étant donné la quantité importante en granulats recyclés, il est clair qu'une quantité d'eau importante servant à la fluidification du béton a été absorbée par le volume important des granulats recyclés ce qui conduit à un faible étalement. Si on rajoute à la quantité d'eau efficace la quantité d'eau absorbée par les granulats recyclés il est probable d'améliorer la fluidité du BAP 100. En effet, en se basant sur la cinétique d'absorption des granulats recyclés (Figure III.1), le taux d'absorption à 20 minutes semble être un bon compromis. Afin de corriger le BAP 100, on rajoute à la quantité d'eau efficace la quantité d'eau absorbée par les granulats au bout de 20 minutes.

D'après les résultats de la figure III.2, le BAP 100 corrigé à un étalement de 725 mm on constate ainsi, une amélioration de l'étalement du BAP 100 corrigé par rapport au BAP 100 (non corrigé) estimé à 45 %.

3.2 Temps d'étalement (T_{500})

Le temps T_{500} est réalisé conjointement avec l'essai d'étalement, il correspond au temps que met la galette de béton pour atteindre un étalement de 500mm, il nous renseigne sur la vitesse de déformation du béton. La figure III.3 représente l'évolution du T_{500} en fonction du taux de substitution des granulats recyclés.

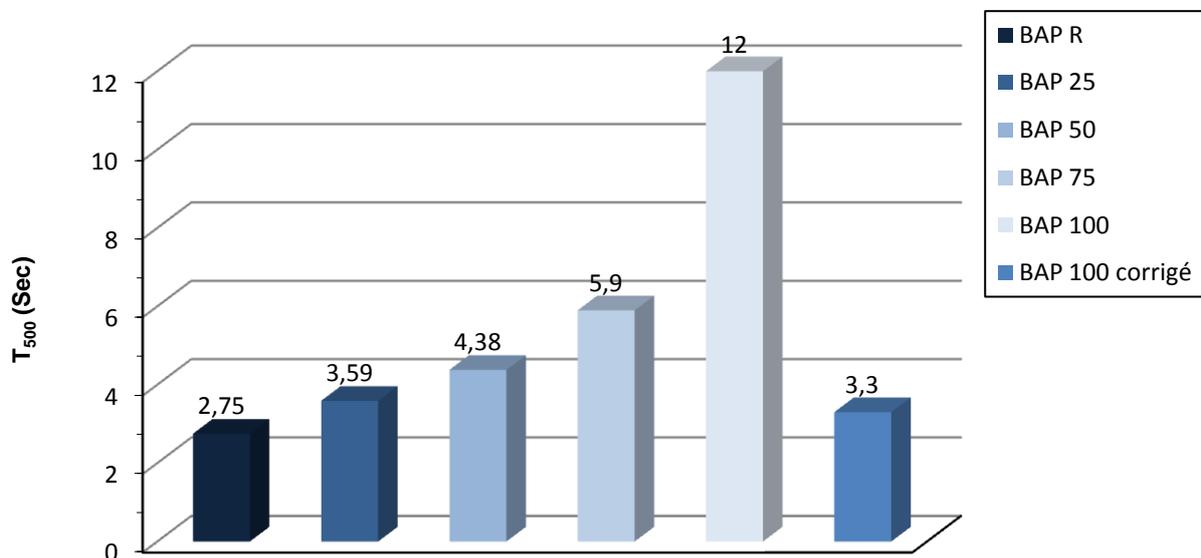


Figure III.3. Influence du taux de substitution en granulats recyclés sur le T_{500}

On constate d'après la figure III.3 que l'ensemble des BAP ont satisfait au critère de T_{500} mm selon (EFNARC, 2005) pour des valeurs inférieures à 7 s, à l'exception du BAP 100. L'augmentation du taux de substitution des granulats naturels par des granulats de béton recyclés conduit à une augmentation du temps d'étalement et par la même occasion, une

augmentation de la viscosité apparente des BAP. Cette augmentation est proportionnelle à l'augmentation du taux de substitution. Cependant, pour un taux de substitution de 100 %, le BAP 100 devient trop visqueux ce qui ralentit sa déformabilité et enregistre un temps d'étalement très important.

Le BAP 100 corrigé de la même manière que celle déjà présenté au paragraphe précédent, montre une diminution importante du temps d'étalement estimé à 72,5 % ce qui classifie le BAP 100 corrigé de recevable selon la norme (EFNARC, 2005).

3.3 Ecoulement à la Boite en L

La fluidité pour un béton autoplaçant n'est pas la seule condition à vérifier, en effet, un BAP doit pouvoir passer à travers un ferrailage plus ou moins dense sous l'effet unique de son propre poids. Afin de caractériser la capacité de passage, un essai à la boite en L avec une configuration à trois barres a été appliqué à l'ensemble des mélanges. Les résultats obtenus sont présentés sur la figure III.4.

