

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR - ANNABA
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY



جامعة باجي مختار – عنابة

Faculté : Sciences de l'ingénierat.....
Département : Génie Civil.....
Domaine : Sciences et Techniques.....
Filière : Génie Civil.....
Spécialité : Matériaux de Génie Civil.....

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème:

Influence de l'effet du vieillissement sur l'écoulement et le comportement mécanique des BAP

Présenté par : *BERREHAIL Ines et KHERICI Sara*

Encadrant : *ARABI Nourredine* Professeur Université Badji Mokhtar Annaba

Jury de Soutenance :

ACHOURA Djamel	Professeur	U. Badji Mokhtar Annaba	Président
ARABI Nourredine	Professeur	U. Badji Mokhtar Annaba	Encadrant
BERREDJEM Layachi	Maître de Conférences/B	U. Badji Mokhtar Annaba	Examineur

Année Universitaire : 2019/2020

REMERCEMENTS

Tout d'abord, nous remercions DIEU qui nous a aidés à accomplir ce modeste travail.

*La première personne que nous voulons remercier est bien notre encadreur monsieur le professeur **ARABI Nourredine** (professeur à l'université d'Annaba), 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 **AMARA HANANE**, 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, au Professeur **Achoura Djamel** et au Docteur **BERREDJEM Layachi**, pour l'honneur qu'ils nous font d'examiner ce travail.*

Nous remercions nos chers parents et familles pour leur encouragements et leurs soutiens.

Enfin, nous n'oublierons pas de remercier tous nos collègues et amis. Demandons à DIEU de leur donner la santé, le bien-être et une longue vie.

Dédicace

*Au nom de dieu le tout-puissant, le tout-compatissant, je dédie ce travail à ma mère, à mon père, à mes frères (ISMAIL et SEIFDDINE), à mon mari (NASREDDINE), à toute la famille BERREHAIL, ainsi que mes amies (NAWAL, MANAL et ASMA) pour leurs encouragements illimités.
Merci à tous.*

BERREHAIL INES - 2020

Dédicace

Dédie ce modeste travail aux êtres qui me sont les plus chers, je cite :

Les parents les plus chers au monde, Papa et Maman, que dieu les garde et Les protège, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études,

A ma chère sœur Sabrina pour son encouragement permanent, et sa soutien moral,

A mes chers frères, Amine et Adem, pour leur appui et leur encouragement,

Mes frères Amine et Adem,

Toutes ma famille surtout ma tante Fairouze et mes amies.

KHERICI SARA -2020

Résumé

Cette étude a pour objectif de voir l'influence de vieillissement sur les propriétés rhéologie des BAP à base de gravier recyclé. Dans ce travail nous avons utilisé les matériaux de démolition, le sable et le gravier issus de ce recyclage et ainsi que les déchets de marbre broyés en tant qu'addition dans la composition.

La démarche de cette étude expérimentale est le remplacement du gravier naturel par 100% de graviers recyclés. Ensuite nous visons à qualifier le rôle apporté par la variation du dosage de super plastifiant et étudier son influence sur la caractérisation des BAP sur deux échéances avant et après déstructuration des BAP. Sur la rhéologie est étudié le temps de vieillissement à l'instant $t=0$ et après 30 et 60 minutes de repos.

Les propriétés étudiées sont pour l'état frais les essais d'étalement au cône, T500, la boîte en L, la stabilité au tamis et la masse volumique ; celles à l'état durci sont la résistance à la compression, l'absorption d'eau et la masse volumique.

Les résultats obtenus font ressortir l'influence évidente de l'apport du superplastifiant sur la fluidité des mélanges ainsi que le temps de vieillissement. La déstructuration du BAP après une structuration pendant 60 minutes garde une thixotropie.

Abstract

The objective of this study is to see the influence of aging on the rheological properties of BAPs made from recycled gravel. In this work we used demolition materials, sand and gravel from this recycling and crushed marble waste as an addition in the composition.

The approach of this experimental study is the replacement of natural gravel by 100% recycled gravel. Then we aim to qualify the role brought by the variation of the superplasticizer dosage and to study its influence on the characterization of BAP on two deadlines before and after BAP destructurement. On rheology, we study the ageing time at time $t=0$ and after 30 and 60 minutes of rest.

The properties studied are for the fresh state the cone spreading tests, T500, L-box, sieve stability and density; those in the hardened state are compressive strength, water absorption and density.

The results obtained show the clear influence of the superplasticizer on the fluidity of the mixtures as well as the ageing time. After a 60-minute structuring period, the BAP retains its thixotropy.

ملخص

الهدف من هذه الدراسة هو معرفة تأثير الشيخوخة على الخصائص الانسيابية للـ BAPs المصنوعة من الحصى المعاد تدويره. في هذا العمل، استخدمنا مواد الهدم والرمل والحصى من عملية إعادة التدوير هذه وكذلك نفايات الرخام المسحوقة كإضافة في التركيب.

نهج هذه الدراسة التجريبية هو استبدال الحصى الطبيعي بالحصى المعاد تدويره بنسبة 100%. ثم نهدف إلى تحديد الدور الذي يوفره تباين جرعة الملدن الفائق ودراسة تأثيره على توصيف BAPs على إطارين زمنيين قبل وبعد تدمير BAPs. يتم استخدام الريولوجيا لدراسة وقت الشيخوخة على الفور $t = 0$ وبعد 30 و 60 دقيقة من الراحة.

الخصائص التي تمت دراستها هي للحالة الجديدة اختبارات انتشار المخروط، L-box، T500، ثبات الغربال وكثافته؛ تلك الموجودة في الحالة الصلبة هي قوة الضغط وامتصاص الماء وكثافته.

أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها التأثير الواضح لمساهمة الملدن المتفوق في سيولة الخلطات وكذلك زمن الشيخوخة. تدمير BAP بعد الهيكلة لمدة 60 دقيقة يحافظ على متغيرة الانسيابية.

Sommaire

Remerciements	
Résumé	
Abstract	
ملخص	
Liste de figures	
Liste de tableaux	
Introduction générale.....	6

CHAPITRE I : Synthèse bibliographique

Partie I : Généralité sur les bétons autoplaçants

I. 1 Introduction.....	9
I.2. Définition	10
I.3. Les constituants du BAP.....	10
I.3.1 Les granulats	11
I.3.2 Pâte.....	11
I.3.2.1. Le ciment.....	12
I.3.2.2. Eau de gâchage.....	12
I.3.2.3 Ajouts minéraux	12
I.3.2.3 Les super plastifiants.....	13
I.4. Les propriétés principales d'un BAP.	13
I.4.1. A l'état frais.....	13
I.4.1.1. Essais de caractérisation rhéologiques des BAP	14
I.4.1.1.a. Essais d'étalement.....	14
I.4.1.1.b. L'essai de la boîte en L.....	15
I.4.1.1.c. Essai stabilité au tamis.....	15
I.4.2. L'état durci.....	16
I.4.2.1 Résistance à la compression.....	16
I.4.2.2. Résistance à la traction.....	17
I.4.2.3. Module d'élasticité.....	17
I.4.2.4. Le retrait.....	17
I.5. Les avantages des bétons autoplaçants	18
I.6. Domaines d'application	18
I.7. Classifications des BAP	18
I. Conclusions.....	19

Partie 2 : Revue sur les granulats recyclés

I. Introduction.....	20
I.1. Recyclage des déchets.....	20
Définition.....	20
I.2. Déchets de la construction/démolition.....	21
I.3. Influence de l'ancien mortier colle au granulat de béton recyclé	21
I.4. Utilisation des granulats recyclés pour la confection des bétons	22
Conclusion.....	23

CHAPITRE II : MATERIAUX ET METHODOLOGIE EXPREMENTALES

Partie 1 : Matériaux utilisés

II. Introduction	25
II.1. Les matériaux	25
II.1.1. Ciment	25
Les compositions chimique et minéralogique du ciment	25
II.1.2. L'eau	25
II.1.3. Les additions minérales	25
II.1.4. L'adjuvant	27
II.2. Préparation des granulats	27
II.3. Caractérisation physique des granulats	27
II.3.1. Masse volumique apparente (M_{vapp})	27
II.3.2. Masse volumique absolue (M_{vabs})	28
II.3.3. Le coefficient d'absorption d'eau	28
II.3.4. La propreté	29
II.3.5. L'analyse granulométrique	30
II.3.6. Courbes granulométriques	30
II.3.7. Le Module de Finesse (MF)	30
II.4. Les résultats des analyses granulométriques	31
II.4.1. Sable de dune	31
II.4.2. Sable de carrière	31
II.4.3. Sable recyclé	32
II.4.4. Le gravier naturel	32
Fraction (3/8)	32
Fraction (8/16)	33
II.4.5. Le gravier recycle	33
Fraction (3/8)	33
Fraction (8/16)	33

Partie 2: Formulation et méthodologie expérimentale

II.1. Méthodologie expérimentale	35
II.2. Le Béton Autoplaçant (BAP)	35
II.2.1. Méthode de formulation de (BAP)	35
II.2.2. Calcul des compositions des (BAP)	35
II.2.2.1. Pour la première série (BAP naturel)	36
II.2.2.2. Pour la deuxième série (BAP recyclés)	36
II.2.3. Malaxage de béton (BAP) et préparation des éprouvettes	37
II.2.4. Caractérisation de BAP à l'état frais	37
II.2.4.1. Essais d'étalement	37
II.2.4.2. Le temps d'étalement T_{500}	38
II.2.4.3. La viscosité	38
II.2.4.4. Essais de la boit en L	38
II.2.4.5. Essais de stabilité au tamis	38
II.2.4.6. La masse volumique de béton frais	38
II.2.5. Caractérisation des BAP à l'état durci	39

II.2.5.1. Résistances mécaniques à la compression	39
II.2.5.2. L'absorption d'eau par immersion	39
II.2.5.5. La masse volumique de béton durci	39

CHAPITRE III : Résultats et discussion sur le Béton autoplaçant

III. Introduction	41
III.1. Caractérisation à l'état frais	41
III.1.1 Mobilité en milieu non confiné.....	41
III.1.2 Mobilité en milieu confiné	50
III.1.3 Résistance à la ségrégation statique.....	53
III.1.4 La masse volumique à l'état frais.....	56
III.2 Caractérisation à l'état durci	57
III.2.1 La résistance à la compression.....	57
III.2.2 La capacité d'absorption.....	59

Liste des figures

CHAPITRE I : Synthèse bibliographique

Partie 1 : Généralité sur les bétons autoplaçants

Figure I.1 : (a) Constituants des bétons ordinaires (BO) et des BAP	11
Figure I.2 : Essai d'étalement	14
Figure I.3 : Essais d'écoulement à la boîte L-box ou boîte en L	15
Figure I.4 : Essai de stabilité au tamis	16

Partie 2 : Revue sur les granulats recyclés

Figure I.5 : Les étapes de la production des granulats recyclés.....	20
-----------------------------------------------------------------------------	----

CHAPITRE II : MATERIAUX ET METHODOLOGIE EXPREMENTALES

Partie 1 : Matériaux utilisés

FigureII.1 : Essai de équivalent sable.....	29
Figure II.2 : Courbes granulométriques des différents granulats utilisés.....	34

CHAPITRE III : Résultats et discussion sur le Béton autoplaçant

Figure III.1 : Variation de l'étalement des BAP de granulats naturels en fonction du dosage en SP et le temps de vieillissement (Avant déstructuration).....	42
Figure III.2: Variation de l'étalement des BAP de granulats recyclés en fonction du dosage en SP et le temps de vieillissement (Avant déstructuration).....	43
Figure III.3 : Variation de l'étalement des BAP de granulats naturels en fonction du dosage en SP et le temps de vieillissement (Après déstructuration).....	44
Figure III.4 Variation de l'étalement des BAP de granulats recyclés en fonction du dosage en SP et le temps de vieillissement (Après déstructuration).....	45
Figure III.5 : Variation de l'étalement des BAP de granulats naturels en tenant compte du phénomène de déstructuration.....	45
Figure III.6 : Variation du temps d'écoulement des BAP de granulats naturels en fonction du dosage en SP et le temps de vieillissement (Avant déstructuration)	56
Figure III.7: Variation du temps d'écoulement des BAP de granulats recyclés en fonction du dosage en SP et le temps de vieillissement (Avant déstructuration)	47

Figure III.8 : Variation du temps d'écoulement des BAP de granulats naturels en fonction du dosage en SP et le temps de vieillissement (Après déstructuration)	47
.....	
Figure III.9 : Variation du temps d'écoulement des BAP de granulats recyclés en fonction du dosage en SP et le temps de vieillissement (Après déstructuration)	48
.....	
Figure III.10: Variation de la viscosité des BAP de granulats naturels en fonction du dosage en SP et le temps de vieillissement.....	49
Figure III.11: Variation de la viscosité des BAP de granulats recyclés pour SP=0.9% et t=0 min.....	50
Figure III.12: Variation du rapport H2/H1 de L-Box des BAP de granulats naturels en fonction du dosage en SP et le temps de vieillissement (Avant déstructuration).....	51
Figure III.13: Variation du rapport H2/H1 de L-Box des BAP de granulats recyclés en fonction du dosage en SP et le temps de vieillissement (Avant déstructuration).....	52
Figure III.14: Variation du rapport H2/H1 de L-Box des BAP de granulats naturels en fonction du dosage en SP et le temps de vieillissement (Après déstructuration).....	52
Figure III.15: Variation du rapport H2/H1 de L-Box des BAP de granulats recyclés en fonction du dosage en SP et le temps de vieillissement (Après déstructuration).....	53
Figure III.16: Variation de la résistance à la ségrégation des BAP de granulats naturels en fonction du dosage en SP et le temps de vieillissement (Avant déstructuration).....	54
Figure III.17: Variation de la résistance à la ségrégation des BAP de granulats recyclés en fonction du dosage en SP et le temps de vieillissement (Avant déstructuration).....	55
Figure III.18: Variation de la résistance à la ségrégation des BAP de granulats naturels en fonction du dosage en SP et le temps de vieillissement (Après déstructuration).....	55
Figure III.19: Variation de la résistance à la ségrégation des BAP de granulats recyclés en fonction du dosage en SP et le temps de vieillissement (Après déstructuration).....	56
Figure III.20 : Evolution de la masse volumique à l'état frais en fonction du dosage en SP pour les BAP à RN et à RG.....	57
Figure III.21 : Dispositif de l'essai d'écrasement des éprouvettes à la compression.....	58

Figure III.22 : Evolution de la résistance en compression à 90 jours des BAP de granulats naturels.....59

Figure III.23 : Evolution de la résistance en compression à 90 jours des BAP de granulats recyclés.....56

Figure III.24 : Evolution de la capacité d'absorption d'eau (%) en fonction du dosage en SP pour les BAP à GN.....60

Liste des tableaux

CHAPITRE II : MATERIAUX ET METHODOLOGIE EXPREMENTALES

Partie 1 : Matériaux utilisés

Tableau II.1 : Composition chimique du ciment utilisé.....	25
Tableau II.2 : Composition minéralogique du ciment utilisé.....	25
Tableau II.3 : Caractéristiques physiques de la poudre de marbre.....	26
Tableau II.4 : Composition chimique de la poudre de marbre.....	26
Tableau II.5 : Composition minéralogique de la poudre de marbre.....	26
Tableau II. 6 : les masses volumiques apparentes du gravier naturel et recyclé.....	27
Tableau II.7 : Les masses volumiques apparentes des sables : de dune, carrier et recyclé...	28
Tableau II.8 : les masses volumiques absolues du gravier naturel et recyclé.....	28
Tableau II.9 : les masses volumiques absolues des sables : de dune, carrier et recyclé.....	28
Tableau II.10 : Le coefficient d'absorption d'eau pour les gravies recyclés.....	29
Tableau II.11 : Equivalent de sable de dune.....	29
Tableau II. 12 : Equivalent de sable de carrière.....	30
Tableau II.13 : Equivalent de sable recyclé.....	30
Tableau II. 14 : Analyse granulométrique du sable de dune.....	31
Tableau II.15 : Analyse granulométrique.....	31
Tableau II.16 : Analyse granulométrique du sable de recyclé.....	32
Tableau17 : Analyse granulométrique de gravier naturel (3/8).....	32
Tableau II.18 : Analyse granulométrique de gravier naturel (8/16).....	33
Tableau II.19 : Analyse granulométrique de la fraction 3/8 recyclée.....	33
Tableau II.20 : Analyse granulométrique de la fraction recyclée 8/16 mm.....	33

Partie 2: Formulation et méthodologie expérimentale

Tableau II.21 : Séries des BAP Naturels et recyclés avec ses dosages de Super plastifiant..	35
Tableau II.22 : Compositions des BAP avec granulats naturels pour 1 m ³ : _Kg	36
Tableau II.23 : Compositions des BAP avec granulats recyclées pour 1 m ³ : Kg.....	37
Tableau II24 : Valeurs préconisées pour les essais [AFGC] et [EFNARC].....	38

CHAPITRE III : Résultats et discussion sur le Béton autoplaçant

Tableau III.1 : Résultats de l'étalement au cône et le T500mm des BAP à granulats naturels et à granulats recyclés.....	41
Tableau III.2 : Variation de la masse volumique à l'état frais des BAP.....	48
Tableau III.3 : Résultats de l'essai de la boîte en L pour le BAP naturel et le BAP recyclé...	50
Tableau III.4 : Résultats de Stabilité au tamis pour le BAP naturel et le BAP recyclé.....	53
Tableau III.5 : résultats de la densité des bétons frais de série A et B.....	56
Tableau III.6 : Résultats des résistances, à la compression (en MPA) des BAP de série À composée de granulats naturels.....	57
Tableau III.7 : Résultats des résistances, à la compression (en MPA) des BAP avec granulats recyclé.....	58
Tableau III.8 : Résultat de l'absorption d'eau pour le BAP série 01.....	60

Introduction générale

INTRODUCTION GENERALE

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 lancé 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, et le ressuage 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 super plastifiants 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 un volume de pâte élevé qui est d'ailleurs responsable de leur comportement rhéologique. De plus, la texture très complexe des bétons autoplaçants à l'état durci fait l'objectif principal de ce travail est de faire une étude sur le BAP. Détermination des paramètres rhéologiques et faire une étude comparative entre des BAP à base des granulats 100% naturels et 100% recyclés.

Pour ce faire, l'étude porte sur un programme expérimental comprenant :

- Etude d'un BAP de granulats recyclés en remplacement des granulats naturels.

Ce document se compose de trois (3) chapitres :

Le premier chapitre de ce mémoire présente une synthèse bibliographique de la littérature spécialisée. Elle englobe des généralités sur les bétons autoplaçant,

les méthodes de caractérisations correspondantes, les approches de formulation existantes ainsi que le rôle joué par les différents constituants des bétons autoplaçant. En outre, un aperçu sur les différents essais auxquels doivent être testés ces bétons à l'état frais et durci est également développés.

Quant à la deuxième partie de ce même chapitre est réservée 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 débute par une présentation de la méthode de préparations des matériaux utilisés pour cette étude. Par la suite, une description des différents essais menés sur les échantillons 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 seront validés par une série selon les recommandations de l'AFGC.

Quant à la deuxième partie de ce même chapitre est consacré à la caractérisation des BAP à base de granulats naturels ainsi des BAP à bases de granulats recyclés.

