

UNIVERSITE DE SAAD DAHLAB DE BLIDA

Faculté des Science de l'Ingénieur

Département de Génie Civil

MEMOIRE DE MASTER

Spécialité : Structures, Réparation et Coût des constructions

**FORMULATION ET PERFORMANCE D'UN BETON
AUTOPLACANT A BASE DES GRANULATS RECYCLES ISSUS
D'UN BETON AUTOPLACANT**

Par

BOUZIDA IBTISSEM

W. YAHIAOUI	Doctorant, USDBlida	Président
F. DEBIEB	Maître de conférences A, U. de Médéa	Examineur
S. KENAI	Professeur, USDBlida	Rapporteur
O. KOUIDER DJELLOUL	Doctorant, USDBlida	Co-Rapporteur

Blida, Juin 2015

ABSTRACT

A self-compacting concrete (SCC) is a fluid concrete, very deformable, homogeneous, stable and can set up by gravity and without the use of any means of vibration. In order to achieve a greater fluidity of SCC and prevent segregation and bleeding, the high dosage in mineral additions is a necessity for good design of SCC. The main objective of this work is to study the effect of recycled concrete aggregates on the fresh and hardened state properties of the SCC, by substitution of either 100% or 50% of natural aggregates by recycled aggregates, and by comparing with a The method Okamura was used for making self-compacting concrete. All compositions were made with fixed water ratio/binder ($W/b = 0.40$), the same report/ratio $G/S=1$, report/ratio S/M with 0.50 constant and according to the results of optimization on the mortar proportioning while superplastifiant is 1.8% of the weight of cement. Tests conducted in the experimental program for determining the rheological characteristics of the SCC are: Slump flow, V funnel flow, test for L- box and Sieve stability test. Compressive strength, non-destructive tests, water permeability, were also studied. The results have shown that the substitution of 50% or 100% of natural aggregates by recycled concrete aggregates gives SCC with very comparable workability to that of the reference SCC. The substitution of natural aggregates by recycled aggregates decreases compressive strength and increase the plate depth of penetration.

Key words: Self-compacting concrete, Recycled aggregates, Workability, compressive strength, permeability.

RESUME

Le béton autoplaçant (BAP) est défini comme un béton très fluide qui se met en place sous l'effet de son poids propre, sans vibration interne ou externe. Afin d'atteindre une grande fluidité de BAP et d'empêcher la ségrégation et le ressuage, le dosage élevé en additions minérales est une nécessité pour une bonne conception de BAP. L'objectif principal de ce travail est d'étudier l'influence des granulats recyclés sur les propriétés du BAP à l'état frais et durci en substituant 100% et 50% de granulats naturels par des granulats recyclés, et en comparant avec un BAP de référence à base de 100% de granulats naturels. La méthode Okamura a été utilisée pour formuler le béton autoplaçant. Toutes les compositions ont été fabriquées avec rapport eau/liant fixe ($E/L=0,40$), un même rapport $G/S=1$, rapport S/M à 0,50 constante et d'après les résultats d'optimisation sur le mortier le dosage en superplastifiant est 1,8% du poids du ciment. Les essais menés dans le programme expérimental qui pour déterminer les caractéristiques rhéologiques du BAP sont : essais d'étalement au cône d'Abrams, d'écoulement à l'entonnoir en V, essai à la boîte en L, et de stabilité au tamis. La résistance à la compression, les essais non destructifs, la perméabilité à l'eau ont été aussi étudiés. Les résultats expérimentaux montrent que la substitution totale ou partielle des granulats naturels par des granulats recyclés donne un BAP dont les propriétés et les caractéristiques à l'état frais restent plus au moins comparable à celles du BAP à base de granulats naturels.. La substitution du granulats naturels par des granulats recyclés diminue la résistance à la compression et augmenter la profondeur de pénétration.

Mots clés : Béton autoplaçant, Granulats recyclés, Ouvrabilité, Résistance à la compression, perméabilité.

ملخص

الخرسانة المرصوصة ذاتيا هي خرسانة مرنة، متجانسة ومستقرة بنسبة وزنها ودون استخدام أي وسيلة من الاهتزاز. ومن أجل تحقيق قدر أكبر من المرونة للخرسانة المرصوصة ذاتيا ومنع التفرقة لمكوناتها والإفرازات المائية، يجب على الخليط أن يحتوي على نسبة عالية من المواد المعدنية الرقيقة جدا في الخليط لتصميم جيد. يهدف هذا العمل الى دراسة تأثير الحصى والرمل المعاد استعماله الناتج عن النفايات خرسانة البناءات على خصائص المرونة للخرسانة المرصوصة ذاتيا وذلك باستبدال 50% او 100% من الحصى والرمل المستخرج طبيعيا بأخرى معاد استعمالها ومقارنتها بخرسانة مكونة من مواد طبيعية. ولتحضير الخلطات طبقنا طريقة أوكامورا. كل التراكيب حضرت بنسب ثابتة منها: نسبة الماء / الرابط = 0.4، ونفس الرمل / الحصى = 1، مونة / الحصى = 0.50. والنتائج التقييمية على المونة أثبتت أن نسبة اللدنات الممتازة هي 1.8% من وزن الاسمنت، والتجارب التي أجريت في البرنامج التجريبي لتحديد الخصائص الريولوجية للخرسانة المرصوصة ذاتيا هي: تجربة نشر مخروط ابرامز، وتدفق القمع V، اختبار تدفق L والاستقرار من خلال منخل. ثم قياس قوة الضغط. فحوص غير اتلافية. تم أيضا دراسة نفاذية المياه مع وجود ضغط المياه. اظهرت نتائج الدراسة التجريبية ان تعويض 50% و 100% من الرمل والحصى الطبيعي بالرمل والحصى المعاد استعماله يمنح خرسانة ذات مرونة جد متشابهة للخرسانة بالمواد الطبيعية. احلال المجامع الطبيعية بالركام المعاد استعماله يقلل قوة الضغط ويزيد من عمق نفاذيه المياه.

الكلمات المفاتيح: الخرسانة المرصوصة ذاتيا، الركام المعاد استعماله، الملدن الممتاز المساعد على المرونة، قوة الضغط، النفاذية.

REMERCIEMENTS

Au terme de ce travail, je tiens à remercier en premier lieu Dieu le miséricordieux qui nous a donné du courage et de la volonté avec lesquels ce mémoire a été achevé.

Cette thèse est le fruit d'un long travail qui n'aurait pu arriver à terme sans l'aide de nombreuses personnes. Je tiens à ce que chacune d'elles sache que je la remercie sincèrement.

Mes gratitude vont aussi à notre encadreur Monsieur Kenai Said, Professeur à l'université de Blida pour son aide, sa disponibilité, et pour la confiance qu'elle faisait en nous, et également pour sa gentillesse et sa modestie. Je le remercie pour le temps qui a consacré pour corriger ce mémoire.

Un grand merci à notre Co-encadreur Monsieur Omar Kouider Djelloul, ici j'écris ce que je devais dire avant d'écrire : merci beaucoup monsieur de nous avoir guidés et suivis. Je ne saurai oublier son aide efficace lors de la réalisation de la partie expérimentale, qu'il soit profondément remercié.

Je remercie aussi les membres de jury pour l'honneur qu'ils nous ont accordé en acceptant de juger notre travail :

Je tiens à adresser toute ma gratitude à M^rYAHIAOUI Walid Maître, mes chaleureux remerciements vont vers cette personne, pour sa gentillesse, ses conseils, ses orientations pris pour mener à bien ce travail.

Je souhaiterai également remercier Monsieur Fortas Abdelkader, laborantin de laboratoire de la Géomatériaux du département de Génie Civil de l'Université de Blida pour leur aide précieuse et leur soutien permanent.

Je tiens également à remercier tous les enseignants de département de Génie civil qui ont contribué à ma formation, commençant par celui qui m'avait fait m'asseoir pour recevoir le premier cours et finissant par celui qui me fait me lever pour exposer mon travail.

Je remercie tous mes collègues de travail, Rouis Naima, Lakhel Zhor, pour leur aide et leur gentillesse spontanée et pour tous les moments que nous avons traversé ensemble sans

oublier de remercier tous mes amis de promotion.

Mes vifs remerciements du tout mon cœur ma famille, A mes chers frères, mes sœurs et en particulier mes parents qui m'ont soutenu durant mes études et qui m'ont toujours encouragé. Leur générosité est inestimable. Merci aussi à tous mes amies, meriem, Soumia, feriel.

Je terminerai en remerciant du tout ceux et toutes celles qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.

TABLE DES MATIERES

Résumé	2
Remerciements.....	4
Table des matières	6
Liste des figures et des tableaux	10
Liste des symboles et des abréviations	15
Introduction générale	17
Chapitre 1 : Le Béton Auto-Plaçant – Etude bibliographique	
1.1 Généralités	20
1.2 Définition des bétons autoplaçants	20
1.3.1 Historique des bétons autoplaçants	20
1.3 Spécificité de la composition des BAP	21
a-Volume de pâte élevé	21
b.Quantité élevée de fines (particules < 125 µm)	21
c. Utilisation de superplastifiants.....	22
d. Utilisation éventuelle d'un agent de cohésion (réteneur d'eau)	22
e.Faible volume de gravillons	22
f. Un rapport E/C faible et un dosage en eau limité [4]	22
1.4 Formulation d'un béton auto plaçant	23
1.4.1 Méthodes basées sur l'optimisation des mortiers.....	23
1.4.2 Méthodes basées sur l'optimisation du volume de pâte	24
1.4.3 Méthodes basées sur l'optimisation du squelette granulaire.....	25
1.4.4 Méthode basée sur un plan d'expérience.....	25
1.4.5 L'approche basée sur l'utilisation du mortier du béton équivalent MBE	25
1.5 Principe et application des approches	26
1.5.1 Approche Japonaise ou la méthode générale.....	26

1.5.2 Approche Suédoise (CBI).....	27
1.5.3 Approche du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées LCPC	28
1.6 Propriété du BAP à base de granulats recyclés	28
1.6.1 Caractéristiques des granulats recyclés	28
a. Granulométrie, teneurs en fines et forme des gravillons.....	29
b. Dureté	29
c. Absorption d'eau.....	31
1.7 Propriété du BAP à base de granulats recyclés.....	32
1.7.1 À l'état frais	32
1.7.2 À l'état durci	39
1.7.2.1 Résistance à la compression	39
1.7.2.2 Résistance à la compression et à la traction.....	39
1.7.2.3 Résistance à la traction	43
1.7.2.4 Module élastique.....	43
1.7.2.5 Retrait	43
a. Retrait plastique	43
b. Retrait endogène	43
c. Retrait de séchage	44
d. Retrait plastique	46
1.7.2.5 Absorption d'eau	46
1.7.2.6 Perméabilité	47
1.7.2.7 Carbonatation	47
2.5 Conclusion	47

Chapitre 2 : Matériaux et Méthodes d'essais

2.1 Introduction	49
2.2 Caractéristiques des matériaux utilisés	49
2.2.1 Ciment	49
2.2.2 Les Granulats naturels	50

2.2.2.1 Le sable	50
2.2.2.2 Le gravier	51
2.2.3 Les Granulats recyclés.....	51
2.2.4 L'eau de gâchage	56
2.2.5 Le Superplastifiant.....	56
2.3 Formulations adoptées	57
2.3.1 Formulation du mortier	57
2.3.1.1 Confection des mortiers	58
2.3.2 Formulation du BAP de Référence	59
2.3.2.1 Confection des BAP.....	61
2.4 Essais de caractérisations technologiques des BAP	62
2.4.1 Essais relatifs au Mortier à l'état frais	62
2.4.1.1 Essai d'Étalement au Mini-Cône.....	62
2.4.1.2 Essai à l'entonnoir en V (V-Funnel test)	63
2.4.2 Essais relatifs au BAP à l'état frais	63
2.4.2.1 Essai d'étalement au cône d'Abrams (Flow test)	65
2.4.2.2 Essai à l'Entonnoir en V (V-Funnel test).....	67
2.4.2.3 Essai à la boîte en L (L-Box test)	68
2.4.2.4 Essai de résistance à la ségrégation par tamisage	69
2.5 Démoulage et conservation des éprouvettes....	70
3.5.1 Résistance mécanique à la compression	71
3.5.2 Les essais non destructives....	71
3.5.2.1 Scléromètre (marteau de rebondissement de Schmidt)	71
a-Principe fondamental	71
b-Procédé de mesure	71
3.5.2.2 Ultrason (Essai de la vitesse d'impulsion ultrasonique)	73
a. Principe fondamental	73
b. Procédé de mesure	75
3.5.3 Perméabilité à l'eau....	75

2.6 Récapitulatif du programme des essais réalisés	77
----------------------------------------------------------	----

Chapitre 3 : Résultats Expérimentaux et Discussion

3.1 Introduction	80
3.2 Optimisation du rapport Superplastifiant.....	80
a. Etalement au mini-cône pour les mortiers	81
b. Temps d'écoulement à l'entonnoir en V pour mortiers	83
3.3 Effet du taux de substitution de granulats recyclés sur l'ouvrabilité des BAP	84
3.3.1 Mesures d'étalement et du temps T50 au cône d'Abrams	87
3.3.2 Mesure du temps d'écoulement par l'essai d'entonnoir en V (V-Funnel)....	88
3.3.3 Mesures du rapport H2/H1, les temps d'écoulement T20 et T40 de l'essai de la boîte en L (L-Box)	89
a. Mesure le rapport H2/H1	89
b. Mesure du temps d'écoulement T20 et T40	90
3.4.6 Mesure de résistance à la ségrégation par tamisage	90
3.4 Effet du taux de substitution de granulats recyclés sur les BAP à l'état durci.....	91
3.4.1 Mesure l'indice de rebondissement	92
3.4.2 Mesure la vitesse ultrasonique	93
3.4.3 Résistance à la compression... ..	94
3.4.4 La perméabilité à l'eau	96
Conclusion Générale et Perspectives	98
Référence	101
Annexe A : Exemple de calcul de la composition du mortier	
Annexe B : Exemple de calcul de la composition du béton	

LISTE DES FIGURES ET DES TABLEAUX

Liste des Figures :

Figure 1.1 : Composition d'un béton ordinaire (BO) et d'un BAP	23
Figure 1.2 : Notion d'excès de pâte : la pâte remplit la porosité (1) et écarte-les granulats (2)	24
Figure 1.3 : Forme des granulats recyclés	29
Figure 1.4 : Corrélation entre la teneur en mortier et le Los Angeles	31
Figure 1.5 : Variation de l'étalement de BAP avec des granulats recyclés en fonction de la qualité des fines	34
Figure 1.6 : Comparaison entre l'étalement d'un BAP (GN) et BAP (GR)	35
Figure 1.7 : Comparaison entre l'étalement des BAP ordinaires et recyclés	35
Figure 1.8 : Effet des granulats fins recyclés sur le diamètre d'étalement d'un BAP de granulats recyclés	36
Figure 1.9 : Comparaison entre le taux de remplissage des BAP ordinaires et recyclés	37
Figure 1.10 : Comparaison entre la résistance à la compression à 7 et 28 jours pour les deux types du BAP	40
Figure 1.11 : Résistance à la compression pour des BAP avec (0, 50 et 100%) de granulats recyclés	40
Figure 1.12 : Résistance à la compression pour des BAP avec (0, 50 et 100%) de granulats recyclés	42
Figure 1.13 : Résistance à la traction pour des BAP avec (0, 50 et 100%) de granulats recyclés	42
Figure 1.14 : Retrait de séchage pour BAP avec GR (25, 50, 75 et 100%) et rapport E/L=0.53	44

	11
Figure 1.15 : Retrait de séchage pour BAP avec GR (25, 50, 75 et 100%) et rapport E/L=0.44	45
	45
Figure 1.16 : Retrait de séchage pour BAP avec 100% GR et rapport E/L (A=0, 44, B=0,40 et C=0,35)	46
Figure 1.17 : Absorption d'eau pour des BAP avec (0, 50 et 100%) de granulats recyclés	50
Figure 2.1 : Figure 2-1 : Sable corrigé	50
Figure 2.2 : Courbes Granulométriques des granulats naturelles et recyclés	51
Figure 2.3 : Gravier Naturel	51
Figure 2.4 : Les éprouvettes en béton autoplaçant	53
Figure 2.5 : procédure de fabrication des granulats recyclés	53
Figure 2.6 : Concasseur à mâchoire	54
Figure 2.7 : Les granulats recyclés	54
Figure 2.8 : Comparaison entre le Masse volumique apparente des granulats naturels et recyclés	55
Figure 2.9 : Comparaison entre la Masse volumique absolue des granulats naturels et recyclés	55
Figure 2.10 : Comparaison entre le coefficient d'absorption d'eau (Ab) des granulats Naturels et recyclés	56
Figure 2.11 : Séquence de malaxage du mortier	59
Figure 2.12 : Malaxeur à mortier	59

Figure 2.13 : Malaxeur pour béton	60
Figure 2.14 : Séquence de malaxage du béton autoplaçant	61
Figure 2.15 : Essai d'Étalement pour Mortier	62
Figure 2.16 : Essai à l'Entonnoir en V pour Mortier	63
Figure 2.17 : Essai d'étalement au cône d'Abrams (slump flow)	64
Figure 2.18 : Mesure du diamètre d'étalement	64
Figure 2.19 : Dispositif de l'essai d'entonnoir en V (V-Funnel).	66
Figure 2.20 : Essai de la boîte en L	67
Figure 2.21 : Essai de résistance à la ségrégation au tamis	68
Figure 2.22 : les éprouvettes dans l'eau de laboratoire	69
Figure 2.23 : Dispositif de l'essai de compression simple	70
Figure 2.24 : Appareil du scléromètre utilisé	71
Figure 2.25 : Scléromètre en cours d'utilisation	72
Figure 2.26 : Appareil de l'ultrason utilisé	74
Figure 2.27 : Ultrason en cours d'utilisation	74
Figure 2.28 : Essai de perméabilité à l'eau	75
Figure 2.29 : Essai Brésilien	76
Figure 2.30 : Mesure de la profondeur de pénétration d'eau	76
Figure 2.31 : Diagramme des essais réalisés sur le mortier et le béton à l'état frais et l'état durci	78
Figure 3.1 : Etalement en fonction du dosage en superplastifiant	82
Figure 3.2 : L'étalement du mortier (Sp/P = 2.0%)	82

Figure 3.3 :	Temps d'écoulement à l'entonnoir en V (V-funnel)	83
Figure 3.4 :	L'étalement du mortier ($S_p/P = 1,8\%$)	84
Figure 3.5 :	Diamètre d'étalement et temps d'écoulement T_{50} au cône d'Abrams des BAP	87
Figure 3.6 :	Temps d'écoulement à l'entonnoir en V de BAP	88
Figure 3.7 :	Rapport H_2/H_1 de l'essai à la boîte en L de BAP	89
Figure 3.8 :	Temps d'écoulement T_{20} et T_{40} en fonction des granulats recyclés	90
Figure 3.9 :	Résistance à la ségrégation par tamisage en fonction des granulats recyclés	91
Figure 3.10 :	l'effet des granulats recyclés sur l'indice de rebondissement	93
Figure 3.11 :	la vitesse ultrasonique sur éprouvettes en fonction de temps	94
Figure 3.12 :	Variation de la Résistance à la Compression en fonction du Temps	95
Figure 3.13 :	La profondeur de pénétration d'eau des BAP	96

Liste des Tableaux

Tableau 1.1 :	caractéristiques mécaniques des granulats naturels et recyclés	30
Tableau 1.2 :	Coefficient d'absorption des granulats naturels et recyclés	32
Tableau 1.3 :	Coefficient d'absorption des granulats naturels et recyclés	32
Tableau 1.4 :	Résultats d'essai de la boîte en L	65
Tableau 1.5 :	Résultats de l'essai de stabilité au tamis	70
Tableau 1.6 :	Densité de BAP avec 50 et 100% de granulats recyclés	73
Tableau 1.7 :	Résistance à la compression	

Tableau 2.1 :	Caractéristiques chimiques et minéralogiques du ciment CEM I 42.5	49
Tableau 2.2 :	Propriétés physique et mécanique de ciment utilisé	50
Tableau 2.3 :	Caractéristiques physico-mécaniques des granulats utilisés	52
Tableau 2.4 :	Classification des BAP selon domaine d'utilisation	53
Tableau 2.5 :	Répartition du nombre d'éprouvettes confectionnées	65
Tableau 2.6 :	Relation générale entre la qualité du béton et la vitesse d'impulsion	70
Tableau 3.1 :	Composition de mortier à base de sable naturel	73
Tableau 3.2 :	Composition de mortier à base de sable recyclé	81
Tableau 3.3 :	Composition des BAP étudiés	85
Tableau 3.4 :	Résultats d'essai d'ouvrabilité des BAP à l'état frais	86
Tableau 3.5 :	Valeurs préconisées pour les essais (EFNARC) du BAP	86
Tableau 3.6 :	Résultats des essais destructifs et non destructifs sur les BAP	92

LISTE DES ABREVIATIONS

BAP	Béton autoplaçant.
BAP GN	Béton autoplaçant à base de granulats naturels.
BAP GN/GR	Béton autoplaçant à base de 50% granulats naturels et 50% granulats Recyclés.
BAP GR	Béton autoplaçant à base de granulats recyclés.
CEM I	Ciment Portland.
cm	Centimeter.
d	Diamètre d'étalement d'un mortier.
E/C	Rapport Eau sur Ciment.
E/P	Rapport Eau sur Poudre.
G/S	Rapport Gravillon sur Sable.

kg/m ³	Kilogramme par mètre cube.
l/m ³	Litre par mètre cube.
M	Masse d'une mole d'eau.
MAP	Mortier autoplaçant
mm	Millimètre.
MPa	Méga pascal.
sec	Secondes.
SCC	Self- Compacting Concrete.
S/M	Rapport sable mortier
Sp	Superlastifiant.
t	Temps.
v	v Volume massique de l'eau.

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Le béton est le deuxième matériau le plus consommé dans le monde après l'eau. Parmi les différentes familles de béton, 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 très fluide 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.

Les professionnels de la construction, de plus en plus sensibles aux questions liées à la préservation de l'environnement, s'interrogent sur le devenir du béton lors de la fin de vie

des constructions. En particulier, on constate que sur un total d'environ 300 millions de tonnes de déchets de chantier produits par an en France, seule une petite partie du béton qu'on y trouve est recyclée, principalement pour des travaux routiers. Pourtant, dans d'autres pays d'Europe, les granulats recyclés provenant de bétons de déconstruction concassés sont déjà utilisés dans la formulation de nouveaux bétons.

L'utilisation des granulats recyclés en travaux routiers est déjà bien développée et des études sur le recyclage du "béton pour faire du béton" sont en cours.

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

Pour cela nous avons réparti notre travail comme suit :

Après une introduction générale, une revue bibliographique est représentée un chapitre sur les caractéristiques des bétons autoplaçants ses propriétés à base des granulats recyclés à l'état frais et à l'état durci.

Dans le deuxième chapitre, nous étalons notre programme expérimental les différentes caractéristiques des matériaux utilisés dans la formulation du BAP ainsi que les différents essais réalisés.

Le chapitre 3, présente et regroupe les différents résultats obtenus et leur discussions.

Enfin, nous terminons cette étude par une conclusion générale qui rappelle les principaux résultats obtenus et propose des recommandations pour d'éventuels futurs travaux, sur cet axe de recherche.

CHAPITRE 1

LE BÉTON AUTO-PLAÇANT – ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE 1 : BETON AUTOPLAÇANT A BASE DES GRANULATS RECYCLES

1.1 Généralités

Dans ce premier chapitre, on présente une synthèse bibliographique sur les caractérisations du béton auto plaçant (BAP) à l'état frais, les différentes formulations et ainsi l'influence les granulats recyclés sur les propriétés mécaniques et physico-chimiques et durabilité des BAP.

1.2 Définition et historique de BAP

Le béton auto plaçant est un béton très fluide, stable et homogène. Il se distingue des bétons ordinaires par ses propriétés à l'état frais et sa capacité de moulage, d'enrobage et de compaction par le seul effet gravitaire.

Ce type de béton est particulièrement bien indiqué pour le remplissage d'éléments à forte densité d'armature, il répond également bien aux exigences posées par la réalisation d'élément en béton à géométrie complexe.

1.2.1 Historique

L'historique du BAP se résume par l'élaboration du premier prototype de BAP au Japon, puis par le développement de la première génération caractérisée par sa forte teneur en liant de l'ordre de 500 à 600 kg/m³, et enfin par, le développement de la deuxième génération de BAP au Canada caractérisée par une faible teneur en liant et un remplacement élevé du ciment par des ajouts minéraux. Selon la littérature, nous pouvons résumer son historique par les trois périodes suivantes :

- La première période a débuté en 1986 avec le besoin pour un béton fluide. Sa formulation s'inspire alors des bétons utilisés pour les travaux de réparation sous l'eau ;
- La deuxième étape dans l'évolution des BAP est l'exportation de cette technique en dehors du Japon. En effet, la technique des BAP s'est vite répandue en Europe et au Canada [1]. Pendant cette phase, le BAP est appelé : BAP de première génération, dû à sa teneur élevée en liant. Les recherches et les études sur l'exploitation des ajouts minéraux et sur les méthodes de formulation d'un tel béton furent l'objectif primordial des chercheurs ;
- L'avancement technologique et le développement des BAP ont permis de diversifier leur utilisation ; beaucoup d'ouvrages d'art furent construits, notamment au Japon et aussi en Europe et au Canada. Par contre, l'usage de ces bétons demeure restreint au domaine des réparations, d'où l'idée de développer une troisième génération de BAP, qui marque le début de la troisième étape dans la recherche sur ce matériau. La raison principale est d'ordre économique, car le coût unitaire du BAP est trop élevé.

Le premier prototype d'un BAP a vu le jour à l'université de Tokyo en 1986 grâce aux travaux du professeur Okamura [2,3]. Les caractéristiques de cette première génération des BAP se résumaient sur les points suivants :

- À l'état frais : une déformabilité et une maniabilité favorable,

- A jeune âge : éviter toute défaillance (fissurations, prise),
- A l'état durci : protection contre les agressions extérieures.