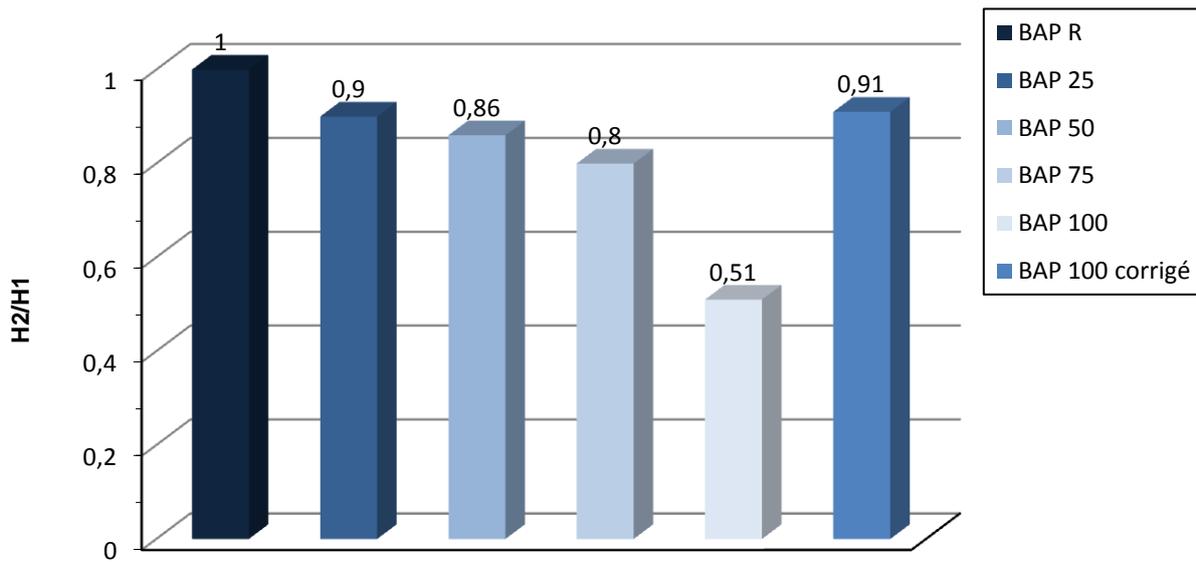


Figure III.4. Influence du taux de substitution en granulats recyclé sur l'écoulement à la boite en L

La capacité de passage à la boite en L des différents mélanges est présentée sur la figure III.4, la majorité des BAP ont un taux de remplissage supérieur ou égal à 0,8 à l'exception du BAP 100 qui enregistre un taux de 0,51. En effet, ce béton a montré des signes de blocage en amont des barres stoppant ainsi le passage du béton. Plus le taux de substitution augmente et plus la mobilité des BAP est réduite. En effet, Revilla-Cuesta et al. (Revilla-Cuesta et al., 2020) rapportent une étude bibliographique sur les bétons autoplaçants fabriqués avec des granulats de béton recyclé. Les auteurs expliquent qu'un rapport E/C plus élevé devrait entraîner une

plus grande fluidité. Cependant, des quantités croissantes d'eau sont nécessaires, en raison de l'absorption de l'eau la plus élevée des granulats de béton recyclé en comparaison avec les granulats naturels ce qui peut entraîner une faible fluidité et une capacité de remplissage inférieure lors du teste de la boîte en L.

Une fois corrigé, le BAP 100 présente une nette amélioration de la capacité de remplissage de la boîte en L estimée à 78 %, la quantité d'eau qui a servit à la correction à amélioré considérablement la fluidité du mélange ce qui a permis une meilleure mobilité du BAP.

3.4 Stabilité au tamis

Les résultats de la stabilité au tamis sont présentés sur la figure III.5.