Le troisième chapitre est consacré à la présentation des différents résultats obtenus. Dans ce chapitre l'influence du taux de superplastifiant est mise en évidence. Également, une attention particulière sur l'influence du temps de vieillissement ou le temps de repos sur le comportement rhéologique des BAP, est suivie. La thixotropie, une caractéristique propre aux mélanges cimentaires, est observée où la déstructuration du béton donne une refluidification qui permet de manier le béton à l'état frais après des temps d'attentes. Une conclusion générale complète ce chapitre et également une liste bibliographique des différents travaux est mentionnée.

CHAPITRE I

Synthèse Bibliographique

Partie 1 : Généralité sur les bétons autoplaçants

I.1.Introduction

L'idée de produire des bétons autoplaçants (BAP) est apparue pour la première fois au Japon en 1986, le Japon fut le pionnier dans le développement de cette nouvelle technique. Afin de satisfaire les conditions habituellement contradictoires (déformabilité et résistance à la ségrégation), on a fait appel à la technique de béton coulé sous l'eau. En effet, la première génération des bétons autoplaçant est formulée de la même manière que les bétons destinés aux structures submergées, mais avec une viscosité plus faible et donc une maniabilité plus élevée.

Les bétons autoplaçant offrent un grand nombre des possibilités d'utilisations très intéressantes dans de nombreux domaines de construction : renforcement et réparation d'ouvrage d'art (application de couches minces dans des endroits d'accès difficiles, construction d'éléments préfabriqués à haute résistance, moulage et mise au point de béton pour toute utilisation (béton coulé sous l'eau pour réparations, béton confinés, pieux, etc.

Les BAP sont reconnus pour leur très grande déformabilité et leur facilité de mise en œuvre sous l'effet de leur poids propre, sans nécessiter de vibration, même en présence de ferraillements très denses. Il peut être intéressant de rappeler que les bétons, de manière générale, sont des fluides à seuil : ils ne s'écoulent que si la contrainte qui leur est appliquée est supérieure à leur seuil d'écoulement (ou seuil de cisaillement). Dans ce cadre, selon Wallevik (2003), un BAP correspond à un béton dont le seuil d'écoulement est inférieur à 200 Pa. D'un point de vue essai empirique, ceci correspond à un étalement de 600 mm. **[Haifi Mohamed Redha 2011]**

On peut résumer à trois les modes de mise en place des bétons autoplaçants dans des coffrages **[HOLCIM 2004]** :

- Le premier consiste à déverser le béton par le haut du coffrage. Mais cette méthode augmente les phénomènes de ségrégation du béton dus à sa chute dans les coffrages. Ensuite, elle favorise la présence de bulles et de taches sur le parement et accentue le lessivage de l'agent de décoffrage utilisé.
- Le deuxième se fait par l'intermédiaire d'un tube plongeur introduit depuis le haut du coffrage. Cette méthode a pour avantage de limiter les effets de la chute du béton

frais dans les coffrages. Elle est utilisée pour les éléments verticaux de grande hauteur.

- Le troisième correspond à l'injection du béton par le bas de la banche à l'aide d'une pompe. Ce procédé évite la chute du béton, diminue la présence de bulles sur le parement et favorise l'auto-nivellement, mais nécessite une adaptation des banches et la présence d'une pompe (ce qui libère en contrepartie la grue).

Quelle que soit la méthode de mise en œuvre choisie parmi ces trois, la longueur de cheminement horizontal dans les coffrages doit être réduite pour éviter la ségrégation dynamique du béton. Il est recommandé de limiter cette longueur à un maximum de 10 m. **[Philippe TURCRY]**

I.2.Définition :

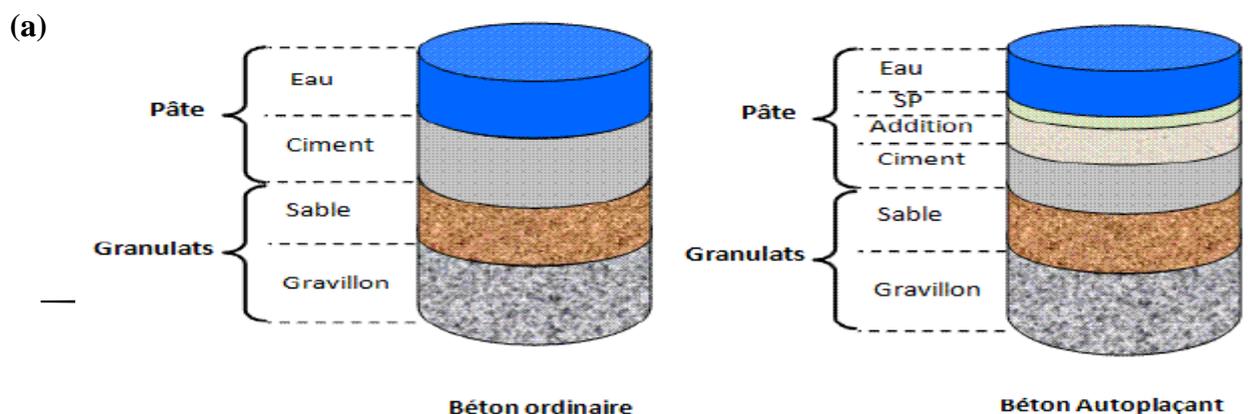
Le BAP est un béton qui, à l'état frais, est caractérisé par une fluidité telle que, par le seul effet de son poids propre et sans énergie de compactage supplémentaire suffit pour le remplissage des formes les plus complexes : *Le BAP est un béton qui se compacte de lui-même par effet gravitaire, sans aucun apport d'énergie de compactage (par ex. vibration, damage).* Il est capable de remplir complètement le coffrage, même à travers une nappe d'armatures dense ou en présence d'autres obstacles, tout en garantissant une résistance à la ségrégation pour rester homogène lors du transport, du pompage et de la mise en œuvre. **[Sandrine Bethmont 2005]**

I.3.Les constituants du BAP :

La qualité du béton dépend de la qualité de la pâte et du granulat. Dans du béton bien constitué, chaque particule de granulat est complètement enrobée de pâte et tous les espaces entre les particules sont complètement remplis de pâte.

Toute combinaison des matériaux et de conditions de cure, la qualité du béton durci dépend dans une large mesure de la quantité d'eau utilisée par rapport à celle du ciment.

Les BAP se différencient des bétons ordinaires (BO) ou vibrés, par leurs caractéristiques à l'état frais, par leur composition [présence indispensable des fines minérales (les ajouts minéraux), et de super plastifiants] ; voir schéma suivant





(b)

Figure I.1 : (a) Constituants des bétons ordinaires (BO) et des BAP
(b) Aspect à l'état frais des BAP

Les constituants du BAP ont un rôle très important dans la détermination des propriétés des BAP à l'état frais et durci. Donc, il est nécessaire de connaître le rôle que peut jouer chaque constituant ainsi que leur influence sur les propriétés des BAP

Cependant, les constituants d'un BAP, sont les mêmes que celui d'un béton ordinaire et qui sont :

I.3.1. Granulats :

Les granulats tels que le gravillon et le sable, constituent le squelette du béton. Pour être utilisés dans la composition du BAP, les granulats doivent être chimiquement stables lors du contact avec les autres constituants. La nature, la forme et la granularité des granulats influencent fortement les propriétés des BAP à l'état frais et durci [Sandrine Bethmont 2005]. Il est possible d'utiliser les granulats roulés ou concassés pour la formulation des BAP. Toutefois, afin d'éliminer le risque de blocage, il faut limiter la taille maximale du gravillon et diminuer la quantité des granulats. [SIAHMED Hamza, OUALIT Mehenna 2007]

I.3.2. Pâte :

La pâte (eau, ciment, addition minérale, adjuvant et air) sert à remplir les vides laissés par le squelette granulaire et à enrober les grains de granulat. A titre d'illustration, les granulats peuvent être considérés comme étant noyés dans une matrice cimentaire de manière à former un mélange bi-phasique homogène. Comme les BAP résistent mieux au phénomène de ressuage [Safi Brahim 2011/2012]. Moins de perturbation sera provoquée vis-à-vis de la porosité de pâte dans la zone de transition.

I.3.2.1. Le Ciment :

Plusieurs travaux ont été menés sur les bétons autoplaçants dans le sens du choix du type de ciment à utiliser. Ces travaux montrent que la résistance et la durabilité du béton dépendent principalement du dosage de ciment. Pour les BAP, le dosage du ciment doit ainsi répondre aux exigences prescrites par les normes (par exemple, EN 206-1). Par ailleurs, avec l'augmentation du dosage de ciment dans le béton, plus de chaleur se produit au cours de l'hydratation du ciment, ainsi que plus de déformations différées (retrait et fluage) à long terme. Il est à noter que les effets engendrés par l'ajout excessif du ciment sont propices à l'apparition des fissures pour les éléments en béton. Etant donné que les BAP contiennent plus de fines que les bétons ordinaires, une partie du ciment est souvent remplacée par les additions minérales en vue de limiter les effets défavorables mentionnés ci-dessus tout en assurant la résistance et la durabilité suffisantes des BAP. [SIAHMED Hamza, OUALIT Mehenna 2007].

I.3.2.2. Eau de gâchage :

L'eau remplit deux fonctions : d'une part, elle sert à hydratation du ciment et d'autre part, elle permet la fluidification de la pâte [Hanna Fares 2009]. Une partie d'eau est consommée par hydratation du ciment, soit entrant dans la composition chimique de l'hydrate, soit étant piégée à l'intérieur des pores de l'hydrate. Cette eau étant physico-chimique fixée par les hydrates, ne contribue pas à la fluidification de la pâte. Par contre, l'autre partie de l'eau qui ne participe pas à hydratation du ciment améliore la fluidification du mélange.

I.3.2.3. Ajouts minéraux :

Les ajouts cimentaires sont des matériaux qui, combinés au ciment Portland, contribuent aux propriétés des coulis frais et durcis par action hydraulique ou pouzzolanique ou les deux à la fois. Les pouzzolanes naturelles, les cendres volantes, le laitier de haut fourneau granulé broyé et les fumées de silice en sont des exemples courants.

Ces ajouts sont incorporés aux mélanges de coulis ou de béton pour différentes raisons :

- Améliorer Les caractéristiques rhéologiques des coulis (viscosité et stabilité).
- Améliorer la résistance du coulis durci et augmenter sa durabilité.
- Réduire le coût de la matière liante : ces ajouts étant le plus souvent des sous-produits d'autres industries, leur incorporation dans le ciment avec des proportions pouvant atteindre les 30% permet de réduire le prix de revient de la matière liante.

- Favoriser la pénétrabilité dans les fissures fines : certains de ces ajouts sont plus fins que le ciment (Ex. la fumée de silice).

L'utilisation croissante d'ajouts cimentaires dans le béton de ciment portland a entraîné la publication en 1982 d'une nouvelle norme CSA-A23.5, qui fut révisée en 1986. La norme CSA A23.5 reconnaît trois groupes d'ajouts cimentaires : les fumés de silice, les pouzzolanes, les laitiers granulés. [SIAHMED Hamza, OUALIT Mehenna 2007].

I.3.2.4. Super plastifiants :

Les super plastifiants sont apparus à la fin des années 1970 au Japon et en Allemagne. Ce sont généralement des sels sulfoniques de formaldéhydes, naphthalènes ou mélamines, qui ont la propriété de pouvoir améliorer notablement la fluidité d'une gâchée, et donc de diminuer la quantité d'eau nécessaire à sa mise en œuvre. Leur arrivée sur le marché a permis le développement des bétons à "hautes performances ». Ces super plastifiants assurent une défloculation de la suspension de ciment en solution aqueuse, ce qui améliore les caractéristiques rhéologiques du mélange. [SIAHMED Hamza, OUALIT Mehenna 2007]

Les super plastifiants interagissent avec les particules du ciment et celles des fines s'en adsorbent à leur surface pour diminuer le phénomène de floculation. La grande fluidité des bétons autoplaçants est assurée par des dosages relativement importants en fluidifiants. La capacité de remplissage d'un BAP croît avec le dosage en fluidifiant jusqu'à un maximum au-delà duquel le phénomène de ségrégation apparaît. Rapporté par [Trudel, 1996], l'utilisation d'un super plastifiant à faible perte d'étalement est essentielle pour la confection de béton autoplaçants. Certains fluidifiants comme le FPC (fluidifiant constitué d'un mélange de deux polymères de structure très complexe permettent d'atteindre des affaissements de 250 mm, dans le cas des bétons ordinaires, sans ségrégation, ce qui n'est pas le cas avec PC (polymère de type polycarboxylate) et NC (naphthalène sulfonate). [Stéphan ASSIE 2004]

I.4. Les propriétés principales d'un BAP :

I.4.1. A l'état frais :

Les propriétés générales d'un béton autoplaçant frais sont la fluidité et l'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. [Sandrine Bethmont 2005]

I.4.1.1. Essais de caractérisation rhéologiques des BAP :

Plusieurs essais ont été développés pour déterminer les propriétés rhéologiques tant au point de vue de la fluidité que de la ségrégation (essai à la boîte en L, au tube en U et au cône en V, essai d'étalement, divers rhéomètres, essai d'enfoncement de billes, etc.). Certains essais permettent de qualifier soit la fluidité du béton, soit son comportement rhéologique. Pour évaluer la résistance à la ségrégation statique, on est actuellement contraint de faire des mesures sur béton en cours de durcissement ou durci (sciage et comptage de granulats, ultrasons, etc...)

[Sandrine Bethmont 2005]

I.4.1.1.a. Essais d'étalement :

Pour la détermination de l'étalement on utilise le même cône que celui normalement utilisé pour l'essai d'affaissement (cône d'Abrams). Ce cône est placé sur une plaque d'étalement, à surface propre et humidifiée et de dimension suffisante, puis il est rempli de béton BAP. Le cône est ensuite soulevé et le BAP en sort en formant une galette qui s'élargit sous sa propre énergie, sans qu'il soit nécessaire de soulever et de laisser retomber la plaque, comme dans l'essai classique d'étalement. La valeur de l'étalement correspond au diamètre moyen de la galette de béton ainsi obtenue, qui devrait être comprise entre 600 et 800mm. La tendance à la ségrégation peut être évaluée qualitativement. Les granulats grossiers devraient être répartis uniformément et aucune concentration ou séparation de fines ne devrait apparaître sur les bords de la galette. Il est utile de documenter le résultat de cet essai au moyen de photographies. [Sandrine Bethmont 2005]

La façon de disposer le cône n'est pas réglementée en Suisse par une norme. L'important est de procéder toujours de la même manière. Lorsque la petite ouverture se trouve en bas (Figure I.2), le remplissage du cône avec le BAP est facilité et son soulèvement est empêché.



Figure I.2 : Essai d'étalement

I.4.1.1.b. L'essai de la boîte en L :

Cet essai permet de caractériser la mobilité du mélange frais en milieu confiné et de vérifier que la mise en place du béton ne sera pas contrariée par des phénomènes de blocage inacceptables. Le dispositif d'essai est constitué d'une boîte en forme de L.

- La partie, verticale est séparée de la partie horizontale par une trappe. Des armatures peuvent être intercalées avant la trappe.
- On laisse le béton reposer pendant une minute on lève la trappe à une hauteur de 16 cm et on laisse le béton s'écouler dans la partie horizontale de la boîte à travers une grille de ferrailage, cette dernière est composée de trois barres éloignées entre elles de 39 mm (généralement 2 à 3 fois la grosseur maximale des granulats).
- Quand le béton ne s'écoule plus, on mesure les hauteurs H_1 et H_2 .
- On vise un rapport H_2/H_1 d'au moins 0.8 pour un béton autoplaçant.

Beaucoup d'autres essais similaires à celui de la boîte en L sont utilisés partout dans le monde pour caractériser l'aptitude au remplissage du béton tel que : l'essai de la boîte L, l'essai en U, l'essai de capacité de remplissage etc. ils relèvent du même principe.



Figure I.3 : Essais d'écoulement à la boîte L-box ou boîte en L

I.4.1.1.c. Essai stabilité au tamis :

Cet essai vise à qualifier les BAP vis-à-vis du risque de ségrégation. Il peut être utilisé en phase d'étude de formulation d'un BAP en laboratoire, ou pour le contrôle de la stabilité du béton livré sur chantier (voire figure I.4). Cet essai complète les essais permettant d'apprécier la mobilité, en milieu confiné ou non, en caractérisant la stabilité. [Sandrine Bethmont 2005]

Cet essai consiste à déposer 4,8 kg, des dix litres (10 l) qui constituent l'échantillon, de béton sur un tamis ayant des mailles de 5 mm d'ouverture, mis préalablement au repos pendant 15 mn. On laisse égoutter, à travers le tamis, pendant cinq minutes on pèse ensuite la quantité de béton ayant traversé le tamis. Cette quantité par rapport à la quantité initialement présentée dans le contenue donne l'indice de ségrégation du notre béton.

- Si $0\% < p < 15\%$: stabilité satisfaisante.
- Si $15\% < p < 30\%$: stabilité critique.
- Si $30\% < p < 100\%$: stabilité mauvaise.



(a) (b)
Figure I. 4 : Essai de stabilité au tamis.

I.4.2. L'état 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 des bétons autoplaçants.

I.4.2.1. Résistance à la compression :

Les BAP se caractérisent par un rapport E/C bas, ce qui amène à de bonnes résistances mécaniques. [Lucas, J. 2006]

L'utilisation de filler dans une formulation de béton génère une accélération de sa résistance mécanique au jeune âge. Les particules fines du filler, lorsqu'elles sont bien défoulées par les super plastifiants, favorisent l'hydratation du ciment, principalement par un effet physique, et conduisent à une matrice cimentaire dont la structure est plus dense. Ces effets ont une influence

sensible sur la résistance mécanique jusqu'à 28 jours puis deviennent moins significatifs par la suite. La résistance de BAP utilisant la poudre de pierre à chaux augmente de 50 à 80 % de celle de référence à 7j et 20 à 40 % 28 j, ils ont expliqué cette augmentation par la poudre à pierre à chaux accélère hydratation de ciment et augmente la résistance aux jeunes âges. Le dosage plus ou moins important en adjuvants dans les formulations de BAP peut aussi avoir une influence sur l'évolution de la résistance mécanique du béton. Ainsi, l'introduction d'un agent de viscosité peut diminuer la résistance mécanique que d'un BAP aux jeunes âges. [Lucas, J 2006]

I.4.2.2. Résistance à la traction :

Gibbs et al. 1999, ont constatés qu'il n'y aucune différence entre la résistance à la traction des BAP et celle des bétons référence. Par contre, ont montrés que la résistance à la traction est plus grande que la résistance des bétons de référence. En comparant des mélanges de BAP ayant le même E/C on trouve que le type et la finesse de poudre affecte peu la résistance en traction. [Lucas, J 2006]

I.4.2.3. Module d'élasticité :

Les différents matériaux de BAP peuvent montrer un différent comportement de relation contrainte-déformation si les BAP contiennent une faible quantité de gros granulats si on se réfère à la formule réglementaire du module ($E_{ij} = 11000 f_{cj}^{1/3}$), celui-ci ne dépend que de la résistance du béton. Ainsi, à résistance égale, un béton autoplaçant aurait donc le même module qu'un béton vibré. [Lucas, J 2006]

I.4.2.4. Le retrait :

Le retrait endogène des BAP est plus faible (les valeurs s'échelonnent entre 50 – 2005 ($\mu\text{m}/\text{m}$) que celui des BV. Le retrait endogène est similaire pour BAP et BV, présentant le même rapport E/C, la présence de l'addition n'a en général pas d'effet significatif ; au moins à long terme ; sur la déformation due aux réactions chimiques. Les données sur le retrait de séchage sont très partagées d'un côté le retrait total est trouvé équivalent pour BAP et BV et de l'autre, il est partagé d'un sensiblement supérieur dans le cas des BAP. Constatent que le retrait de séchage des BAP est supérieur à celui des BV est ceci parce que la quantité de fine qu'ils contiennent est plus important

I.5. Les avantages des bétons autoplaçants :

Le BAP présente de nombreux avantages :

- Mise en œuvre sans vibration
- Bétonnage plus rapide et optimisation de productivité sur chantier
- Coulage de murs verticaux de grande hauteur
- Bétonnage de formes complexes avec un excellent remplissage
- Plus grande fluidité pour un meilleur pompage
- Enrobage des armatures amélioré
- Optimisation de la qualité de parement
- Amélioration des conditions de travail sur le chantier
- Absence de nuisance sonore liée à la vibration. [**SIAHMED Hamza, OUALIT Mehenna 2007**]

I.6. Domaines d'application :**Le BAP est une solution bien adaptée pour**

- Tous types de dalles y compris dalles de compression sur poutrelles hourdis.
- Plancher dalle pleine et plancher chauffant.
- Rattrapage de niveau en rénovation.
- Fondations superficielles.
- Voiles, poteaux, poutres.