1.3 Spécifique de composition des BAP

Malgré les différentes méthodes de formulation existantes, certaines caractéristiques demeurent intrinsèques aux BAP mais peuvent légèrement différer d'une approche à l'autre. Les approches de formulation des BAP font appel à :

a. Volume de pâte élevé

Les frottements entre les granulats limitent l'étalement et l'aptitude au remplissage des bétons. C'est pourquoi les BAP contiennent un volume de pâte (ciment + additions + adjuvants + eau efficace + air) important, typiquement de 330 à 400L/m³, dont le rôle est d'écartier les granulats les uns des autres.

b. Quantité élevée de fines (particules < 125 µm)

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 500kg/m³) supérieure à celle des bétons conventionnels. Ces fines proviennent du ciment, des additions et des granulats. Toutefois, pour éviter des problèmes d'élévation excessive de la température lors de l'hydratation, le liant est souvent un composé binaire, voire ternaire : ciment Portland mélangé avec cendre volante, laitier de haut fourneau, filler calcaire, etc.

c. Utilisation de superplastifiants

Les BAP contiennent des superplastifiants permettant d'obtenir la fluidité souhaitée. Toutefois un dosage trop élevé peut augmenter la sensibilité du béton à des variations de teneur en eau vis-à-vis du problème de la ségrégation et du ressuage.

d. Utilisation éventuelle d'un agent de cohésion (rétenteur d'eau)

Ce sont généralement des dérivés cellulosiques, des polysaccharides ou des suspensions colloïdales. Ces produits, comme les fines, ont pour rôle d'empêcher le ressuage et de limiter les risques de ségrégation. Les agents de cohésion ont la réputation de rendre les

BAP moins sensibles à des variations d'eau vis-à-vis du problème du ressuage et de la ségrégation.

e. Faible volume de gravillons

Il est possible d'utiliser des granulats concassés ou roulés pour la formulation des BAP. Toutefois, comme les gravillons sont à l'origine du blocage du béton en zone confinée, il faut en limiter le volume. D'un autre côté, la présence de gravillons permet d'augmenter la compacité du squelette granulaire du béton et, donc, de limiter la quantité de liant nécessaire pour obtenir l'ouvrabilité et la résistance souhaitées. En général, ces considérations conduisent à adopter un rapport gravillon/sable de l'ordre de 1 dans les BAP et le diamètre maximal D_{max} des gravillons est compris entre 10 et 20 mm.

f. Un rapport E/C faible et un dosage en eau limité [4]

L'eau est l'un des facteurs les plus importants au niveau de l'ouvrabilité du béton, l'augmentation du dosage en eau augmente la fluidité du béton et entraîne l'apparition des phénomènes de ségrégation et de ressuage, pour cela on utilise un rapport E/C faible et un dosage en eau limité.

Chaque spécification de la composition des BAP cité précédent joue un rôle important dans l'écoulement et dans le comportement rhéologique du BAP. La Figure 1.1 présente une comparaison entre les deux types de béton, le béton ordinaire et le BAP.

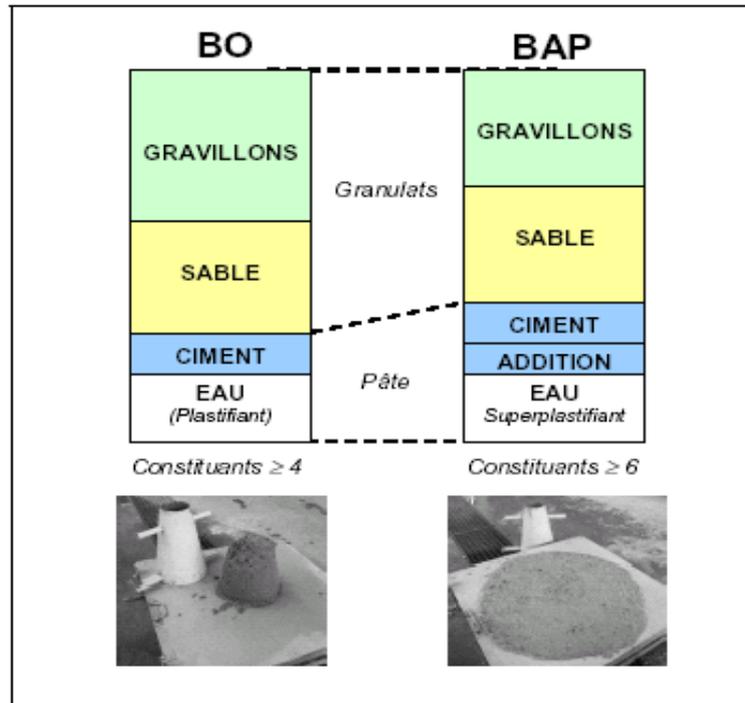


Figure 1.1 : Comparaison entre un béton ordinaire (BO) et un BAP [5].

1.4 Formulation d'un béton auto plaçant

Le principal problème dans la formulation d'un BAP est de concilier des propriétés a priori contradictoires comme la fluidité et la résistance à la ségrégation et au ressuage du béton. Il n'existe pas de méthode de formulation unique car les matériaux employés et leurs qualités diffèrent selon les régions ou les pays. La variation de matériau peut conduire à des comportements différents à tous les niveaux (ouvrabilité, rhéologie, résistance).

L'approche d'optimisation pour développer les performances d'un béton et sa durabilité consiste en général à choisir et examiner un groupe d'essais préliminaires, évaluer les résultats puis ajuster les propositions du mélange et examiner d'autres mélanges jusqu'à ce que les propriétés exigées soient réalisées. À cet effet, beaucoup de chercheurs se sont orientés vers l'optimisation et le développement des formulations des BAP. Quelques résultats de ces recherches seront exposés dans cette partie.

1.4.1 Méthodes basées sur l'optimisation des mortiers

Okamura [5, 6, 7] propose de formuler les BAP en composant en premier lieu le mortier du béton. Dans le mortier, la proportion de sable est fixée arbitrairement. Il reste ensuite à trouver expérimentalement les dosages en eau et en superplastifiant, pour un liant donné

(rapport massique ciment sur addition fixé), et suivant certains critères de rhéologie. La formule finale est obtenue en ajoutant au mortier un volume de gravillons limité, de manière sécuritaires, à la moitié de leur compacité.

A la suite d'une optimisation identique du mortier, d'autres chercheurs [7] ont proposé de doser les gravillons en cherchant expérimentalement leur volume limite menant à un blocage. Ce volume est évalué en comparant l'écoulement du mortier dans un entonnoir avec et sans gravillons.

1.4.2 Méthodes basées sur l'optimisation du volume de pâte

Le béton est considéré ici comme un mélange biphasique, avec une phase solide, les granulats, et une phase liquide, la pâte. Dans le cas d'un BAP, la pâte joue un rôle prédominant. Son rôle est de séparer les gravillons pour limiter les contacts, en particulier dans les milieux ferraillés et ainsi prévenir la formation de voûtes susceptibles de bloquer l'écoulement. La notion de quantité de pâte en excès optimale pour fluidifier le BAP et limiter les problèmes de blocage a été aussi introduit (Figure 1.2).

Des formules empiriques reliant l'épaisseur de la pâte autour des granulats et les constantes du modèle de bingham (seuil de cisaillement et viscosité) du béton, exprimées par rapport à celles de la pâte ont été proposées [7]. Lors de la formulation, il faut d'abord optimiser et caractériser la rhéologie de la pâte, puis déterminer à l'aide de ces équations la proportion minimale de pâte nécessaire pour fluidifier le béton.

Il existe une approche similaire du dosage de la pâte mise au point par Tangtermsirikul, et Bai [7]. Cette fois, deux critères, calés aussi expérimentalement, sont proposés, un volume de pâte minimal vis à vis de la fluidité, et un volume de pâte minimal vis à vis du blocage.

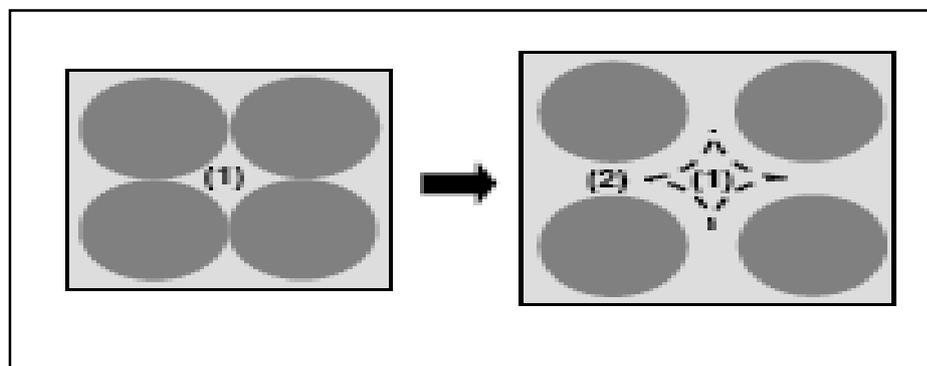


Figure 1.2 : Notion d'excès de pâte : la pâte remplit la porosité (1) et écarte-les granulats (2) [7].

1.4.3 Méthodes basées sur l'optimisation du squelette granulaire

La formulation des bétons peut passer par une optimisation de la porosité du système formé par les grains solides, du ciment aux gravillons [8]. Il est connu par exemple que la résistance à la compression augmente avec la compacité de la pâte. L'ouvrabilité est elle-aussi tributaire de l'arrangement du squelette granulaire.

Sedran et Turcry [6, 7], ont développé un modèle décrivant mathématiquement un empilement, à partir des caractéristiques des grains qui le composent (forme, granulométrie). Le modèle permet le calcul de la compacité du béton et d'un indice représentatif de son degré de serrage. A l'aide de ces variables sont modélisées la viscosité et le seuil de cisaillement du béton.

Le modèle est implanté dans un logiciel (Bétonlabpro2), qui permet de plus de simuler les autres propriétés du béton (résistance, déformations différées, etc.). Ses auteurs proposent un cahier des charges spécifique pour les BAP, avec des indices pour estimer la capacité de remplissage et la stabilité du béton.

1.4.4 Méthode basée sur un plan d'expérience

Le nombre de constituants d'un BAP est tel que l'utilisation d'un plan d'expérience est intéressante pour connaître l'effet des paramètres de composition. Une étude [9] a été réalisée avec les facteurs suivants : le volume de gravillons, la masse de fines (C+A), le rapport massique eau sur fines $E/(C+A)$, la masse de superplastifiant et la masse d'agent de viscosité. Chaque facteur a été varié sur une plage comportant cinq points, ce qui élève le nombre de compositions testées à 25. Au final, les auteurs fournissent les modèles obtenus, notamment l'étalement et le taux de remplissage, en fonction des différents facteurs. Cette approche fournit surtout un support pour corriger une formule ne répondant pas, par exemple, aux critères de l'Association Française de Génie Civil (AFGC) [10].

1.4.5 L'approche basée sur l'utilisation du mortier du béton équivalent MBE

L'approche du Mortier de Béton Equivalent (MBE) a été initialement développée pour faciliter la sélection des adjuvants lors de la formulation d'un béton, en utilisant des tests sur mortier au lieu de tests sur béton [11]. En fonction des essais préalables réalisés, les résultats obtenus peuvent être utilisés de façon qualitative ou quantitative. Plusieurs chercheurs [11] ont montré que cette méthode peut être adaptée aux BAP et aussi que les principes de base de la méthode peuvent être gardés.

1.5 Principe et application des approches

1.5.1 Approche Japonaise ou la méthode générale

Okamura et Ozawa ainsi que Ouchi et al. [5,12] sont les précurseurs en matière de formulation des BAP. Les caractéristiques requises sont une capacité de déformation élevée de la pâte et du mortier, ainsi qu'une résistance à la ségrégation lors de l'écoulement en milieu confiné. Leur méthode de formulation se base sur les critères suivants :

- Une quantité de gravillons limitée,
- Un rapport eau/poudre faible,
- Utilisation d'un superplastifiant.

Cette méthode consiste d'abord à fixer le dosage de gravier dans le béton et celui du sable dans le mortier, ensuite de procéder à l'optimisation de la pâte de ciment afin de donner au béton résultant les meilleures performances.

Le principe de cette méthode est le suivant :

- La teneur volumique G en gravillons du béton est fixée à 50% du volume du solide pour éviter le risque de blocage :

$$G = \frac{50}{100} G_{lim} (1 - A) \quad (1.1)$$

Où : A = quantité d'air choisie en fonction de la résistance au gel-dégel

G_{lim} = Volume absolu d'un mètre cube de gros agrégats.

- Le volume du sable est fixé à 40% du volume total de mortier pour assurer une bonne ouvrabilité :

$$S = \frac{40}{100} \frac{(1-A-G)}{(1-K_{sf})} (1.2)$$

Où : K_{sf} = taux de fines particules (< 0,09 mm) dans le sable

- L'eau, le superplastifiant et les fines sont ajustés pour les mortiers pour obtenir une viscosité suffisante et une fluidité importante.

Un étalement relatif (Γ_m) est déterminé à l'aide de l'essai au mini-cône et la vitesse d'écoulement relative (R_m) est déterminée par un essai au V-funnel pour mortier :

La fluidité du mortier, donnée par :

$$F_m = \frac{(r_1 r_2 - r_0^2)}{r_0^2} (1.3)$$

Avec : r_1 et r_2 les diamètres d'étalement selon deux médianes.

La viscosité du mortier, donnée par :

$$R_m = \frac{10}{t} (1.4)$$

Avec : t le temps d'écoulement à l'entonnoir en V funnel exprimé en secondes.

1.5.2 Approche Suédoise (CBI)

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

Le principe de cette méthode s'appuie sur des tests effectués sur des mélanges de pâte de ciment et de granulats de différentes tailles, passant à travers différents espacements d'armatures. Pour chaque taille de granulats, ils ont montré qu'il existe une teneur volumique critique de granulats en deçà de laquelle le risque de blocage est nul et au-dessus de laquelle le blocage est systématique. Cette teneur volumique critique est fonction de l'espacement entre les armatures (par rapport à la taille des granulats), et de la forme des granulats (roulés ou concassés). Cette méthode suppose que le phénomène de blocage est indépendant de la nature de la pâte, pourvu que celle-ci soit suffisamment fluide. Ainsi, dans la formulation d'un béton, la méthode CBI consiste à déterminer le risque de blocage R_b par la relation :

$$R_b = \sum \frac{V_i}{V_{cri,i}} (1.5)$$

Où : V_i = la proportion volumique des granulats de taille i , par rapport au volume total du béton.

$V_{cri,i}$ = la teneur volumique critique de cette fraction granulaire de taille i .

La valeur du coefficient du risque de blocage R_b doit être inférieure ou égale à 1 pour obtenir un béton satisfaisant. Ainsi, en utilisant cette approche pour évaluer le risque de blocage de bétons, on réécrit l'équation du risque de blocage :

$$R_b = (1 - V_p) \cdot \sum \frac{Y_i}{V_{cri,i}}$$

(1.6)

Où : Y_i = la proportion volumique des granulats de taille i rapportée au volume total des granulats.

V_p = le volume de la pâte dans un volume unité de béton.

A partir de cette relation, on peut déduire, pour chaque rapport gravier sur sable (G/S), le volume minimal de pâte pour éviter le risque de blocage. On écrivant $R_b = 1$, le rapport E/C de la pâte et le type du ciment sont choisis en fonction de la gamme de résistance visée, le dosage du superplastifiant est optimisé pour obtenir un écoulement autoplaçant caractérisé essentiellement par le cône d'Abrams (un étalement de 700 mm est jugé adéquat) et la boîte en L (un rapport d'hauteurs H_2/H_1 doit rester au-dessus de 0,8) [13].

1.5.3 Approche du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées LCPC

L'approche développée en France au LCPC par de Larrard et Sedran est basée sur le modèle d'empilement compressible qui passe par l'optimisation de la porosité du système formé par les grains solides. Le modèle permet de prévoir la compacité du squelette granulaire à partir des caractéristiques des constituants telles que la densité apparente, les proportions du mélange, les distributions granulaires et la compacité propre.

Cette approche, basée sur la synthèse d'une quinzaine d'années de recherches est simplifiée par la mise en œuvre d'un logiciel (Bétonlapro 2).

Une proportion de liant est fixée à priori, pour laquelle on détermine le dosage à saturation du superplastifiant utilisé. Selon l'expérience des auteurs, le dosage de saturation pourrait conférer au béton une viscosité élevée, par conséquent la moitié de ce dosage serait plus pertinente. Le besoin en eau du liant en présence du superplastifiant est déterminé, et conduit au calcul de la compacité propre du liant, qui est une donnée d'entrée nécessaire. Grâce au logiciel, les dosages des constituants sont déterminés, en prenant en compte tous les paramètres de calcul, et de l'effet de paroi. Le dosage du superplastifiant peut être ajusté pour obtenir les critères d'ouvrabilité désirés, celui de l'eau pour obtenir la résistance à la compression ciblée [13].

1.6 Propriété du BAP à base de granulats recyclés

1.6.1 Caractéristiques des granulats recyclés

Les granulats sont les principaux composants du béton (70 % en poids). Les performances mécaniques des granulats vont donc conditionner la résistance mécanique du béton et leurs caractéristiques géométriques et esthétiques, en particulier, l'aspect des parements des ouvrages.

Pour obtenir une bonne qualité de béton contenant des granulats recyclés, il faut que ces derniers soient aussi de bonne qualité. Les propriétés acceptables des granulats sont un élément de base pour un béton recyclé de qualité. Cependant, les proportions adéquates de mélange et la méthode de production sont aussi importantes pour avoir la qualité recherchée du béton.

Les granulats recyclés de béton diffèrent des granulats naturels par leur composition et leur forme. Il s'agit de matériaux composites constitués de granulats naturels concassés et de la pâte de ciment hydratée concassée, enrobant les granulats naturels (Figure 1.3).

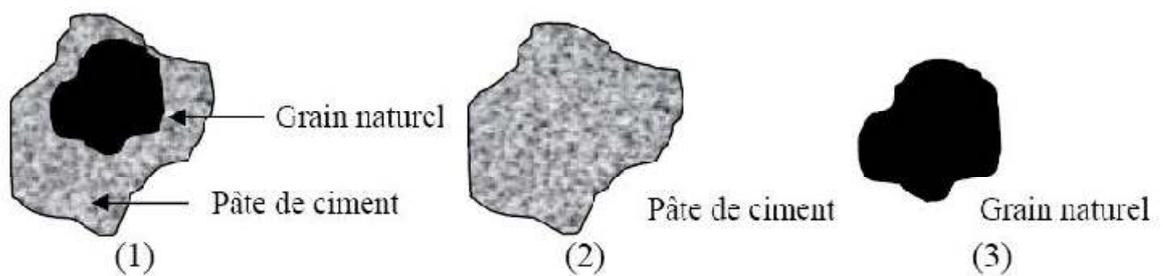


Figure 1.3 : Forme des granulats recyclés [14].

a. Granulométrie, teneurs en fines et forme des gravillons

Ravindrarajah et son équipe montre l'influence du choix du concasseur et des performances du béton ancien sur la régularité des courbes granulométriques [15]. Evangelista et de Brito ont montré que les granulats recyclés étaient plus anguleux et donc à l'origine d'une plus grande friction interne ce qui, en plus de l'absorption plus élevée, explique qu'à courbe et module de finesse égaux, la demande en eau du béton soit plus forte. **DEBIEB [16]** a trouvé que le sable recyclé est grossier par rapport au sable naturel et il est constitué en majorité de petit gravillon et une faible proportion de sable moyen ainsi qu'une quantité importante du ciment dans ces fines.

b. Dureté

La résistance à la fragmentation (dureté) est déterminée par le coefficient Los Angeles. Le principe de cet essai est la détermination de la résistance à la fragmentation par chocs et à

l'usure par frottements réciproques. L'essai consiste à faire tourner les granulats dans un tambour fermé contenant des boulets métalliques. Le coefficient Los Angeles représente la proportion d'éléments finis produits au cours de l'essai. Plus le coefficient LA est faible, plus la résistance des gravillons est élevée. Le coefficient de Los Angeles trouvé pour les granulats recyclés est supérieur à celui des granulats naturel (Tableau 1-1). Même résultats ont été rapporté par **DEBIEB [16]**, **GASTI [17]** ET **PANI et al [18]**. **HACHANA et al [19]** ont aussi remarqués que la valeur du coefficient de Los Angeles des granulats du béton concassé (31,62%) est supérieure à celle des granulats naturels (23,50%). Par conséquent, les granulats recyclés sont moins résistant que les granulats naturels, mais acceptable selon la norme qui exige $LA < 40\%$.

Tableau 1.1 : Caractéristiques mécaniques des granulats naturels et recyclés [20]

	Essai Micro-De val (MDE)		Essai Los-Angeles(L.A)	
	G. Naturel	G. Recyclé	G. Naturel	G. Recyclé
Fraction (4-6.3)	18.4	36.5	--	--
Fraction (6.3-10)	24.04	38.6	31.4	38.8
Fraction (10-14)	--	--	30.58	36.52

Plusieurs chercheurs indiquent que la présence du mortier réduit la résistance aux chocs et à l'usure[21,22].

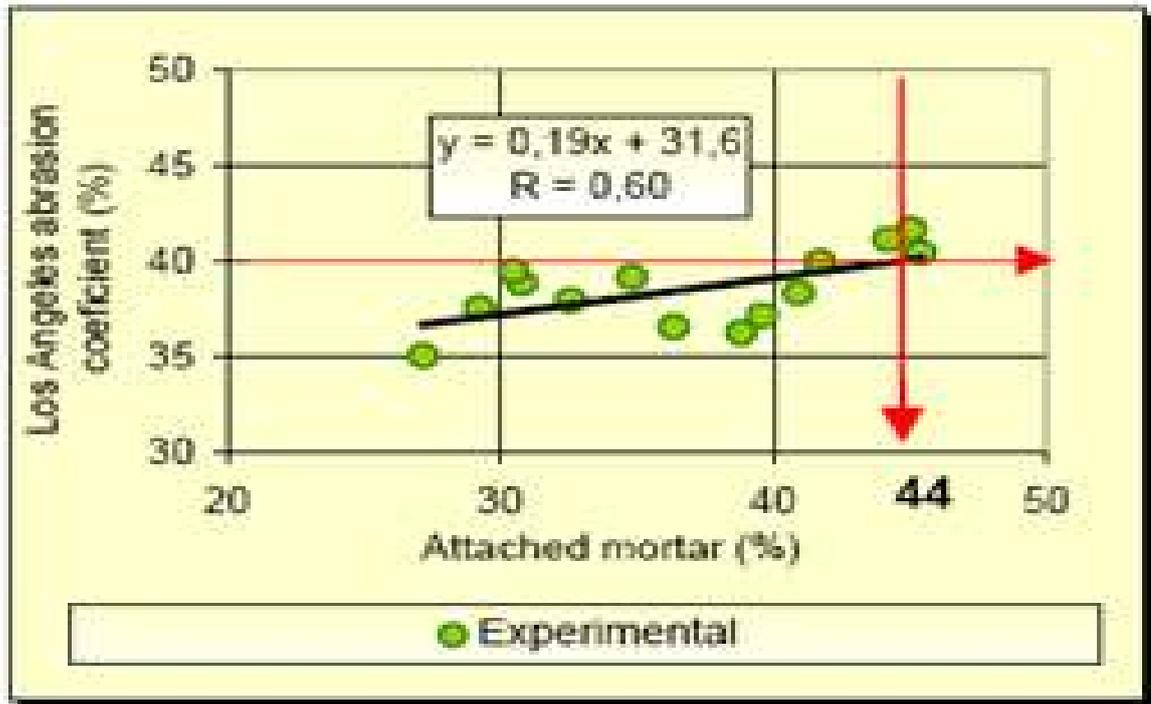


Figure 1.4 :Corrélation entre la teneur en mortier et le Los Angeles [22].

c. Absorption d'eau

Le coefficient d'absorption d'eau (Ab) représente la capacité d'absorption d'eau d'un granulat. Plus il est élevé, plus le matériau est absorbant. La propriété principale des granulats recyclés est la capacité élevée d'absorption d'eau en comparaison avec les granulats naturels. Ceci est dû à la présence de la pâte du ciment autour d'un granulat recyclé [23]. Les bétons des granulats recyclés nécessitent une quantité d'eau plus importante, pour maintenir le même affaissement (étalement), par rapport à un béton à base de granulats naturels [24]. De nombreuses études ont confirmé ces résultats caractérisés par les quelques figures qui suivent [24, 25, 26, 9, 27, 28, 29, 30, 31, 66, 32, 16, 18].

Le taux élevé de l'absorption d'eau des granulats recyclés par rapport aux granulats naturels complique la mise en œuvre d'un tel béton de granulats recyclés (Tableau 1-2). Une valeur élevée du coefficient absorption d'eau (environ de 7%) a été trouvée pour les granulats recyclés en comparaison avec les granulats naturels (environ de 1%) (Tableau 1-3). Des résultats similaires ont aussi été observés par d'autres chercheurs ($Ab_{GN} = 1,3\%$ et $Ab_{GR} = 6\%$) [19].

Tableau 1-2 : Coefficient d'absorption des granulats naturels et recyclés [20]

	Sable roulé	Sable Naturel concassé	Sable recyclé	Gravier naturel concassé		Gravier recyclé	
	0/0.8	0/5	0/5	12.5/20	12.5/20	5/12.5	12.5/20
Absorption (%)	0.5	1.91	7.09	0.73	0.46	6.25	5.36

Tableau 1-3 : Coefficient d'absorption des granulats naturels et recyclés [20]

	Granulats naturels		Granulats recyclés	
	8/15	3/8	8/15	3/8
Absorption	0.81	0.91	5.65	6.60

1.7 Propriété du BAP à base de granulats recyclés

1.7.1 À l'état frais

Par rapport à des bétons de granulats naturels, les bétons de recyclés présentent des particularités de formulation :

- ✓ La masse volumique des granulats recyclés est plus faible que celle des granulats naturels, du fait de leur teneur en mortier ;
- ✓ La granularité des granulats peut faire apparaître des teneurs en fines importantes, en particulier lorsque le sable recyclé est utilisé ;
- ✓ Les granulats recyclés étant obtenus par concassage, leur rugosité de surface est importante, et leur compacité relativement faible. Ceci est un autre facteur tendant à augmenter la demande en eau efficace ;

- ✓ Cette demande en eau efficace peut être traitée soit par un volume de pâte plus élevé (se traduisant par un supplément d'eau de 5 à 15 % d'après la littérature [33]), soit par l'utilisation d'adjuvants plastifiants/superplastifiants utilisés en réducteur d'eau, soit enfin par une combinaison de ces deux stratégies ;
- ✓ La demande en eau totale du béton est encore accrue par l'absorption d'eau importante des granulats recyclés. Dans les cas où les granulats sur stock ne sont pas saturés en eau, une reprise d'eau des granulats dans le mélange intervient dans les heures qui suivent le malaxage. Pendant le durcissement, en cas d'auto-dessiccation, un mouvement inverse de l'eau (des granulats vers la matrice) peut intervenir ;
- ✓ Quelle que soit la stratégie de formulation, l'obtention d'une résistance finale passe par des rapports eau/liants égaux ou plus faibles qu'avec des granulats naturels, et implique des dosages en liants neufs plus importants, sans parler des liants anciens qui viennent encore augmenter la proportion de pâte de ciment durcie dans le mélange final;
- ✓ Enfin, le béton peut contenir en quantité notable certaines espèces génératrices de gonflement, et notamment les sulfates, résidus de plâtre adhérant à certains granulats recyclés même si ces matériaux sont, en principe, écartés des stocks destinés à la réutilisation.

BENHOUNA et al [34] ont étudié l'effet des granulats recyclés sur l'écoulement non confiné. Ils ont constaté que les fines ayant une influence significative sur l'étalement du béton avec 100% de granulats naturels qui contient 22,5% de fines recyclés présentent un bon étalement sans ségrégation et sans ressuage et avec un temps d'écoulement T_{50} inférieur à 5 secondes. Pour le béton avec 100% granulats recyclés, ils ont constaté que les compositions contenant 22,5 et 29% de fine recyclés ont un bon étalement sans ségrégation ni ressuage et avec un temps d'écoulement T_{50} inférieur à 5 secondes (Figure 1.5). Une comparaison entre l'étalement D'un BAP à base de granulats naturels et un BAP à base granulats recyclés est donnée sur la (Figure 1-6). Le béton avec 50% de granulats naturels et 50% de granulats recyclés présente un étalement supérieur à celui du béton avec 100% granulats naturels et 100% granulats recyclés, pour un rapport E/L égal à 0,46 et 0,47 (Figure 1.7).