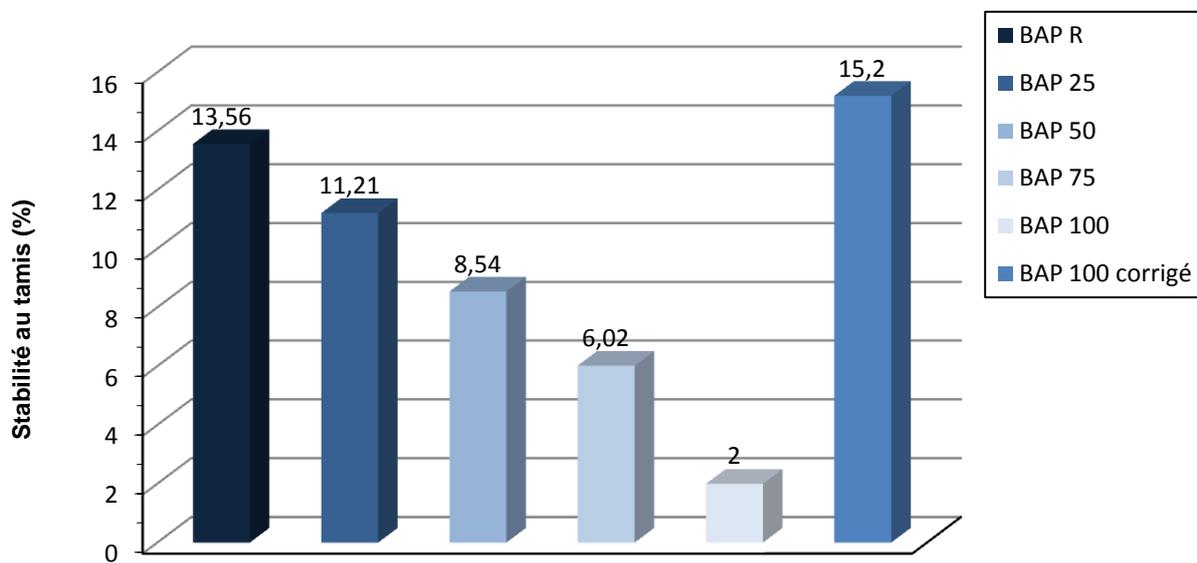


Figure III.5. Influence du taux de substitution en granulats recyclé sur la stabilité au tamis

La stabilité au tamis d'un BAP représente la quantité de laitance dans le béton. D'après la figure III.5 on constate que la substitution des granulats naturels par des granulats de béton recyclé réduit la stabilité au tamis des BAP, autrement dit, elle réduit la quantité de laitance contenue dans ces bétons. Cette diminution de la laitance est proportionnelle au taux de substitution. Néanmoins, tous les BAP enregistrent des valeurs qui s'inscrivent dans les limites des normes (inférieure à 15 %).

La diminution de la stabilité en fonction de l'augmentation du taux de substitution s'explique par l'augmentation de la viscosité des BAP. En effet, pour une quantité d'eau fixe, les granulats de béton recyclé absorbent une quantité d'eau plus importante que celle absorbée par les granulats naturels, de ce fait, le BAP devient de plus en plus visqueux. Plus le taux de substitution augmente et plus le béton devient plus visqueux jusqu'à atteindre une stabilité au

tamis critique, ce qui a été constaté pour le BAP 100 avec une stabilité de 2 %. Ceci peut d'ailleurs conduire à une qualité de parement assez mauvaise (Cussigh *et al.*, 2003).

Le BAP 100 corrigé enregistre un pourcentage de laitance de 15,2 % ce qui est acceptable en vue des normes en vigueur. La quantité d'eau qui a servi à la correction a réduit la viscosité du mélange et a amélioré la stabilité du BAP.

3.5 Mesures de la masse volumique sur béton frais

La figure III.6 présente la masse volumique réelle des BAP de notre étude.

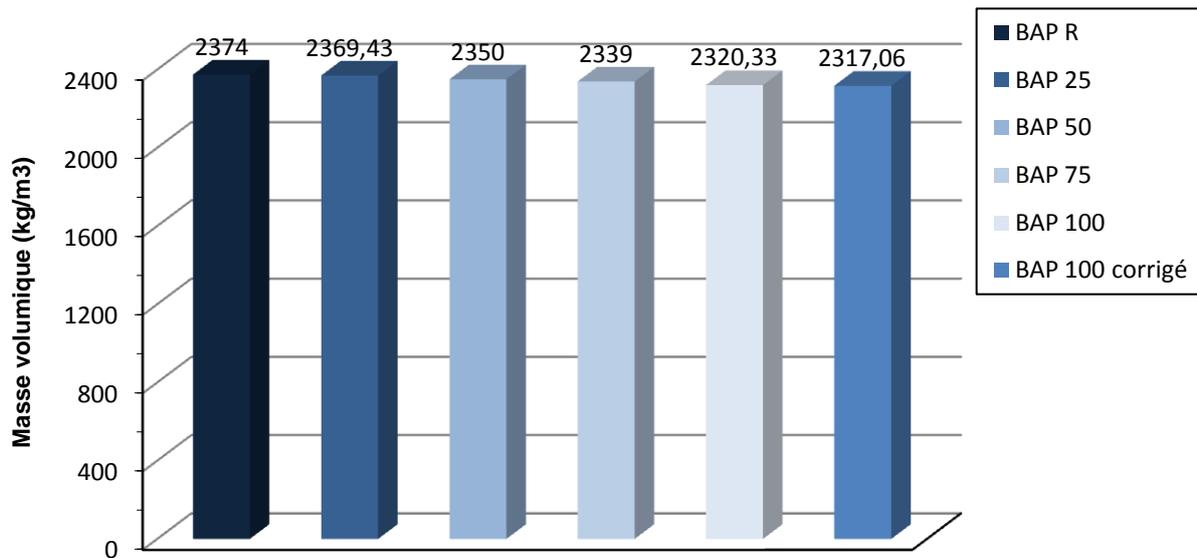


Figure III.6. Influence du taux de substitution en granulats recyclé sur la masse volumique réelle du béton