I.7. Classifications des BAP :

La notion de classification des BAP est apparue tardivement et constitue pourtant un paramètre essentiel du développement de ces bétons.

On distingue donc aujourd'hui, en France (conformément aux Recommandations pour l'emploi des BAP éditées par l'AFGC et le PN BAP), trois catégories :

Catégorie 1 : il s'agit des ouvrages horizontaux de faible épaisseur (planchers, dallages) pour lesquels le ferrailage est léger et le béton peut être facilement réparti sur toute la surface ;

Catégorie 2 : elle couvre les ouvrages horizontaux épais pour lesquels les risques déségrégations statique sont importants, et les ouvrages verticaux courants (on exclut le cas des ouvrages à très forte densité de ferrailage)

Catégorie 3 : ce sont les ouvrages exigus ou très fortement ferrillés (pour lesquels l'écoulement du béton dans le coffrage est le plus difficile).

□ Chaque catégorie correspond des spécifications particulières pour le BAP à l'état frais, définies ci-après. [Safi Brahim 2011/2012]

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 béton courant ou pour BAP.

Partie 2 : Revue sur les granulats recyclés

Granulats recyclés :

I. Introduction

L'intérêt de réduire la consommation abusive des granulats naturels non renouvelables et la nécessité d'éliminer les gravats de démolition en quantités croissantes, constituent un des objectifs vis-à-vis des exigences soulevées par la prise en compte du développement durable dans le bâti. La solution passe par un remplacement même partiel des granulats naturels par des recyclés issus des matériaux de la déconstruction. Le recyclage se pose comme concept environnemental et économique à la fois. [R Zaitri 2015]

La fabrication de tels bétons nécessite la caractérisation des matériaux recyclés mis en œuvre afin d'en appréhender précisément l'influence sur les propriétés à l'état frais mais également durci du matériau ainsi élaboré. [Sandrine B 2014]

I.1. Recyclage des déchets :

Définition :

Le recyclage est un procédé de traitement des déchets (industriels ou ménagers) de produits arrivés en fin de vie, qui permet de réintroduire certains de leurs matériaux dans la production de nouveaux produits. Les matériaux recyclables comprennent certains métaux, plastiques et cartons, le verre, les gravats, etc.

Le recyclage a deux conséquences écologiques majeures :

La réduction du volume de déchets, donc de la pollution qu'ils causeraient (certains matériaux mettent des décennies, voire des siècles, à se dégrader) ; la préservation des ressources naturelles, puisque la matière recycle est utilisé à la place de celle qu'on aurait dû extraire.

Il représente une des activités économiques de la société de consommation. Certains procédés sont simples et bon marché, tandis que d'autres sont complexes et peu rentables.



Figure I.5 : Les étapes de la production des granulats recyclés.

I.2. Déchets de la construction/démolition :

Les déchets de construction et de démolition sont les déchets générés par les travaux de construction d'infrastructure et de bâtiments et par les travaux de démolition. Ces déchets ont une constitution très diverse mais on y trouve majoritairement du béton. Ils peuvent être soit réutilisés sur le site de construction, recyclés hors-site ou bien – c'est le cas le plus fréquent – mis en décharge. 70% des déchets de construction et de démolition devront être recyclés d'ici à 2020. Dans cette optique, des entreprises spécialisées proposent des solutions de recyclage permettant de séparer les différents types de déchets issus de la construction et de la démolition (lourds ou légers, déchets ferreux...). Granulats recyclés issus de déchet de démolition.

La démolition des ouvrages en béton et l'industrie des matériaux de construction sont toujours accompagnées par des produits secondaires ou des déchets.

Le béton constitue presque 75%, en poids, de tous les matériaux de construction. Il s'ensuit donc que la plus grande partie des rebuts de démolition soit du béton.

Par ailleurs, les sinistres fournissent des millions de tonnes de débris de béton. [SAADANI S]. Ces déchets forment la plus importante catégorie de déchets en Europe et sont constitués d'un ensemble complexe de matériaux. Grâce à une technologie de traitement et de tri moderne, le taux de recyclage peut être nettement augmenté afin de produire des fractions de valeur. [SAADANI S]

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

I.3. Influence de l'ancien mortier colle au granulats 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 granulats naturels 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 granulats.

Aussi, certaines études ont été réalisées pour caractériser ce mortier. L'ancien mortier collé au granulats ne peut être éliminé facilement et sa quantité est aléatoire et dépend de la qualité d'adhérence granulats-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 [Sánchez et Al., 2004]

I.4. Utilisation des granulats recyclés pour la confection des bétons :

Les granulats de béton concassés issus de produit de construction et ou de démolition présentent un intérêt particulier car leur valorisation permet de contribuer à la résolution du problème de stockage des déchets, à la réduction de la pollution de l'environnement, à la réduction du coût de construction et enfin à la résolution du problème d'approvisionnement en sable et graviers.

La résistance en compression des bétons à granulats recyclés est fortement liée au rapport E/C du béton de démolition, lorsque ce rapport est inférieur à celui du nouveau béton, la résistance est améliorée. En 1984, Hansen et Hedegkd ont montré que l'utilisation des bétons de démolition adjuvantes n'a pas d'effet sur les propriétés des nouveaux bétons, constat observé aussi par. Les résultats de Tavakoli et Soroushian en 1996 indiquaient que la résistance des bétons à granulats recyclés est influencée par la résistance et le pourcentage des gravillons du béton source, le rapport des diamètres max des granulats des deux bétons, le coefficient Los Angeles, et la capacité d'absorption des granulats recyclés. Ils ont montré aussi que les relations entre les résistances à la traction par fendage, par flexion, et à la compression ne sont pas applicables sur les bétons à granulats recyclés. Une étude comparative faite sur les résistances en compression et traction a montré qu'il n'y a pas de grande différence entre les deux bétons. Selon d'autres études, la diminution de la résistance à la compression est peu significative lorsque le taux de remplacement des graviers est inférieur ou égal à 25% et de sable inférieur à 30%. Généralement, cette diminution est attribuée à une porosité plus importante dans les bétons de granulats recyclés et une mauvaise interface granulats/liant.

Les résistances à la rupture en compression et le fractionnement du béton, fait avec de gros granulats recyclés dépendent des proportions du mélange. En général, la résistance de recyclage de béton peut être 10-25% plus faible que celle du béton classique faite avec de gros granulats naturels. Selon Katz pour un rapport E/C constant, le béton de granulats recyclés présente des caractéristiques plus faibles qu'un béton ordinaire.

Concernant les conditions de cure, une façon claire que le béton à granulats recyclés conservé dans l'air après une cure humide partielle possède une résistance supérieure à celle d'un béton conservé en milieu humide.

Les essais de flexion, montrent que l'énergie de rupture des bétons à granulats recyclés est inférieure à celle des bétons à granulats naturels (27-45%). Les mécanismes de rupture semblent dépendre de la nature du béton de démolition.

Très peu de travaux traitent de la résistance à la fatigue des bétons recyclés. Il semble, la résistance à la fatigue en flexion des bétons fabriqués avec du sable naturel et des graviers recyclés est supérieure à celle d'un béton normal, du fait de la liaison forte qui existe entre la matrice cimentaire (où se produit la rupture) et les granulats recyclés. Tous les auteurs ont signalé la faible rigidité des bétons à granulats recyclés.

Une étude sur les BAP à base de gros granulats recyclés, a montré la possibilité d'utiliser les sables recyclés dans ces BAP, les résistances à la compression montrent que les bétons constitués de granulats recyclés (graviers et sable) sont comparables aux BAP naturels. Une étude aussi de l'utilisation des gros granulats recyclés dans la composition de BAP, ils ont montré qu'il n'y a pas de grande différence entre les caractéristiques des BAP naturels et recyclés, étudiés sur l'influence de la substitution des gros granulats naturels par les recyclés dans la composition d'un BAP sur les propriétés à l'état frais, en conservant les mêmes paramètres de composition. Ils ont montré que ces granulats recyclés peuvent être utilisés jusqu'à un taux de remplacement de 50 % sans affecter les propriétés des BAP. La possibilité d'introduire le sable recyclé dans la formulation des BAP, ils ont formulé des BAP à plusieurs taux de remplacement. Leur étude a montré que l'incorporation de sable recyclé influe sur les propriétés des bétons, mais qui gardent toujours la qualification qualifier d'auto plaçant.

Conclusion :

Ce chapitre est basé sur la caractérisation de la fluidité des BAP, ainsi qu'aux granulats recycle. Ces derniers provoquent des frottements qui jouent un rôle principal que ce soit lors de l'étalement ou vis-à-vis de la composition du matériau. Pour réduire ces interactions, les BAP contiennent donc une quantité élevée de pâte ainsi que du super plastifiant. Par ailleurs, une partie du ciment, indispensable pour obtenir un volume de pâte élevé, est remplacée par des additions minérales. La composition des BAP est donc plus complexe que celle d'un béton traditionnel.

CHAPITRE II
Matériaux et méthodologie
Expérimentales

Partie 1 : Matériaux utilisés

II. Introduction :

La formulation d'un BAP requiert une étude précoce notamment dans le choix des constituants, et l'optimisation de la teneur en ajout chimique et de la quantité d'eau.

L'étape de formulation consiste à choisir une proposition optimale et bien précise des différents constituants dans le but d'obtenir les meilleures caractéristiques du béton.

Dans ce qui suit sont décrits les différents constituants entrant dans la composition d'un béton courant « vibrer » et d'un béton autoplaçant (granulats, additions minérales, adjuvants et eau).

Les constituants de base d'un béton ordinaire (ou courant) sont le ciment, l'eau et les granulats.

Les bétons autoplaçant sont obtenus par ajouts d'adjuvants et d'additions minérales.

II.1. Les matériaux :

Les matériaux utilisés dans cette campagne expérimentale font partie d'une gamme de constituants disponibles localement (contexte algérien).

II.1.1. Ciment :

Le ciment utilisé dans la confection des différents bétons est conforme aux normes NF P 15-301 et ENV 197-1 [105, 106]. C'est un ciment portland composé de classe CEM II 42,5, fabriqué à Hadjar-Essoud Wilaya de Skikda. La finesse de mouture de ce ciment est de 3280 cm²/g, caractéristique fournie par le fabricant du ciment.

Les compositions chimique et minéralogique du ciment :

Le ciment utilisé pour l'ensemble des compositions sont données dans le tableau 1 et 2 respectivement (les résultats sont fournis par la cimenterie) :

Tableau II.1 : Composition chimique du ciment utilisé

Oxydes (%)									
CaO	Al ₂ O ₃	Si O ₂	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	Cl ⁻	SO ₃	P.A.F
58.59	6.58	24.92	3.65	1.21	0.08	0.85	0.00	2.17	1.70

Tableau II.2 : Composition minéralogique du ciment utilisé

C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
57	17.5	10.5	9

II.1.2. L'eau :

L'eau de gâchage utilisée pour la confection des bétons est une eau potable du réseau publique au niveau du département de génie civil (Université Badji Mokhtar Annaba).

II.1.3. Les additions minérales :

Dans notre étude nous utilisons un seul type d'addition qui est la poudre de marbre. Elle est commercialisée par l'entreprise nationale de marbre « ENAMARBRE » de la carrière de Fil-Fila (SKIKDA).

Tableau II.3– Caractéristiques physiques de la poudre de marbre

Couleur	Blanche
Masse volumique	972.0kg/cm ³
Masse spécifique	2.68g/cm ³
S.S.B	5500cm ² /g

Tableau II.4 : Composition chimique de la poudre de marbre.

Elément	(%)
SiO ₂	0.48
Al ₂ O ₃	0.10
Fe ₂ O ₃	0.12
CaO	54.54
MgO	0.72
SO ₃	0.46
K ₂ O	0.01
Na ₂ O	0.01
P ₂ O ₅	0.02
Ti O ₂	0.01
P.A.F	43.53

Tableau II.5 : Composition minéralogique de la poudre de marbre.

Minéraux présents	%
Quartz SiO ₂	1.5
Calcite CaCO ₃	95.5
Dolomite CaMg(CO ₃) ₂	03
Albite NaAlSi ₃ O ₈	---
Feldspaths K (Orthoclase) (K ₂ O 6SiO ₂ Al ₂ O ₃)	---
Illite 2K ₂ O Al ₂ O ₃ 24SiO ₂ 2H ₂ O	
Minéraux ferrugineux + Autres	---

II.1.4. L'adjuvant :

L'adjuvant utilisé est un superplastifiant haut réducteur d'eau polyvalent de nouvelle génération à base de poly-carboxylates, qui permettent de réaliser des bétons très fluides avec des rapports E/C très réduits, commercialisé sous le nom de SUPERIOR 126. Les caractéristiques techniques de ce superplastifiant sont : de couleur Brun, une densité de 1.13g/cm³, le pH= 5.5, extrait sec 38 %, la teneur en chlorures ≤0,1%. Le dosage de SUPERIOR 126 varie entre 0.6 à 2 % du poids du ciment soit de 0.6 à 1.8 litre pour 100 Kg de ciment.

II.2. Préparation des granulats :

On a choisi pour cette étude deux types des granulats naturel et recyclé : gravier naturel (GN) et gravier recyclé (GR). Le GN est composé de deux fractions (3/8 et 8/16) mm, il est d'origine calcaire, provenant des carrières AIN ABIDE de la région de Constantine. Le (GR) de fractions (3/8 et 8/16) mm aussi, il a été préparé au laboratoire de Génie Civil de l'université d'ANNABA. Le gravier recyclé a été récupéré d'un vieux béton massif, peu ferrailé, trouvé à Sidi Ammar. On a procédé à la fragmentation des blocs du béton de démolition (dalles préfabriquées) à l'aide d'une presse hydraulique, et à l'aide d'un marteau on a brisé les fragments du béton à des dimensions adaptées à l'ouverture du concasseur. Celui-ci est à double mâchoires l'un fixe et l'autre mobile. La dimension de l'ouverture de sortie du concasseur est réglée de telle façon que le matériau (mélange) qui sort du concasseur ait la dimension maximale du gravier. On a procédé ensuite à l'aide des tamis, à séparer les différentes classes granulaires. Les produits obtenus sont : sable 0/3, gravillons 3/8 et 8/16. Pour éliminer les impuretés les fractions granulométriques ont été lavées puis séchées.

II. 3. Caractérisation physique des granulats :

III.3. 1.Masse volumique apparente (M_{vapp}) :

Elle est déterminée selon les normes NF P 18-554 pour les graviers et NF P 18-555 pour les sables. L'essai consiste à remplir un récipient vide de volume (V) du matériau sec sans le tasser et à peser ensuite cette quantité (M), pour en déduire la masse volumique selon la formule suivante :

$$M_{vapp}=M/V \text{ (g/cm}^3 \text{ ou kg /m}^3\text{)}$$

Ou: M : La masse sèche du matériau.

V en : représente le volume du récipient

Les tableaux suivants présentent les résultats des essais :

Tableau II. 6 : les masses volumiques apparentes du gravier naturel et recyclé

Fraction	GN 3/8	GN 8/16	GR 3/8	GR 8/16
Mv APP (kg/l)	1,49	1.36	2,33	2,45

Tableau II.7 : Les masses volumiques apparentes des sables : de dune, carrier et recyclé

SABLE	RECYCLE	DUNE	CARRIERE
Mv APP (KG/l)	1,26	1,62	1,68

II.3.2. Masse volumique absolue (M_{vabs}) :

Cet essai a été réalisé selon la norme NF P18-558. D'abord on va remplir dans un tube de verre un volume d'eau (V1), ensuite on verse l'échantillon sec dans le tube de verre et le niveau de l'eau va augmenter (V2). La différence entre le niveau V1 et V2 est le volume absolu de l'échantillon. La masse volumique absolue calculée par la formule suivante :

$$M_{vabs} = M / (V_2 - V_1)$$

Les masses volumiques des granulats utilisés trouve dans les tableaux suivants :

Tableau II. 8 : les masses volumiques absolues du gravier naturel et recyclé

Fraction	GN 3/8	GN 8/16	GR 3/8	GR 8/16
Mv ABS (kg/l)	2,6	2,6	2,5	2,5

Tableau II.9: les masses volumiques absolues des sables : de dune, carrier et recyclé

SABLE	RECYCLE	DUNE	CARRIERE
Mv ABS (kg/l)	2,35	2,6	2,6

- Aussi nous avons trouvé que la masse volumique de la poudre de marbre est 3.03 g/cm³.

II.3.3. Le coefficient d'absorption d'eau :

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

$$Ab(\%) = \frac{M_h - M_s}{M_s}$$

M_a en (g): la masse du l'échantillon immergé pendant 48h dans l'eau après avoir épongé soigneusement avec un chiffon absorbant l'eau à la surface des granulats ou plus connue sous le nom SSS (Saturé à Surface Sèche). - M_s en (g): la masse de l'échantillon séché à 105°C.