D'autre part, **KOUetPOON [35]** ont constaté que l'étalement d'un BAP des granulats recyclés augmente avec l'augmentation de la quantité des granulats fins recyclés,

l'étalement minimal est de 760 mm et le rapport de blocage varie entre 0,85 et 0,94. L'addition des cendres volantes de classe F augmente l'étalement du BAP (Figure 1.8). De plus, **GRDICetal [23]**, ont trouvé que l'étalement des BAP avec 50 et 100% granulats recyclés (gravier) est très comparable à l'étalement du BAP à base de granulats naturels.

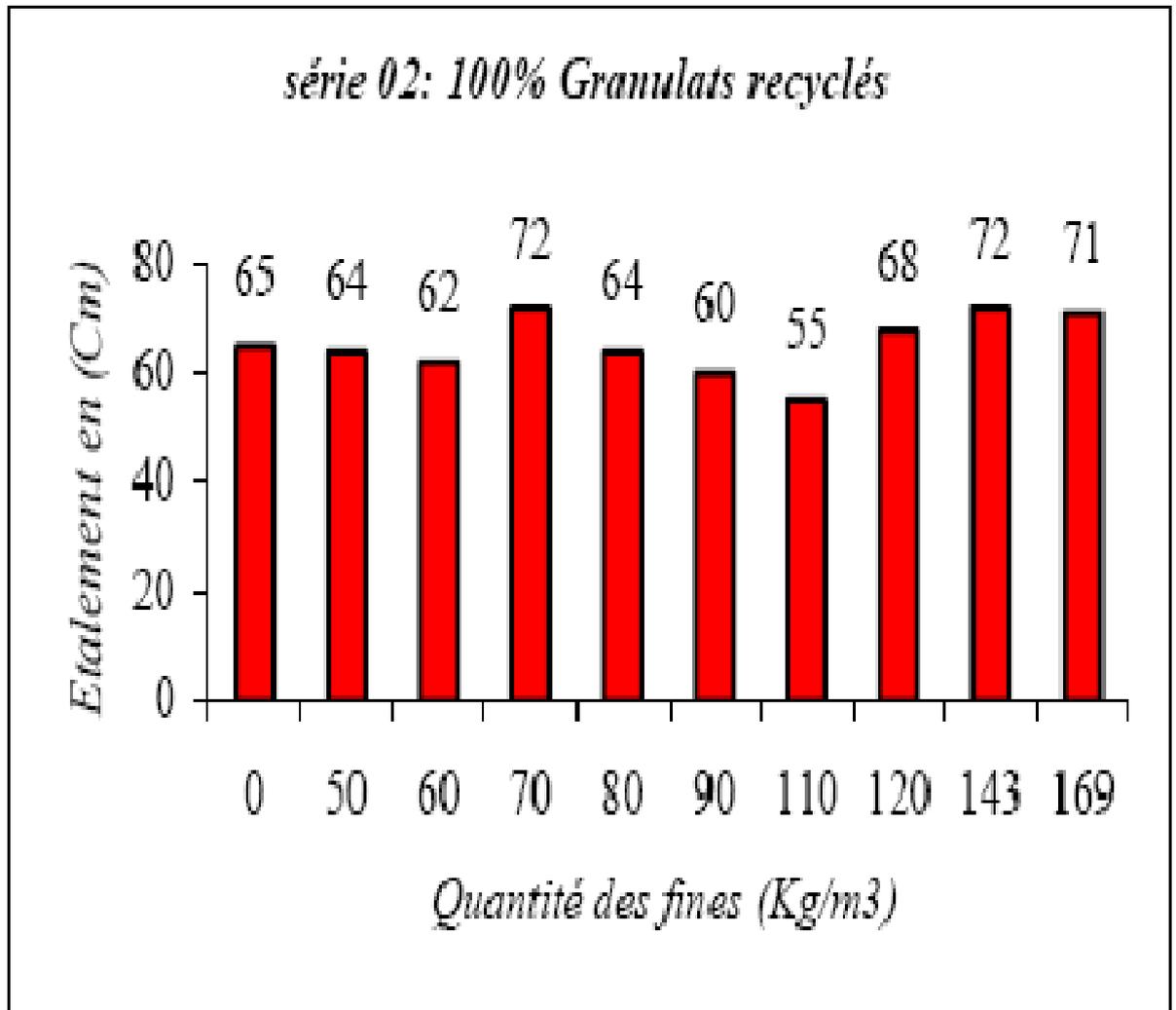


Figure 1-5 : Variation de l'étalement de BAP avec des granulats recyclés en fonction de La quantité des fines [34].

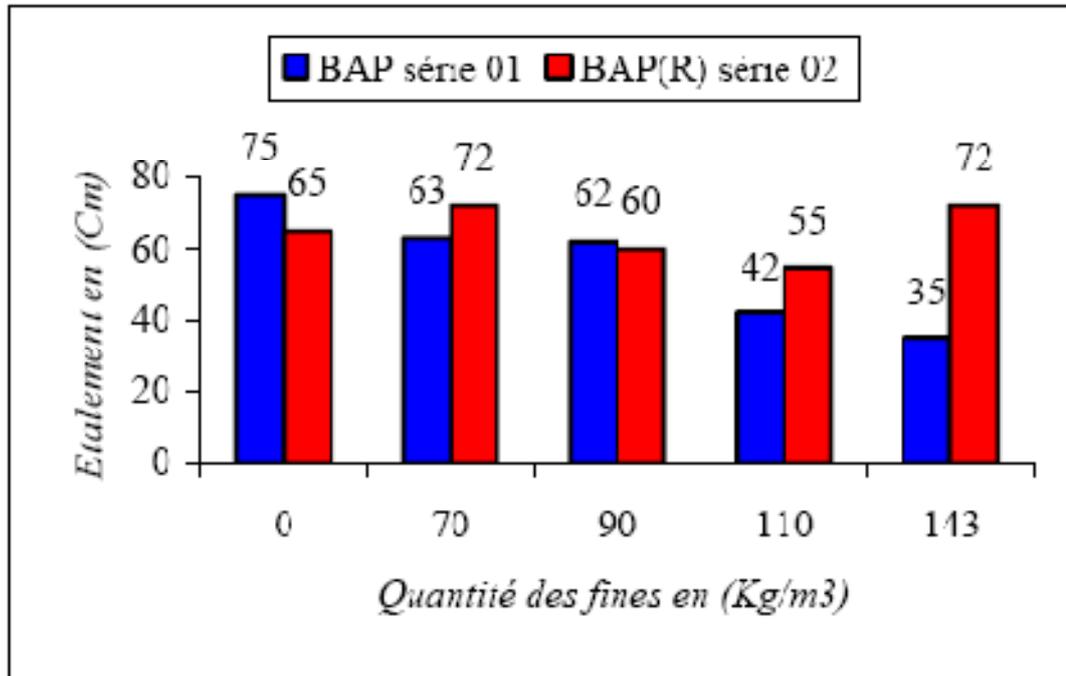


Figure 1.6 : Comparaison entre l'étalement d'un BAP (GN) et BAP (GR) [34].

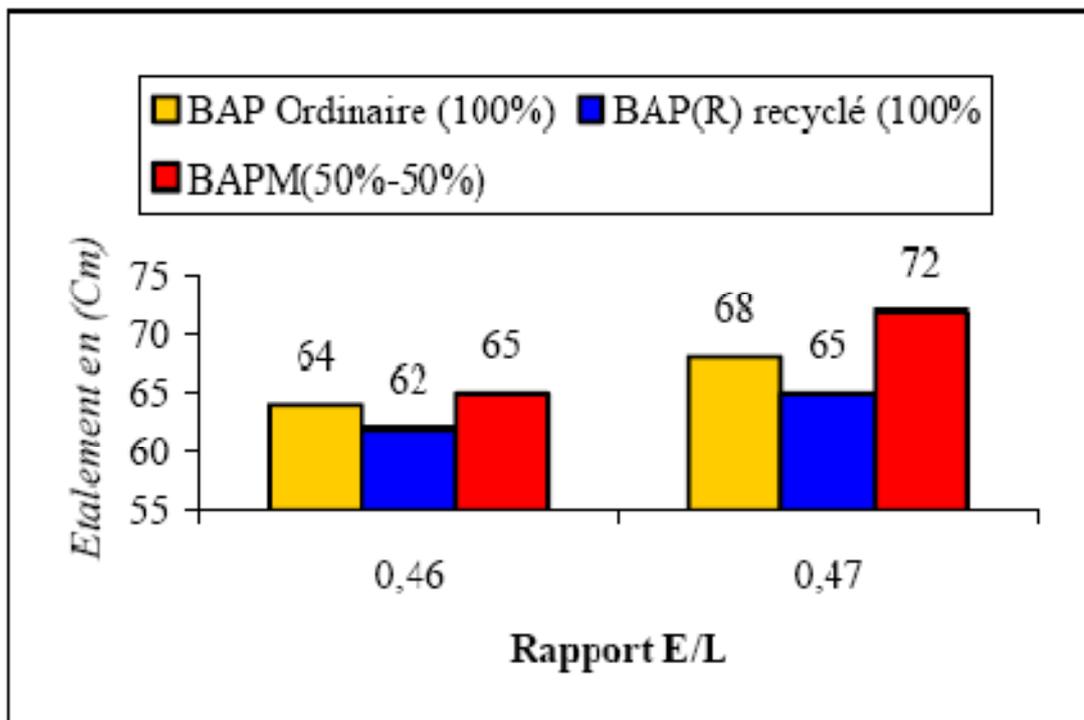


Figure 1.7 : Comparaison entre l'étalement des BAP ordinaires et recyclés [34].

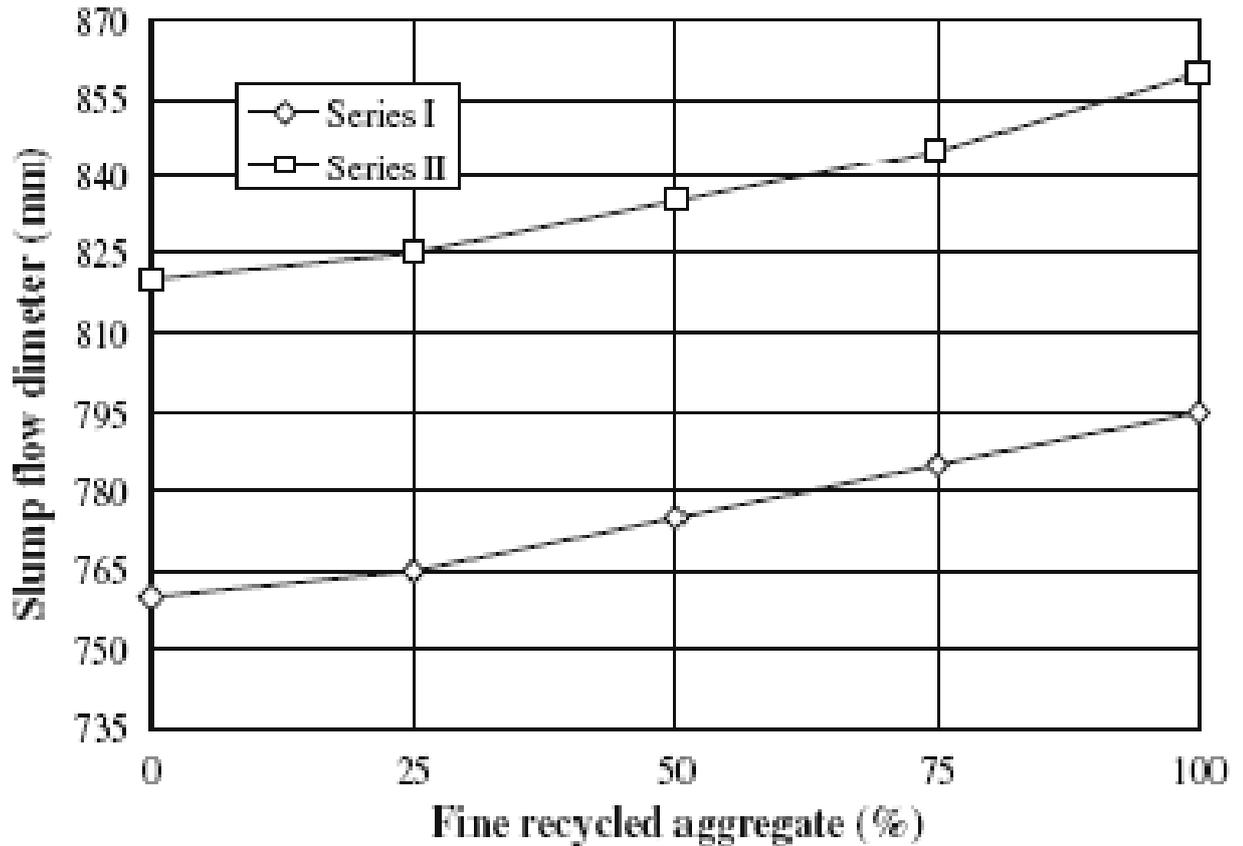


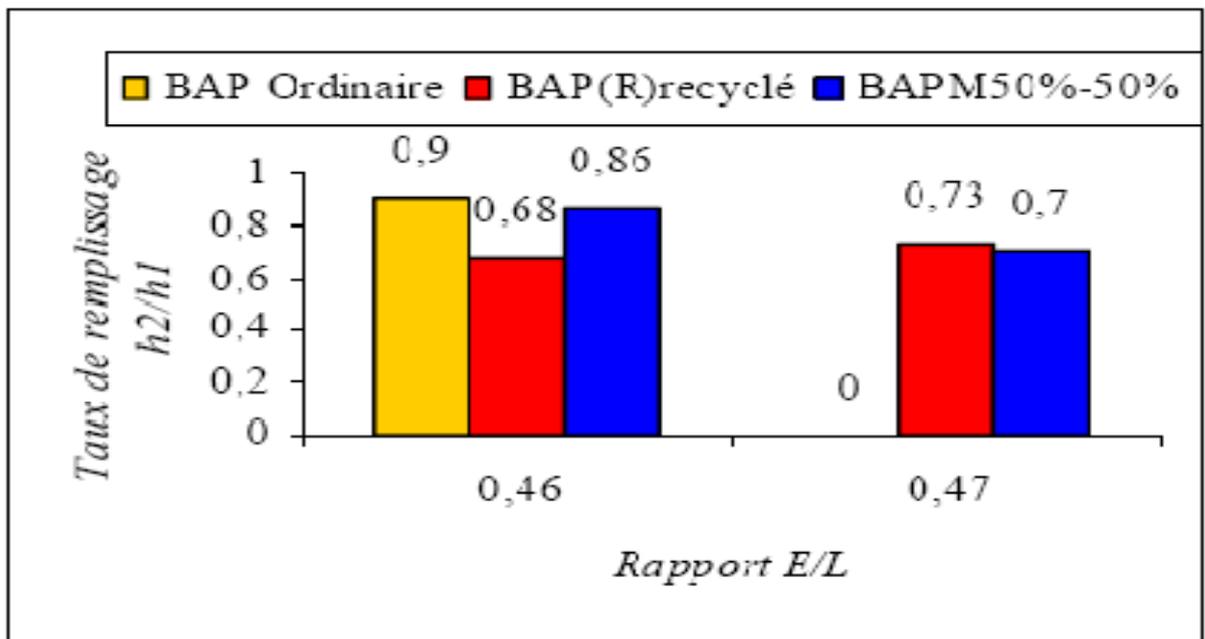
Figure 1.8 : Effet des granulats fins recyclés sur le diamètre d'étalement d'un BAP de Granulats recyclés [35].

L'essai à la boîte en L a aussi montré que le BAP contenant des granulats fins recyclés a une fluidité suffisante, ainsi qu'une viscosité et une résistance à la ségrégation adéquate [36]. Cependant, **BENHOUNA et al [34]** ont trouvé que les résultats des essais de la boîte en L ne satisfait pas les exigences requises pour un BAP avec un rapport $E/L = 0,45$ à $0,47$ et 100% de granulats recyclés (Tableau 1-4). Pour un BAP avec un mélange de granulats naturels et recyclés (50% des granulats naturels, 50% des granulats recyclés), ils ont constaté que pour un rapport E/L égal à $0,46$ le béton présente un taux de remplissage Pareil au BAP ordinaire $H2/H1 = 0,86$ (limite minimale) (Figure 1-9). D'autre part, [23], ont trouvé un taux de remplissage équivalent pour les BAP avec granulats naturels et 50, 100% granulats recyclés (0,94, 0,95 et 0,98) respectivement.

Tableau 1-4 : Résultats d'essai de la boîte en L [34]

Compositions		$\frac{E}{L}$	Fine (Kg)	$\frac{H1}{H2}$	Temps d'écoulement (s)		
					T20	T40	T60
GN	BAP3-1	0.45	90	0.77	1.10	2.41	3.66
	BAP3-1	0.46	90	0.90	1.01	1.82	2.66
	BAP3-1	0.45	90	0.63	2.13	3.06	4.37
GR	BAP3-1	0.46	90	0.68	1.95	2.80	4.02
	BAP3-1	0.47	90	0.73	1.13	2.46	3.79

La substitution de 50 et 100% de granulats naturels par des granulats recyclés a donné un béton avec une stabilité satisfaisante pour un rapport E/L=0,46, mais il est moins stable pour un rapport E/L=0,47 (Tableau 1-5). Par contre [23], ont constaté que le BAP à base de granulats naturels est moins stable vis-à-vis de la ségrégation par rapport aux BAP avec 50 et 100% granulats recyclés.

**Figure 1-9 : Comparaison entre le taux de remplissage des BAP ordinaires et recyclés**

[34].

Tableau 1-5 : Résultats de l'essai de stabilité au tamis [34]

Composition	BAP 3-1	BAP(R) 6-2	BAPM-1	BAP(R) 6-3	BAPM-2
Type de granulats	100% GN	100%GR	50%-50%	100%GR	50%-50%
E/L	0.46	0.46	0.46	0.47	0.47
PLAITENCE (%)	6.98	10.23	9.84	12.40	16.56

L'effet de substitution de granulats naturels par des granulats recyclés sur la densité du BAP est donné par le tableau 1-6. On remarque une diminution d'environ 2% de la Densité pour 50% de gravier recyclés et de 4% pour 100% de gravier recyclés.

Tableau 1-6 : Densité de BAP avec 50 et 100% de granulats recyclés [23].

Type of concrete	Density (Kg/m³)	Shump-flow test (cm)	T₅₀₀ (s)	L-box test	Sirve segregation (%)	W_c (water-cement factor)	W_p (water-powder factor)
E	2391	735	5.60	0.94	11.7	0.41	0.25
P50	2366	735	5.40	0.95	9.31	0.43	0.26
P100	2355	725	6.00	0.98	5.2	0.45	0.27

La forme et la rugosité des granulats peuvent impliquer une plus grande difficulté pour les bulles d'air à s'extraire du béton pendant la vibration. C'est ainsi qu'en moyenne, certains auteurs trouvent des teneurs en air occlus légèrement plus importantes dans les bétons de granulats recyclés, l'écart étant de l'ordre de 0,6 %.

1.7.2 À l'état durci

1.7.2.1 Résistance à la compression

Toutes les études montrent que la résistance à la compression des bétons fabriqués avec des granulats recyclés peut être de 5 à 40 % plus faible que celle d'un béton formulé avec des granulats naturels. De façon générale les études menées ont montré que la résistance à la compression dépend :

- ✓ Du taux de substitution pour un rapport E/C constant. 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% [37, 38, 39, 40, 41]. Généralement, cette diminution est attribuée à une porosité plus importante dans les bétons de granulats recyclés [42].
- ✓ Des paramètres de formulation et plus particulièrement le rapport E/C [43, 44]. **Angulo [26]** montre qu'une porosité des granulats inférieure à 17% affecte peu les résistances à la compression, quel que soit le rapport E/C.
- ✓ De la qualité du béton de démolition dont les granulats sont issus [46, 39]. **Ainsi [39]** montrent que le module d'élasticité est plus important si les granulats sont issus d'un béton de haute résistance à la compression.
- ✓ De la nature des ajouts d'origine minérale [46, 43, 47, 44].
- ✓ Des conditions de cure [37]. Il apparaît de 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.

1.7.2.2 Résistance à la compression et à la traction

La résistance à la compression à 7 jours et à 28 jours pour le BAP à 100% de granulats recyclés est similaire à celle d'un BAP de granulats naturels lorsqu'une quantité de fines de 22.5% est utilisée (Figure 1-10).

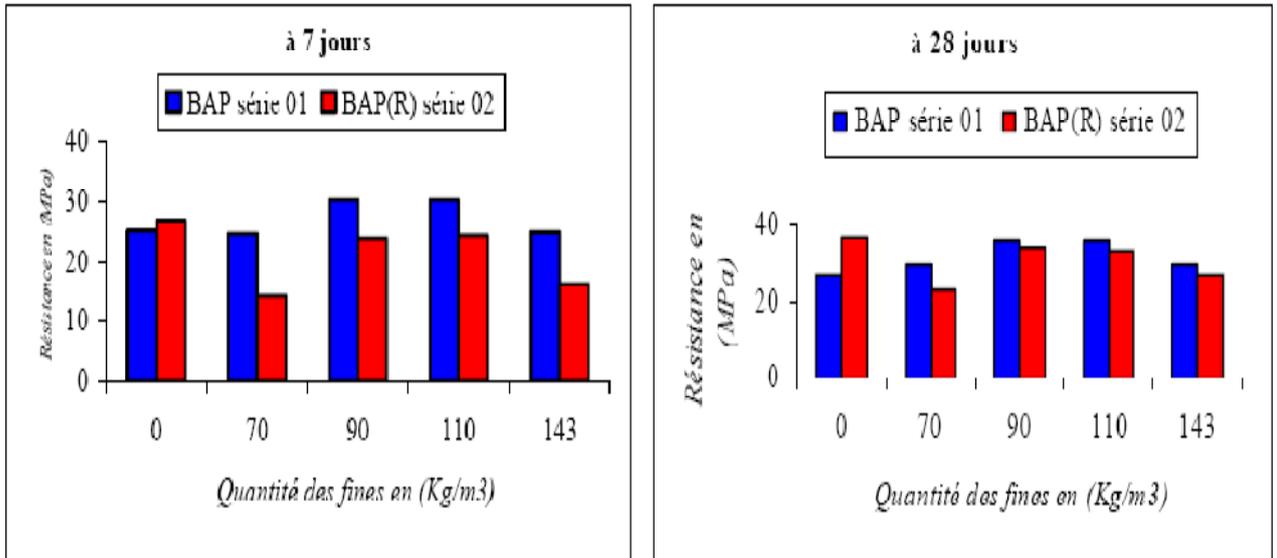


Figure 1-10 : Comparaison entre la résistance à la compression à 7 et 28 jours pour les Deux types du BAP [34].

D'autres chercheurs, ont montré que la qualité des granulats recyclés a un effet direct sur la résistance à la compression ainsi que la substitution de 50% et 100% de gravier naturel par un gravier recyclé réduit la résistance de 3,88% et de 8,55% respectivement (Figure 1-11).

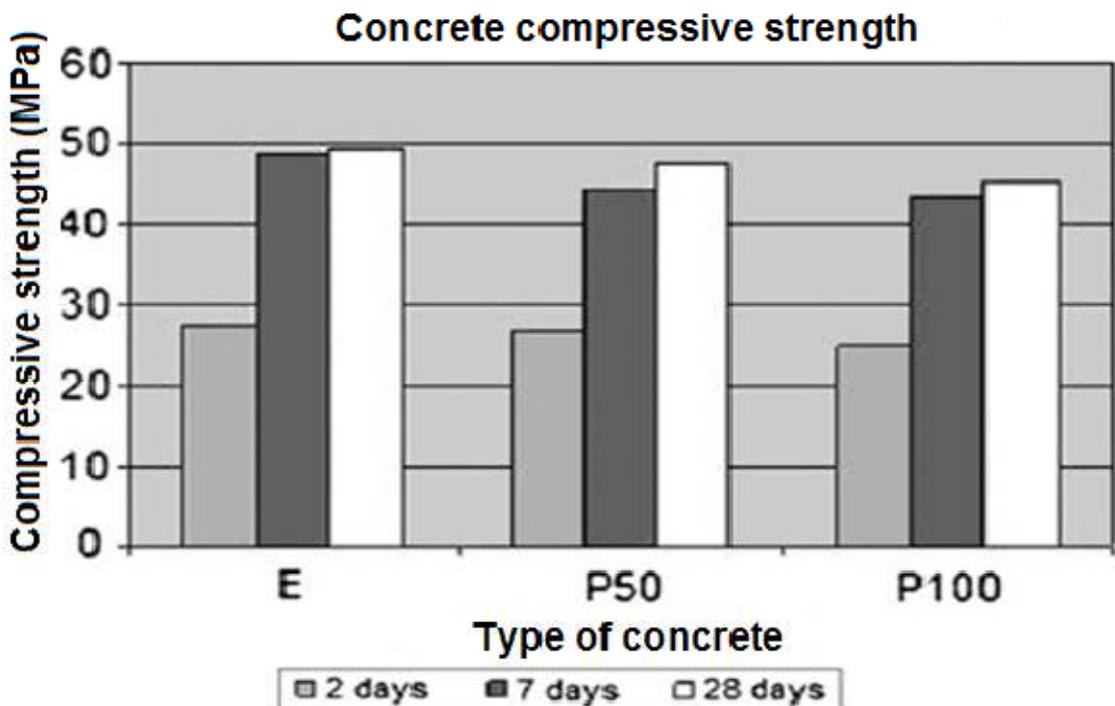


Figure 1-11 : Résistance à la compression pour des BAP avec (0, 50 et 100%) de granulats Recyclés [23].

La résistance à la compression et à la traction pour un BAP contenant des granulats recyclés et sans les cendres volantes diminue avec l'augmentation des granulats fins recyclés. La résistance à la compression et à la traction maximale ont été atteintes avec un taux de substitution de 25-50% de sable de rivière par un sable recyclé (Tableau 1-7 et Figure 1-12). Une diminution de la résistance à la traction avec l'augmentation du pourcentage des granulats recyclés a été aussi observée avec de BAP (Figure 1-13).

Tableau 1-7 : Résistance à la compression [35].