D'une manière générale, la substitution des granulats naturels par des granulats de béton recyclé affecte très sensiblement la masse volumique des BAP, une très légère variation des masses volumiques est constatée. Néanmoins, la diminution des masses volumiques en fonction de l'augmentation des taux de substitutions peut être expliquée par le fait que la masse volumique absolue des granulats de béton recyclé est plus faible que celles des granulats naturels (voir Tableau II.7). Par conséquent, plus la quantité des granulats de béton recyclé augmente et plus la masse volumique du béton diminue.

3.6 Mesures de la teneur en air occlus

La figure III.7 présente les valeurs de l'air occlus des BAP de notre étude.

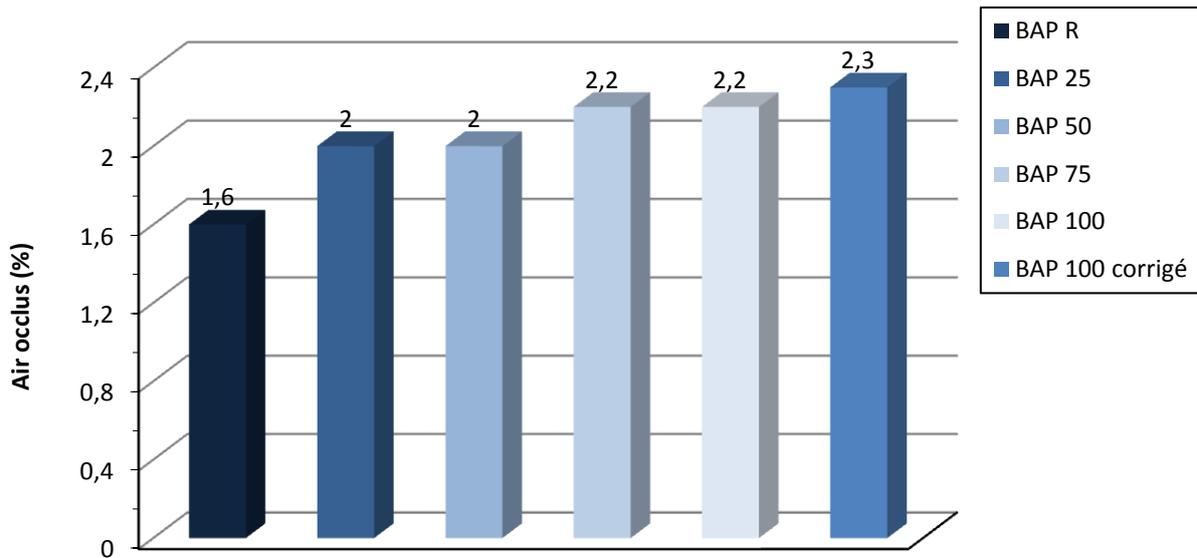


Figure III.7. Influence du taux de substitution en granulats recyclé sur la teneur en air occlus
D'après la figure III.7 on constate une augmentation de la teneur en air occlus des BAP en fonction de l'augmentation de la substitution des granulats naturels par les granulats de béton recyclé. Cette augmentation de la teneur en air occlus est principalement due à la morphologie des granulats de béton recyclé. En effet, ces granulats se caractérisent par une porosité plus importante que celles des granulats naturels liée à la présence du vieux mortier qui reste collé au granulat.

Le BAP 100 corrigé enregistre la plus grande teneur en air occlus, liée d'un coté à la porosité importante des granulas recyclé et d'un autre coté à la quantité d'eau supplémentaire qui a été rajouté au mélange pour la correction, rappelant que cette eau est destiné à l'humidification des granulats de béton recyclé et qui va crée par la suite une porosité additionnelle.

4. CARACTÉRISATION À L'ÉTAT DURCI

Le comportement à l'état durci se rapporte essentiellement aux résistances à la compressions à 2, 7 et 28 jours. La figure III.8 présente la résistance mécanique à la compression des BAP aux différentes échéances.

D'après la figure on constate une diminution des résistances mécaniques en fonction de l'augmentation des taux de substitution des granulats naturels par les granulats de béton recyclé et cela pour les différentes échéances.

Cela pourrait être attribué d'après Mohammed et Najim (Mohammed et Najim, 2020) à la faible résistance des granulats de béton recyclé par rapport aux granulats naturels en plus de la liaison entre la surface du granulats recyclé et le nouveau mortier c'est-à-dire une zone de

transition plus faible par rapport au granulats standard. Il peut s'agir de points d'amorçage de défauts et de fissures qui accélèrent la distribution des fissures dans la nouvelle zone de transition, puis dans le corps en béton.