Les résultats de la capacité d'absorption d'eau des granulats recyclés sont représentés dans le tableau suivant par contre les granulats naturels leur absorption est négligeable :

Tableau II.10 : Le coefficient d'absorption d'eau pour les gravies recyclés

Temps d'immersion (min)	GR 8/16 (%)	GR 3/8 (%)
5	2,45	4,1
10	2,82	4,15
15	2,87	4,2
20	3,1	4,77
25	3,27	4,81
30	3,37	4,82
60	3,6	5,05
120	3,78	5,12
24 H	3,83	5,17
48 H	3,95	6,2

II.3.4. La propreté :

L'essai d'équivalent de sable consiste à séparer les impuretés argileuses dans le sable qui quantifie la propreté selon la norme (NF P 18-598). L'équivalent de sable visuel est donné par la formule :

$$E_s = (h_2 / h_1) \times 100$$

Nous avons fait cet essai sur les trois types de sable : de dune, carrière et recyclé comme définie sur figure II.3 suivante :



FigureII.1 : Essai de équivalent sable

Les résultats de cet essai sont montés dans les tableaux suivants :

Les sables utilisés dans cette étude, le premier c'est le sable de dune roulé, siliceux provenant de la sablière HWIJBAT de la région de Tébessa :

Tableau II.11 : Equivalent de sable de dune

	H ₁	H ₂	ES %
Essai 1	9,3	11	84,55
Essai 2	9,5	10,9	87,16
Essai 3	8,1	11	73,64
		MOY	81,78

Le deuxième est un sable de carrière d'origine calcaire, provenant de la sablière d'AIN ABID de la région de Constantine.

Tableau II. 12 : Equivalent de sable de carrière

	H ₁	H ₂	ES %
Essai 1	8	10,5	76,19
Essai 2	8	11	72,73
Essai 3	8	10,8	74,07
		MOY	74,33

Tableau II.13 : Equivalent de sable recyclé

	H ₁	H ₂	ES %
Essai 1	10,5	12,8	82,03
Essai 2	10	12,2	81,97
Essai 3	10,8	12,4	87,10
		MOY	83,70

II.3.5. L'analyse granulométrique :

L'analyse granulométrique des granulats est déterminée selon la norme NF P 18-560, elle a été réalisée par voie sèche. L'échantillon de masse M ($200D < M < 600D$) préalablement séché dans une étuve ($105 \pm 5^{\circ}C$) est tamisé à travers une série de tamis qui correspond pour chaque cas de granulat. Le tamisage est considéré fini lorsque le refus ne se modifie pas de plus de 1% en 1 minute de tamisage. Après on calcule le refus sur chaque tamis, et le cumul avec les précédents. et le matériau restant dans le fond (le tamisât du dernier tamis).

II.3.6. Courbes granulométriques :

Les masses des différents refus sont rapportées à la masse initiale du matériau et exprimées en pourcentage, servent pour tracer la courbe granulométrique sur un graphique comportant en ordonnée le % des refus et les mailles D sont indiquées en abscisse.

II.3.7. Le Module de Finesse (MF):

Le module de finesse des sables est déterminé selon la norme XP P 18-540 [02], et calculé selon la formule suivante :

$$MF = \Sigma \text{ des refus cumulés en \% des tamis (0,16 - 0,315 - 0,63 - 1,25 - 2,5 - 5 mm) } / 100$$

II.4. Les résultats des analyses granulométriques :

II.4.1. Sable de dune :

La masse initiale = 1000g (200*D)

Tableau II. 14 : Analyse granulométrique du sable de dune

Tamis	Refus (g)	Ref.cum. (g)	Ref.cum.(%)	Tam.cum.(%)
5	2,6	2,6	0%	100%
4	2,9	5,5	1%	99%
3,15	3,2	8,7	1%	99%
2,5	3,6	12,3	1%	98,76%
2	8	20,3	2%	98%
1,6	9	29,3	3%	97%
1,25	40,4	69,7	7%	93%
1	49	118,7	12%	88%
0,63	158	276,7	28%	72%
0,5	170	446,7	45%	55%
0,315	296,9	743,6	75%	25%
0,2	181	924,6	93%	7%
0,16	15,4	940	95%	5%
0,125	30,3	970,3	98%	2%
0,08	13,3	983,6	99%	1%
fond	5,9	perte	10,5	
		MF	2,07	

II.4.2. Sable de carrière :(mi=1000g)

Tableau II.15 : Analyse granulométrique

Tamis	Refus (g)	Ref.cum. (g)	Ref.cum.(%)	Tam.cum.(%)
5	8,3	8,3	1%	99%
4	100,6	108,9	11%	89%
3,15	121,8	230,7	23%	77%
2,5	102,5	333,2	34%	66%
2	66	399,2	41%	59%
1,6	68,7	467,9	48%	52%
1,25	75,2	543,1	55%	45%
1	43,4	586,5	60%	40%
0,63	84,3	670,8	68%	32%
0,5	40	710,8	72%	28%
0,315	97,2	808	82%	18%
0,2	56,3	864,3	88%	12%
0,16	25,3	889,6	90%	10%
0,125	45,8	935,4	95%	5%
0,08	17,6	953	97%	3%
fond	30	perte	17	
		MF	3,31	

II.4.3. Sable recyclé :(mi =1000g)

Tableau II.16 : Analyse granulométrique du sable de recyclé

Tamis	Refus (g)	Ref.cum. (g)	Ref.cum.(%)	Tam.cum.(%)
5	1,7	1,7	0%	100%
4	0,4	2,1	0%	100%
3,15	11,4	13,5	2%	98%
2,5	102,3	115,8	14%	86%
2	75	190,8	22%	78%
1,6	73,4	264,2	31%	69%
1,25	64,5	328,7	39%	61%
1	25,5	354,2	42%	58%
0,63	88,3	442,5	52%	48%
0,5	31,8	474,3	56%	44%
0,315	136,8	611,1	72%	28%
0,2	126,1	737,2	87%	13%
0,16	43,9	781,1	92%	8%
0,125	66,1	847,2	100%	0%
0,08	2,5	849,7	100%	0%
fond	128,3	perte	22	
		MF	2,68	

II.4.4. Le gravier naturel

Fraction (3/8) : Mi=1600g

Tableau17 : Analyse granulométrique de gravier naturel (3/8)

Tamis	Refus (g)	Ref.cum. (g)	Ref.cum.(%)	Tam.cum.(%)
8	0	0	0%	100%
6,3	1076,4	1076,4	69%	31%
5	257,8	1334,2	85%	15%
3,15	227,5	1561,7	100%	0%
fond	35,2	perte	3,1	

Fraction (8/16), Mi =3200g

Tableau II.18 : Analyse granulométrique de gravier naturel (8/16)

Tamis	Refus (g)	Ref.cum. (g)	Ref.cum.(%)	Tam.cum.(%)
20	0	0	0%	100%
16	70,2	70,2	2%	98%
12,5	440,7	510,9	16%	84%
10	738,9	1249,8	40%	60%
8	897,2	2147	68%	32%
6,3	760,6	2907,6	93%	7%
5	230,7	3138,3	100%	0%
Fond	60,9	perte	0,8	

II.4.5. Le gravier recycle :

Fraction (3/8) : Mi= 1600g

Tableau II.19: Analyse granulométrique de la fraction 3/8 recyclée

Tamis	Refus (g)	Ref.cum. (g)	Ref.cum.(%)	Tam.cum.(%)
8	49,9	49,9	3%	97%
6,3	822,1	872	58%	42%
5	285,9	1157,9	77%	23%
3,15	353,7	1511,6	100%	0%
Fond	81,6	perte	6,8	

Fraction (8/16) : Mi= 3200g

Tableau II.20: Analyse granulométrique de la fraction recyclée 8/16 mm

Tamis	Refus (g)	Ref.cum. (g)	Ref.cum.(%)	Tam.cum.(%)
20	0	0	0%	100%
16	0	0	0%	100%
12,5	434,4	434,4	14%	86%

10	1229	1663,4	53%	47%
8	1238,8	2902,2	92%	8%
6,3	248,8	3151	100%	0%
5	3,8	3154,8	100%	0%
fond	39,2	perte	6	

Les résultats des analyses granulométriques des granulats utilisés sont tracés sous forme de courbes granulométriques sur la figure suivante :

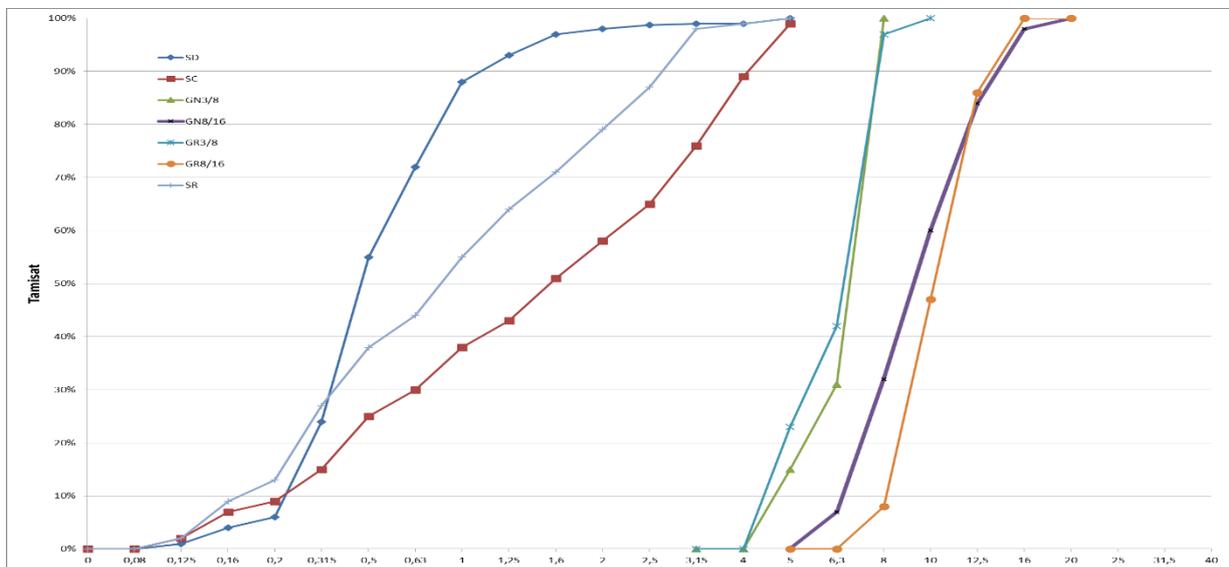


Figure II.2 : Courbes granulométriques des différents granulats utilisés.

Partie 2 : Formulation et méthodologie expérimentale

II. 1. METHODOLOGIE EXPERIMENTALE

L'objectif de cette étude est de réaliser un béton autoplaçant à base de granulats recyclés (100% granulats recyclés) et un BAP à base des granulats naturels (100% granulats naturels).

BAP : Série 01 (formulation d'un BAP avec 100% granulats naturels) et la série 02 (formulation d'un BAP avec 100% granulats recyclés).

Tableaux : plans expérimentaux de cette étude :

BAP:

Tableau II.21 : Séries des BAP Naturels et recyclés avec ses dosages de Super plastifiant.

Série A	BAP 1	BAP 2	BAP 3
Dosage de superplastifiant	0,9%	1,1%	1,3%
Série B	BAP 1	BAP 2	BAP3
Dosage de superplastifiant	0,9%	1,1%	1,3%

II. 2. Le Béton Autoplaçant (BAP) :

II.2.1. Méthode de formulation de (BAP) :

La méthode de formulation utilisée pour concevoir les compositions des BAP dans cette étude expérimentale est une méthode empirique basée sur plusieurs points :

- La formulation du BAP doit répondre aux critères de résistance mécanique (fixés ou désirés) choisis à partir de la formulation de Bolomey. Nous avons posé comme résistance caractéristique en compression à 28 jours pour un béton d'ouvrage $f_{c28} = 32$ MPA.

• Le volume de pâte doit favoriser l'écoulement du béton tout en réduisant le coût en matières premières de cette formulation.

Pour cela, le volume de pâte (ciment + additions + adjuvants + eau efficace + air) est fixé à 400 l/m^3

• Une quantité de fines élevée pour leur assurer une maniabilité suffisante tout en limitant les risques de ségrégation et de ressuage, les BAP contiennent une quantité de fines (de l'ordre de 500 kg/m^3). Ces fines proviennent du ciment, des additions et des fines contenues dans les granulats dont la grosseur est inférieure à $125 \mu\text{m}$.

• Le dosage en super plastifiant est déterminé de manière expérimentale à partir d'essais sur béton frais pour lequel l'étalement doit être compris entre 650 et 750 mm (valeur moyenne des normes en vigueur) afin de limiter la ségrégation et le ressuage.

• La constitution du squelette est optimisée afin de réduire la ségrégation et favoriser l'écoulement. Pour cela, on a fixé ($D_{\text{max}} = 16 \text{ mm}$ et un rapport G/S proche de 1).

II.2.2. Calcul des compositions des (BAP):

1. un rapport gravier/sable (G/S) égal à 1.

2. un rapport eau/ (ciment + addition) (E/L) égal à 0.4.

3. un dosage en ciment égal à 350 Kg/m^3

4. un dosage en poudre de marbre de 130 Kg/m^3

Et en ce qui concerne les dosages en granulats, on a utilisé les formules suivantes

$(G+S+C+PM+SP+E) = 1000$ litres

Où G = Gravier

S = Sable

C = Ciment
 PM =Poudre de marbre
 SP = Super plastifiant
 E = Eau

On a les données suivantes [13] : On a pris le volume de pâte égal à 400 litres et (G + S) = 600 litres

II.2.2.1. Pour la première série (BAP naturel) :

G1n (3/8) =60%G Sd=50%S (Sd : sable de dune)
 G2n(8/16) =40% Sc=50%S (Sc : sable de carrière)
 G/S=1
 MG=MS
 MG1+ MG2= MSd+ MSd
 CGn1. Gn1+ CGn2. Gn2= Csd. Sd+ Csc. Sc
 (Csd ,Csd: la densité de sable et de gravier) 2.85(0.6G) +2.5(0.4G)
 =2.66(0.5S) +2.66(0.5S)
 2.72G=2.72S..... (1)
 G+S=600Kg/m3 (2)

II.2.2.2. Pour la deuxième série (BAP recyclés):

G1R (3/8) =60%G Sd=50%S
 G2R(8/16) =40% Sc=50%S
 G/S=1
 MG=MS
 MG1+ MG2= MSd+ MSd
 CGR1. GR1+ CGR2. GR2= Csd. Sd+ Csc. Sc
 (Csd ,Csd: la densité de sable et de gravier) 2.5 (0.6G) +2.2 (0.4G) =2.66 (0.5S) +2.78 (0.5S)
 2.72G=2.72S.....(1)
 G+S=600Kg/m3(2)

- Une première formulation d'un BAP avec 50% de gravier 3/8 et 50% de gravier 8/16, n'a pas donné de résultats conformes aux critères de l'AFGC.

Lors d'un essai d'étalement, on remarque un signe de ségrégation, un amoncellement de gros granulats au centre de la galette. Pour cela nous avons corrigé le dosage des fractions granulaires (40% gravier 8/16 et 60% gravier 3/8).

Toutes les compositions étudiées sont présentées dans les tableaux suivants :

Tableau II.22 : Compositions des BAP avec granulats naturels pour 1 m³ : en Kg

Composition	BAP 1	BAP 2	BAP 3
Sd	390	390	390
Sc	390	390	390
GN 3/8	468	468	468
GN 8/16	312	312	312
C	350	350	350
PM	130	130	130
E	182	182	182
SP	4,32	4,8	5,28

Tableau II.23 : Compositions des BAP avec granulats recyclés pour 1 m³ : Kg

Composition	BAP1	BAP2	BAP3
Sd	382,35	382,35	382,35
SC	382,35	382,35	382,35
GR 3/8	458,75	458,75	458,75
GR 8/16	306,25	306,25	306,25
C	350	350	350
PM	130	130	130
E	226,18	226,18	226,18
SP	4,32	4,32	4,32

Remarque :

Concernant la quantité d'eau pour les BAP avec des granulats recyclés. Pour s'affranchir de l'absorption d'eau de gâchage par les granulats recyclés, une quantité d'eau supplémentaire est ajoutée à la quantité d'eau initiale concernant uniquement les mélanges contenant les granulats recyclés. Cette quantité a été estimée par la capacité d'absorption des granulats recyclés durant 60 min, temps nécessaire pour la mise en place des bétons frais.

II.2.3. Malaxage de béton (BAP) et préparation des éprouvettes :

La séquence d'introduction des différents matériaux est décrite comme suit :

- les matériaux sont introduits dans la bétonnière dans l'ordre suivant : ciment, addition minérale (Poudre de marbre), sable de carrière, sable de dune, gravier 3/8 et gravier 8/16.
- malaxage à sec pendant 1 minute.
- Introduction de 3/4 de la quantité d'eau et malaxage pendant 2 minutes.
- Ajouter l'adjuvant (super plastifiant) et 1 /4 d'eau restante puis malaxer pendant 2 minutes.

La durée effective totale du malaxage est 5 minutes.

- Réalisation des essais à l'état frais (l'étalement, T500, la boîte en L, et la stabilité au tamis) aux temps t=0, 30 et 60 min. Pour les essais à 30 et 60 min, le béton est conservé dans des récipients couverts (pour éviter l'évaporation de l'eau). Les mêmes tests sont reconduits sur le même béton pour étudier l'influence de sa destruction sur l'écoulement, c'est dire un deuxième malaxage d'une durée de 2 min.

Les bétons sont ensuite mis dans des moules pour les essais à l'état durci à l'échéance de 28 jours de durcissement. Après 24h on procède au démoulage des éprouvettes pour les conserver dans milieu humide (dans l'eau) jusqu'à l'échéance d'écrasement.

Pour les essais à l'état durci, les tests ont été conduits pour mesurer la résistance à la compression, la masse volumique et l'absorption d'eau sur des spécimens de cubiques de dimensions (10x10x10) cm³.

II.2.4. Caractérisation de BAP à l'état frais :

II.2.4.1. Essais 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. L'essai sur béton se fait avec le cône d'Abrams

II.2.4.2. Le temps d'étalement T500 :

Lorsque l'on effectue un essai d'étalement, on peut mesurer le temps T500, 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 le béton sera visqueux, plus il mettra de temps à s'affaisser et plus la valeur T500 sera élevée. On s'attend donc à ce que cette valeur soit reliée à la viscosité de béton.

II.2.4.3. La viscosité :

La viscosité des bétons caractérise aussi leurs écoulements. Elle est calculée en utilisant le T500 de l'essai d'étalement au cône et le diamètre de la galette suivant la formule :

$$\mu = \rho / 1000. (0,0268 Sf - 2,39). T500$$

Où :

μ : est la viscosité (Pa.s).

ρ : est la masse volumique (kg/m³).

Sf : est l'étalement (mm).

T500 : est le temps d'écoulement de 500 mm (s).

II.2.4.4. Essais de la boîte en L :

La boîte en L permet de tester la mobilité du béton en milieu confiné et de vérifier que la mise en place du béton ne sera pas contrariée par des phénomènes de blocage inacceptables. Le taux de remplissage final H₂/H₁ renseigne sur la mobilité du béton en milieu confiné.

Les essais d'écoulement en milieu confiné ont été effectués avec la boîte en L .

II.2.4.5. Essais de stabilité au tamis :

Cet essai vise à qualifier les bétons auto plaçant vis-à-vis du risque de ségrégation. Cet essai complète les essais permettant d'apprécier la mobilité, en milieu confiné ou non, en caractérisant la stabilité.

Le tableau donne les valeurs préconisées pour l'obtention d'un BAP selon l'AFGC et EFNARC.