Mixe code	Recycled agg fine (%)	W/B	Compressive strength (MPa)				
			1-day	4-day	7-day	28-day	90-day
Series I							
Control 1	0	0.53	10.3	26.8	32.9	44.3	56.5
RF25	25		11.2	29.0	34.0	44.5	54.7
RF50	50		8.8	25.3	31.1	43.4	55.7
RF75	75		9.4	26.0	29.7	41.3	50.8
RF100	100		9.8	23.6	29.2	38.7	50.1
Series II							
Control 2	0	0.44	11.1	30.3	36.8	53.7	78.9
RF25	25		13.8	38.3	43.9	64.3	82.6
RF50	50		17.5	38.4	42.1	62.3	81.4
RF75	75		13.8	32.3	40.9	56.3	75.3
RF100	100		15.1	29.2	38.3	53.2	71.7
Series III							
RF 100A	100	0.44	15.1	29.2	38.3	53.2	71.7
RF 100B	100	0.44	15.6	33.1	44.0	59.1	77.0
RF 100C	100	0.44	16.6	39.8	43.8	64.2	81.8

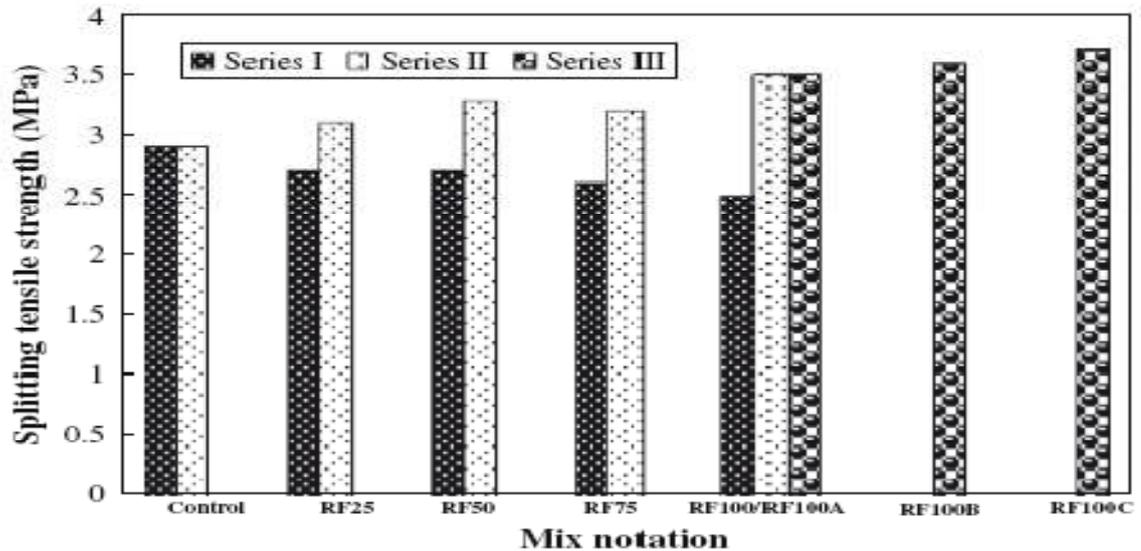


Figure 1-12 : Résistance à la compression pour des BAP avec (0, 50 et 100%) de granulats Recyclés [35].

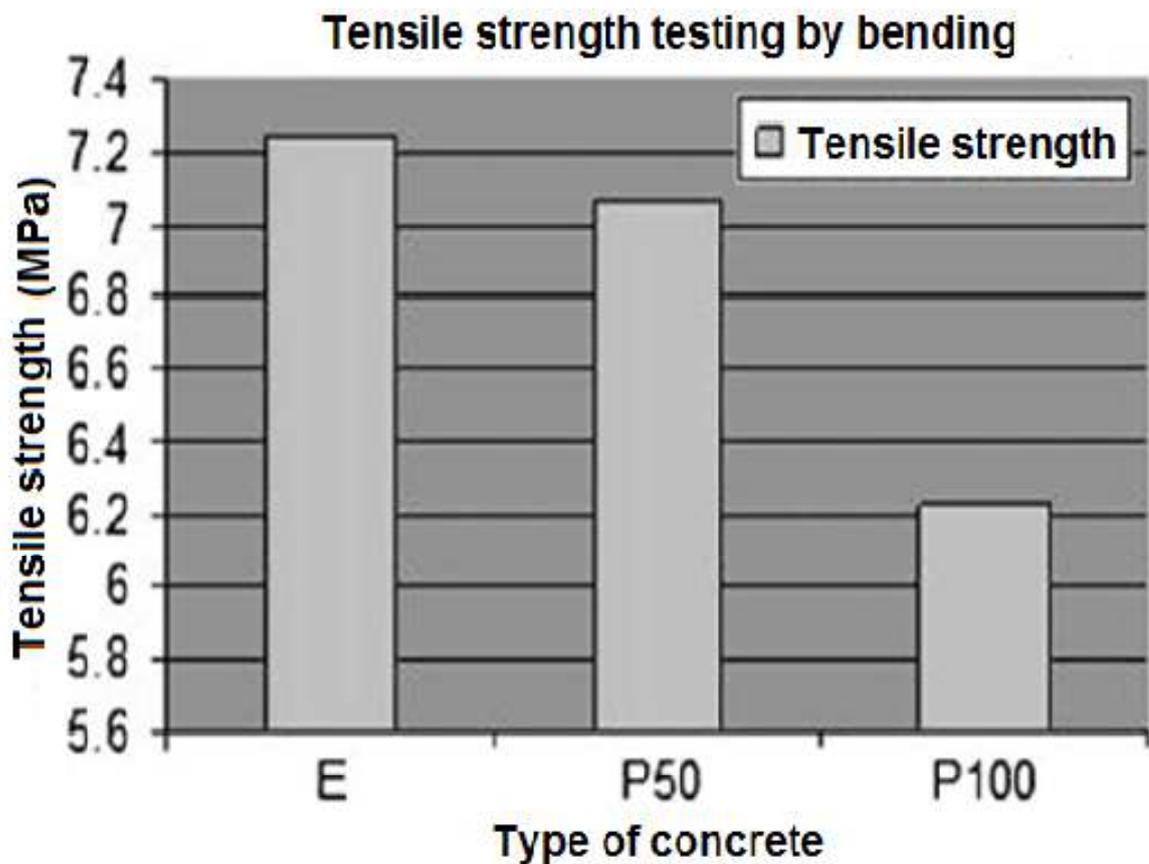


Figure 1-13 : Résistance à la traction pour des BAP avec (0, 50 et 100%) de granulats Recyclés [23].

1.7.2.3 Résistance à la traction

Les résultats issus des essais de traction uniaxiale, de fendage et de flexion ont montré que la résistance à la traction diminue également en augmentant le taux de substitution en granulats recyclés [37, 31, 48, 41]. Les relations empiriques établies entre la résistance à la flexion et à la compression des bétons naturels selon les codes ACI, CEB ou chinois ne peuvent pas être appliquées aux bétons à granulats recyclés [46].

- Il est possible de conclure que la résistance à la traction avec les granulats recyclés est affectée négativement lorsque le taux augmente de remplacement.
- La corrélation entre la résistance à la traction et la porosité est illustrée sur la figure. 14. Les résultats, comme on pouvait s'y attendre, montrer une diminution de la résistance à la traction lorsque la porosité augmente. La figure 15 montre le module statique normalisée d'élasticité par rapport à la résistance à la traction normalisée. La linéaire corrélation indique que la porosité élevée de recyclage agrégats affecte les deux caractéristiques. Ces résultats sont en accord avec ceux établis par [41].

1.7.2.4 Module élastique

Tous les auteurs ont signalé la faible rigidité des bétons à granulats recyclés [46, 49, 39, 37, 41, 44].

1.7.2.5 Retrait

a. Retrait plastique

Ce phénomène est lié aux conditions atmosphériques, au ressuage et à la cure dont le matériau fait l'objet dès après sa mise en œuvre. La présence de fines en quantité importante et l'absorption différée d'eau par les granulats réduit le ressuage (Mukai et al. 1979, cité par Hansen, 1992), et augmente donc le risque de retrait plastique en cas de cure insuffisante.

b. Retrait endogène

Ce phénomène est lié à l'auto-dessiccation, qui apparaît préférentiellement dans les bétons à faible rapport eau/ciment. On a dit que le rapport eau efficace/ciment est plutôt plus bas pour les bétons de granulats recyclés. Cependant, les granulats contiennent une importante réserve d'eau, capable de suppléer à la raréfaction de l'eau présente dans les pores de la matrice. Le retrait endogène est donc réduit pour ces bétons [50, 51]. L'incorporation de

granulats recyclés constituerait même une stratégie efficace pour réduire le retrait endogène des BHP [52].

c. Retrait de séchage

Du fait de la forte présence d'ancien mortier à la surface des granulats et de la forte porosité des granulats, le retrait de séchage sont nettement supérieures à celles des bétons à granulats naturels [47, 53, 54, 33].

Le retrait de séchage du BAP avec des granulats recyclés augment avec l'augmentation de la quantité des fines recyclées mais il peut être contrôlé par l'utilisation d'un rapport E/L Faible (Figure 1-20 à 1-22).

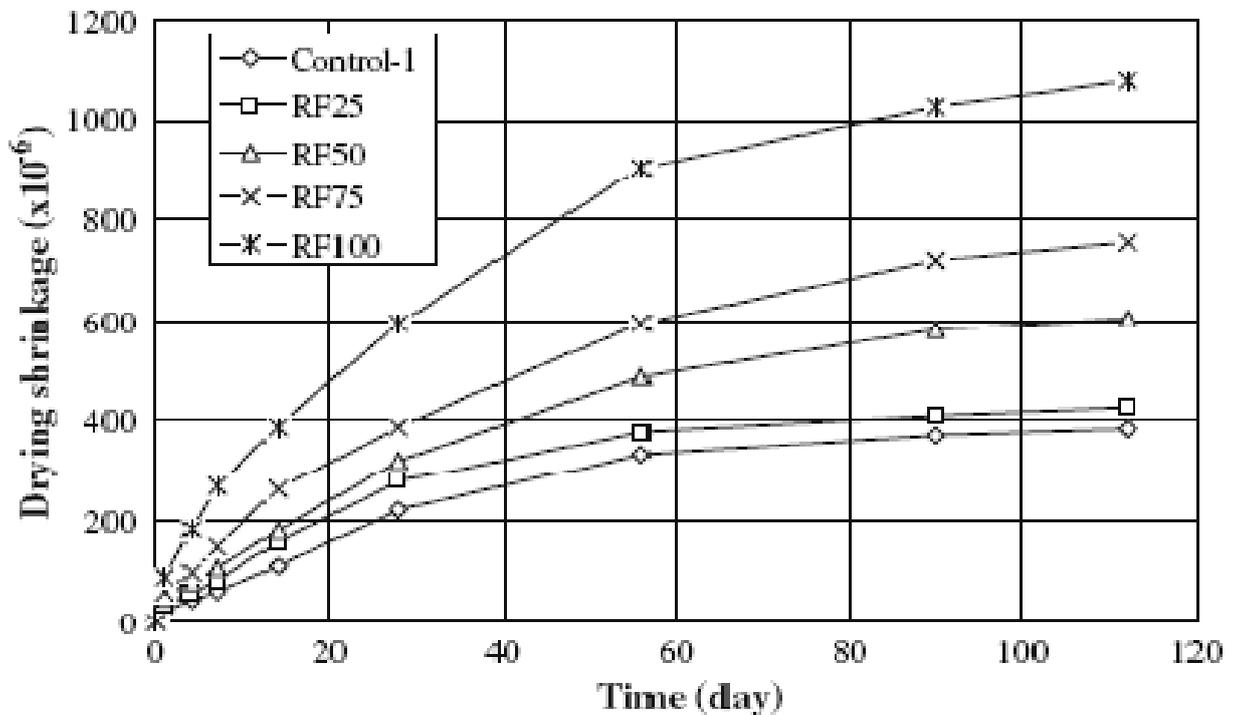


Figure 1-14 : Retrait de séchage pour BAP avec GR (25, 50, 75 et 100%) et rapport E/L=0,53 [35].

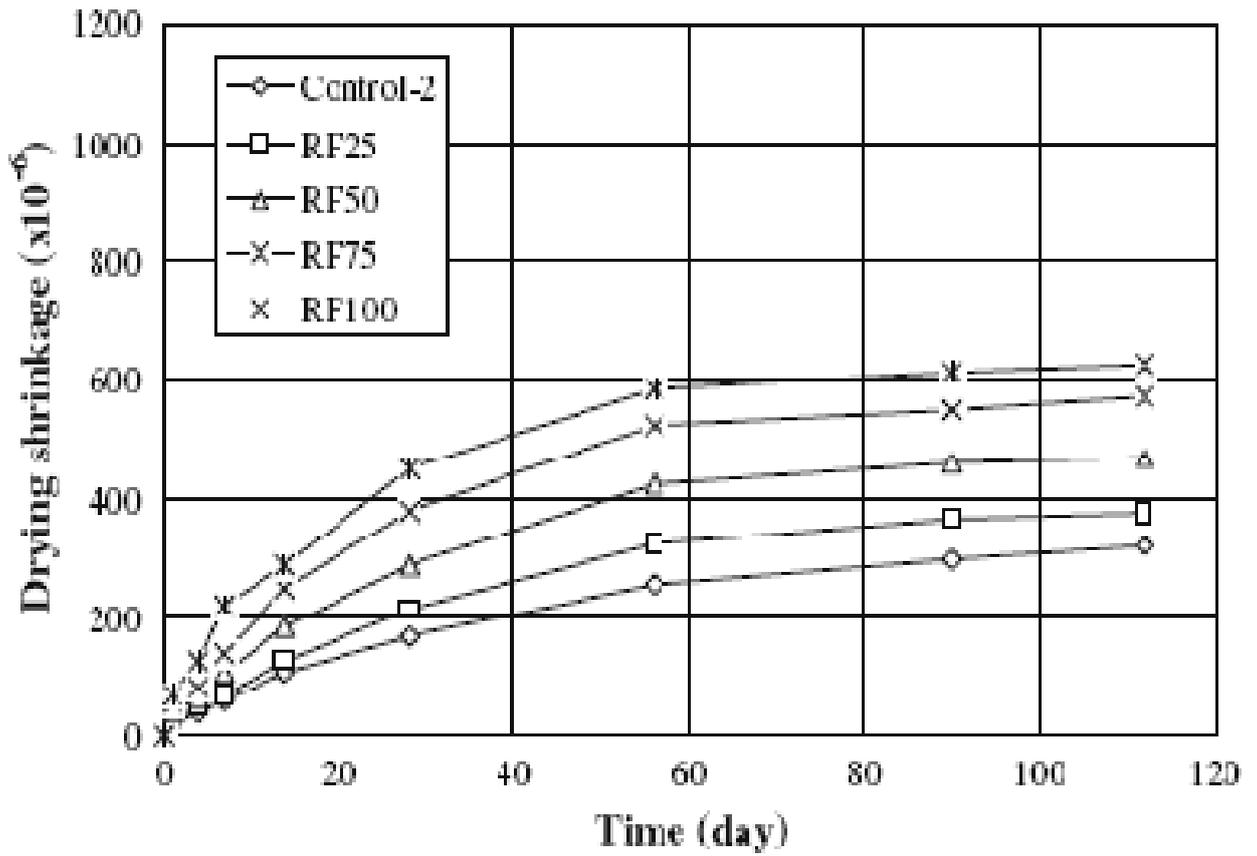


Figure 1-15 : Retrait de séchage pour BAP avec GR (25, 50, 75 et 100%) et rapport $E/L=0,44$ [35].

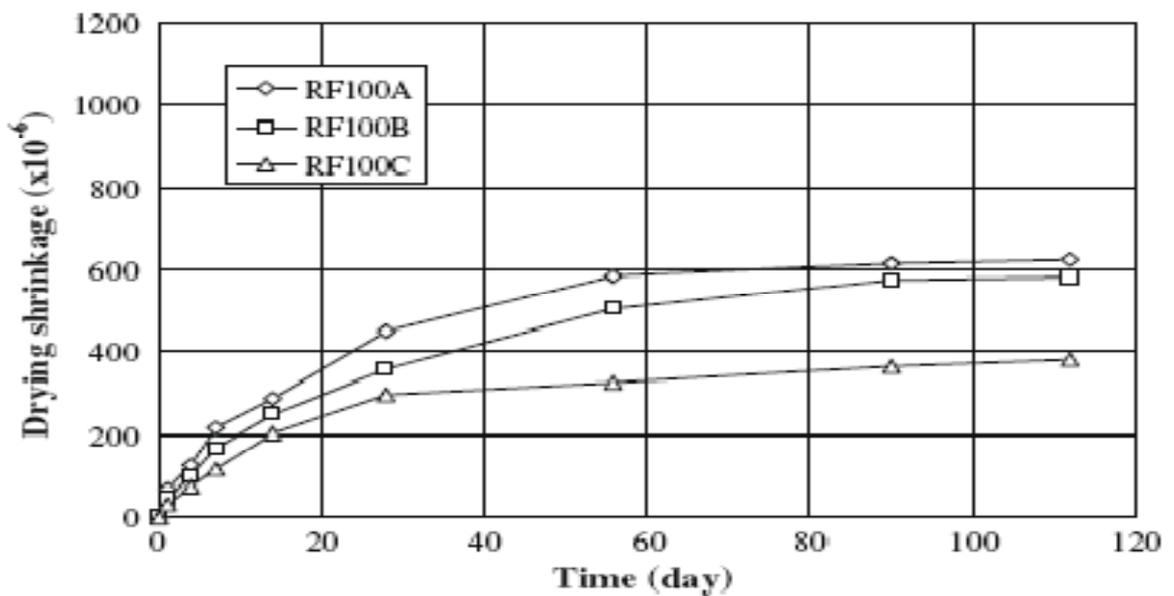


Figure 1-16 : Retrait de séchage pour BAP avec 100% GR et rapport E/L (A=0,44, B=0,40 et C=0,35) [35].

d. Retrait plastique

Ce phénomène est lié aux conditions atmosphériques, au ressuage et à la cure dont le matériau fait l'objet dès après sa mise en œuvre. La présence de fines en quantité importante et l'absorption différée d'eau par les granulats réduit le ressuage (Mukai et al. 1979, cité par Hansen, 1992), et augmente donc le risque de retrait plastique en cas de cure insuffisante.

1.7.2.5 Absorption d'eau

La propriété la plus importante qui différencie les granulats recyclés des granulats naturels est leur forte absorption d'eau.

Les absorptions par immersion ou par capillarité sont nettement augmentées dans le cas des bétons de granulats recyclés. Ceci s'applique en particulier à l'absorption par capillarité, du fait d'une plus grande quantité de pores capillaires [55, 56].

L'augmentation de la quantité de granulat recyclés augmente l'absorption d'eau. L'utilisation de 50 à 100% du gravier recyclé augmente l'absorption d'eau de 0,15 à 0,37% (Figure 1-23).

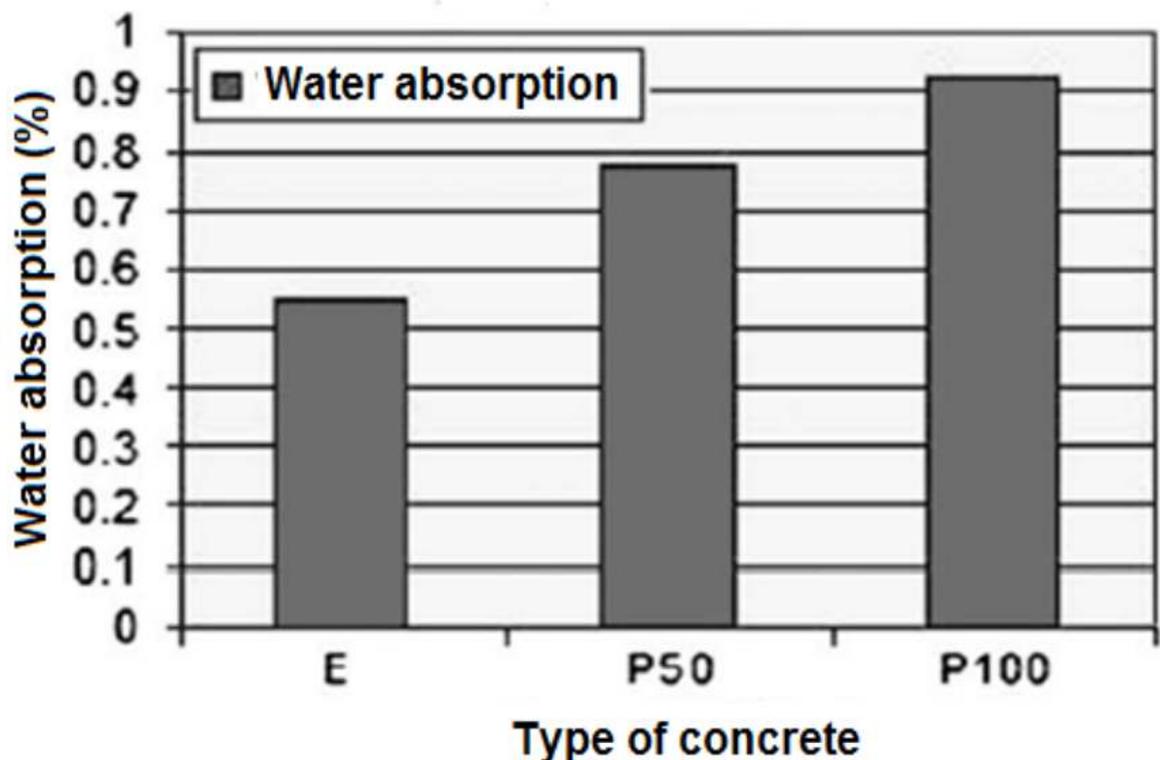


Figure 1-17 : Absorption d'eau pour des BAP avec (0, 50 et 100%) de granulats recyclés

[23].

1.7.2.6 Perméabilité

La perméabilité du BAP avec les granulats recyclés est affectée en même temps par les

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

Selon [57], lorsque le rapport E/C est supérieur à 0,55, la présence de granulats de recyclage ne modifie pas cette propriété. Par contre pour des faibles valeurs du rapport E/C, la perméabilité des bétons recyclés est supérieure à celles des bétons conventionnels.

1.7.2.7 Carbonatation

La carbonatation est particulièrement affectée par l'incorporation de granulats recyclés [De Brito et al. 2010]. La cinétique de carbonatation est plus rapide pour les bétons incorporant du sable issu de béton concassé [Evangelista et al. 2010]. Les travaux de Katz [Katz, 2003] confirment aussi l'évolution de la carbonatation.

Rasheeduzzafar et col. [57] ont montré que le potentiel de corrosion dans les bétons fabriqués avec des granulats recyclés est légèrement supérieur à celui d'un béton conventionnel.

2.5 Conclusion

- ✓ Le BAP est un béton très fluide, se mettant en place sans vibrations. Il doit présenter deux aspects, la fluidité qui le rend facile à utiliser dans les milieux confinés sans vibrations et l'homogénéité qui lui permet de résister à la ségrégation et au ressuage. Ces deux aspects sont rendus possibles en introduisant dans les formulations des adjuvants (superplastifiant, agents de viscosité...).
- ✓ Les granulats recyclés se caractérisent généralement par une porosité plus élevée et une absorption d'eau plus importante en raison de l'ancien mortier cohérant à la surface.
- ✓ Le BAP à base de granulats recyclés a un comportement rhéologique comparable à celle de granulats naturels mais la résistance à la compression diminue, le retrait augmente, l'absorption augmente et la diffusion des ions de chlorure augmente.

CHAPITRE II

MATERIAUX ET METHODES D'ESSAIS

CHAPITRE 2

MATERIAUX ET METHODES D'ESSAIS

2.1 Introduction

Dans ce chapitre, on s'intéresse tout d'abord à la présentation des principales caractéristiques des matériaux utilisés dans la composition de BAP et ensuite des méthodes de formulation adoptées pour réaliser les différents essais expérimentaux de notre étude expérimentale.

2.2 Caractéristiques des matériaux utilisés

2.2.1 Ciment

Le ciment utilisé est un ciment Portland composé, du type CEM II/A 42.5. Ce ciment présente une résistance minimale à la compression à 28 jours de 42,5 MPa. Les caractéristiques chimiques et minéralogiques de ce ciment sont présentées dans le Tableau 2.1.

Tableau 2.1 : Caractéristiques chimiques et minéralogiques du ciment CEM II/A 42.5

Composition chimique (%)									
CaO	SiO₂	Al₂O₃	Fe₂O₃	MgO	SO₃	Na₂O	K₂O	PAF	RI
63,40	21,06	3,60	4,47	1,85	2,00	0,13	0,57	2,53	0,65
Composition minéralogique (%)									
C₃S		C₂S			C₃A		C₄AF		
67,40		9,896			1,98		13,59		

Les essais physico-mécaniques du ciment ont été réalisés au laboratoire Géomatériaux et Génie Civil de l'Université de Blida dont les résultats d'identification sont donnés dans le Tableau 2.2.

Tableau 2.2 : Propriétés physique et mécanique de ciment utilisé

Essai	CEM I 42.5
Masse volumique apparente (ρ_{app}) (kg/m ³)	1200
Masse volumique absolue (ρ_{abs}) (kg/m ³)	3050
Finesse SSB (cm ² /g)	3200
Temps de début de prise (heure, minute)	2h15
Temps de fin de prise (heure, minute)	5h25
Résistance à la compression (N/mm ²)	
2 jours	14,53
7 jours	31,10
28 jours	44,06

2.2.2 Les Granulats naturels

2.2.2.1 Le sable

Le sable utilisé dans cette étude provient de la région de Baghlia 'S₁', est un sable roulé de formes arrondies et de surface lisses. Il est caractérisé par sa granulométrie et son diamètre maximal qui n'excède pas 5 mm, de module de finesse de 3,32 a été rectifié par un sable fin 'S₂' (sable de Boughzoul) de granulométrie 0/3 et de module de finesse 2,11. Le sable obtenu (Figure 2.1), mélange de 57% du sable 'S₁' et de 43% du sable 'S₂', à un module de finesse de 2,80. La Figure 2.2 présente la courbe granulométrique de sable testé après le séchage et tamisage par une tamiseuse électrique. Les autres propriétés physiques de sable sont présentées dans le Tableau 2.3.

**Figure 2.1** : Sable corrigé.

2.2.2.2 Le gravier

Le gravier utilisé est de deux classes granulaires différentes, le premier est un gravier de classe 3/8 et le deuxième de classe 8/15(Figure 2.3). Ces deux types de graviers provenant de la même station de concassage de Sétif. Les principales caractéristiques physiques de gravier sont données dans le Tableau 2.3. La Figure 2.2 présente les courbes granulométriques des graviers utilisés.

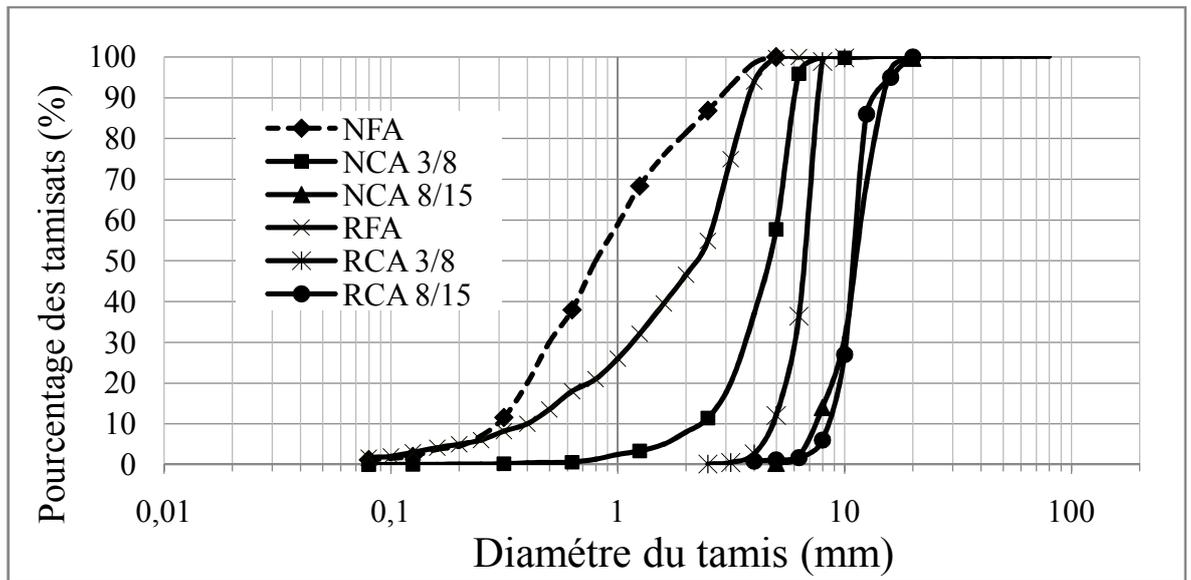


Figure 2.2 : Courbes Granulométriques des granulates naturelles et recyclés.