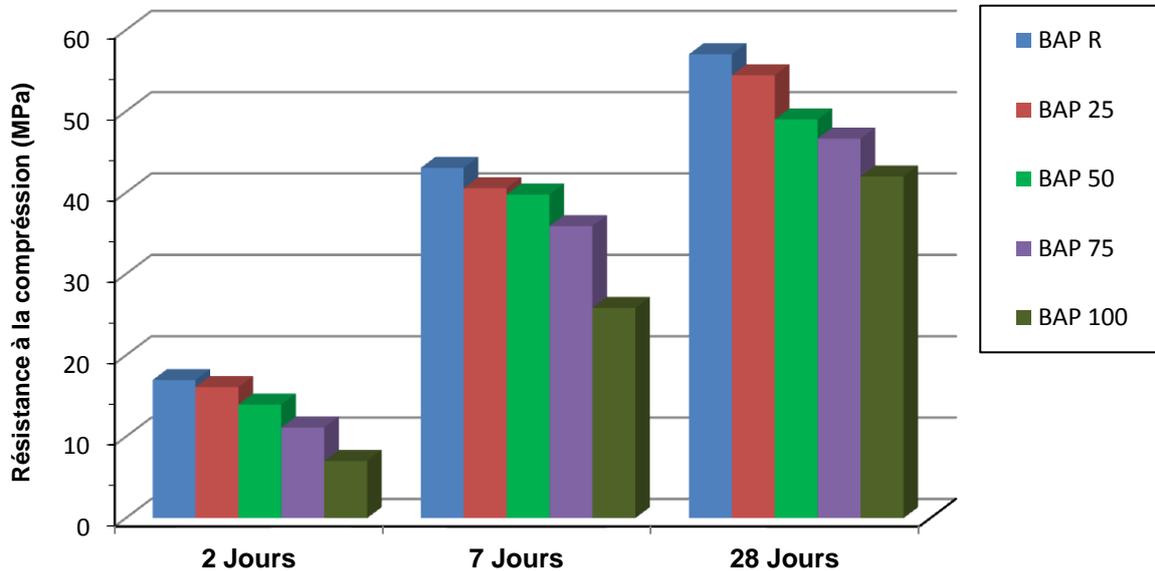


Figure III.8. Influence du taux de substitution en granulats recyclé sur les résistances mécaniques en compression

5.CONCLUSION

D'après les résultats obtenus au cours de cette étude, nous pouvons conclure que :

- La substitution des granulats naturels par des granulats recyclé réduit l'étalement des BAP par rapport au BAP de référence et cela proportionnellement au taux de substitution. De plus, l'augmentation du taux de substitution conduit à une augmentation du temps d'étalement et par la même occasion, une augmentation de la viscosité apparente des BAP ;
- La substitution des granulats naturels par des granulats recyclé réduit la capacité de remplissage des BAP en milieu confiné et en présence d'obstacles ;
- La substitution des granulats naturels par des granulats de béton recyclé réduit la stabilité au tamis des BAP, et peut entraîner pour un taux de 100 %, une mauvaise qualité de parement ;
- L'augmentation de la substitution des granulats naturels par les granulats de béton recyclé entraîne une augmentation de la teneur en air occlus des BAP ;

- L'augmentation des taux de substitution des granulats naturels par les granulats de béton recyclé engendre une diminution des résistances mécaniques pour les différentes échéances.

Pour conclure, il est parfaitement faisable de fabriquer un béton autoplaçant qui respecte l'ensemble des critères d'autoplaçance avec des granulats de béton recyclé en substitution des granulats naturels traditionnellement utilisés dans les bétons. Et cela même pour une substitution totale de 100 % à condition d'effectuer une correction sur le dosage en eau.

CONCLUSION GÉNÉRALE

CONCLUSION GÉNÉRALE

L'apport de cette étude permet de confirmer la possibilité de valorisation des granulats recyclés comme remplacement des granulats naturels. Étant donné que les granulats recyclés sont des granulats poreux et ont généralement une cinétique d'absorption d'eau rapide. On peut éliminer cet effet par la saturation avant le bétonnage. La présence de l'ancien mortier à la surface des particules des GR est aléatoire et inévitable et il faut la considérer comme une caractéristique intrinsèque du matériau.

Notre étude a pour objectif la formulation d'un béton autoplaçant à base de granulats recyclés en substituant graduellement les GN par les GR. Plusieurs formulations de béton autoplaçant avec différents taux de substitution des GN par les GR ont été étudiées à l'état frais pour estimer les propriétés autoplaçantes : étalement, stabilité au tamis et pouvoir de remplissage dans la boîte en L et à l'état durci pour estimer la résistance à la compression.