Tableau 24 : Valeurs préconisées pour les essais [AFGC] et [EFNARC]

Essais	L'étalement	Boite en	Stabilité au tamis	T500 (s)
AFGC	55-85 cm	>0,8%	< 15%	
EFNARC 2002	65-80	30%	30%	2 - 5

II.2.4.6. La masse volumique de béton durci :

La masse volumique de béton durci s'effectue sur des éprouvettes cubiques, La masse volumique de béton durci est déterminée après démoulage les éprouvettes cubiques (10x10x10) cm et peser chacune des éprouvettes à l'aide d'une balance et ensuite calculer la masse volumique de chaque éprouvette avec les valeurs obtenues :

$$Mv \text{ (durci)} = \text{masse d'éprouvette} / 1000 \text{ [g/cm}^3\text{]}$$

La masse volumique réelle du béton frais doit être systématiquement mesurée. Cela permet de vérifier le rendement de la composition en comparant la masse volumique déterminée expérimentalement avec la masse volumique théorique. Elle est mesurée par la pesée des moules remplis de béton autoplaçant sans vibration.

La densité est déduite par l'application de la formule suivante :

$$\Delta = (mrr - mrv) / vr \text{ [g/cm}^3\text{]}$$

mrv: La masse de moule vide. [g]

mrr: La masse de moule avec béton. [g]

vr: Volume des 3 Cubique (3000 cm³).

II.2.5. Caractérisation des BAP à l'état durci :

II.2.5.1. Résistances mécaniques à la compression :

Les essais de la résistance mécanique à la compression s'effectuent sur des éprouvettes cubiques. Les résistances ont été mesurées à 90 jours après la date de coulage, selon la norme [NF EN 196-1], à l'aide d'une presse hydraulique.

La résistance à la compression est déterminée par la formule :

$$R_c = P / S \text{ [Mpa]}$$

- R_c : la résistance à la compression (MPa)
- P : la charge à la rupture (N)
- S : la section du cube (mm^2)

II.2.5.2. L'absorption d'eau par immersion totale :

Le coefficient d'absorption de notre béton est calculé après avoir déterminé la masse de 3 éprouvettes pour chaque mélange en forme de cube $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}$ saturés dans l'eau jusqu'à 3 jours (M_{sat}), puis on met ces éprouvettes dans l'étuve 3 jours aussi pour déterminer la masse sèche ($M_{\text{séc}}$).

L'absorption déterminée par la formule suivante :

$$A_b (\%) = [(M_{\text{sat}} - M_{\text{séc}}) / M_{\text{séc}}] \cdot 100 (\%)$$

II.2.5.3. La masse volumique de béton durci :

La masse volumique de béton durci s'effectue sur des éprouvettes cubiques, La masse volumique de béton durci est déterminée après démoulage les éprouvettes cubiques ($10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$) et peser chaque éprouvette à l'aide d'une balance et ensuite calculer la masse volumique de chaque éprouvette avec les valeurs obtenues :

$$M_v (\text{durci}) = \text{masse d'éprouvette} / 1000 \text{ [g/cm}^3\text{]}$$

CHAPITRE III
Résultats et discussion

III. Introduction :

Dans ce chapitre, nous présentons les propriétés du béton frais où les caractéristiques de mobilité en milieu non confiné et confiné, le temps d'écoulement (viscosité), la stabilité. A l'état durci la résistance mécanique à la compression, la masse volumique et la capacité d'absorption après immersion totale dans l'eau pendant 72 heures.

III.1. Caractérisation à l'état frais :

III.1.1 Mobilité en milieu non confiné :

Les résultats des tests réalisés sur les bétons d'étude (deux séries, selon le type de graviers, pour trois mélanges à chaque dosage en superplastifiant (SP). Chaque test est répété trois fois où l'effet du dosage en SP ainsi que le temps du vieillissement sont pris en compte. Les mesures ont été prises à l'instant $t=0$ minute et après des temps de repos à 30 et 60 minutes. Les mêmes tests sont reconduits aux mêmes échéances après déstructuration du mélange. Les résultats obtenus en écoulement libre sont représentés, en termes de diamètre d'étalement et de temps d'étalement (T_{500mm}), dans le tableau III.1 :

Tableau III.1 : Résultats de l'étalement au cône et le T_{500mm} des BAP à granulats naturels et à granulats recyclés

Avant déstructuration

Série A : BAP à granulats naturels									
Le temps	t=0 min			t=30min			t=60 min		
Sp (%)	0,9	1,1	1,3	0,9	1,1	1,3	0,9	1,1	1,3
Étalement (cm)	64	70,5	76	65	69	70	49	66,5	67
	66	73	74	63	66	71	55	60	65
	65	71	77	55	65	74	38,5	56	67
T500 (s)	6,2	5,01	3,5	12	9,2	7,5	18	10,05	10,2
	9	5,59	3,33	13,2	8,01	7,8	19	10,22	10
	8,1	4,12	2,92	10,11	7,11	8,53	15	9,66	9,5
Série B: BAP à granulats recyclés									
Étalement (cm)	66	-	-	63	-	-	51,5	-	-
	66	-	-	62,5	-	-	52	-	-
	67	-	-	62,5	-	-	54	-	-
T500 (s)	4	-	-	6	-	-	9	-	-
	5	-	-	5	-	-	6	-	-
	4	-	-	5	-	-	6,5	-	-

Après déstructuration

Série A : BAP à granulats naturels									
Le temps	t=0 min			t=30 min			t=60 min		
Sp (%)	0,9	1,1	1,3	0,9	1,1	1,3	0,9	1,1	1,3
Étalement (cm)	67	74	80	65	66	71,5	53	63	70
	66	71	78	66,5	69,5	72	50	66	68,5
	66,5	73	79	57,5	67,5	73	41,5	65	67
T500 (s)	7	4,3	3	11,04	10,1	9,11	14,01	9,06	8,5
	5	5,1	2	12,33	9,03	9,1	10,1	10,5	9,73
	6	4,2	3	10,55	9,01	8,01	16,21	8	9,38
Série B : BAP à granulats recyclés									
Étalement (cm)	68	-	-	66	-	-	57	-	-
	69	-	-	65	-	-	58,5	-	-
	70	-	-	64,5	-	-	58	-	-
T500 (s)	5	-	-	6	-	-	7	-	-
	4	-	-	6	-	-	6	-	-
	4,5	-	-	5	-	-	6,5	-	-

Les figures III.1 et III.2 représentent la variation de l'étalement des BAP à granulats naturels et recyclés, respectivement. Les tests ont été effectués sans qu'il y ait de destruction du mélange au préalable, c'est-à-dire que les mesures sont faites directement après le temps de repos. Il est à noter que pour les BAP de granulats recyclés, les tests pour les dosages en SP à 1,1 et 1,3% n'ont pas été réalisés. Au premier constat, l'étalement augmente en fonction de l'augmentation de la teneur en SP. Cependant, l'étalement diminue lorsque le temps de vieillissement (ou le temps de repos) augmente.

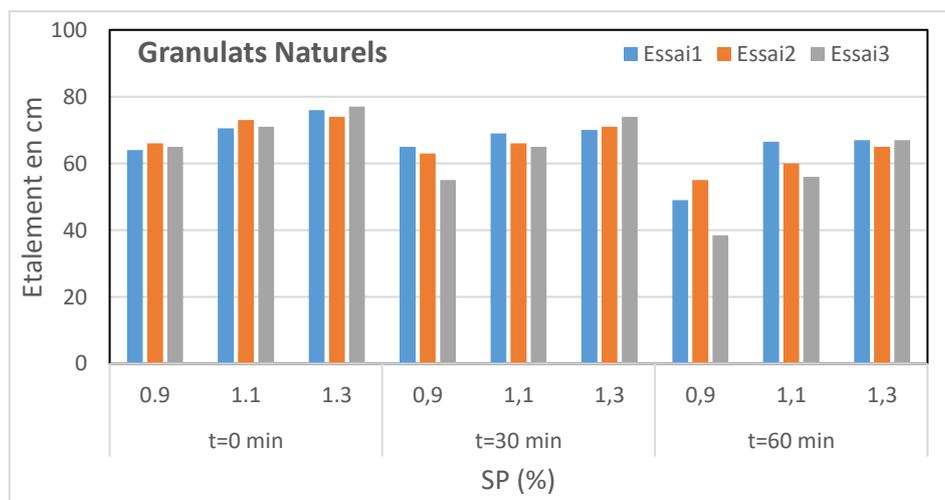


Figure III.1 : Variation de l'étalement des BAP de granulats naturels en fonction du dosage en SP et le temps de vieillissement (**Avant déstructuration**)

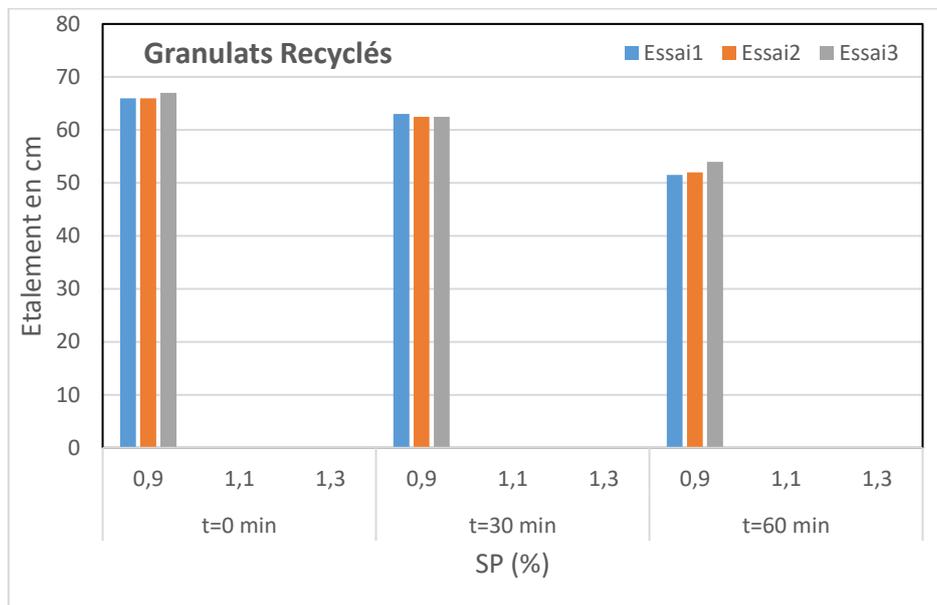


Figure III.2 : Variation de l'étalement des BAP de granulats recyclés en fonction du dosage en SP et le temps de vieillissement (**Avant déstructuration**)

L'influence du SP sur l'écoulement est bien évidente, par son effet le mélange est devenu plus fluide surtout avec le dosage de SP à 1,3%. Avec ce dosage et à l'instant T=0, l'étalement mesuré est de 76 cm, cette valeur est proche de la limite supérieure prescrite selon les exigences de l'EFNARC 2002. Avec cette teneur de SP, le BAP risque de perdre en stabilité et aussi risque d'apparition de ressuage.

En tenant compte du temps de repos ou du vieillissement, l'effet est plus visible pour le dosage en SP de 0,9% surtout après 60 minutes de repos où la perte de maniabilité se précise comparativement autres dosages de 1,1 et 1,3% dont la perte maniabilité est moindre. Après 60 minutes, en moyenne, les mesures l'étalement diminuent de 18 cm pour SP=0,9%, de 11 cm pour SP=1,1% et de 9 cm pour SP=1,3%. Les BAP fabriqués avec 0,9% de SP ne sont plus qualifiés d'auto-plaçants après 30 et 60 minutes de repos et de même pour les BAP dosés à 1,1% après 30 minutes de repos, puisque la limite minimale d'étalement, qui est de 65 cm, n'est plus garantie. Après 1 heure de temps il se pourrait que la prise du ciment ait fait son effet surtout pour le BAP dosé SP à 0,9%. Pour les autres dosages en SP (1,1 et 1,3%) leur augmentation retarde la prise ce qui assure au mélange de garder encore une certaine fluidité.

Hieu Tha Huynh (1996) assure qu'un dosage en SP inférieur à 1%, le maintien de la maniabilité est faible, sa durée maximale étant de 15 min. Tandis qu'un dosage compris entre 1 et 3%, il y a une refluidification, c'est-à-dire le maintien de fluidité est plus long. Le même auteur conclue aussi que le temps d'hydratation du ciment augmente graduellement lorsque la concentration en SP augmente, donc un ralentissement du dégagement de la chaleur d'hydratation et à une augmentation de la durée de prise.

Les étalements des BAP de granulats recyclés diminuent lorsque le temps d'attente augmente. Seulement la diminution est moins accentuée que celle pour les BAP de granulats naturels. Ceci peut être justifiée par la quantité d'eau ajoutée, pour l'absorption de granulats recyclés, qui améliore la fluidité du BAP. Les BAP de granulats recyclés au-delà de 30 minutes de repos, leur viscosité augmente et perdent de fluidité. Les pertes de maniabilité sont de 3,7 et 13,8 cm

après 30 et 60 minutes respectivement. Donc on constate que l'ajout de l'eau aux granulats recyclés pour atténuer leur absorption a eu un effet plutôt positif sur l'étalement.

Les figures III.3 et III.4 représentent la variation de l'étalement des BAP à granulats naturels et recyclés, respectivement, et ceci après que les mélanges aient subi une destruction après les temps de repos. On constate que l'étalement augmente en fonction de l'augmentation de la teneur en SP, mais diminue lorsque le temps de vieillissement (ou le temps de repos) augmente. Le fait nouveau dans la procédure de déstructuration des BAP après le temps de repos est que la fluidité (l'étalement) s'améliore ou revient à son état initial après une structuration, on dit que l'ouvrabilité en général du béton est réversible, donc les mélanges sont thixotropes et c'est le phénomène de thixotropie qui s'est produit. **Toutou et Roussel (2005)** ont observé ce phénomène. On constate que tous les BAP confectionnés ont enregistré une refluidification (voir figure III.5), c'est-à-dire que la fluidité des BAP s'est améliorée après déstructuration dans le malaxeur, et ceci pour les toutes doses de SP utilisées. Seuls les BAP dosés en SP à 0,9% ne répondent plus aux exigences d'acceptabilité en termes d'étalement (limite inférieure 65 cm).

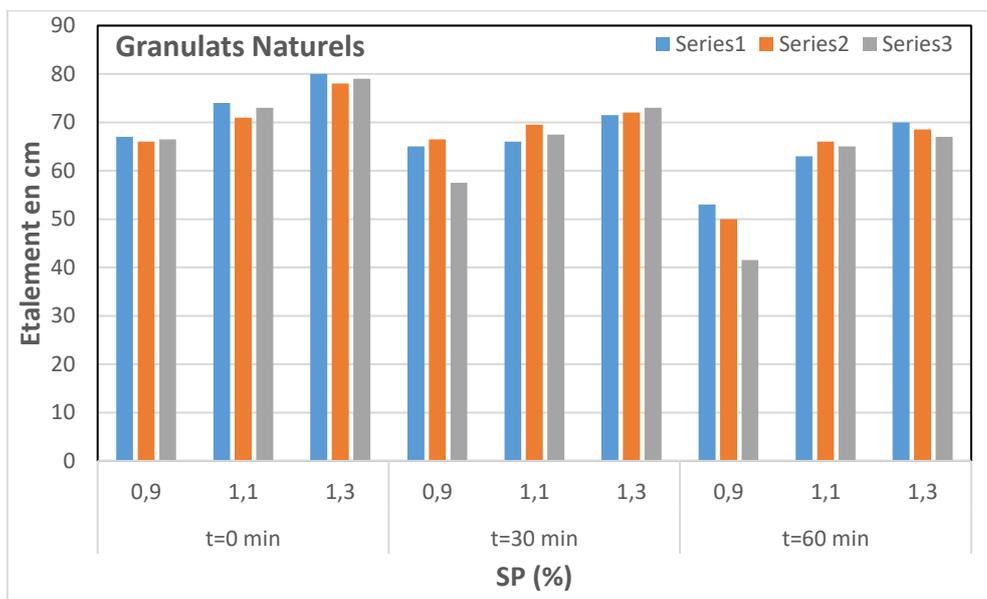


Figure III.3 : Variation de l'étalement des BAP de granulats naturels en fonction du dosage en SP et le temps de vieillissement (**Après déstructuration**)

Les étalements des BAP de granulats recyclés diminuent également (figure III. 4) lorsque le temps d'attente augmente. L'étalement a augmenté lorsque les BAP ayant subi une déstructuration. Les BAP de granulats recyclés sont aussi thixotropes, l'absorption davantage d'eau par les granulats recyclés ne s'est pas produite au cours du temps d'attente.

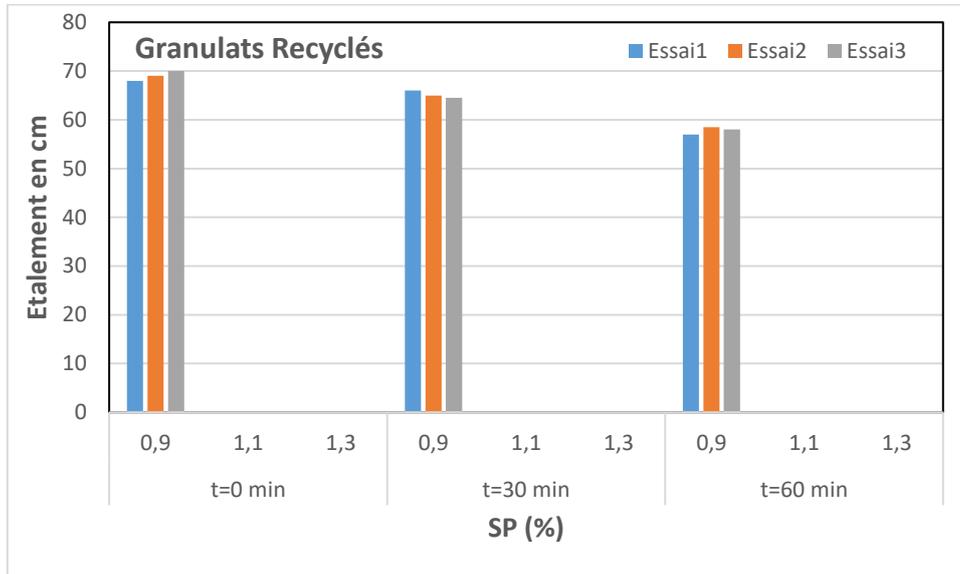


Figure III.4 : Variation de l'étalement des BAP de granulats recyclés en fonction du dosage en SP et le temps de vieillissement (**Après déstructuration**)

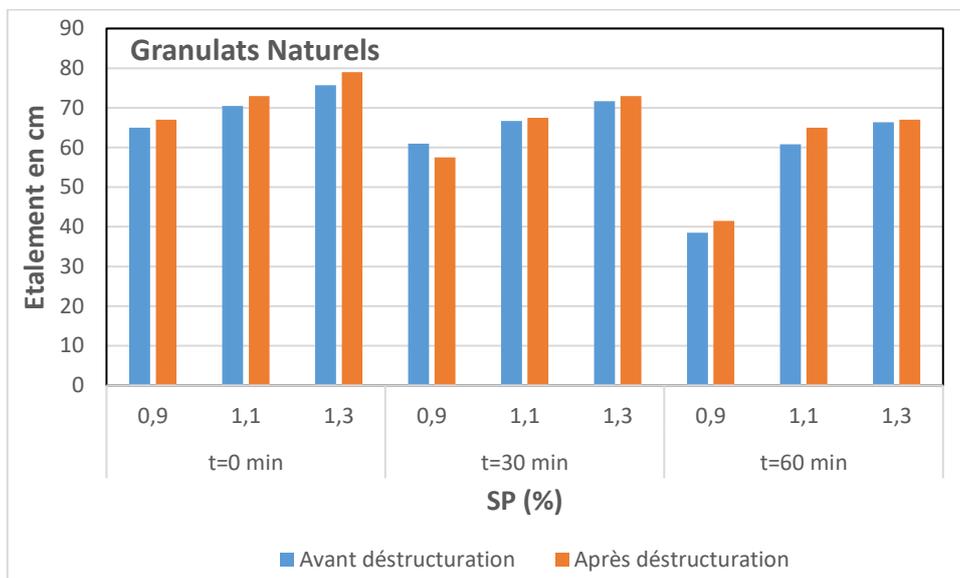


Figure III.5 : Variation de l'étalement des BAP de granulats naturels en tenant compte du phénomène de déstructuration

Les figures III.6 et III.7 représentent la variation du temps d'écoulement des BAP à granulats naturels et recyclés, respectivement. L'influence du dosage en SP et le temps d'attente avant déstructuration sont étudiés. L'observation notée des résultats obtenus est que le temps d'écoulement (T500) diminue lorsque le pourcentage de SP s'accroît, par contre lorsque le temps d'attente augmente le temps T500 augmente également. Seuls les BAP dosés à 1,1 et

1,3% en SP et mesurés à l'instant T=0 remplissent le critère établi par l'EFNARC 2002 pour le temps d'écoulement (T500) qui de 5 secondes. Les autres mélanges ne répondant pas à cette condition semblent présenter un état plus visqueux. Après un temps d'attente de 60 minutes les mesures T500 pour les BAP dosés à 0,9% sont trop élevés et dépassent 15 secondes ce qui contraint ces BAP à des difficultés d'écoulement surtout en cas de présence un ferrailage au sein des éléments à couler.