Figure 2.3 : Gravier Naturel.

2.2.3 Les Granulats recyclés

Les granulats recyclés (gravier et sable) ont été obtenus par un concassage et criblage des éprouvettes en béton autoplaçant (Figure 2.4). La composition d'un mètre cube de BAP est de 741.60 kg de granulats, 925.70 kg de sable, 459.5 kg de ciment et de 8.25 kg en superplastifiant. C'est un béton fluide présente un étalement de 623 mm de rapport $E/C = 0.45$ et qui présente une résistance en compression moyenne à 28 jours de 36.11 MPa.

Les éprouvettes ont été subir un concassage préliminaire qui a été fait manuellement, et un concassage final (Figure 2.5) à l'aide d'un concasseur mécanique (Figure 2.6). Le matériau concassé est passé à travers des tamis pour obtenir les différentes fractions de granulats recyclés (Figure 2.7). Les courbes granulométrique sont présentées dans la Figure 2.2. La caractérisation des granulats sont représentés dans le Tableau 2.3.

Tableau 2.3 : Caractéristiques physico-mécaniques des granulats utilisés

Caractéristiques physiques des granulats recyclés	Sable		Gravier			
	Naturel	Recyclé	Naturel		Recyclé	
	0/5	0/5	3/8	8/15	3/8	8/15
Masse volumique apparente (ρ_{app}) (kg/m ³)	1586	1392	1358	1422	1204	1219
Masse volumique absolue (ρ_{abs}) (kg/m ³)	2500	2687	2727	2727	2675	2513
Coefficient d'absorption (%)	1.3	7.80	1.1	1.1	6.60	4.60
Humidité (%)	0.8	3.30	0.8	0.8	3.14	3.30
Module de finesse	2.5	3.12	/	/	/	/
Equivalent de sable visuel (%)	76.04	89.21	/	/	/	/
Equivalent de sable au piston (%)	80.23	90.37	/	/	/	/

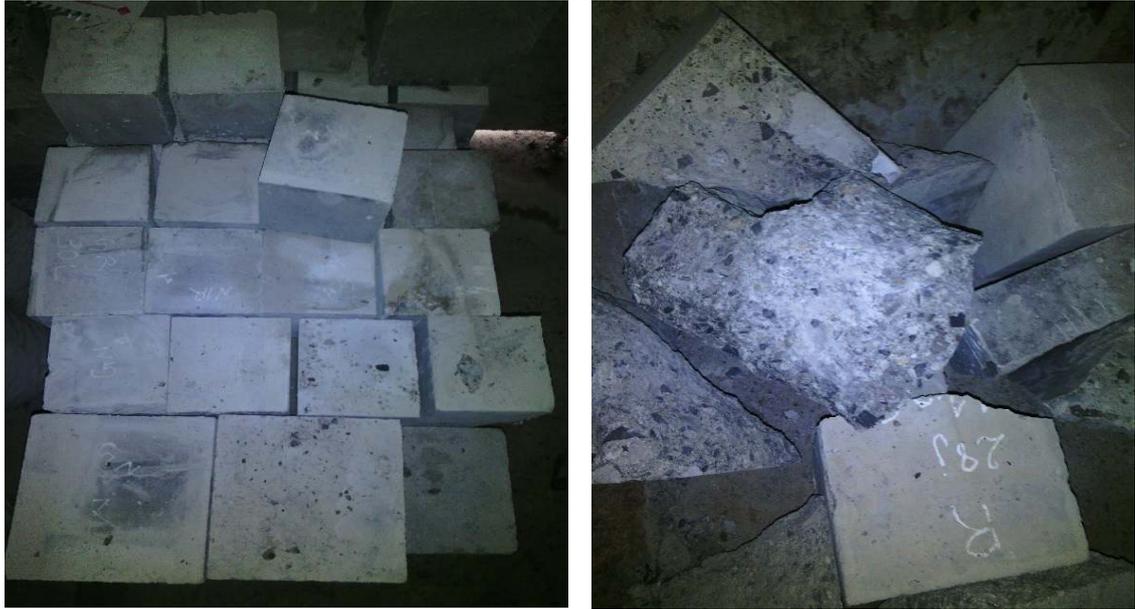


Figure 2.4 : Les éprouvettes en béton autoplaçant.

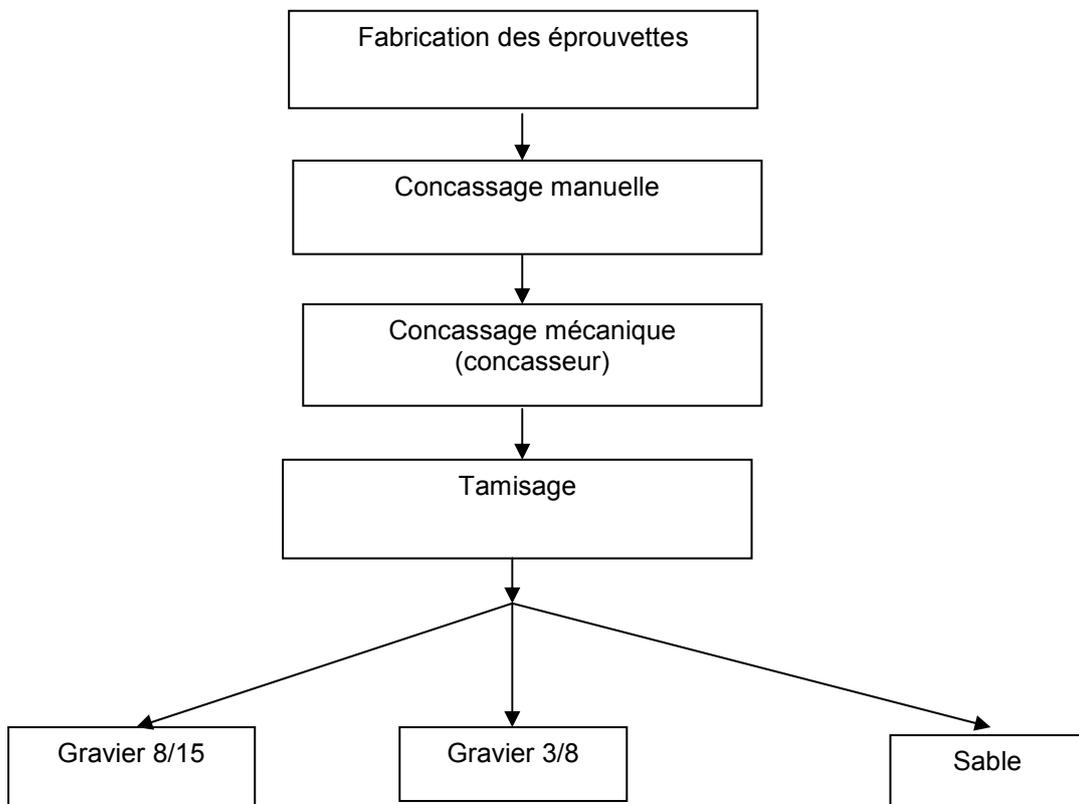


Figure 2.5 : procédure de fabrication des granulats recyclés.



Figure 2.6 : Concasseur à mâchoire.



Figure 2.7 : Les granulats recyclés.

Les Figures 2.8 et 2.9 présente la différence entre les masses volumique apparente et absolue des granulats naturels et recyclés. En comparant les masses volumiques (absolue et apparente) des granulats naturels et des granulats recyclés, on remarque une chute de la masse pour les trois fractions granulaires. Cette diminution est peut être due à la faible densité de la pâte d'ancien mortier recouvrant le granulat. Des résultats similaires ont été trouvés par [14, 16,17, 18].

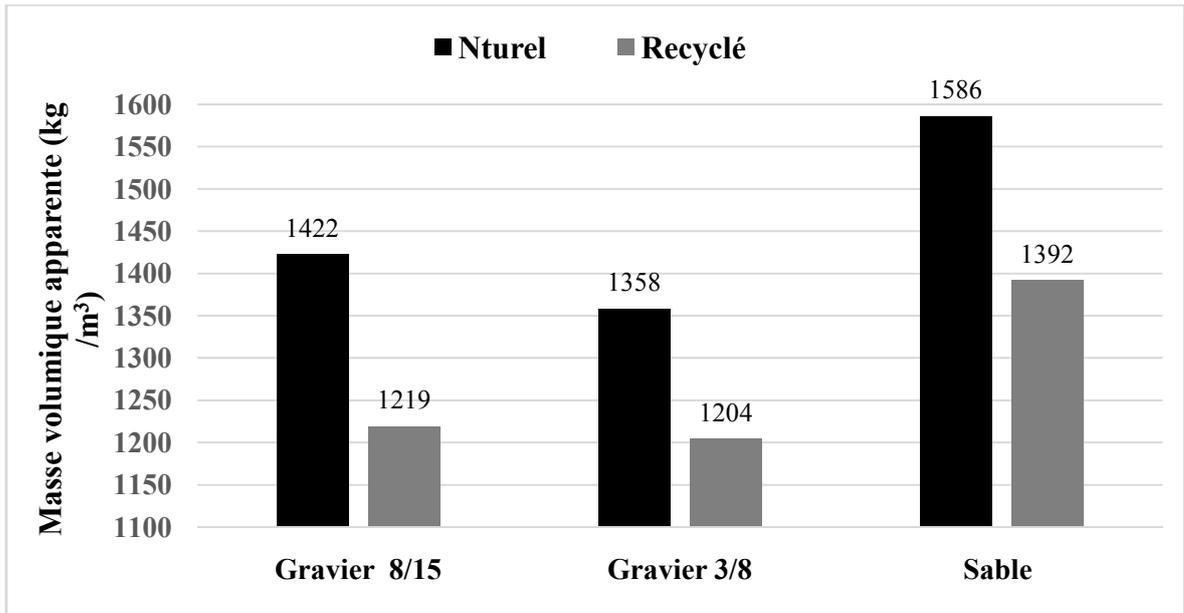


Figure 2.8 : Comparaison entre le Masse volumique apparente des granulats naturels et recyclés.

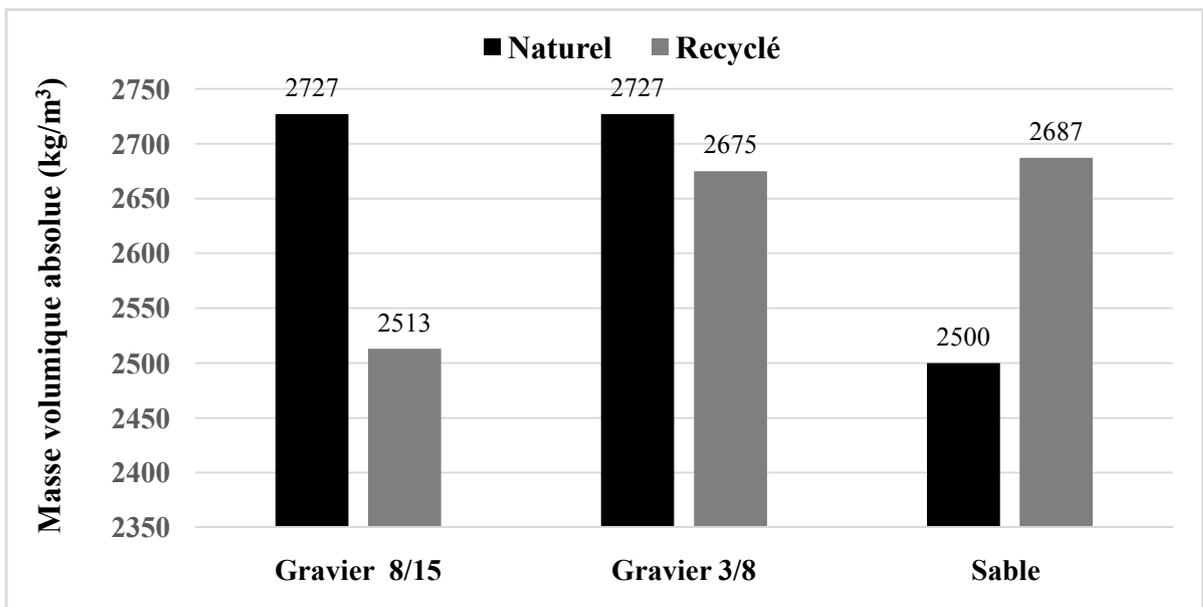


Figure 2.9 : Comparaison entre la Masse volumique absolue des granulats naturels et

recyclés.

D'autres paramètres se différencient entre les granulats naturels et les recyclés. Le paramètre le plus important est le coefficient d'absorption d'eau (A_b). La Figure 2.10 présente la différence entre les coefficients d'absorption d'eau (A_b) des granulats naturels et recyclés. On a remarqué un coefficient d'absorption d'eau élevé pour les granulats recyclés. Cette remarque a été observée par [20, 14, 16, 19 et 32]. La différence entre les coefficients est de l'ordre de 9 à 13 fois plus grand pour le gravier recyclé (3/8 et 8/15) et de 6 fois pour le sable.

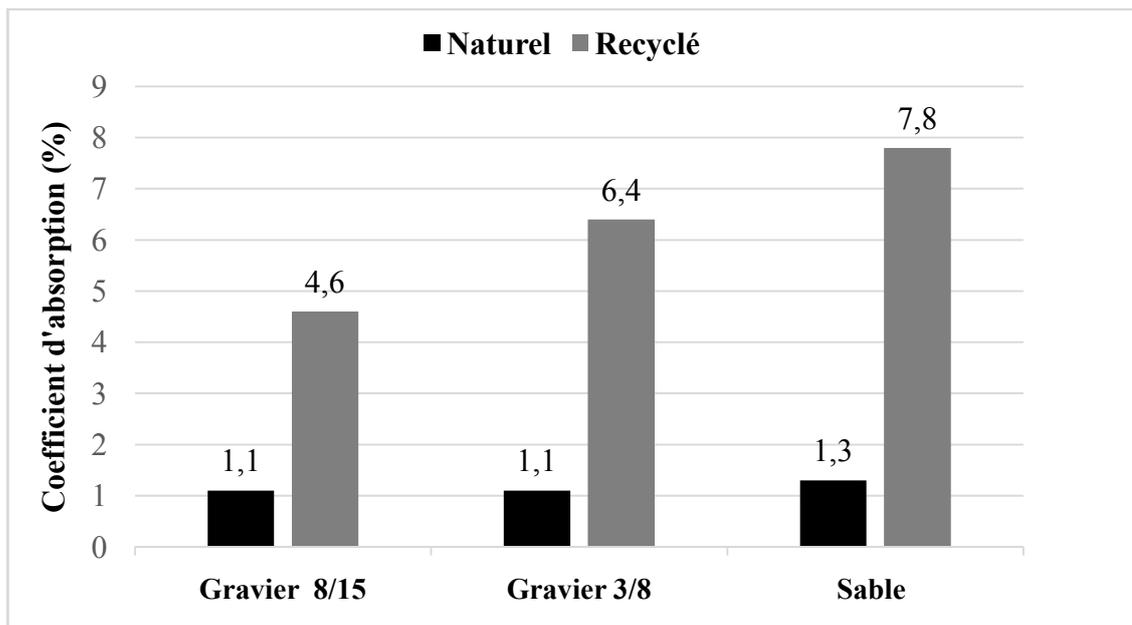


Figure 2.10 : Comparaison entre le coefficient d'absorption d'eau (A_b) des granulats Naturels et recyclés.

2.2.4 L'eau de gâchage

Pour la confection des mortiers et bétons, nous avons utilisé de l'eau potable du robinet exempte d'impuretés.

2.2.5 Le Superplastifiant

Un seul type d'adjuvant a été employé durant notre étude, un superplastifiant de haut réducteur d'eau de la troisième génération. Ce superplastifiant est produit de Granitex et commercialisé sous le nom de 'MEDAFLOW 30'. Il est à base de polycarboxylates qui fonctionnent par répulsion stérique, de densité 1.07 ± 0.01 , le pH varie entre 6 à 6,5, la teneur en ions chlorures inférieure ou égale à 1 g/l, et il possède 30% d'extraits secs. La plage d'utilisation recommandée varie de 0,5 à 2,0 % du poids du ciment soit 0,5 à 1,85

litre pour 100 kg de ciment selon la fluidité et les performances recherchées. Il se caractérise par sa grande durée de rhéologie et de sa résistance à la ségrégation. Ces caractéristiques nous ont permis de réaliser tous les essais préconisés pour les BAP à l'état frais sans utiliser de retardateur de prise ou d'agent de viscosité.

2.3 Formulations adoptées

La formulation du béton consiste à définir le mélange optimal des différents granulats dont on dispose, ainsi que le dosage en ciment, en eau et en adjuvant, afin de réaliser un béton dont les qualités soient celles recherchées.

La plupart des formulations de BAP sont conçues actuellement de manière empirique, et on doit concilier deux caractéristiques a priori contradictoires la fluidité et la stabilité (résistance à la ségrégation et au ressuage). Par conséquent, les BAP doivent satisfaire plusieurs tests, qui permettent de caractériser les principales propriétés du BAP à l'état frais : la mobilité en milieu confiné, la mobilité en milieu non confiné, et la stabilité et ce contrairement aux méthodes classiques de formulation, qui ne considèrent généralement que l'affaissement et la résistance à la compression à 28 jours (comme critères de caractérisation).

Boukandakdji [58] précise que la formulation du BAP requiert une étude précise notamment dans le choix de ses constituants, et l'optimisation des paramètres influant en particulier les rapports eau/liant (E/L), le rapport sable/mortier (S/M), et la variation du rapport superplastifiant/Liant (Sp/L).

Nous avons confectionné nos mélanges selon la formulation proposée par le japonais Okamura avec quelques modifications concernant la sélection de la quantité de sable dans le mortier, le rapport eau/liant ainsi que le rapport superplastifiant/liant. Ces derniers ont été évalués expérimentalement de manière à avoir des valeurs de l'étalement au cône d'Abrams et du temps d'écoulement au V-Funnel acceptables. Pour la sélection des quantités d'air et de graviers, la méthode Okamura a été maintenue.

2.3.1 Formulation du Mortier

Dans le BAP, la phase du mortier fournit la lubrification entre les particules des gros granulats, et la stabilité globale du béton. Les propriétés du mortier sont semblables à celle du BAP lui-même, c'est-à-dire un faible seuil de cisaillement pour assurer l'écoulement

sous le seul effet de la gravité et une viscosité plastique suffisante afin d'assurer le non ségrégation du béton durant l'écoulement.

Des tests sur les mortiers sont réalisés car :

- Le BAP à un volume en gros granulats moins important que le béton ordinaire, et donc les propriétés du mortier sont dominants ;
- L'évaluation des propriétés du mortier est une partie intégrale de la formation des BAP, et donc la connaissance des propriétés du mortier est utile ;
- Tester un mortier est beaucoup plus commode que tester un béton.

Pour la formulation les bétons autoplaçants, nous avons suivi les mêmes principes de formulations utilisés par Boukendakdji [58]. En se basant sur les résultats trouvés dans ces travaux concernant l'optimisation du rapport sable/mortier, nous avons fixé : le rapport Sable/Mortier à 0,50, le rapport E/C à 0,40 tout en faisant varier le rapport superplastifiant/poudre (Sp/P). Pour chaque dosage de superplastifiant, des mesures d'étalement et du temps d'écoulement ont été effectués sur leurs mortiers correspondants.

La sélection du rapport Sp/L est ajustée par l'essai d'étalement, dont le diamètre de la galette de mortier de référence obtenu doit être compris entre $270 \text{ mm} \leq d \leq 330 \text{ mm}$, et par l'essai de l'entonnoir en V (V-funnel), dont le temps d'écoulement obtenu doit être compris entre $2 \text{ sec} \leq t \leq 10 \text{ sec}$ [70].

2.3.1.1 Confection des mortiers

Pour la confection du mortier, les proportions du mélange (ciment, sable, eau et superplastifiant) ont été calculées selon une méthode donnée en annexe A.

Plusieurs auteurs décrivent la méthode de malaxage dans le but de couvrir la surface de tous les agrégats par la pâte de ciment et d'assurer le mélange le plus homogène possible des différents constituants. Dans nos essais nous avons opté pour la proposition de Domone et Jin [71] qui s'articule sur les étapes suivantes (Figure 2.11) :

- ◆ Malaxer à sec le ciment et le sable pendant environ une (1) minute afin d'homogénéiser le mélange (on a utilisé un malaxeur à mortier de capacité de 5 litres) (Figure 2.12) ;
- ◆ Malaxer pendant une (1) minute avec la première quantité d'eau (Eau1 = 70% Eau) ;

- ◆ Malaxer pendant une (1) minute avec le restant de l'eau de gâchage (Eau2 = 30% Eau) mélangé avec le superplastifiant ;
- ◆ Malaxer le mélange pendant 3 minutes.

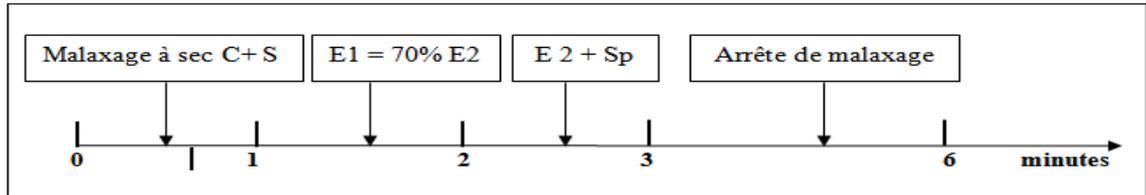


Figure 2.11 : Séquence de malaxage du mortier [60].



Figure 2.12 : Malaxeur à mortier.

2.3.2 Formulation du BAP de Référence

Les essais effectués sur mortier est une étape indispensable car elle permet de fixer les rapports E/L (eau/liant), S/M (sable/mortier) ainsi que Sp/L (superplastifiant/liant) qui facilité par la suite la formulation du BAP de Référence.

Par la même procédure d'exécution de la méthode générale, on formule le BAP de référence en se basant sur les résultats d'optimisation de mortier. Si nécessaire le rapport Sp/L sera ajusté afin d'obtenir un bon étalement sans ségrégation ni ressuage.

Les différentes proportions ont été calculées selon la procédure donnée en annexe B.

2.3.2.1 Confection des BAP

Les mélanges ont été confectionnés dans un malaxeur à béton d'une capacité de 40 litres (Figure 2.13).



Figure 2.13 : Malaxeur pour béton.

Pour notre cas, la séquence suivie est celle décrite dans la Figure 2.14 ; elle suit les étapes suivantes :

- ◆ Calculer l'eau efficace que l'on introduit dans le malaxeur en prenant en compte la teneur en eau et l'absorption des granulats ainsi que l'eau contenue dans l'adjuvant. La quantité d'eau efficace est donnée par la formule suivante :

$$E_{\text{eff}} = E_{\text{totale}} - E_{\text{teneur en eau}} - E_{\text{adjuvant}} + E_{\text{absorbée par granulats}} \text{ (annexe B) ;}$$

- ◆ Calculer les proportions du ciment, sable, gravier 3/8, gravier 8/15 et superplastifiant (voir annexe B) ;
- ◆ Malaxer le sable, ciment, laitier et gravier (3/8 et 8/15) pendant 30 secondes pour homogénéiser le mélange ;
- ◆ Ajouter pendant 1 minute la première quantité d'eau ($E_{\text{eau1}} = 70\% E_{\text{eau}}$) ;

- ◆ Ajouter le superplastifiant dilué dans le restant de l'eau de gâchage (Eau2 = 30% Eau) ;
- ◆ Malaxer pendant 5 minutes ;
- ◆ Arrêter le malaxeur et laisser le mélange au repos pendant 2 minutes ;
- ◆ Remalaxer pendant 30 secondes.

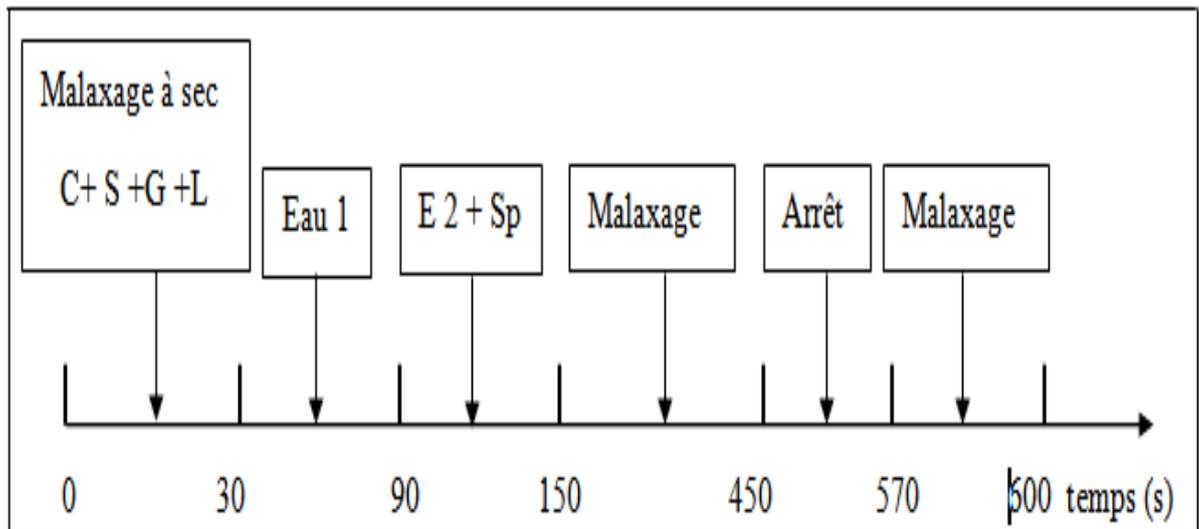


Figure 2.14 : Séquence de malaxage du béton autoplaçant [60].

Cette séquence de malaxage est la même pour tous les mélange de bétons. En ce qui concerne le re-malaxage il se fait juste avant chaque essai.

2.4 Essais de caractérisations technologiques des BAP

Il n'existe pas d'essai standard, bien définie pour s'assurer qu'un béton est effectivement autoplaçant. En effet, le comportement spécifique des BAP à l'état frais rend quasi inadaptés la plupart des essais classiques sur les bétons traditionnels. Les essais au maniabilimètre ne sont pas possibles en l'absence de vibration et l'essai classique d'affaissement au cône d'Abrams est inopérant. C'est pourquoi les chercheurs et les industriels ont développé toute une série d'essais plus ou moins complémentaires, mais dont l'interprétation reste bien souvent subjective et dépendante de l'opérateur.

2.4.1 Essais relatifs au Mortier à l'état frais

2.4.1.1 Essai d'Étalement au Mini-Cône

L'essai d'étalement consiste à remplir un moule tronconique placé sur une surface horizontale lisse, le diamètre d'étalement du mortier est mesuré suivant deux directions perpendiculaire, la moyenne est retenu. La tendance à la ségrégation et au ressuage peut être détectée visuellement, le sable doit être réparti uniformément et aucune concentration ou séparation de fines ne devrait apparaître sur les bords de la galette. La Figure 2.15 montre le dispositif de l'essai d'étalement pour les mortiers.