- Par rapport au BAP de référence, le remplacement du granulat naturel par du granulat recyclé réduit l'étalement du BAP, qui est proportionnelle au taux de remplacement. De plus, l'augmentation du taux de substitution entraîne une augmentation du temps d'étalement, et en même temps la viscosité apparente du BAP augmente
- Le remplacement des granulats naturels par des granulats recyclés réduit la capacité de remplissage du BAP dans les environnements restreints et les obstacles;
- Le changement des granulats naturels par des granulats de béton recyclé réduit la stabilité au tamis des BAP, et peut entraîner pour un taux de 100 %, une mauvaise qualité de parement ;
- L'augmentation de la substitution des granulats naturels par les granulats de béton recyclé entraîne une augmentation de la teneur en air occlus des BAP ;
- L'augmentation des taux de substitution des granulats naturels par les granulats de béton recyclé engendre une diminution des résistances mécaniques pour les différentes échéances.

Pour conclure, il est parfaitement faisable de fabriquer un béton autoplaçant qui respecte l'ensemble des critères d'autoplaçance avec des granulats de béton recyclé en substitution des granulats naturels traditionnellement utilisés dans les bétons. Et cela même pour une substitution totale de 100 % à condition d'effectuer une correction sur le dosage en eau.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

A

Achoura . D. cour bétons innovants, département génie civil , université badji moukhtar annaba , 2021.

AFGC. (2008). Association française de Génie Civil, Recommandations provisoires pour l'emploi des Bétons Autoplaçants, Paris, 2ème édition, AFGC, 64 p.

Ali-Boucetta .T. Contribution du laitier granulé et de la poudre de verre sur les propriétés d'écoulement et de durabilité des bétons autoplaçants et de hautes performances , département génie civil , université badji moukhtar annaba ,2014 .

Ali-Boucetta .T. cours mdc2 , département génie civil , université badji moukhtar annaba , 2020.

B

Benhoua M., Nezerghi B. Et Boudraa S. Valorisation des granulats recyclés dans la formulation d'un béton autoplaçant", SBEIDCO – 1st International Conférence of Sustainable Built Environment Infrastructure in Developing Countries ENSET Oran (Algeria), Octobre 12-14, 2009, pp.295-301.

Berredjem . L . Les matériaux de démolition une source de granulats pour béton: formulation et caractérisation d'un béton à base de ces recyclés , université badji moukhtar annaba , 2009.

Brahim Nécira. ÉTUDE DES PROPRIÉTÉS RHÉOLOGIQUES ET MÉCANIQUES DES BÉTONS AUTOPLAÇANTS,2006.

C

CHAKRADHARAR M., BHATTACHARYYA, S. K. et BARAI, S. V. (2011)."Influence of field recycled coarse aggregate on properties of concrete. "Materials and Structures/ Matériaux et Constructions, volume 44, numéro 1, p. 205-220.cité par Boulay-vincent-MScA-2014.

CUSSIGH, F., SONEBI, M. et DE SCHUTTER, G. (2003). Project testing SCC-segregation test method, Proceedings of 3rd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Reykjavik, Island, p.311-322.

D

De Juan M.S. and Gutiérrez P.A. Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate, *Construction and Building Materials*, 23 (2), pp. 872- 877, 200.

E

EFNARC, Specification and guidelines for self-compacting concrete, Association House, Farnham, U.K., 2005, p. 68.

EN XP P 18-540 . Granulats pour bétons hydrauliques , 1997.

G

Grdic Z.J., A. Toplicic-Curcic G., Despotovic I.M. And Ristic N.S. Properties of self compacting concrete prepared with coarse recycled concrete aggregate , *Construction and Building Materials*," 2010, Vol. 24, pp.1129-1133.

H

HERIHIRI Ouided . Formulation et caractérisation des bétons légers , département Génie Civil université Biskra , 2010.

K

Khodair, Y., & Bommareddy, B. Self-consolidating concrete using recycled concrete aggregate and high volume of fly ash, and slag. *Construction and Building Materials*, 153, 307-16. (2017).

Kou S.-C., Poon C.-S. and Etxeberria M. Influence of recycled aggregates on long term mechanical properties and pore size distribution of concrete, *Cement and Concrete Composites*, 2011, Vol. 33, pp. 286-291.

M

M. Arnauld et M. Virlogeux . livre «Granulats et béton légers» Presses de l'école nationale des Ponts et chaussées , 1986.

Mohammed, S. I., & Najim, K. B. (2020, February). Mechanical strength, flexural behavior and fracture energy of Recycled Concrete Aggregate self-compacting concrete. In *Structures*(Vol. 23, pp. 34-43). Elsevier.