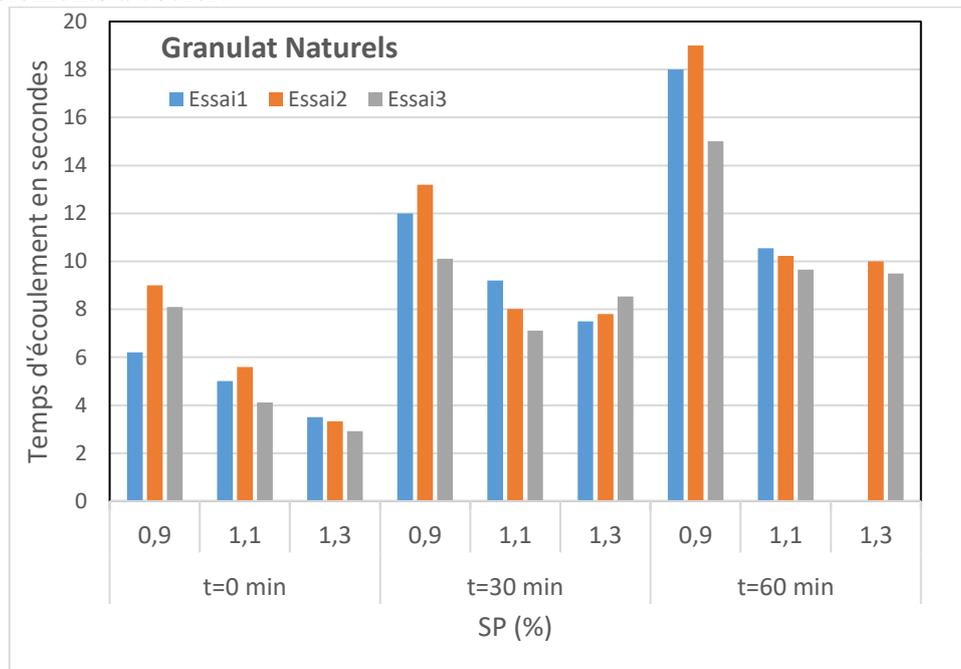


Figure III.6 : Variation du temps d'écoulement des BAP de granulats naturels en fonction du dosage en SP et le temps de vieillissement (**Avant déstructuration**)

Concernant les BAP formulés avec des granulats recyclés les temps d'écoulement sont inférieurs à ceux des BAP à granulats naturels. L'eau supplémentaire ajoutée aux mélanges a améliorée l'écoulement et par conséquent le temps d'écoulement diminue.

Après déstructuration des BAP les temps d'écoulement ont diminués (figures III.8 et III.9). De plus le SP et le malaxage de nouveau agissent directement sur le ciment et libère l'eau piégée entre les particules de ciment. La pâte de ciment étant plus fluide entraîne une force de traînée importante sur les granulats. Donc on constate une évolution de la viscosité au cours du temps par une diminution réversible de l'état de floculation (déstructuration) des particules de ciment soumises à un cisaillement (lors du malaxage). Comme l'ont expliqué Toutou et Roussel, qu'un simple malaxage suffisamment vigoureux peut « effacer » les conséquences d'un long temps de repos sur l'état de floculation d'un matériau alors qu'aucun malaxage ne peut inverser les réactions physico-chimiques des particules de ciment avec l'eau qui sont irréversibles.

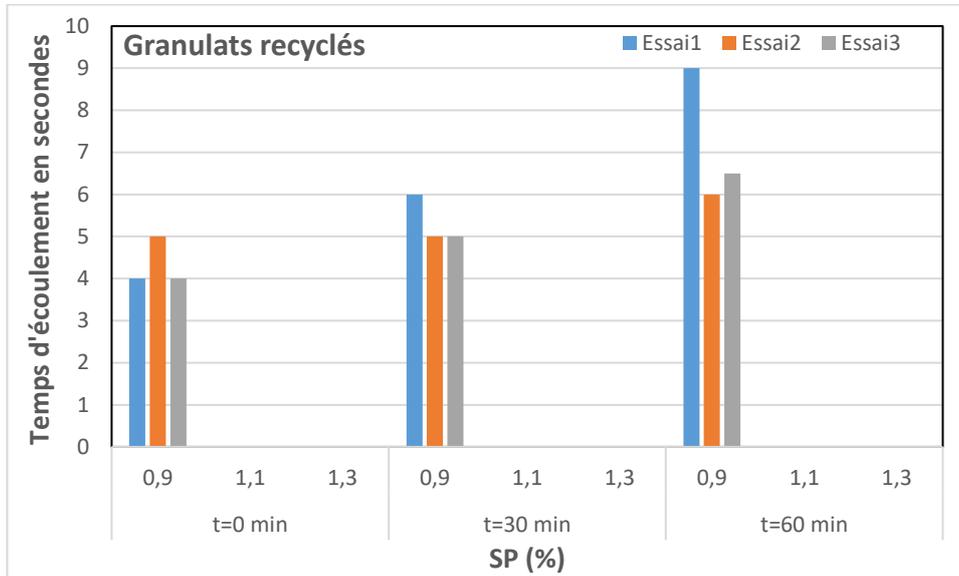


Figure III.7 : Variation du temps d'écoulement des BAP de granulats recyclés en fonction du dosage en SP et le temps de vieillissement (**Avant déstructuration**)

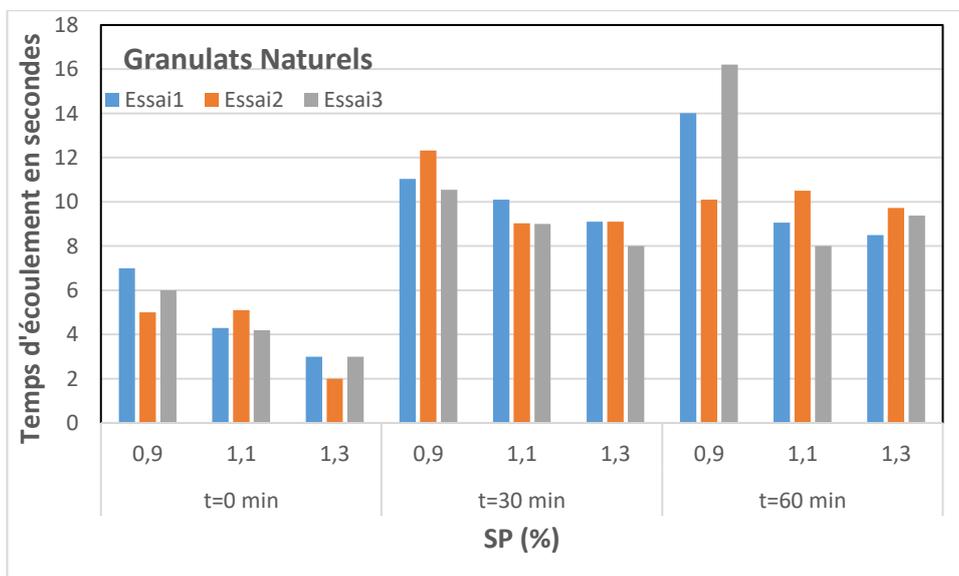


Figure III.8 : Variation du temps d'écoulement des BAP de granulats naturels en fonction du dosage en SP et le temps de vieillissement (**Après déstructuration**)

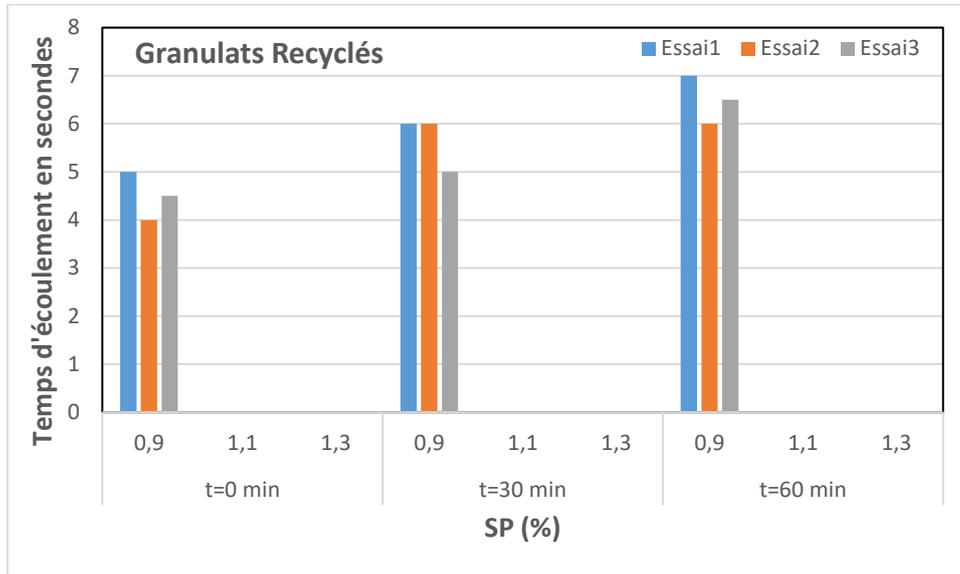


Figure III.9 : Variation du temps d'écoulement des BAP de granulats recyclés en fonction du dosage en SP et le temps de vieillissement (**Après déstructuration**)

L'évolution de la viscosité dans le temps est mise en évidence par la figure III.10. Cette caractéristique est déterminée suivant la formule tirée des travaux de Sedran (1999) :

$$\mu = \rho / 1000. (0,0268 Sf - 2,39). T500$$

Où :

μ : est la viscosité (Pa.s).

ρ : est la masse volumique (kg/m^3).

Sf : est l'étalement (mm).

T500 : est le temps d'écoulement de 500 mm (s).

Tableau III.2 : Variation de la masse volumique à l'état frais des BAP

Série A : BAP à granulats naturels									
Le temps	t=0 min			t=30 min			t=60 min		
Sp (%)	0,9	1,1	1,3	0,9	1,1	1,3	0,9	1,1	1,3
M.V (kg/m^3)	2,38	2,3	-	2,38	2,29	2,52	2,3	2,41	2,49
	2,42	2,31	-	2,45	2,45	2,45	2,31	2,59	2,42
	2,44	2,35	-	2,47	2,3	2,39	2,31	2,38	2,36
Série B : BAP à granulats recyclés									
Étalement (cm)	2,38	-	-	-	-	-	-	-	-
	2,39	-	-	-	-	-	-	-	-
	2,37	-	-	-	-	-	-	-	-

Dans cette formule les masses volumiques à l'état frais sont tirées du tableau III.2 et les étalements et les valeurs de T500 sont représentés dans le tableau III.1. On constate sur la figure III.10 que la viscosité diminue lorsque le dosage en SP augmente et que cette viscosité augmente lorsque le temps de vieillissement s'accroît, et ce qui est logique. Néanmoins, la viscosité diminue lorsque les BAP ont subi une déstructuration. Pour certains mélanges la valeur de la viscosité est supérieure après déstructuration qu'avant déstructuration, ceci est semble-t-il lié aux mesures prises.

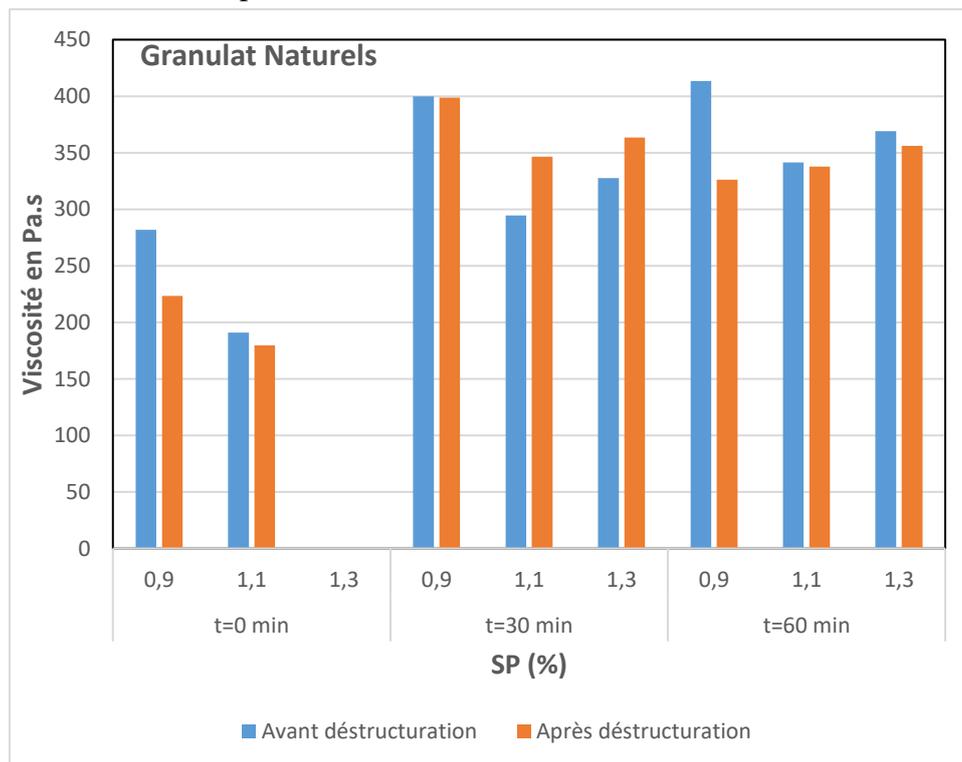


Figure III.10: Variation de la viscosité des BAP de granulats naturels en fonction du dosage en SP et le temps de vieillissement

On note que la viscosité des BAP de granulats recyclés est inférieure à celle des BAP de granulats naturels. Ceci est une conséquence directe de la présence d'eau qui n'est pas encore absorbée qui serve à augmenter la fluidité et également la présence d'une densité faible des granulats recyclés qui sont facilement entraînés par le volume de pâte, comparativement aux granulats naturels plus lourds. De même la viscosité diminue après déstructuration.

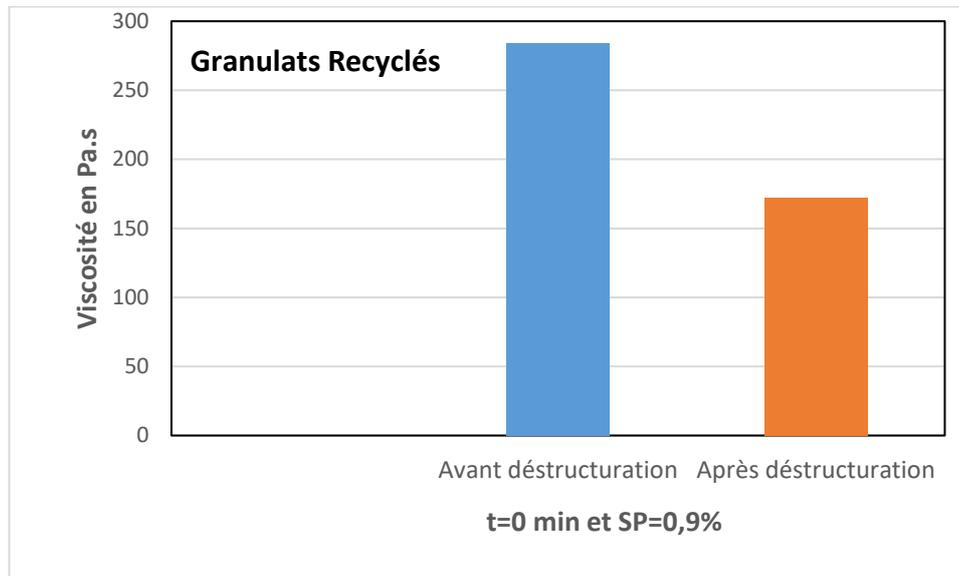


Figure III.11: Variation de la viscosité des BAP de granulats recyclés pour SP=0.9% et t=0 min

III.1.2 Mobilité en milieu confiné :

Le tableau III.3 regroupe les valeurs des rapports H_2/H_1 de la boîte en L pour les BAP à granulats naturels et recyclés. Dans ce tableau est représenté les effets du SP, le temps de vieillissement et l'influence du phénomène de déstructuration (avant et après). Pour chaque test 3 essais ont été effectués. Pour que le BAP satisfait les conditions de non blocage en milieu confiné il faut que le rapport H_2/H_1 soit compris entre 0.8 et 1.