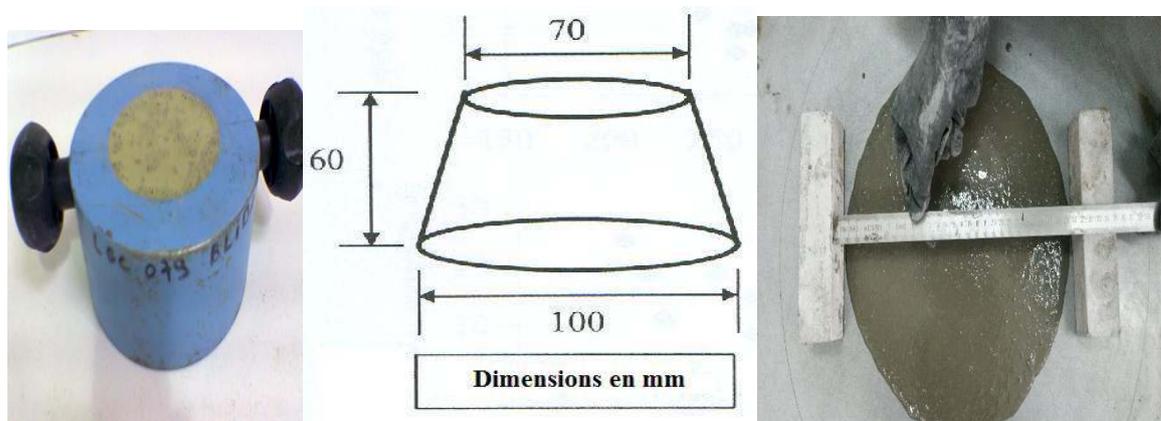


Figure 2.15 : Essai d'Étalement pour Mortier.

2.4.1.2 Essai à l'entonnoir en V (V-Funnel test)

Dans l'essai de l'entonnoir en V (V-funnel), l'entonnoir est rempli de 1.1 litre de mortier, et le temps d'écoulement est calculé entre l'instant de l'ouverture de l'orifice de l'entonnoir et l'instant de l'apparition de la première lumière en regardant verticalement vers le bas de l'entonnoir (Figure 2.16). Au cours de l'essai le mortier doit s'écouler avec une vitesse constante ; un simple changement de vitesse de l'écoulement est un signe de blocage, donc de ségrégation dans le mortier.

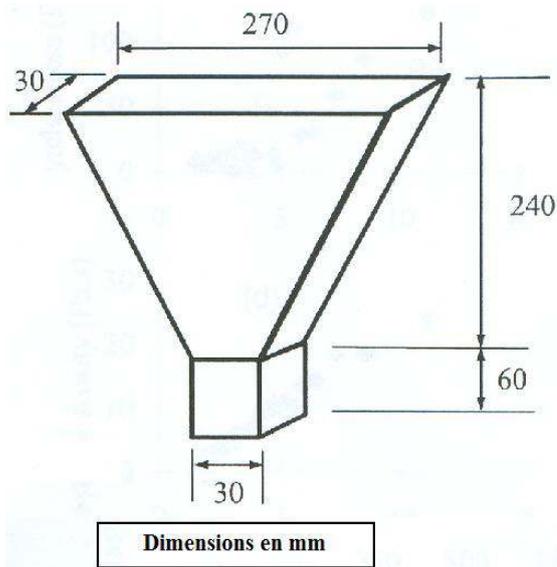


Figure 2.16 : Essai à l'Entonnoir en V pour Mortier.

Des essais réalisés avec des matériaux Japonais ont montré l'obtention simultanée d'une valeur d'étalement comprise entre 250 et 280 mm et un temps d'écoulement compris entre 6 et 10 sec produisant un bon BAP [58]. Des essais sur des matériaux Anglais, a suggéré une valeur d'étalement minimale de 300 mm et un temps d'écoulement compris entre 2 et 10 sec [58].

2.4.2 Essais relatifs au BAP à l'état frais

Pour accorder les deux caractéristiques contradictoires de BAP c'est-à-dire la fluidité et la ségrégation, nous avons procédé à un certain nombre d'essais qui sont recommandés par (AFGC) [61] qui permettent de caractériser les principales propriétés du BAP à l'état frais. Les recommandations nationales (AFGC) prévoient de caractériser les BAP à l'état frais en prenant en compte les trois caractéristiques principales demandées :

- la mobilité en milieu non confiné, décrit par l'essai d'étalement et le V-Funnel ;
- la mobilité en milieu confiné, décrit par la boîte en L et en U ;
- la stabilité c'est-à-dire la résistance à la ségrégation et au ressuage.

2.4.2.1 Essai d'étalement au cône d'Abrams (Flow test)

L'essai d'étalement est réalisé à l'aide du cône d'Abrams (Figure 2.17). Ce dernier est un moule en métal non directement attaqué par la pâte de ciment, d'une épaisseur

minimum de 1,5 mm. La paroi intérieure du moule lisse et de forme d'un tronc de cône creux, dont le diamètre de base inférieur est de 200 ± 2 mm et le diamètre de base supérieur est de 100 ± 2 mm. Il a une hauteur de 300 ± 2 mm.

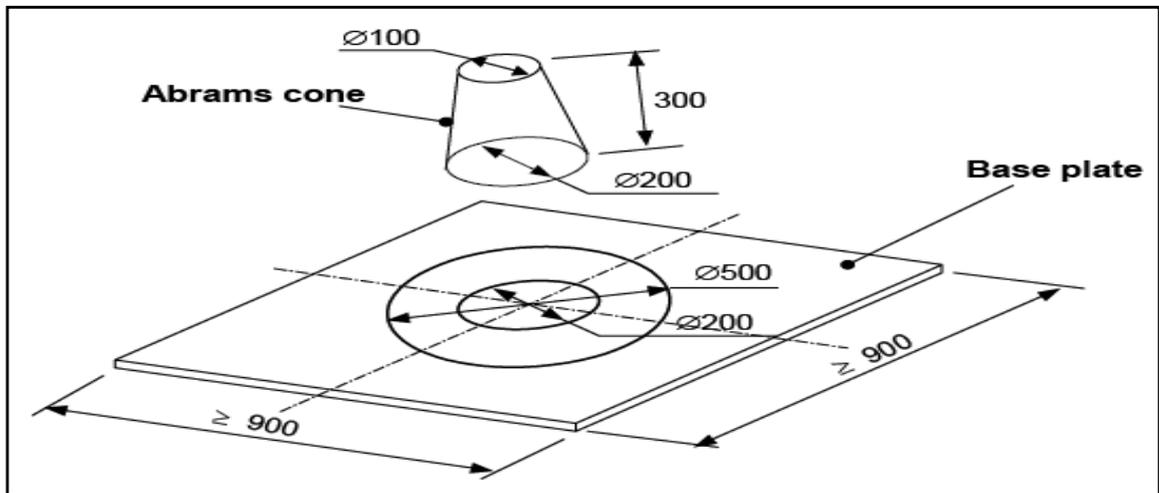


Figure 2.17 : Essai d'étalement au cône d'Abrams (slump flow) [62].

On remplit le cône de l'échantillon de béton à tester, puis on soulève le cône lentement pour permettre au béton de s'étaler. Cette opération de soulèvement du cône doit durer 5 secondes environ. On mesure ensuite la taille de la galette de béton obtenue (Figure 2.18). Sa dimension correspond à la moyenne de deux diamètres mesurés. A cause de la nature visqueuse du BAP, les lectures des mesures d'étalement doivent se faire après stabilité de la galette, soit environ 60 secondes après soulèvement du cône [63].



Figure 2.18 : Mesure du diamètre d'étalement.

D'après AFGC [61], les valeurs d'étalement au cône d'Abrams acceptables pour un BAP sont généralement fixées dans la fourchette de 600 à 750 mm (pas de ségrégation visible en fin d'essai c'est-à-dire pas d'amoncellement de gros granulats ni d'auréole de laitance). Selon EFNARC [64], la mesure de l'étalement au cône d'Abrams, peut être divisée en trois (03) classes. Le Tableau 2.4 définit ces trois classes selon le domaine d'utilisation du BAP :

Tableau 2.4 : Classification des BAP selon domaine d'utilisation [64].

Classe	Etalement (en mm)	Domaine d'utilisation de BAP
SF1	550 – 650	<ul style="list-style-type: none"> • structures nom ou peu ferraillées. béton coulé à partir du haut (ex. les dalles). • coulage par système de pompage du BAP (ex. tunnels). • petites sections (ex. les piles et les fondations profondes).
SF2	660 – 750	<ul style="list-style-type: none"> • La majorité des applications.
SF3	760 – 850	<ul style="list-style-type: none"> • applications verticales. • structures trop ferraillées. • coulage à partir du dessous du coffrage. • structures de forme complexe.

La classe SF3 est typiquement produite avec les petites dimensions maximales de granulats ($D_{max} < 16$ mm), et donne généralement une meilleure finition de surface que la classe SF2, mais la résistance à la ségrégation est difficile à contrôler.

Lors de l'essai d'étalement, on mesure le T_{50} temps d'écoulement, c'est le temps nécessaire à l'obtention d'une galette de 50 cm de diamètre. Cette dernière valeur donne une indication sur la viscosité du matériau et peut donner aussi des informations concernant l'uniformité et la résistance à la ségrégation du mélange. Pour des BAP cette valeur est, généralement, comprise entre 2 et 5 secondes [74].

2.4.2.2 Essai à l'Entonnoir en V (V-Funnel test)

D'autres essais permettent d'évaluer la mobilité du béton en milieu non confiné comme

celui de l'entonnoir en forme de V funnel (Figure 2.19) développé par Okamura et Ozawa en 1995 [12].

On remplit l'entonnoir de béton de capacité de 12 litres, puis on laisse reposer pendant 1 minute. L'essai consiste à observer l'écoulement du béton à travers l'entonnoir et à mesurer le temps d'écoulement entre le moment où la trappe est libre et le moment où on aperçoit le jour par l'orifice.

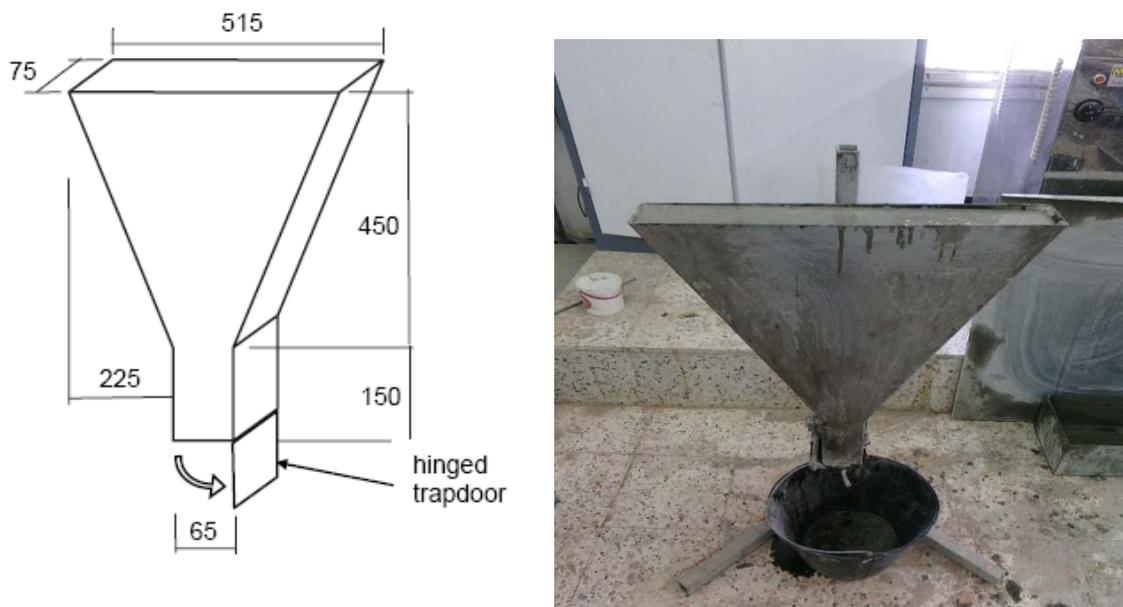


Figure 2.19 : Dispositif de l'essai d'entonnoir en V (V-Funnel).

L'essai de l'entonnoir en V nous enseigne sur la stabilité, ainsi que sur la viscosité du mélange étudié. S'il y a de la ségrégation, on observera un amoncellement de granulats au goulot de l'entonnoir, ou si le mélange est trop visqueux, le temps d'écoulement du béton à travers l'entonnoir sera plus important.

Selon EFNARC [64] le temps d'écoulement du béton autoplaçant à l'entonnoir doit être compris entre 6 et 12 secondes pour obtenir un béton de viscosité suffisante. Et à partir de ce dernier ces spécifications EFNARC [64] ont définies deux classes de viscosité qui sont :

- VF1 si le temps d'écoulement t est inférieur à 8 s. Cette classe correspond à $T_{500} \leq 2$ s.

- VF2 pour un temps d'écoulement compris entre 9 et 25 s. Cette classe correspond à $T_{500} > 2s$.

2.4.2.3 Essai à la boîte en L (L-Box test)

D'autres essais permettent d'évaluer la mobilité du béton en milieu confiné comme l'essai de la boîte en L (Figure 2.20). Ce test permet de caractériser la viscosité du mélange, de plus la présence de barres simulant des armatures d'un coffrage renseigne sur la capacité de remplissage du mélange. On place le béton dans la partie verticale de la boîte environ 13 litres. Après arasement, on laisse le béton se reposer pendant une minute. Puis on lève la trappe et on laisse le béton s'écouler dans la partie horizontale de la boîte à travers le ferrailage.

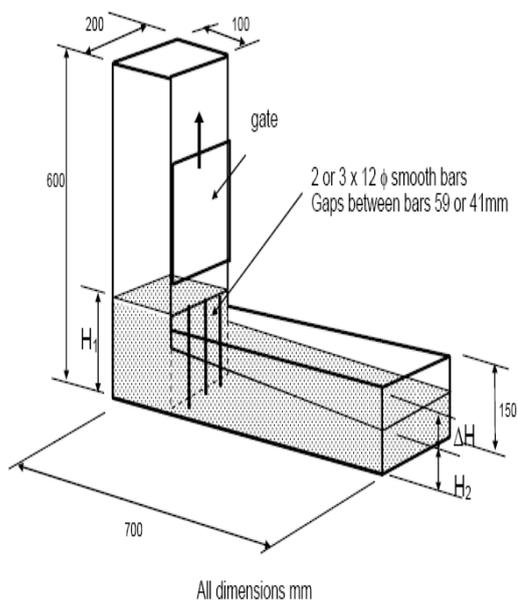


Figure 2.20 : Essai de la boîte en L [64].

Les paramètres suivants peuvent être mesurés :

- ♦ le temps d'écoulement du béton T_{20} pour arriver à la distance 200 mm (dans la partie horizontale),
- ♦ le temps d'écoulement du béton T_{40} pour arriver à la distance 400 mm (dans la partie horizontale),

- ♦ une fois l'écoulement du béton achevé, on mesure les hauteurs H1 et H2 et on exprime en terme de taux de remplissage H_2 / H_1 qui renseigne sur la capacité du BAP à cheminer en milieu confiné.

Lorsque le béton s'écoule mal à travers le ferrailage et qu'il se produit un amoncellement de granulats en aval de la grille, c'est le signe d'un problème de blocage ou de ségrégation. Si, par contre, on observe une bonne distribution des gros granulats tout au long de la partie horizontale du L, on pourra dire que ce béton est homogène.

Pour que le BAP soit accepté, le taux de remplissage de la boîte en L (rapport des hauteurs H_2/H_1) doit être supérieur à 0,8 [9]. Les temps d'écoulement peuvent aussi être mesurés pour apprécier la viscosité du béton. Certains auteurs recommandent des valeurs inférieures à 1.5 secondes pour T_{20} et inférieures à 3.5 secondes pour T_{40} afin de rester dans un domaine autoplaçant [62].

2.4.2.4 Essai de résistance à la ségrégation par tamisage

Cet essai permet de caractériser l'amplitude du BAP à rester homogène après sa mise en place et jusqu'au début de prise (Figure 2.21). Le BAP doit demeurer stable sous l'effet de la gravité et ne doit pas présenter des signes de ressuage. L'essai de stabilité au tamis est proposé dans les recommandations provisoires de l'Association Française de Génie Civil [66]. Il consiste à prélever une quantité de béton frais ($4.8 \pm 0.2 \text{ kg}$) d'un échantillon de 10 litres mis au repos pendant 15 minutes, de la déverser sur un tamis de maille 5 mm avec une hauteur de chute de 50 cm et après 2 minutes d'attente, le pourcentage de laitance qui traverse le tamis est calculé selon l'expression suivant :

$$\Pi = \frac{P_{\text{laitance}}}{P_{\text{échantillon}}} \times 100$$



Figure 2.21 : Essai de résistance à la ségrégation au tamis.

Les critères d'acceptabilité d'une formulation de BAP sont divisés en trois classes :

- ♦ $0 \leq \Pi \leq 15\%$: la stabilité est satisfaisante,
- ♦ $15 \leq \Pi \leq 30\%$: la stabilité est critique,
- ♦ $\Pi > 30\%$: la stabilité est très mauvaise.

2.5 Démoulage et conservation des éprouvettes

Les différents types de bétons sont tous fabriqués dans l'environnement de laboratoire. Juste après la confection, toutes les éprouvettes ont été couvertes afin d'éviter les risques d'évaporation excessive et le retrait plastique. Après 24 heures de la confection, les éprouvettes ont été démoulées et conservées selon deux modes différents : l'eau et l'air libre d'un climat chaud (Figure 2.22). Les échantillons conservés dans l'eau ont été séchés à l'atmosphère de laboratoire pendant 24 heures avant l'âge d'essai.



Figure 2.22 : les éprouvettes dans l'eau de laboratoire.

Les éprouvettes confectionnées sont au nombre total de 36, réparties selon l'âge (7, 28 et 56,90jours) et selon l'environnement de conservation comme le présente le tableau 2.5.

Tableau 2.5 : Répartition du nombre d'éprouvettes confectionnées

		Nombre des éprouvettes confectionnées		
Module de convection	Age (Jours)	100% GN	50%GR	100%GR
Eau de laboratoire	7	3	3	3
	28	3	3	3
	56	3	3	3
	90	3	3	3

2.5.1 Résistance mécanique à la compression

La qualité du béton est généralement caractérisée par la mesure de la résistance à la compression. L'importance de cette grandeur en termes de qualité du béton est reliée directement à la composition de la pâte de ciment.

L'essai de résistance à la compression a été effectué sur une presse de capacité de 3000 kN (Figure 2.23), conformément à la norme NF P 18-406 [67], la vitesse de chargement est de 0.5 kN/s.

La résistance en compression des bétons est mesurée sur des éprouvettes cubiques 100x100x100 mm³ pour chaque mélange du béton à l'âge de 7, 28 et 90 jours



Figure 2.23 : Dispositif de l'essai de compression simple.

3.5.2 Les essais non destructives

3.5.2.1 Scléromètre (marteau de rebondissement de Schmidt)

a-Principe fondamental

Le scléromètre est principalement un appareil de contrôle de la dureté d'une surface de béton durci (Figure 2.24). Il travaille sur le principe que le rebondissement d'une masse élastique dépend de la dureté de la surface. Plus la distance de rebondissement est grande, plus la surface essayée est dure. Il y a peu de rapport théorique apparent entre la résistance du béton et l'indice de rebondissement du marteau. Cependant, avec des limites, des corrélations empiriques ont été établies entre les propriétés de résistance et l'indice de rebondissement [68].



Figure 2.24 :Appareil du scléromètre utilisé.

b-Procédé de mesure

La lecture est très sensible aux variations locales dans le béton, particulièrement à la présence immédiatement de gros granulats et des vides sous la tige lors de l'essai. Il est donc nécessaire de prendre 10 à 12 mesures par zone et de trouver leur moyenne exprimée sous forme de nombre entier [69, 70]. En éliminant les lectures différentes de la valeur médiane de plus de six unités et ensuite on détermine la moyenne pour le reste. Si plus de 20% de l'ensemble des lectures diffèrent de la valeur médiane de plus de six unités, l'ensemble des lectures doit être écarté. Il est recommandé de définir sur la surface à essayer des zones d'environ 300 mm x 300 mm, et de tracer un quadrillage de 25 mm à 50 mm de côté, et de considérer les intersections de ces lignes comme points d'impact de la tige de percussion. La distance minimale entre deux essais de choc étant de 25 mm et aucun essai ne doit être réalisé à moins de 25 mm du bord de la surface testée [70, 71].

Les éléments de béton soumis à l'essai doivent avoir une épaisseur minimale de 100 mm et être encastrés dans une structure. Des corps d'épreuve de dimensions plus réduites peuvent être testés à condition qu'ils soient fermement maintenus [70, 71]. La surface à essayer doit être lisse, propre et sèche. Si la surface est rugueuse, il devrait être lissé par ponçage avec une pierre abrasive(Figure 2.25). Toute trace d'humidité constatée à la surface, peinture ou enduit adhérent susceptible de fausser les mesures doivent être éliminées. Il convient d'éviter les zones présentant des nids de cailloux, des écaillages, des parties

ébréchées, une texture grossière, une porosité élevée ou un enrobage moins de 20 mm d'épaisseur [71, 72]. Lors de l'essai chaque empreinte laissée sur la surface doit être examinée, et si le choc provoque l'écrasement ou la perforation d'une surface proche d'un vide d'air, le résultat ne doit pas être pris en considération [70, 71]. L'appareil peut être effectué à la position horizontale, verticale vers le haut ou vers le bas (Figure 2.25), ou à n'importe quel angle intermédiaire, à condition que le marteau soit fermement maintenu de manière à permettre à la tige de frapper perpendiculairement la surface d'essai. Il convient d'utiliser le scléromètre dans une température ambiante comprise entre 10 et 35 °C [70].

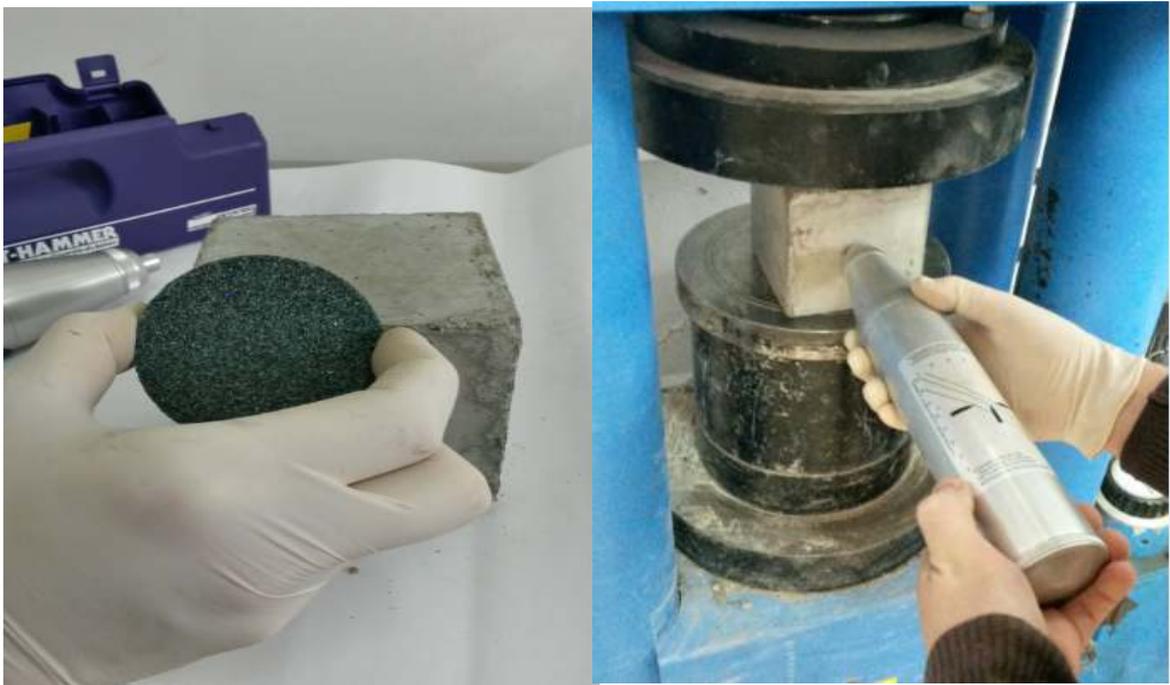


Figure 2.25 : Scléromètre en cours d'utilisation.

3.5.2.2 Ultrason (Essai de la vitesse d'impulsion ultrasonique)

a. Principe fondamental

Cet essai est une méthode de détermination de la vitesse de propagation des ondes ultrasoniques longitudinales dans le béton durci. Elle consiste à mesurer le temps de propagation entre deux points désignés sur la surface de l'objet à essayer. En sachant la longueur du parcours entre ces deux points, alors la vitesse d'impulsion peut être déterminée. Une vitesse élevée de propagation des impulsions indique généralement un béton de bonne qualité comme il a été décrit dans le tableau 2.6 [73, 74].

Tableau 2.6 : Relation générale entre la qualité du béton et la vitesse d'impulsion [73]

Vitesse de propagation des impulsions (m/s)	Qualité du béton
Supérieure à 4500	Excellente
3500 - 4500	Bonne
3000 - 3500	Moyenne
Inférieure à 3000	Douteuse

b. Procédé de mesure

L'opération est relativement simple mais exige un grand soin afin d'obtenir des résultats fiables. Il doit assurer un bon accouplement acoustique entre la surface du béton et la face du transducteur, en utilisant un produit de couplage tel que la vaseline, le savon liquide ou la graisse pour éliminer complètement les poches d'air. Il est important que cette couche de séparation doive être mince autant que possible. Pour les surfaces lisses, il convient d'appliquer sur elle une couche mince de la vaseline ou le savon liquide (Figure 2.26), mais une graisse plus épaisse est recommandée pour les surfaces qui n'ont pas été coulées contre des surfaces lisses d'un coffrage. Si la surface du béton est très rugueuse et irrégulière, il convient de la polir et de l'égaliser par ponçage ou à l'aide d'une résine époxy à prise rapide. Il est recommandé d'appuyer fermement les faces des transducteurs contre les surfaces du béton jusqu'à la stabilité du temps affiché. Il est également important que les lectures soient répétées par le déplacement et la réapplication des transducteurs jusqu'à l'obtention d'une valeur minimale du temps mesuré, avec une attention spéciale à l'élimination de n'importe quelle autre source de vibration, même de manière légère, pendant l'essai [72, 75, 76]. Pour la longueur de parcours, il doit mesurer la distance à ligne directe entre les centres des faces des transducteurs avec une précision de 0.5 % de la distance (Figure 2.27). De même que le temps de passage soit enregistré avec une précision de 0.5 % du temps. Le résultat ainsi obtenu de la vitesse de propagation du son doit être exprimé à 10 m/s près [75, 76].



Figure 2.26 : Appareil de l'ultrason utilisé.



Figure 2.27 : Ultrason en cours d'utilisation.

3.5.3 Perméabilité à l'eau

Les essais de perméabilité à l'eau ont été effectués selon la norme DIN 1048 [77]. Cet

essai permet de mesurer sur des éprouvettes cubiques de dimension 150 mm, la profondeur de pénétration d'eau sous un gradient de pression de 5 bars pendant une période de $72h \pm 2$ (Figure 2.28). L'essai a été réalisé à l'âge de 28 jours sur des éprouvettes conservées dans deux différents modes de cure. La pression est appliquée sur la surface inférieure au centre d'éprouvette. Après 72 heures de l'application de la pression, les spécimens sont ensuite divisés en deux parties par le biais de l'essai de traction par fendage (essai Brésilien, Figure 2.29). A l'aide d'un pied à coulisse, la profondeur de pénétration de l'eau en hauteur est mesurée (Figure 2.30).