N

NF EN 12350-11. Essai pour béton frais - Partie 11 : béton autoplaçant - Essai de stabilité au tamis, 2010.

NF EN 12350-6. (2012). Essai pour béton frais - Partie 6 : masse volumique.

NF EN 12350-7. (2012). Essais pour béton frais - Partie 7 : teneur en air - Méthode de la compressibilité.

NF EN 12350-8. Essai pour béton frais - Partie 8 : béton autoplaçant - Essai d'étalement au cône d'Abrams,2010.

NF EN 12390-3. (2012). Essais pour béton durci - Partie 3 : résistance à la compression des éprouvettes.

NF EN 197-1 . Ciment - Partie 1 : composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants,2012.

NF EN 206-1. (2012). Béton – Partie 1 : Spécification, performances, production et conformité.

NF EN 206-9. (2010). Béton – Partie 9 : Règles complémentaires pour le béton autoplaçant.

NF X 11-501 , 1992.

P

Padmini A.K., Ramamurthy K. and Mathews M.S. Influence of parent concrete on the properties of recycled aggregate concrete, *Construction and Building Materials*, 23 (2), pp. 829-836, 2009.

PELLERIN. F. le recyclage des bétons : une nouvelle approche pour les granulats de fondation routière , projet de fin d'études département de génie géologique et de géologie ,université laval , 1997

Philippe TURCRY . Retrait et fissuration des bétons autoplaçants- influence de la formulation, thèse doctorat l'école centrale de Nantes,2004.

R

Rao A., Jha K.N. Misra S. Use of aggregates from recycled construction and demolition waste in concrete, *Resource conservation and Recycling* (2007), pp 71-81 doi :10.1016/j.resconrec.2006.05.010

Revilla-Cuesta, V., Skaf, M., Faleschini, F., Manso, J. M., & Ortega-López, V. (2020). Self-compacting concrete manufactured with recycled concrete aggregate: An overview. *Journal of Cleaner Production*, 262, 121362.

S

Sánchez et Al . (2004)., Houari H. (2014) . Grondin .A (2011) . Valorisation des granulats recyclés de béton : étude des caractéristiques physiques et mécaniques des bétons de granulats recyclés de béton. Mémoire présenté à IUT Robert Schuman .

Sandrine Bethmont. mécanismes de ségrégation dans les bétons autoplaçants (BAP), thèse doctorat de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 2005.

T

Tam V.W.Y., Wang K. and Tam C.M. "Assessing relationships among properties of demolished concrete, recycled aggregate and recycled aggregate concrete using regression analysis", *Journal of Hazardous Materials*, 152 (2), pp. 703-714, 2008.

V

Vinh-An Le. Comportement des bétons autoplaçants par temps chaud, département génie civil , thèse doctorat , université toulouse 3 paul sabatier ,2014 .

Site

www.guidebeton.com . Site officiel de guide béton consulté ,2021

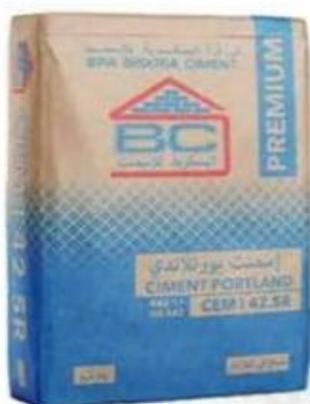
www.indiaitaly.com . site officiel de chambre de commerce indo-italy , 2008

ANNEXES

Annexe - A : Fiche technique du ciment



SPA BISKRIA CIMENT



FICHE TECHNIQUE

CEM I 42.5R

CIMENT PORTLAND

CEM I 42.5R Ciment portland, pour les bétons hautes performances et a une résistance rapide à court terme, destiné aux domaines où les délais de décoffrage sont courts, il est recommandé particulièrement pour le bétonnage par temps froid

CEM I 42.5R :
Conforme à la norme Algérienne (NA442-2013)

DOMAINES D'APPLICATION

Un ciment pour tous vos travaux de constructions de haute résistance a jeune âge, il est aussi recommandé pour les utilisations suivantes :

- Produits en bétons qui demandent un durcissement rapide.
- Le bétonnage dans des coffrages coulissant, surtout en période hivernale.
- Béton résistant au gel en présence de sels de déverglaçage.
- Tabliers de ponts.
- Béton pompé.
- Béton projeté



✓ APPLICATIONS RECOMMANDÉES

- Béton armé à haute résistance.
- Béton autoplaçant.