Tableau III.3 : Résultats de l'essai de la boîte en L pour le BAP naturel et le BAP recyclé

Avant déstructuration

Série A: BAP à granulats naturels									
Le temps	t=0 min			t=30min			t=60 min		
Sp (%)	0,9	1,1	1,3	0,9	1,1	1,3	0,9	1,1	1,3
Rapport H_2/H_1	0.8	0.81	0.93	0.33	0.71	0.68	0.18	0.2	0.45
	0.82	0.83	0.9	0.21	0.65	0.78	0.11	0.33	0.5
	0.81	0.85	0.95	0.31	0.8	0.62	0.12	0.37	0.57
Série B: BAP à granulats recyclés									
Rapport H_2/H_1	0.83			0.4			0.27		
	0.83			0.33			0.34		
	0.84			0.4			0.33		

Après déstructuration

Série A : BAP à granulats naturels									
Le temps	t=0 min			t=30 min			t=60 min		
Sp (%)	0,9	1,1	1,3	0,9	1,1	1,3	0,9	1,1	1,3
Rapport H ₂ /H ₁	0.83	0.84	0.95	0.33	0.71	0.68	0.25	0.4	0.7
	0.84	0.88	0.93	0.21	0.65	0.78	0.3	0.46	0.6
	0.8	0.95	0.96	0.31	0.8	0.62	0.41	0.5	0.53
Série B : BAP à granulats recyclés									
Rapport H ₂ /H ₁	0.85			0.43			0.31		
	0.85			0.53			0.36		
	0.84			0.69			0.4		

Les figures III.12 et III.13 illustrent les résultats obtenus dans la boîte en L pour les BAP confectionnés avec des granulats naturels et recyclés, respectivement. En fonction de l'accroissement du dosage en SP les valeurs des rapports H₂/H₁ augmentent, tandis que le temps du vieillissement augmente ces rapports chutent. Après des temps d'attentes de 30 et 60 minutes les conditions de passage dans la boîte en L ne sont plus satisfaites, puisque le rapport H₂/H₁ est inférieur à la valeur 0.8 (valeur minimale d'acceptabilité pour un BAP). Pour les BAP de granulats recyclés, seuls dosés avec SP=0.9% remplissent les conditions d'acceptabilité. Pour le même dosage et après des temps d'attente de 30 ou 60 minutes les valeurs du rapport H₂/H₁ sont largement inférieures à la valeur de 0.8. L'ajout d'une quantité d'eau supplémentaire, pour atténuer un possible effet d'absorption d'eau par les granulats recyclés, n'a pas donné l'effet escompté pour les temps de vieillissement de 30 et 60 minutes.

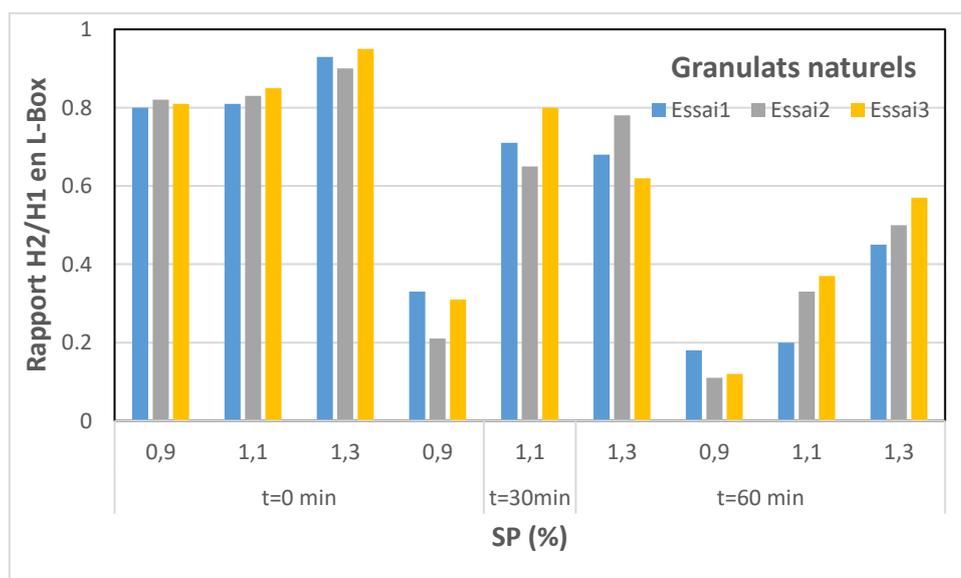


Figure III.12: Variation du rapport H₂/H₁ de L-Box des BAP de granulats naturels en fonction du dosage en SP et le temps de vieillissement (**Avant déstructuration**)

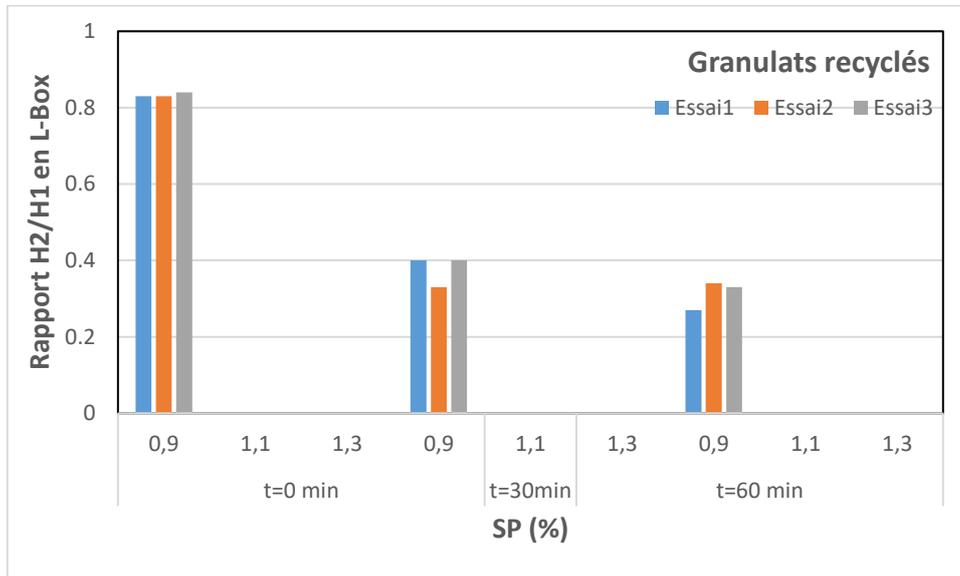


Figure III.13: Variation du rapport H2/H1 de L-Box des BAP de granulats recyclés en fonction du dosage en SP et le temps de vieillissement (**Avant déstructuration**)

Les figures III.14 et III.15 montrent les résultats après déstructuration des mélanges de granulats naturels et recyclés, respectivement. Il en découle de ces figures que l'effet de déstructuration des mélanges, après structuration pendant des temps de repos, a refluïdié légèrement les BAP mais le rapport $H_2/H_1=0.8$ n'est pas atteint après un temps de repos égal et supérieur à 30 minutes. Seuls les BAP dosés à 0.9% en SP ont satisfait le rapport 0.8

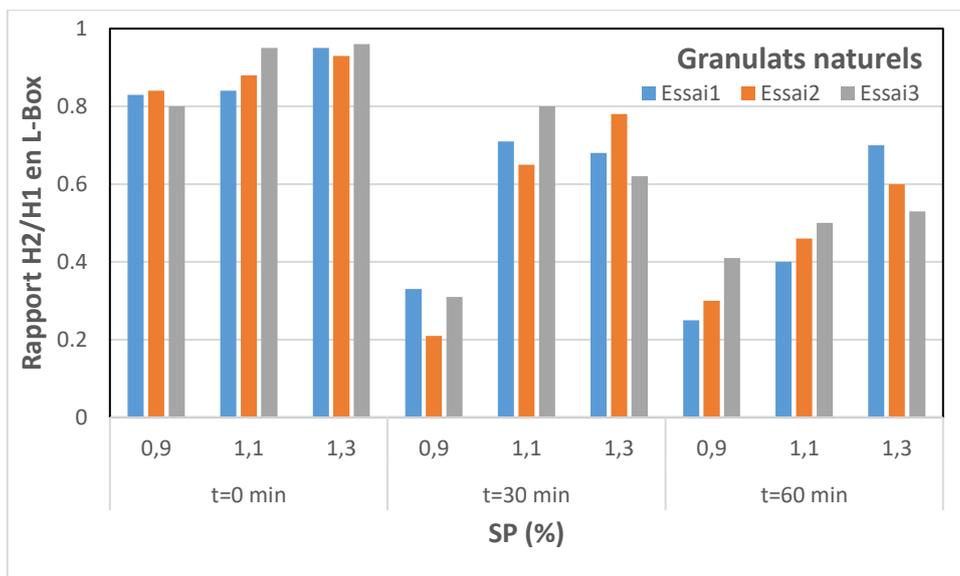


Figure III.14: Variation du rapport H2/H1 de L-Box des BAP de granulats naturels en fonction du dosage en SP et le temps de vieillissement (**Après déstructuration**)

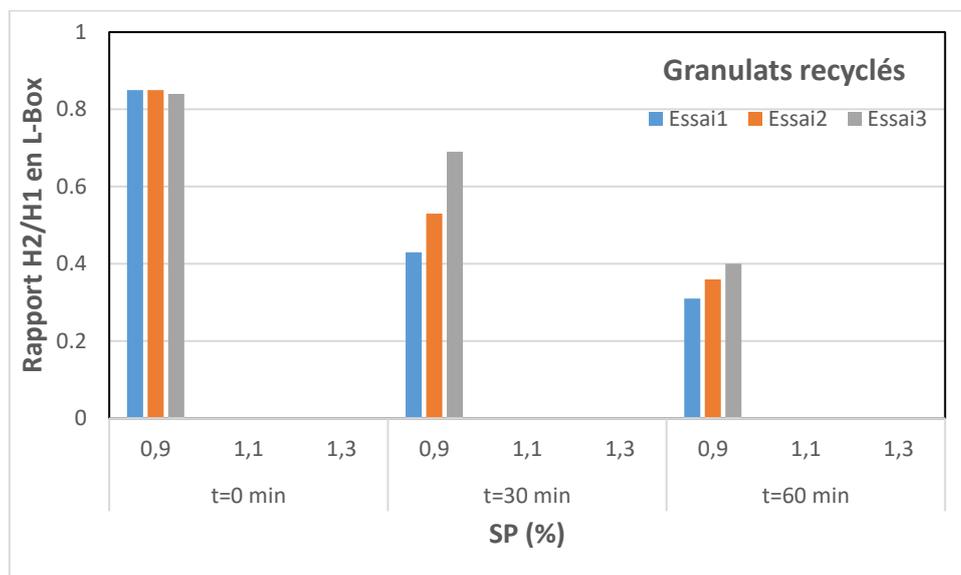


Figure III.15: Variation du rapport H2/H1 de L-Box des BAP de granulats recyclés en fonction du dosage en SP et le temps de vieillissement (**Après déstructuration**)

III.1.3 Résistance à la ségrégation statique :

L'objectif est d'évaluer la capacité du BAP à rester homogène après la mise en place jusqu'au début de prise. Les normes recommandent des valeurs inférieures à 15% et il est même toléré des valeurs allant jusqu'à 30%, au-delà de cette valeur, le béton n'est plus utilisable. Les réponses des tests réalisés pour l'essai de stabilité au tamis (pourcentage de laitance passant à travers le tamis 5 mm) des BAP des séries A et B sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau III.4 : Résultats des mesures de la stabilité au tamis pour les BAP à granulats naturels et recyclés

Avant déstructuration

Série A: BAP à granulats naturels									
Le temps	t=0 min			t=30min			t=60 min		
Sp (%)	0,9	1,1	1,3	0,9	1,1	1,3	0,9	1,1	1,3
Stabilité au tamis (%)	1.15	8.58	5.86			4.57			2.6
	1.4	5.67	14.37						
	3.23	8.49	7.4						
Série B: BAP à granulats recyclés									
Stabilité au tamis (%)	5.5			3.51					
	4.9			2.7					
	6.3			3.6					

Après déstructuration :

Série A: BAP à granulats naturels					
Le temps	t=15 min			t=15+30min	
Sp (%)	0,9	1,1	1,3	0,9	1,1
Stabilité au tamis (%)	1.15	8.58	5.86	5.7	3.9
	1.04	5.67	14.37	5	4.5
	3.23	8.49	7.4	6.5	4
Série B: BAP à granulats recyclés					
Stabilité au tamis (%)	5.7			3.9	
	5			4.5	
	6.5			4	

Les figures III.16 et III.17 montrent la variation de la résistance à la ségrégation des BAP de granulats naturels et recyclés, avant déstructuration. Toutes les mesures satisfont le critère d'acceptabilité, dont la valeur de la laitance qui passe à travers le tamis 5 mm doit être inférieure à 15%. Au fur et à mesure que le % de SP augmente la valeur de la résistance à la ségrégation augmente, tandis que cette caractéristique diminue lorsque le temps de repos augmente. Le SP a tendance à fluidifié le mélange ce qui a contribué à l'augmentation de laitance et le temps d'attente a permis l'hydratation du ciment de produire ce qui a favorisé une adhérence même partielle avec les granulats donnant ainsi moins de laitance. Au dosage de 0,9% en SP, les BAP de granulats recyclés présentent des valeurs de résistance à la ségrégation supérieures à celles observées avec les granulats naturels et ceci est dû à la quantité d'eau rajoutée aux mélanges de granulats recyclés.

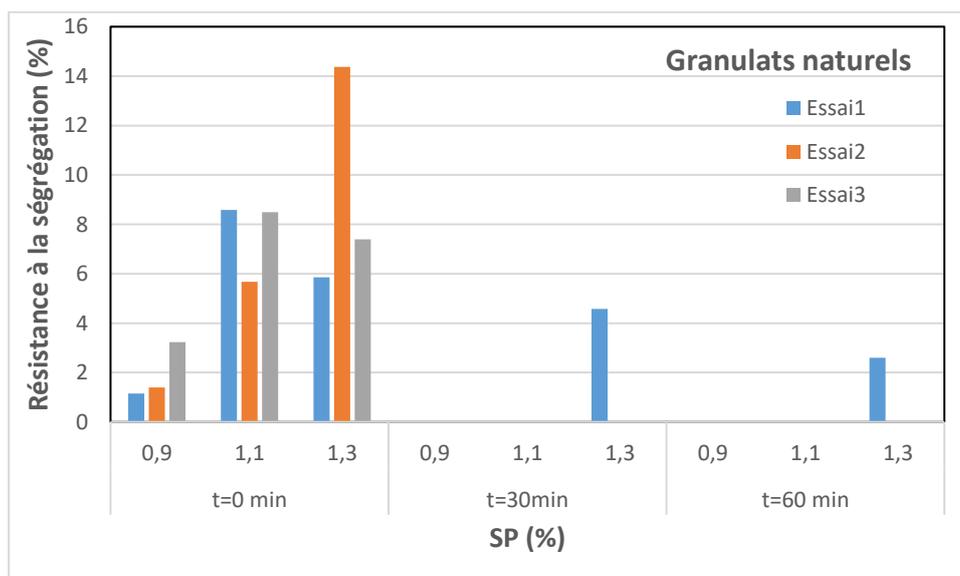


Figure III.16: Variation de la résistance à la ségrégation des BAP de granulats naturels en fonction du dosage en SP et le temps de vieillissement (**Avant déstructuration**)

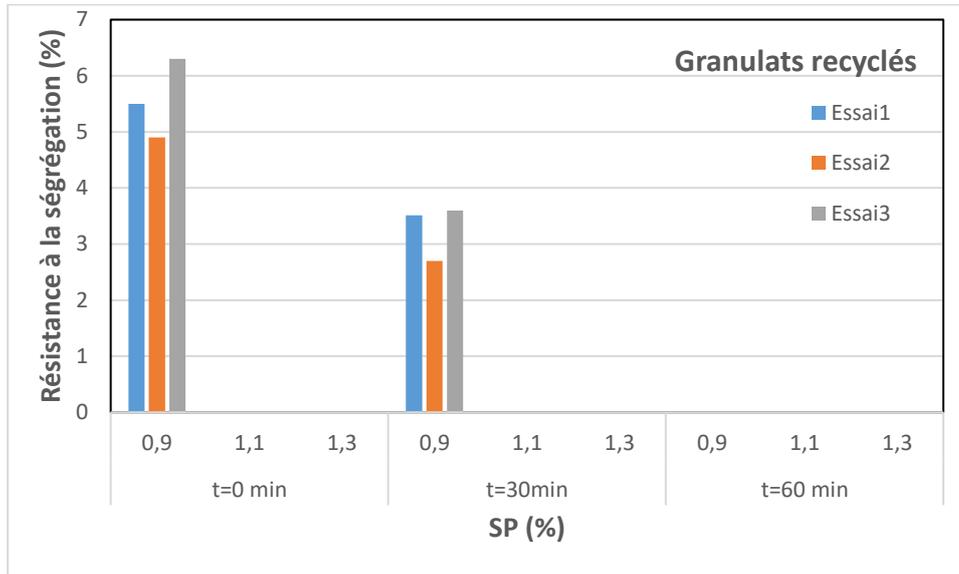


Figure III.17: Variation de la résistance à la ségrégation des BAP de granulats recyclés en fonction du dosage en SP et le temps de vieillissement (**Avant déstructuration**)

Les figures III.18 et III.19 illustrent la variation de la résistance à la ségrégation des BAP de granulats naturels et recyclés, après déstructuration. Les mesures de laitance ont augmenté lorsque les mélanges ont été déstructurés. Un malaxage de nouveau a brisé les tensions superficielles qui ont été créés entre la pâte cimentaire et les granulates ce qui a libéré plus de pâte ou de laitance.

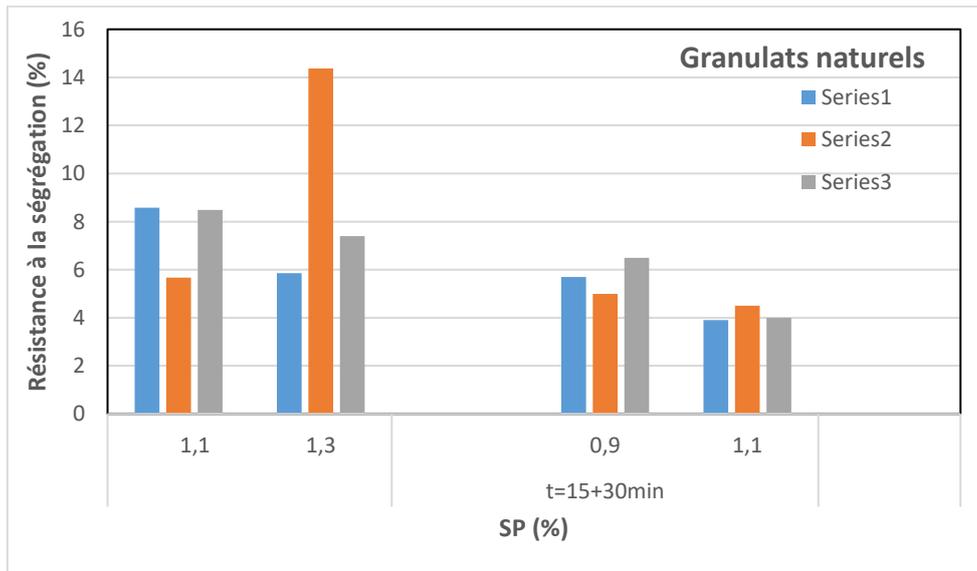


Figure III.18: Variation de la résistance à la ségrégation des BAP de granulats naturels en fonction du dosage en SP et le temps de vieillissement (**Après déstructuration**)

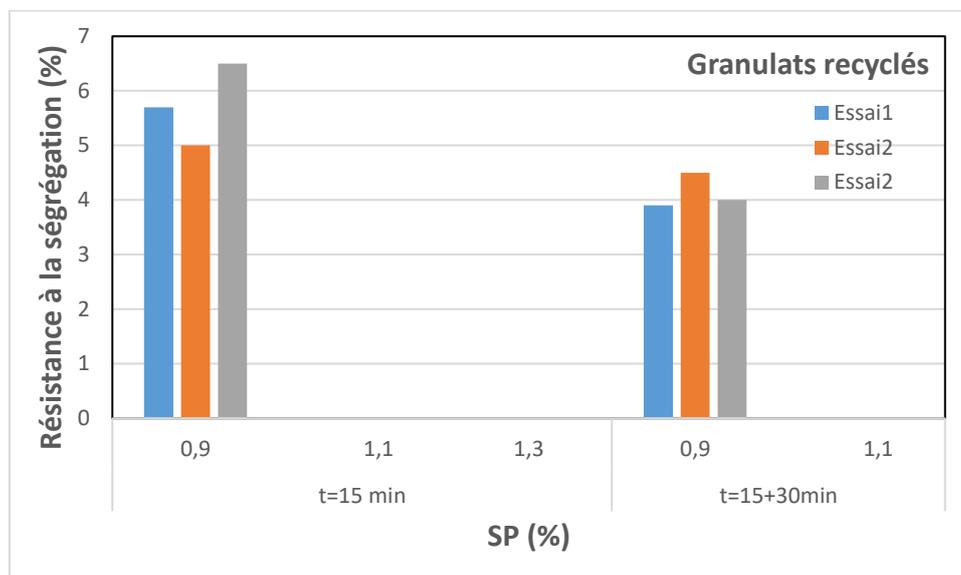


Figure III.19: Variation de la résistance à la ségrégation des BAP de granulats recyclés en fonction du dosage en SP et le temps de vieillissement (**Après déstructuration**)

III.1.4 La masse volumique à l'état frais :

La densité des bétons d'étude est mesurée à l'état frais après remplissage des moules cubiques destinés à la confection des éprouvettes pour la mesure de la résistance mécanique à la compression. Les résultats de la masse volumique réelle obtenue sur les deux séries sont présentés dans le tableau III.5.