Figure 2.28 : Essai de perméabilité à l'eau.



Figure 2.29 : Essai Brésilien.



Figure 2.30 : Mesure de la profondeur de pénétration d'eau.

2.6 Récapitulatif du programme des essais réalisés

Dans cette section, nous résumons le programme expérimental réalisé et les variables étudiés, deux types de mortiers, un à base de sable naturel et le deuxième à base de sable recyclé. L'objectif des essais sur mortier est d'optimiser le dosage en superplastifiant afin d'obtenir un bon mortier autoplaçant. La procédure consiste à faire en fixant le rapport sable/mortier $S/M = 0,50$, le rapport $E/C = 0,40$ et varier le pourcentage en Sp de 1,20 à 2,0% jusqu'à avoir l'étalement et le temps d'écoulement souhaité, sans la présence de ressuage. Le dosage de Sp optimisé sur mortier sera adopté pour béton. Trois bétons de référence seront réalisés à base de granulats naturels, 50 et 100% granulats recyclés et sans ajout afin de connaître l'effet des granulats recyclés seules sur la rhéologie du béton.

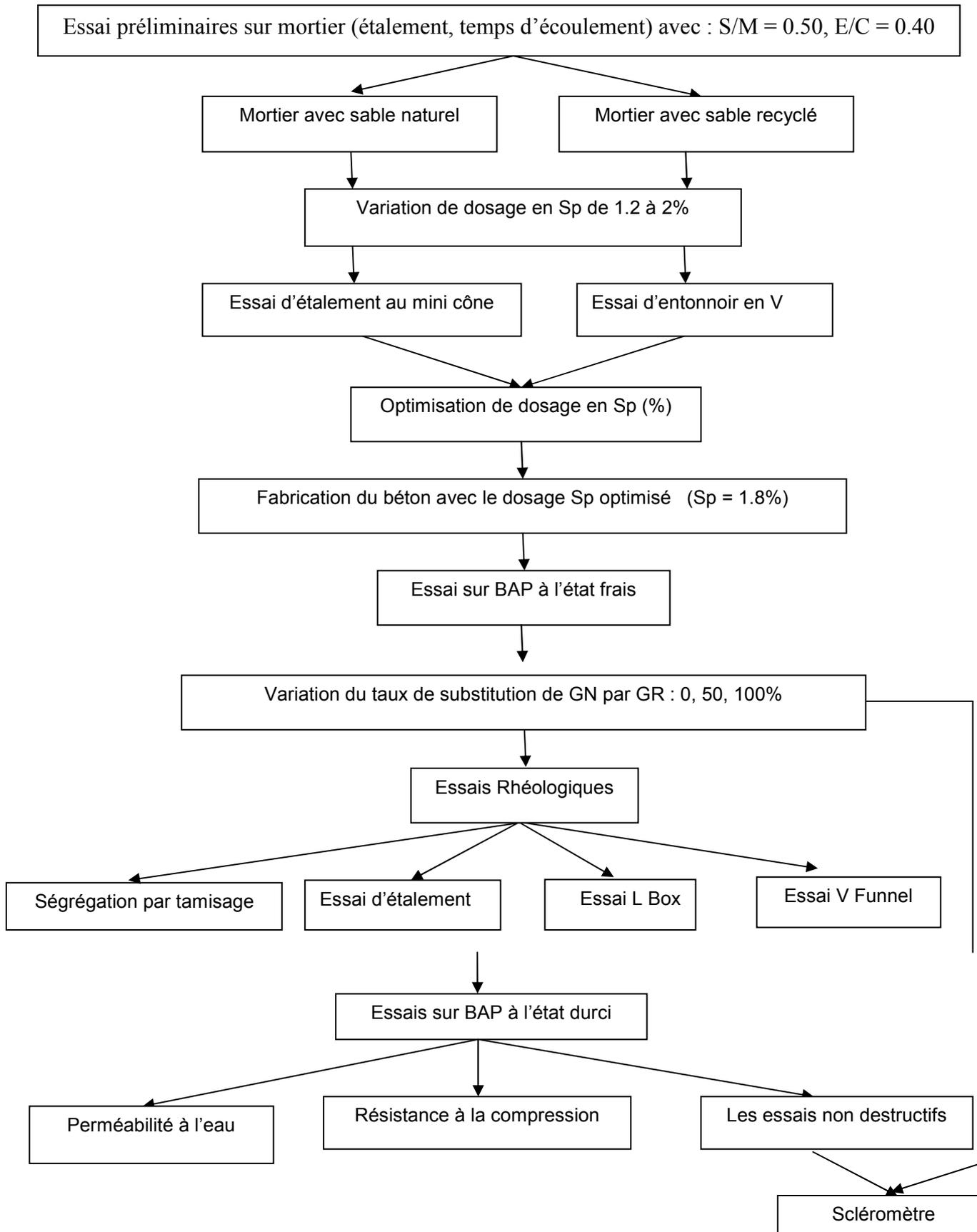


Figure 2.31 : Diagramme des essais réalisés sur le mortier et le béton à l'état frais et l'état Durci.

CHAPITRE III

RESULTATS EXPERIMENTAUX ET DISCUSSION

CHAPITRE 3 RESULTATS EXPERIMENTAUX ET DISCUSSION

3.1 Introduction

Dans ce chapitre on présentera les résultats des essais réalisés. Les essais réalisés sur mortier à base de sable naturels et de sable recyclé sont présentés en premier afin d'optimiser le dosage en superplastifiant pour un bon mortier autoplaçant. Ensuite on exposera les essais sur les bétons de références à base de granulats naturels, 50 et 100% granulats recyclés à l'état frais et durci.

3.2 Optimisation du Superplastifiant

Dans cette première étape on a varié le dosage en superplastifiant de 1,20% à 2,0% de poids du ciment, avec un pas de 0,20 et on a réalisé les deux essais recommandés sur mortier (étalement au mini cône et le V-funnel) cités dans le chapitre 2.

Les différentes compositions du mortier (naturel et recyclé) en fonction de dosage en superplastifiant sont présentées dans les Tableaux 3.1 et 3.2

Tableau 3.1 :Composition de mortier à base de sable naturel

Compositions	Unité	MOR 1	MOR 2	MOR 3	MOR 4	MOR 5
Ciment	kg/m ³	892	892	892	892	892
Sable	kg/m ³	1604	1604	1604	1604	1604
Eau	kg/m ³	370	369	371	367	366
Superplastifiant	kg/m ³	11	12	14	16	18
Superplastifiant	%	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0

Tableau 3.2 : Composition de mortier à base de sable recyclé

Compositions	Unité	MOR 1	MOR 2	MOR 3	MOR 4	MOR 5
Ciment	kg/m ³	892	892	892	892	892
Sable	kg/m ³	1543	1543	1543	1543	1543
Eau	kg/m ³	423	421	420	419	417
Superplastifiant	kg/m ³	11	12	14	16	18
Superplastifiant	%	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0

a- Étalement au mini-cône pour les mortiers

Les résultats d'étalement au mini-cône pour les mortiers en fonction du dosage en superplastifiant sont illustrés sur la Figure 3.1

A partir de la Figure, on remarque que le mortier à base de sable naturel et le mortier à base de sable recyclé ont un comportement similaire en fonction du dosage en superplastifiant. Amina montre que l'étalement augmente avec l'augmentation de dosage en superplastifiant pour les deux mortiers car le superplastifiant disperse les grains du ciment et améliore la fluidité du mélange. Cependant, il faut noter que l'étalement du mortier recyclé reste toujours supérieur par rapport à l'étalement du mortier naturel. A un dosage de superplastifiant de 2% l'étalement a été de 344.5mm et il a été accompagné d'un ressuage (Figure 3.2). La quantité élevée des fines dans le sable recyclé qui provient de l'ancienne pâte du ciment lors de concassage, et la quantité d'eau élevée en comparaison au mortier naturel due au coefficient élevé d'absorption (7,80 pour le sable recyclé et 1,3 pour le sable naturel) ont contribué à ce comportement.

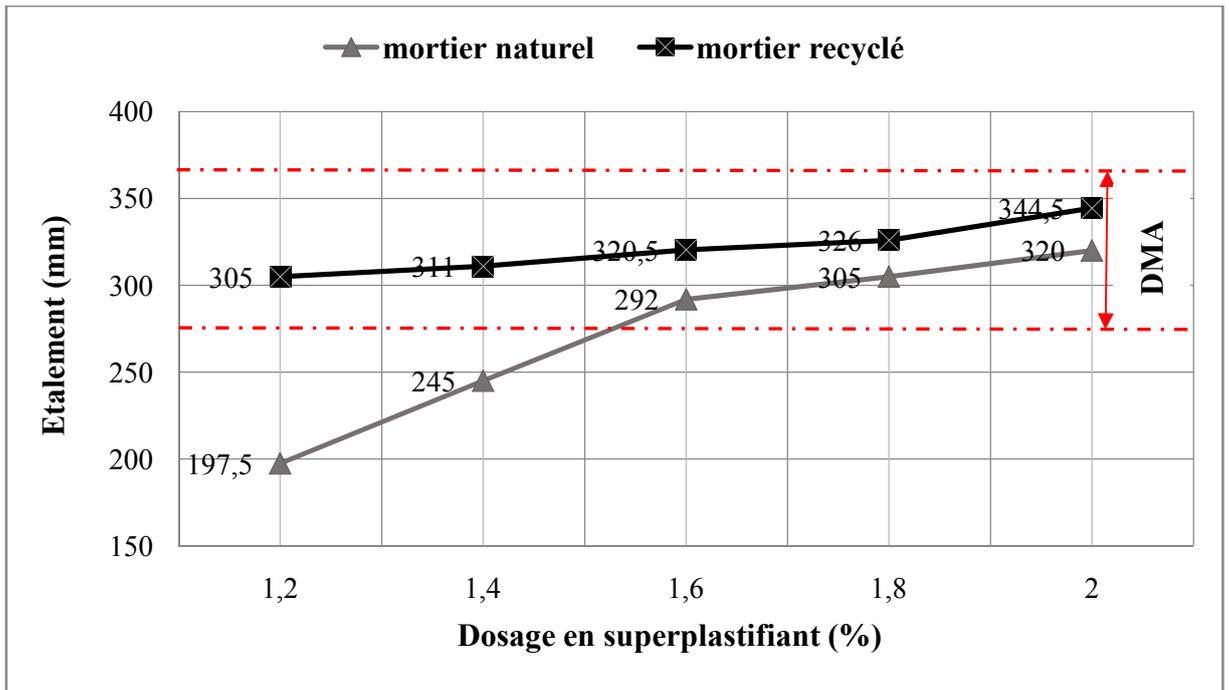


Figure 3.1 : Etalement en fonction du dosage en superplastifiant.



Figure 3.2 : L'étalement du mortier (Sp/P = 2.0%).

b- Temps d'écoulement à l'entonnoir en V pour mortiers

Les résultats de l'effet des superplastifiants sur le temps d'écoulement sont illustrés sur la Figure 3.3. Amina montre que le temps d'écoulement au V-funnel est inversement proportionnel au dosage en superplastifiant, donc $T_{V\text{-funnel}}$ diminue de manière remarquable quand le pourcentage de Sp varie entre 1,20% et 1,80%. On remarque aussi, le temps d'écoulement à l'entonnoir en V du mortier à base de sable recyclé est supérieur à celui du mortier à base de sable naturel pour le même pourcentage en superplastifiant ce que signifie que la viscosité du mortier diminue en augmentant le dosage en Sp. Le comportement des deux mortiers reste similaire en fonction de dosage en Sp.

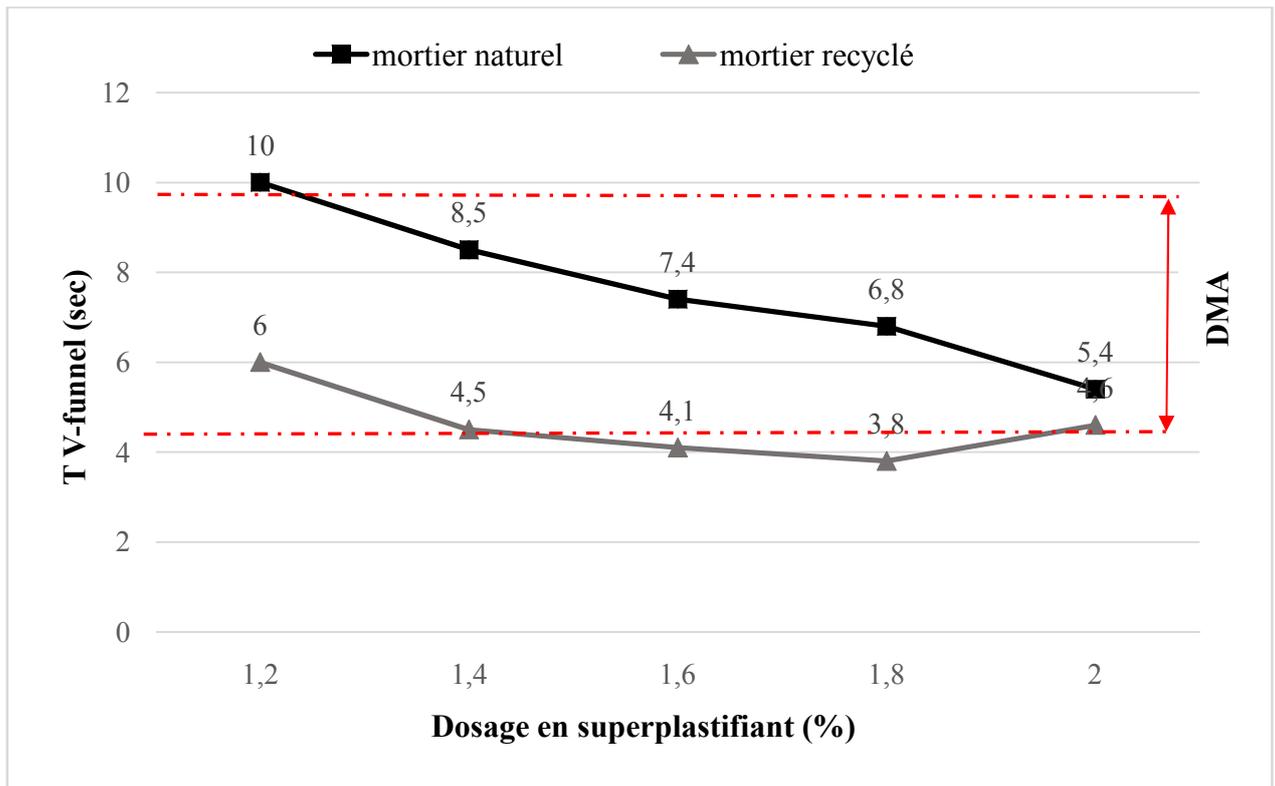


Figure 3.3 : Temps d'écoulement à l'entonnoir en V (V-funnel).

Par conséquent, on a adopté un dosage en superplastifiant de 1,80% pour les deux mortiers naturels et recyclé car avec ce pourcentage on a obtenu un bon mortier autoplaçant, homogène sans ressuage (Figure 3.4). Pour ce dosage en Sp, l'étalement et le temps d'écoulement à l'entonnoir en V ont été comme suit :

- Mortier naturel : $D= 305 \text{ mm}$, $T=6.8\text{sec}$;
- Mortier recyclé : $D= 320.5\text{mm}$ et $T=3.8 \text{ sec}$.

Ces valeurs satisfont les exigences normalisées :

- Diamètre d'étalement : $270 \text{ mm} < D < 330 \text{ mm}$.
- Temps d'écoulement au V-funnel : $2 \text{ sec} < T < 10 \text{ sec}$.



Figure 3.4 : L'étalement du mortier ($Sp/P = 1,8\%$).

3.3 Effet du taux de substitution de granulats recyclés sur l'ouvrabilité des BAP

Il s'agit d'étudier l'effet de la substitution de granulats recyclés sur les différentes propriétés des bétons autoplaçants à l'état frais conformément aux recommandations AFGC [61], notamment la mobilité en milieu non confiné et confiné, ainsi que la stabilité (la résistance à la ségrégation et au ressuage). A cet effet, nous avons tout d'abord formulé un BAP de référence en s'appuyant sur les résultats d'optimisation obtenus sur le mortier, où on a pu avoir le rapport superplastifiant/poudre (Sp/P) de 1,8%. Pour toutes les compositions des bétons utilisés dans la présente travail, nous avons fixé le rapport S/M à 0,50, le rapport E/C à 0,40, et le rapport Sp/P à 1,8%). Trois types de béton ont été étudiés, un BAP nommé GN à base de 100% granulats naturels, un BAP nommé GN/GR avec un

pourcentage de 50% granulats recyclé et une troisième composition de BAP nommée GR à base de 100% de granulats recyclés. Le Tableau 3.3 présente la composition des différents BAP à base de granulats naturels et recyclés. Les résultats d'ouvrabilité obtenus pour les trois BAP sont regroupés dans le Tableau 3.3.

Tableau 3.3 : Composition des BAP étudiés

	Unité	BAP GN	BAP GR	BAP GN/GR	
		Naturel	recyclé	Naturel	recyclé
Ciment	kg/m ³	492		492	
Gravier (3/8)	kg/m ³	245	245	122.5	122.5
Gravier (8/15)	kg/m ³	490	460	245	230
Sable	kg/m ³	965	933	482.5	466.5
Eau	kg/m ³	198	197	197.5	
Superplastifiant	kg/m ³	7.91	8.85	8.3	

Tableau 3.4 : Résultats d'essai d'ouvrabilité des BAP à l'état frais

		BAP 0% R	BAP 50% R	BAP 100% R
Essai d'Étalement	Temps d'Écoulement T ₅₀ (sec)	2,67	2,40	3,18
	Étalement S (mm)	750	735	765
Essai V-Funnel	Temps d'Écoulement (sec)	6.3	7.4	9.12
Essai de ségrégation sur Tamis de 5 mm	Laitance passant à travers le Tamis (%)	8.05	8,47	10,24
Essai L-Box	Rapport des Hauteurs (H2/H1)	0,80	0,85	0,91
	T ₂₀ (sec)	2,05	1,60	1,63
	T ₄₀ (sec)	2,11	3,97	4,82

Les essais de caractérisation de ces bétons ont été effectués selon les procédures décrites par les guides Européens du BAP [66], dont les valeurs limites sont données dans le Tableau 3.5.

Tableau 3.5 : Valeurs préconisées pour les essais (EFNARC) du BAP

Essai		Unité	Valeurs limites
Essai d'Étalement	Étalement S	mm	550 - 850
	Temps d'Écoulement T ₅₀	sec	2 - 5
Essai V-Funnel	Temps d'Écoulement	sec	6 - 12
Essai de ségrégation	Laitance passant à travers le Tamis	%	0 - 15
Essai L-Box	Rapport des Hauteurs (H2/H1)	/	0,8 - 1
	T ₂₀	sec	/
	T ₄₀	sec	/

(/) Ne sont pas mentionnés.

3.3.1 Mesures d'étalement et du temps T_{50} au cône d'Abrams

Cet essai nous permet de tester la déformation du béton sous l'effet de son poids propre au milieu libre. La Figure 3.5 présente les diamètres d'étalement au cône d'Abrams pour les différents BAP.

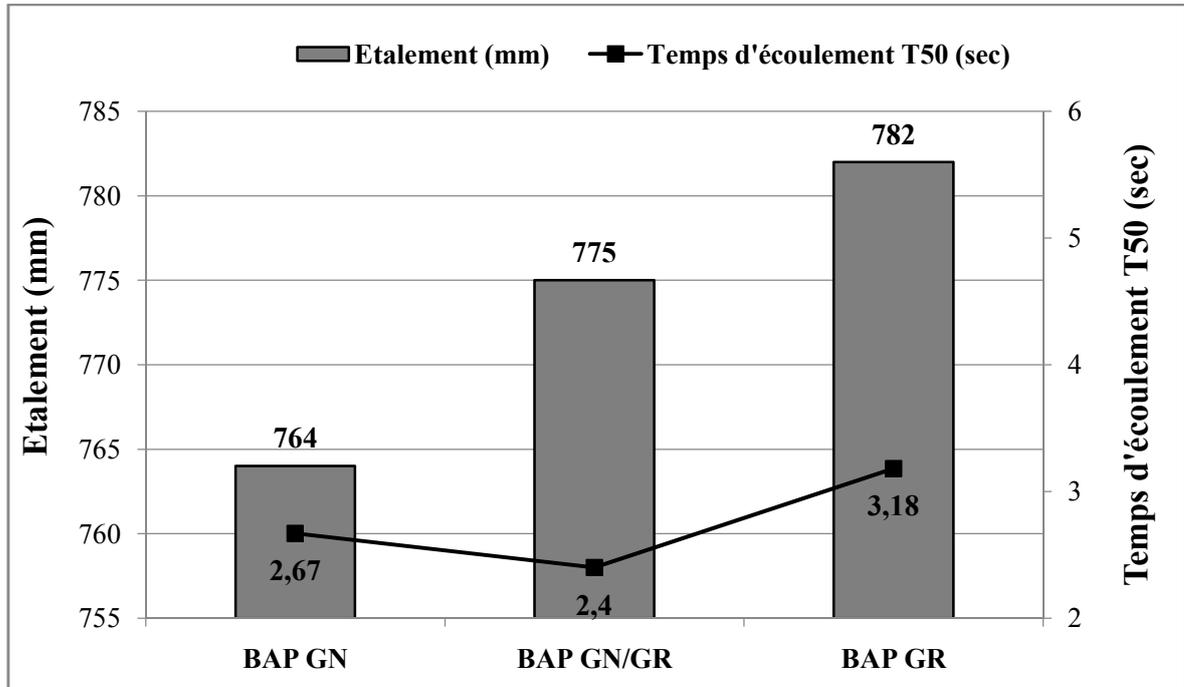


Figure 3.5 : Diamètre d'étalement et temps d'écoulement T_{50} au cône d'Abrams des BAP.

On remarque que le diamètre d'étalement du BAP à base de 100% granulats recyclés est supérieur par rapport aux diamètres de BAP GN ainsi qu'au BAP à base de 50% granulats recyclés. **BENHOUNA et al [34]** ont étudié l'effet des granulats recyclés sur l'écoulement en milieu non confiné. Ils ont constaté que les fines ayant une influence significative sur l'étalement du béton avec 100% de granulats naturels qui contient 22,5% de fines recyclés présentent un bon étalement sans ségrégation et sans ressuage et avec un temps d'écoulement T_{50} inférieur à 5 secondes. D'autre part, **KOU et POON [35]** ont constaté que l'étalement d'un BAP des granulats recyclés augmente avec l'augmentation de la quantité des granulats fins recyclés, l'étalement minimal est de 760mm et le rapport de blocage varie entre 0,85 et 0,94. De plus, **GRDIC et al [23]**, ont trouvé que l'étalement des BAP avec 50 et 100% granulats recyclés (gravier) est très comparable à l'étalement du BAP à base de granulats naturels.

D'après la Figure 3.5 on remarque que le temps d'écoulement T_{50} pour les trois bétons est inférieur à la limite maximale tolérée de 5 secondes pour les BAP. On remarque aussi que le BAP à base de granulats naturels représente le T_{50} les plus petites 2,67 secondes suivies de BAP (GN/GR) et le BAP (GR) avec un T_{50} égal à 3,23 et 3,29 secondes respectivement. GRDIC et al [23] ont trouvé un T_{50} qui dépasse les 5 secondes pour les trois types des bétons, mais les valeurs restent très comparables.

3.3.2 Mesure du temps d'écoulement par l'essai d'entonnoir en V (V-Funnel)

Cet essai permet d'évaluer la capacité du passage du béton au milieu confiné et il nous donnera une idée sur la ségrégation. La Figure 3.6 donne les valeurs du temps d'écoulement à l'entonnoir en V pour les trois compositions du béton. Le temps d'écoulement à l'entonnoir en V reste comparable pour le BAP GN et le BAP GN/GR, par contre le temps d'écoulement est supérieur pour le BAP à base des granulats recyclés, sans blocage à signaler au niveau de l'orifice. Donc, on peut dire que la viscosité des BAP étudiés est plus au moins identique. Les trois valeurs de T_v restent inférieures à la limite maximale qui est égale à 10 secondes.

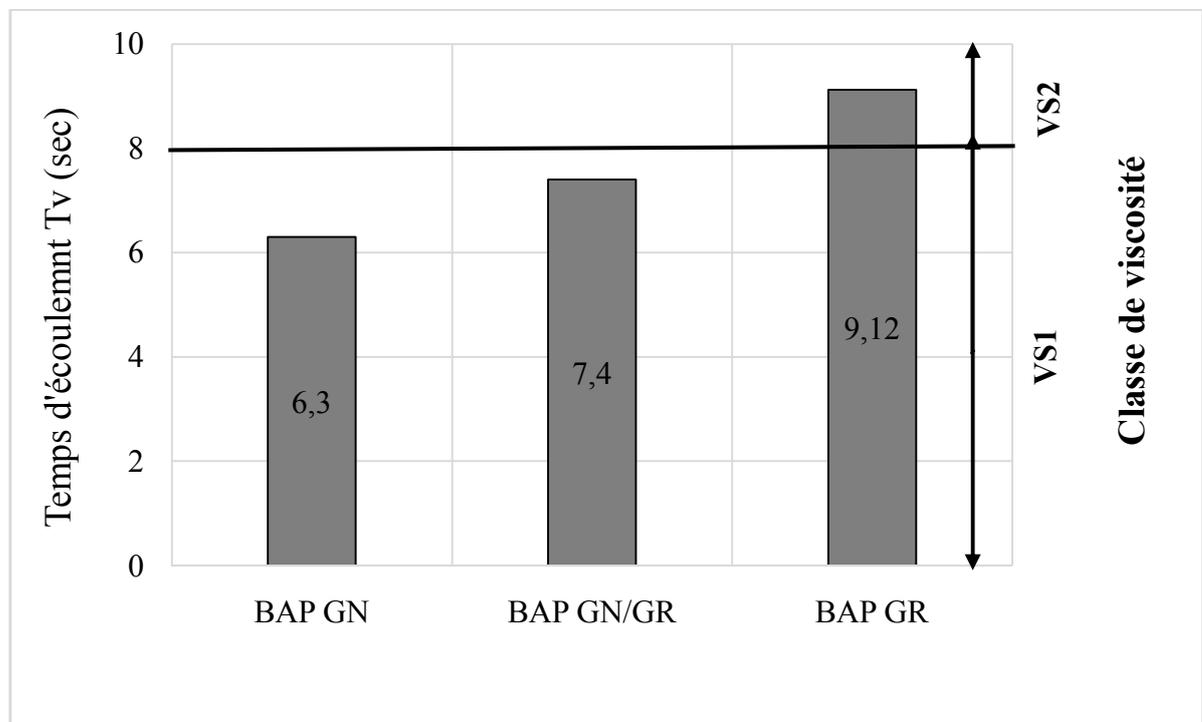


Figure 3.6 : Temps d'écoulement à l'entonnoir en V de BAP.

3.3.3 Mesures du rapport H_2/H_1 , les temps d'écoulement T_{20} et T_{40} de l'essai de la boîte en L (L-Box)

Dans cette partie, nous avons étudié le comportement des bétons BAP à l'écoulement dans un milieu confiné qui est traduit par l'essai de la boîte en L- Box. La caractéristique de l'essai est qu'il donne une bonne appréciation sur les trois capacités, de remplissage, de passage et de la résistance à la ségrégation. En plus, l'aspect rhéologique est exprimé par l'analyse des temps d'écoulement T_{20} et T_{40} de la même boîte.

a- Mesure le rapport H_2/H_1 .