🪣 FORMULATION CONSEILLÉE

	ciment 	Sable (sec) 0/5 	Gravillons ^(sec) 8/15mm 15/25mm 	Eau (litre)
Dosage pour béton	50k X1 	+ X7 	+ X5  + X4 	+ 2
	ciment 	Sable Correcteur 0/1mm 	Sable (sec) 0/4mm 	Eau (litre)
Mortier de briquetage	50k X1 	+ X6 	+ X9 	+ 3
Mortier de finitions	50k X1 	+ X9 	+ X6 	+ 3

Remarque: un bidon

🔍 CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES

Analyses chimiques (%)	valeur
Perte au feu	2.6 – 3.7
Teneur en sulfates (SO ₃)	2.2 – 2.8
Teneur en Oxyde de Magnésium (MgO)	1.7 – 2.8
Teneur en Chlorures (Cl ⁻)	0.03 – 0.07
Composition Potentielle du Clinker (Selon Bogue) (%)	valeur
C ₃ S	56 – 66
C ₂ A	5.1 – 7.2
Propriétés physiques	valeur
Consistance normale (%)	25.8 – 26.4
Expansion à chaud (mm)	0.25 – 1.0
Temps de prise (min)	valeur
Début de prise	150 – 190
Fin de prise	220 – 250
Résistance à la compression	valeur
2 jours (MPa)	20 – 29
28 jours (MPa)	42.5 – 52.5



SPA BISKRIA CIMENT
Adresse : Djar Belahrache
Branis , Biskra Algerie

Tel : +213 (0) 560 753 424
Fax : +213 (0) 33 62 73 92
contact@biskriaciment-dz.com
www.biskriaciment-dz.com

Annexe - B : Fiche technique du superplastifiant

Notice technique
Edition Octobre, 2013
Version 01,2013
POLYFLOW® LSR 8800



POLYFLOW® LSR 8800

Superplastifiant/Haut Réducteur d'eau polyvalent pour bétons prêts à l'emploi.

Conforme à la norme NF EN 934.2 tab. 1.3.1 3.2

Présentation

POLYFLOW® LSR 8800 est un superplastifiant/haut réducteur d'eau polyvalent de nouvelle génération non chloré à base de polycarboxylate. POLYFLOW® LSR 8800 ne présente pas d'effet retardateur.

Domaines d'application

POLYFLOW® LSR 8800 permet d'obtenir des bétons de très haute qualité

- ☞ POLYFLOW® LSR 8800 permet la fabrication de bétons plastiques à auto plaçants transportés sur de longues distances et pompés.
- ☞ Dans les bétons auto plaçants, POLYFLOW® LSR 8800 améliore la stabilité, limite la ségrégation du béton et rend les formules moins susceptibles aux variations d'eau et des constituants.
- ☞ POLYFLOW® LSR 8800 permet de réduire significativement le rapport E/C ce qui améliore la durabilité du béton durci (diminution de la perméabilité, augmentation des résistances mécaniques, diminution du retrait).

Caractères généraux

POLYFLOW® LSR 8800 est un superplastifiant puissant qui confère aux bétons les propriétés suivantes :

- ☞ Longue rhéologie (>3h),
- ☞ Robustesse à la ségrégation,
- ☞ Qualité de parement.

Caractéristiques

Aspect

Liquide brun clair

Condit

- ☞ Fûts de 220 kg
- ☞ Conteneur perdu de 1100 kg
- ☞ Vrac

Construction



Construction

Stockage	Dans un local fermé, à l'abri de l'ensoleillement direct et du gel, entre 5 et 30 °C. POLYFLOW® LSR 8800 peut geler, mais, une fois dégelé lentement et réhomogénéisé, il retrouve ses qualités d'origine. En cas de gel prolongé et intense, vérifier qu'il n'a pas été déstabilisé.
Conservation	1 an en emballage intact
Données techniques	
densité	1,07 ± 0,02
pH	5 à 5.5
Teneur en ions Cl-	≤ 0,1%
Teneur en Na ₂ O éq.	≤ 1%
Extrait sec	29% à 2%
Conditions d'application	
Dosage	Plage d'utilisation recommandée : 0,3 à 3 % du poids du liant ou du ciment selon la fluidité et les performances recherchées. Plage d'utilisation usuelle : 0,4 à 1 % du poids du ciment ou du liant.
Mise en œuvre	POLYFLOW® LSR 8800 est ajouté, soit en même Temps que l'eau de gâchage, soit en différé dans le béton préalablement mouillé avec une fraction de l'eau de gâchage.
Mentions légales	les propriétés énumérées sont seulement à titre de conseils et ne constituent pas une garantie de performance .L'emploi des produits doit être adapté aux conditions spécifiques à chaque situation. Toutes nos fiches techniques sont mises à jour régulièrement, il est de la responsabilité de l'utilisateur d'obtenir la version la plus récente.

SOLU EST ®
Zone Industrielle Sidi Salem
ANNABA 23000-ALGERIE
Tél/Fax : +213(0)38 88 38 01
Tél : 0560 91 53 30 /31 -32
E.mail : solu-est@hotmail.fr
www.soluest-DZ.com