Tableau III.5 : résultats de la densité des bétons frais des séries A et B

Série A: BAP à granulats naturels										
		t=0 min			t=30 min			t=60 min		
Le temps		0.9	1.1	1.3	0.9	1.1	1.3	0.9	1.1	1.3
Masse Volumique (g/cm ³)		2.38	2.3	-	2.38	2.29	2.52	2.3	2.41	2.49
		2.42	2.31	-	2.45	2.45	2.45	2.31	2.59	2.42
		2.44	2.35	-	2.47	2.3	2.39	2.31	2.38	2.36
Série B: BAP à granulats recyclés										
Masse Volumique (g/cm ³)		2.38	-	-	-	-	-	-	-	-
		2.39	-	-	-	-	-	-	-	-
		2.37	-	-	-	-	-	-	-	-

La variation de la masse volumique à l'état frais est liée aux caractéristiques intrinsèques des granulats utilisés. La masse volumique des granulats naturels étant supérieure à celle des granulats recyclés.

- La densité calculée théoriquement des BAP à base des granulats naturels est : $\approx 2.31 \text{ g/cm}^3$
- La densité calculée théoriquement des BAP à base des granulats recyclés est : $\approx 2.23 \text{ g/cm}^3$

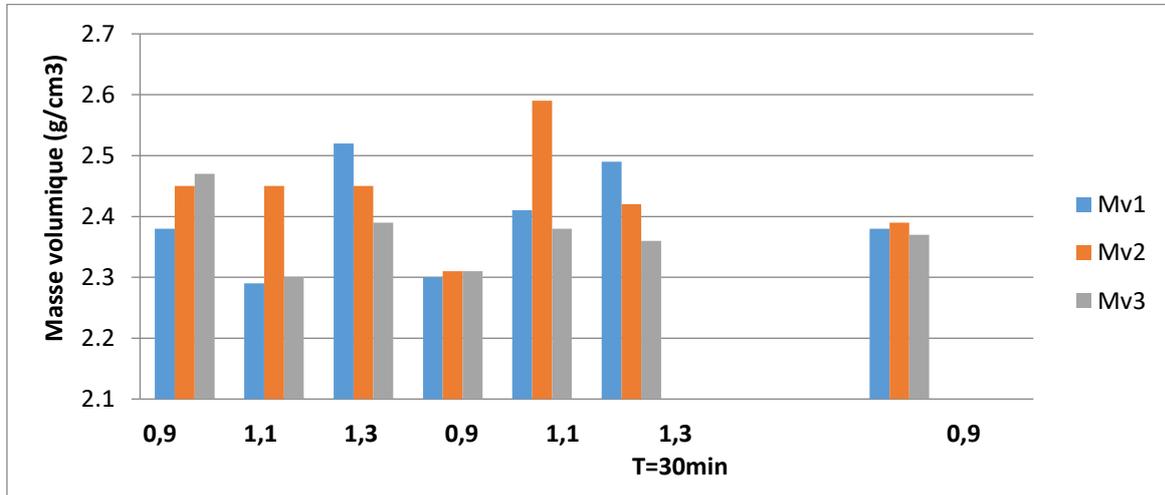


Figure III.20 : Evolution de la masse volumique à l'état frais en fonction du dosage en SP pour les BAP à RN et à RG

III.2 Caractérisation à l'état durci :

III.2.1 La résistance à la compression :

Les résultats obtenus des résistances à la compression à 90 jours sont regroupés dans les tableaux III.6 et III.7. Ces valeurs sont données en fonction de la variation du % de SP.

Tableau III.6: Résultats des résistances à la compression (en MPA) des BAP de série A composée de granulats naturels

SP (%)	0.9	1.1	1.3
Rc après 90 jours, MPa	43.83	29.88	45.02
	47.43	50.32	42.15
	54.34	58.25	42.59
	43.1	46.12	42.67



Figure III.21 : Dispositif de l’essai d’écrasement des éprouvettes à la compression

Tableau III.7 : Résultats des résistances. à la compression (en MPA) des BAP avec granulats recyclés.

SP (%)	0.9
R après 90 jours (MPa)	38.43
	20.35
	24.32
	30.51

Comme attendue, le remplacement des granulats naturels par des recyclés a entraîné en général une diminution des résistances mécaniques des BAP et ceci a été également confirmé par d’autres travaux réalisés précédemment dans notre laboratoire. Les granulats recyclés ayant une masse volumique et des résistances mécaniques inférieures à celles des granulats naturels. De plus l’ancien mortier à forte porosité a contribué à donner des résistances moindres. L’eau supplémentaire ajoutée aux compositions des BAP de granulats recyclés fait aussi chuter la résistance, puisque le rapport E/C a augmenté.

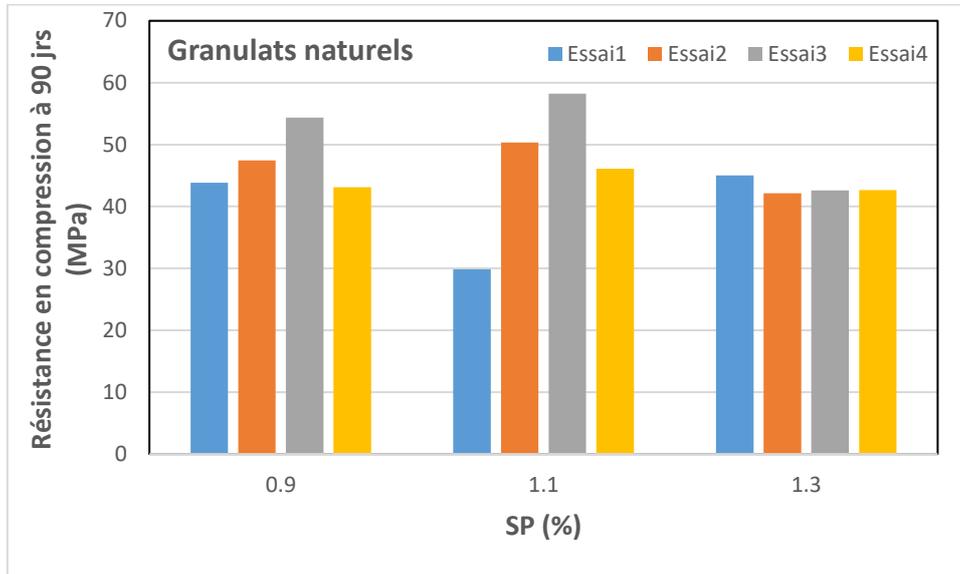


Figure III.22 : Evolution de la résistance en compression à 90 jours des BAP de granulats naturels

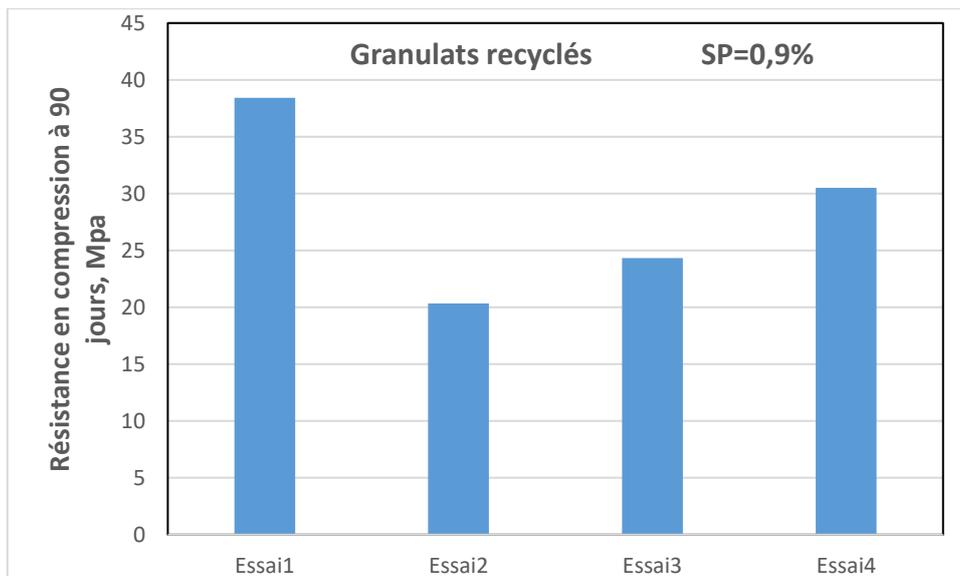


Figure III.23 : Evolution de la résistance en compression à 90 jours des BAP de granulats recyclés

III.2.2 La capacité d'absorption :

Les résultats de l'essai d'absorption capillaire obtenue sur les deux séries sont présentés dans les tableaux III.12 et III.13.

La figure III.14 montre les résultats de la capacité d'absorption d'eau (CAE) en fonction du dosage de SP (%) pour les mélanges BAP à GN et à GR. La CAE évolue en fonction de l'augmentation du dosage en SP. On a constaté que le SP utilisé assure un ressuage à la surface des BAP assez conséquent qui par la suite celui-ci migre le cœur du béton et au cours du

protocole d'essai s'évapore et les vides laissés se remplissent par la suite d'eau lors de l'opération saturation.

Tableau III.8 : Résultat de l'absorption d'eau pour le BAP série 01

Le temps		t=0 min	
Sp (%)	0.9	1.1	1.3
Absorption d'eau (%)	5.38	6.16	4.4
GN	3.01	6.26	4.99
	3.21	6.29	3.86

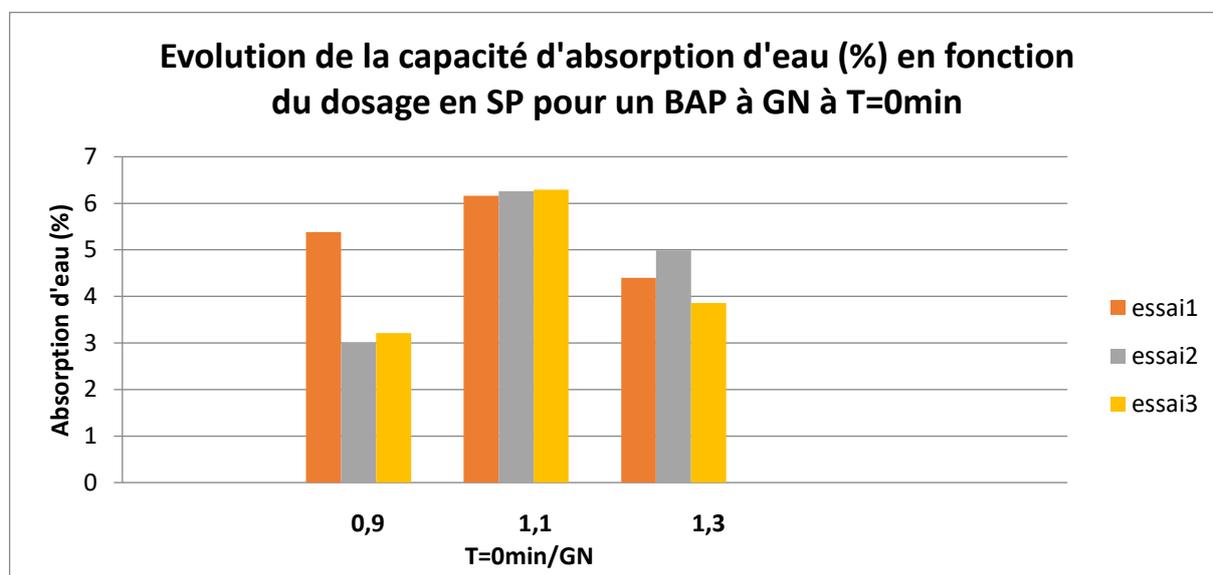


Figure III.24 : Evolution de la capacité d'absorption d'eau (%) en fonction du dosage en SP pour les BAP à GN.

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.

Les résultats obtenus permettent de tirer les enseignements suivants :

- Sur la mobilité en milieu non confiné :
 - L'apport d'un SP à la composition du BAP permet d'améliorer la maniabilité,
 - Les temps d'attente ou vieillissement porte atteinte à la maniabilité,
 - Le critère d'acceptabilité pour un écoulement n'est plus rempli surtout pour les compositions à faible dosage en SP.
 - La déstructuration du BAP après un temps de repos a permis de refluidifier le mélange. La maniabilité s'est améliorée.
 - La thixotropie du BAP est observée après la déstructuration.
 - L'eau supplémentaire ajoutée aux BAP de granulats recyclés améliore davantage la maniabilité.

- Sur la viscosité (temps d'écoulement)
 - La viscosité diminue lorsque le dosage en SP augmente et elle augmente lorsque le temps de vieillissement s'accroît,
 - La viscosité diminue lorsque les BAP ont subi une déstructuration
 - Les mesures de T500 déstructuration confirme la thixotropie du mélange qui revient en son état initial après une période de structuration.
 - La viscosité des BAP de granulats recyclés s'est améliorée par l'apport d'eau supplémentaire.

- Sur la mobilité en milieu confiné :
 - Le dosage en SP améliore la mobilité du BAP dans le milieu confiné.
 - Le temps de repos fait chuter les valeurs des rapports H_2/H_1 .
 - Après des temps d'attentes de 30 et 60 minutes les conditions de passage dans la boîte en L ne sont plus satisfaites, puisque le rapport H_2/H_1 est inférieur à la valeur 0.8.
 - L'ajout d'une quantité d'eau supplémentaire, pour atténuer un possible effet d'absorption d'eau par les granulats recyclés, n'a pas donné l'effet escompté pour les temps de vieillissement de 30 et 60 minutes.
 - L'effet de déstructuration des mélanges, après structuration pendant des temps de repos, a refluidifié légèrement les BAP mais le rapport $H_2/H_1=0.8$ n'est pas atteint après un temps de repos égal et supérieur à 30 minutes. Seuls les BAP dosés à 0.9% en SP ont satisfait le rapport 0.8.

- Sur la résistance à la ségrégation
 - Toutes les mesures satisfont le critère d'acceptabilité, puisque ces mesures sont inférieures à 15%.
 - Au fur et à mesure que le % de SP augmente la valeur de la résistance à la ségrégation augmente, tandis que cette caractéristique diminue lorsque le temps de repos augmente.
 - Les mesures de laitance ont augmenté lorsque les mélanges ont été déstructurés. Un malaxage de nouveau a brisé les tensions superficielles qui ont été créés entre la pâte cimentaire et les granulats ce qui a libéré plus de pâte ou de laitance.

- Sur la résistance mécanique
 - Le remplacement des granulats naturels par des recyclés a entraîné une diminution des résistances mécaniques des BAP.
 - Pour les granulats recyclés, la masse volumique, la résistance mécanique, la présence de l'ancien mortier, l'eau supplémentaire ajoutée sont tant de facteurs qui défavorisent la résistance mécanique des bétons de granulats recyclés.

Références bibliographies

Haifi. Mohamed Redha. ;(2011). « Formulation des bétons autoplaçants » Thèse Magister en Génie Civil. Université Mentouri-Constantine.

Hanna Fares. ;(2009). « Propriétés mécaniques et physico-chimiques des bétons autoplaçants exposés à une température élevée » Thèse Doctorat. Ecole Doctorale Science et ingénierie. Université de Cergy-Pantaise. Soutenue le 07 Décembre 2009.

HOLCIM ; (2004), « le béton autoplaçant ».Version 26-11-2004.

Hieu Tha Huynh (1996). Compatibilité ciment-superplastifiant dans les bétons à hautes performances. Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées ; n°206, pp.63-73.

Lucas. J. ;(2006). Verres et optiques Bulletin de l'Union des Physiciens (BUP). 100. p. 581 - 598.

Philippe TURCRY . retrait et fissuration des bétons autoplaçants. Influence de la formulation. Thèse de doctorat, (*l'université de NANTES*).

SAADANIS. « COMPORTEMENT DES BETONS A BASE DE GRANULATS RECYCLES » .thèse de doctorat. Université Mentouri Constantine.

Zahia Toutou et Nicolas Roussel (2005). Rhéologie des bétons autoplaçants Évaluation de la thixotropie. BULLETIN DES LABORATOIRES DES PONTS ET CHAUSSÉES - 258-259 OCTOBRE-NOVEMBRE-DÉCEMBRE 2005 : PP. 15-27

Safi Brahim. ;(2011/2012). « Formulation et caractérisation rhéologique et physico-mécanique des pâtes cimentaires et mortiers autoplaçants » thèse de doctorat. UMBB.

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 B., Sébastien R., Déodonne K., Cristian C., M. Françoise F., Christophe F. ;(2014).« Les granulats recyclés de bétons : un matériau à fort potentiel de valorisation dans les bétons ». 1er COLLOQUE sur l'ECOMATERIAUX. 24-28 NOVEMBRE 2014.

Sandrine Bethmont ; (2005). « Mécanisme de ségrégation dans les bétons autoplaçants » Thèse doctorat. Laboratoire central des ponts et chaussées.58Bd Lefbvre 75015 Paris. Soutenue le 15 décembre 2005.

SIAHMED Hamza., OUALIT Mehenna. ; (2007). « Formulation et caractérisation rhéologique d'un BAP : action de différents super plastifiants sur les propriétés rhéologique .PFE Université de Boumerdes .juin 2007.

Stéphan ASSIE. ;(2004). « Durabilité des bétons autoplaçants ». Thèse de Doctorat de l'Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse. Octobre 2004.

Zaitri .R.;(2015). HAL Id: hal-01167746

<https://hal.archivesouvertes.fr/hal01167746>Submitted on 24 Jun 2015

<https://fr.m.wikipedia.org/wiki/Recyclage>

<https://www.tomra.com/fr-fr/sorting/recycling/your-application/waste> sorting/construction-
And-demolition-waste