Les résultats de rapport H_2/H_1 en fonction des granulats recyclés obtenus par l'essai L-Box sont présentés sur la Figure 3.7. On remarque que tous les mélanges donnent des taux de remplissage qui s'inscrivent dans le domaine des BAP.

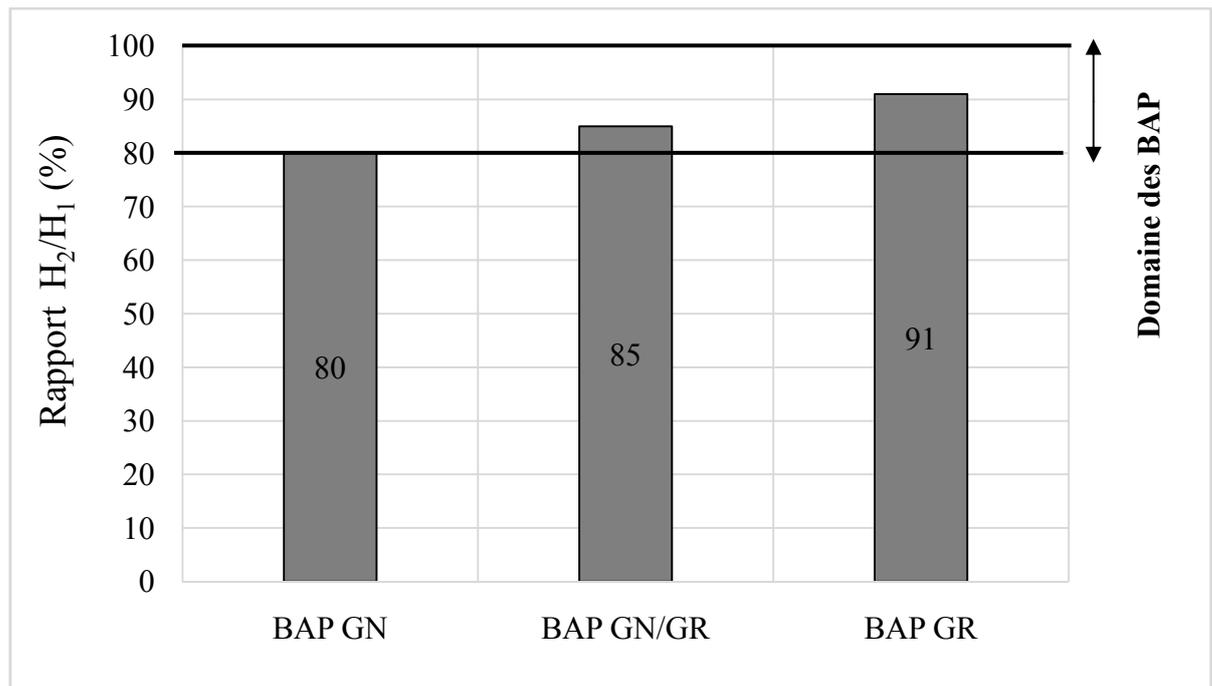


Figure 3.7 : Rapport H_2/H_1 de l'essai à la boîte en L de BAP.

On observe que le rapport H_2/H_1 dépasse 80% pour les trois BAP avec un léger blocage au niveau des armatures pour le BAP à base des granulats recyclés. Des résultats similaires ont été rapportés par GRDIC et al [23], avec un taux de remplissage de 94% pour un BAP à base de granulats naturels et un taux de 95% et 98% pour le BAP à base de 50% et 100%

de granulats recyclés.

b- Mesure du temps d'écoulement T_{20} et T_{40}

La Figure 3.8 montre les variations des temps d'écoulement T_{20} et T_{40} pour arriver à la distance de 20 et 40 cm, respectivement, de la boîte en L en fonction de taux de substitution de granulats naturels par granulats recyclés.

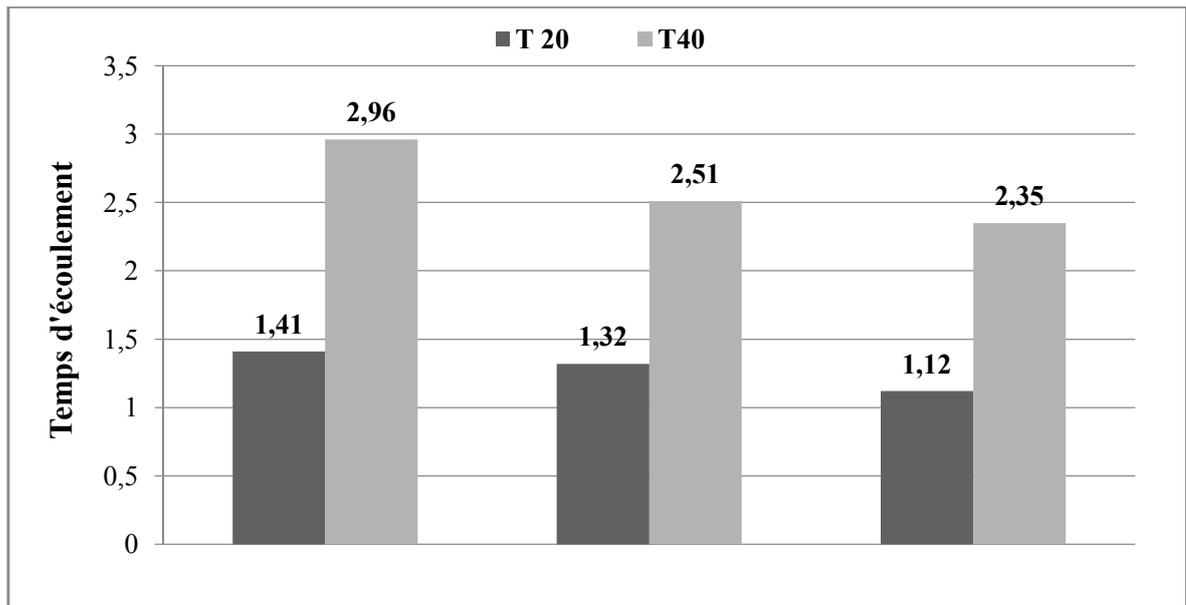


Figure 3.8 : Temps d'écoulement T_{20} et T_{40} en fonction des granulats recyclés.

D'après la figure on remarque que le temps d'écoulement T_{20} et T_{40} dépassent la limite maximale recommandée 1,50 sec pour T_{20} et 3.50 pour T_{40} .

3.4.6 Mesure de résistance à la ségrégation par tamisage

L'objectif de cet essai est d'évaluer la capacité du BAP à rester homogène après la mise en place (absence de chute verticale des gros granulats) jusqu'au début de prise : c'est la résistance à la ségrégation statique. Figure 3.9 montre les résultats des pourcentages de laitance passant à travers un tamis de 5 mm pour déterminer le degré de ségrégation statique des mélanges en fonction des granulats recyclés.

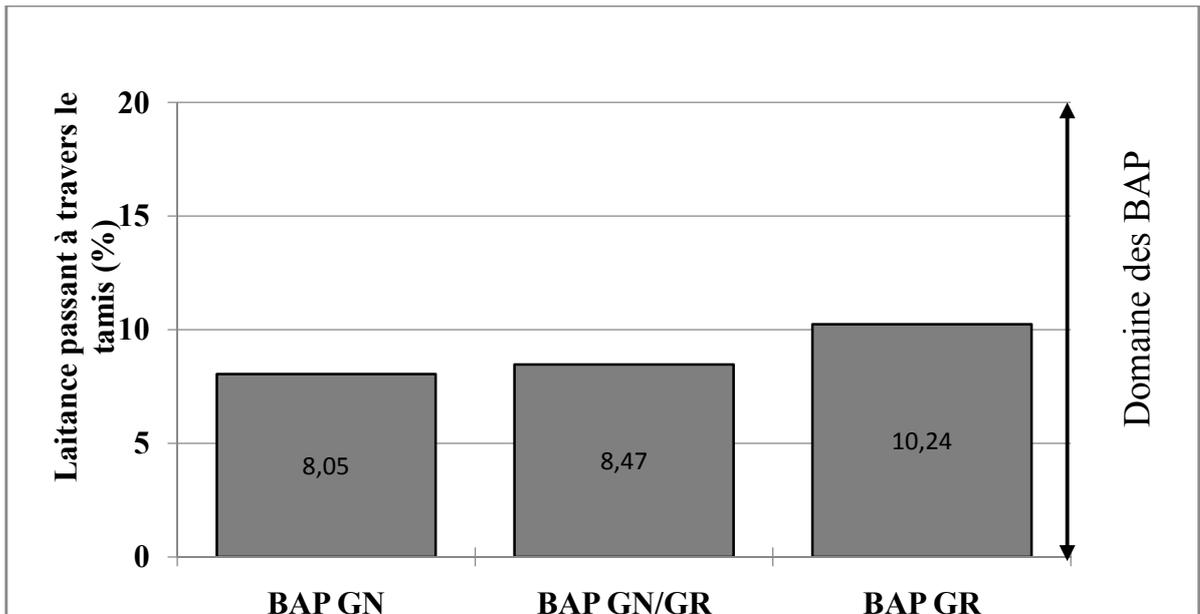


Figure 3.9 : Résistance à la ségrégation par tamisage en fonction des granulats recyclés.

On constate que l'instabilité du béton augmente avec l'augmentation des granulats recyclés de l'ordre de 5.21 % pour le BAP GN/GR et 27.2 % pour le BAP GR par rapport au BAP à base de granulats recyclé. Grdicet al[23], ont constaté que le BAP à base de granulats naturels est moins stable vis-à-vis de la ségrégation par rapport aux BAP avec 50 et 100% granulats recyclés.

3.4 Effet du taux de substitution de granulats recyclés sur les BAP à l'état durci

L'objectif de ce travail est de présenter les résultats obtenus expérimentalement sur l'effet des granulats recyclés sur les propriétés mécaniques et durabilité du BAP.

Les résultats obtenus, lors des essais destructifs et non destructifs à différents âges, sont présentés dans le tableau 3.6.

Tableau 3.6 : Résultats des essais destructifs et non destructifs sur les BAP

<i>Béton utilisé</i>		<i>BAP GN</i>			<i>BAP GN/GR</i>			<i>BAP GR</i>		
<i>Age</i>	<i>Epr</i>	<i>VU (km/s)</i>	<i>Ind.R.</i>	<i>Resist. (MPa)</i>	<i>VU (km/s)</i>	<i>Ind.R.</i>	<i>Resist. (MPa)</i>	<i>VU (km/s)</i>	<i>Ind.R.</i>	<i>Resist. (MPa)</i>
<i>7 Jours</i>	1	5.95	22	35.65	5.13	20	33.89	4.22	19	30.07
	2	5.92	21	37.18	4.37	21	31.41	4.56	18	31.05
	3	5.90	23	36.84	3.94	22	32.57	3.19	20	32.44
<i>28 Jours</i>	1	6.31	30	39.72	6.27	28	33.92	4.67	23	32.85
	2	6.47	28	37.95	6.23	27	34.23	5.81	22	33.62
	3	6.54	29	38.36	6.19	29	35.79	4.56	24	34.71
<i>56 Jours</i>	1	6.91	39	39.47	6.03	32	37.96	6.02	25	35.90
	2	6.85	38	40.81	6.97	31	38.53	5.92	27	36.39
	3	6.88	36	41.19	6.99	33	39.41	5.75	26	37.72

3.4.1 Mesure l'indice de rebondissement :

La Figure 3.10 représente l'effet des granulats recyclés sur la variation de l'indice de rebondissement à différentes âges (7, 28, et 56 jours).

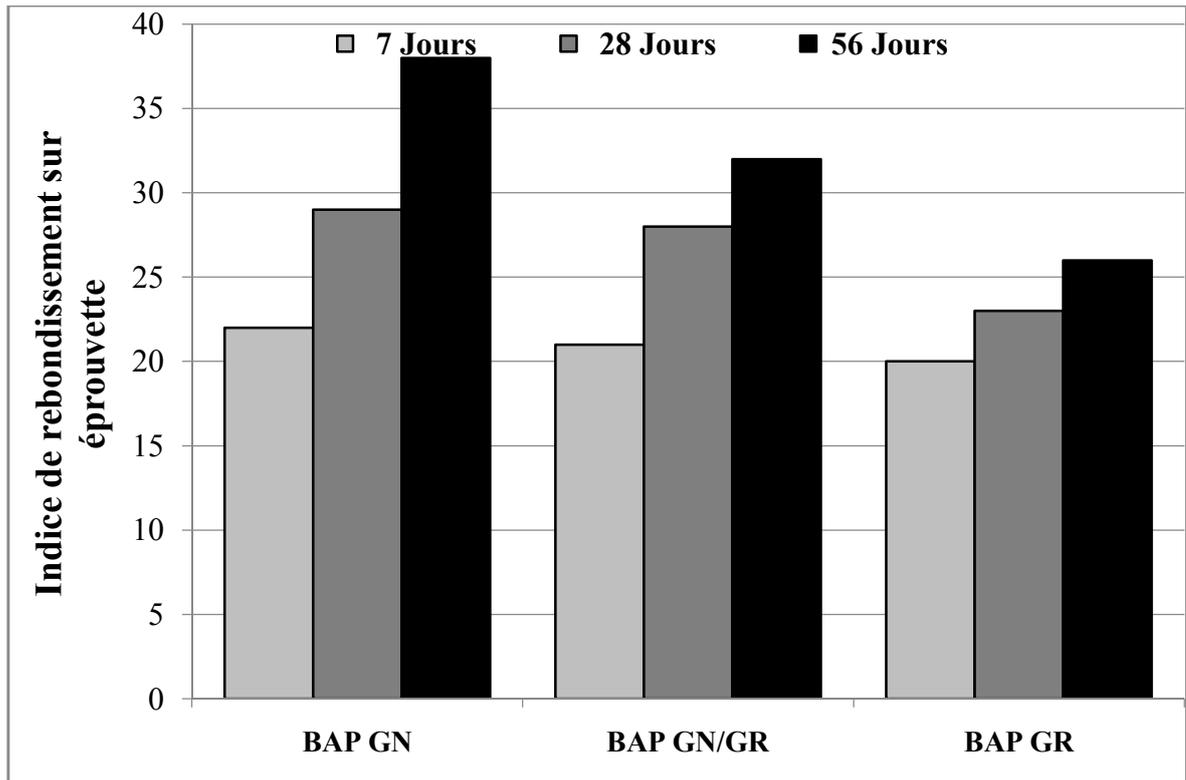


Figure 3.10 : l'effet des granulats recyclés sur l'indice de rebondissement.

On remarque une diminution de l'indice de rebondissement avec l'augmentation le pourcentage des granulats recyclés et une amélioration en fonction de temps. Une diminution à 7 jours de 4.55% et 9.09% le teneur de GR 50% et 100%.l'idice augmente avec le temps, diminué de 3.45% et 15.79 pour BA/GR à 28 et 56 jours respectivement.

3.4.2 Mesure la vitesse ultrasonique :

La Figure 3.11 représente l'effet des granulats recyclés sur la vitesse d'ultrason en fonction du temps.

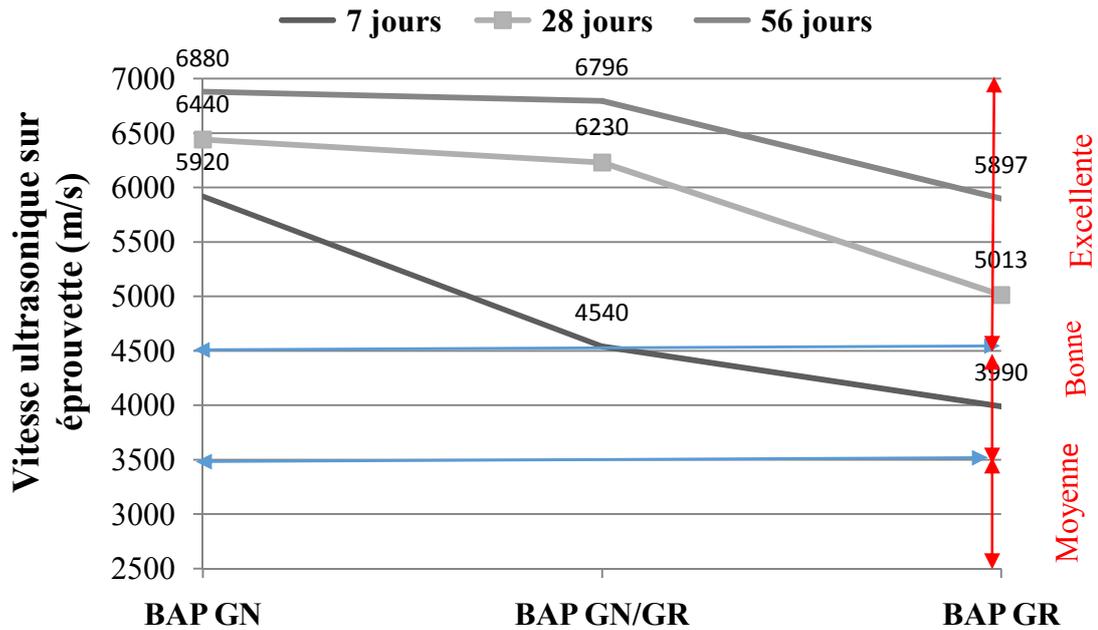


Figure 3.11 : la vitesse ultrasonique sur éprouvettes en fonction de temps.

On a observé que la qualité du BAP à base des granulats naturels et BAP GN/GR elle est excellente, par contre le BAP à base des granulats recyclés elle est bonne à l'âge 7 jours. A 28 jours et 56 jours la qualité du béton elle est excellente pour les différentes BAP. La Figure 3.11 montre la variation de la vitesse ultrasonique en fonction des granulats recyclés à différents âges. Une diminution de la vitesse ultrasonique avec l'augmentation de la quantité de GR à tous les âges. En effet, à 7 jours et en chiffres, cette diminution équivaut à 23.31%, 32.60%, respectivement pour des taux de substitution du BAP par du GR de 50% et 100%. La diminution de la vitesse ultrasonique est dans le cas des âges avancés (28 et 56 jours après malaxage), en comparant les vitesses ultrasoniques pour les deux pourcentages en GR ,50% et 100, on remarque que la diminution à 56 jours était de 3.26% et de 22.16% pour BAP GN/GR et BAP GR de l'ordre. Une diminution de 1.22 et 14.29% pour le BAP GN/GR et BAP GR respectivement.

3.4.3 Résistance à la compression

La Figure 3.12 montre la variation de la résistance à la compression en fonction du taux de substitution des granulats naturels par granulats recyclés à différents âges.

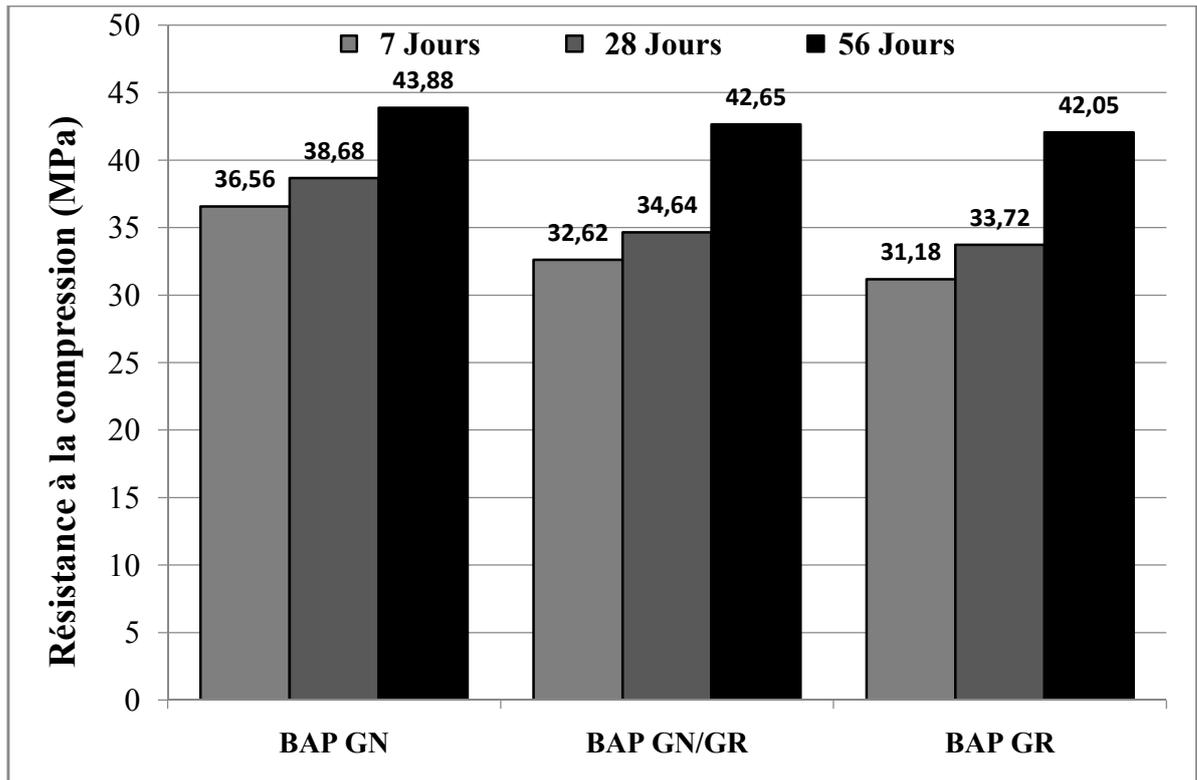


Figure 3.12: Variation de la Résistance à la Compression en fonction du Temps.

On a remarqué une diminution de la résistance à la compression avec l'augmentation de la quantité de granulats recyclés dans le mélange est observée à tous les âges (7,28 et 56 jours). En effet, à 28 jours et en chiffres, cette diminution équivaut à 10.78% et 14.71% respectivement pour des taux de substitution du BAP par du GR de 50%, et 100%. Néanmoins on remarque que la diminution de la résistance à la compression est moins importante dans le cas des âges avancés (56 et 90 jours après malaxage), en comparant les résistances à la compression pour les deux teneurs en GR, 0 et 50%, on remarque que la différence à 28 jours était de 3.94 MPa, pour diminuer à 1.86 à 56 jours, soit une diminution de 4.59%.

Plusieurs études montrent que la résistance à la compression des bétons fabriqués avec des granulats recyclés peut être de 5 à 40 % plus faible que celle d'un béton formulé avec des granulats naturels. Grdic ,[34] , al [35] et d'autres chercheurs, ont montré que la qualité des granulats recyclés a un effet direct sur la résistance à la compression ainsi que la substitution de 50% et 100% de gravier naturel par un gravier recyclé réduit la résistance de 3,88% et de 8,55% respectivement. La résistance à la compression pour un BAP contenant des granulats recyclés et sans les cendres volantes diminue avec l'augmentation

des granulats fins recyclés. La résistance à la compression a été atteinte avec un taux de substitution de 25-50% de sable de rivière par un sable recyclé.

3.4.4 La perméabilité à l'eau

Les résultats de la perméabilité à l'eau des BAP sont représentés dans la Figure 3.13 à 28jours.

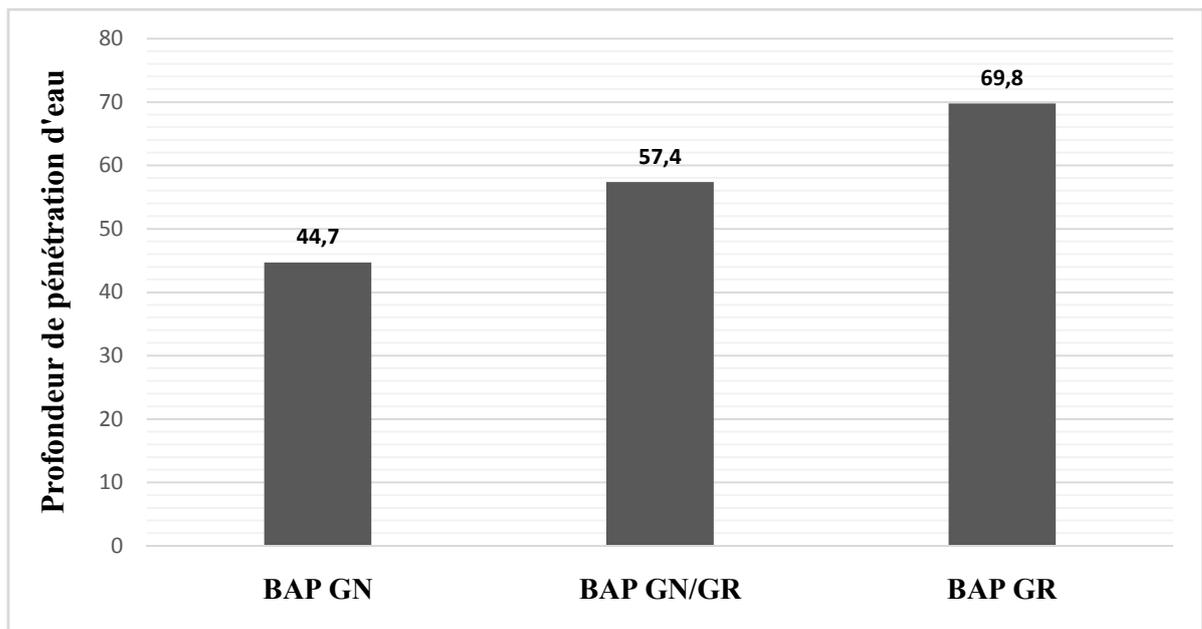


Figure 3.13 :La profondeur de pénétration d'eau des BAP.

La Figure 3.13 montre que la profondeur de pénétration de l'eau des BAP augmente avec l'augmentation des granulats recyclés. La profondeur de la perméabilité à l'eau dépend le pourcentage des granulats recyclés, plus le pourcentage est grand plus la profondeur de pénétration de l'eau dans le béton est grande. [Rasheeduzzafar et al\[57\]](#), montre que pour des faibles valeurs du rapport E/C, la perméabilité des bétons recyclés est supérieure à celles des bétons conventionnels.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

3.5 Conclusion générale

D'après les résultats obtenus de cette partie d'étude, on peut tirer les conclusions suivantes :

- ✓ L'utilisation de la méthode Okamura pouvait être utilisée avec les matériaux locaux avec quelques modifications.
- ✓ En utilisant le superplastifiant à base de polycarboxylates qui fonctionnent par répulsion stérique, le pourcentage optimal Sp/L à utiliser dans les mélanges de béton est de 1,8%.
- ✓ La substitution des granulats naturels par des granulats recyclés améliore l'ouvrabilité de béton.
- ✓ le BAP à base de granulats naturels représente le T_{50} les plus petites que BAP (GN/GR) et le BAP (GR).
- ✓ L'instabilité du béton augmente avec l'augmentation des granulats recyclés de l'ordre de 5.21% pour le BAP GN/GR et 27.2% pour le BAP GR par rapport à BAP GN.
- ✓ Le seuil de cisaillement et la viscosité plastique sont inversement proportionnels à Le pourcentage des granulats recyclés, quand le pourcentage augmente les propriétés rhéologiques des BAP diminuent et inversement.
- ✓ La vitesse ultrasonique pour les BAP GN, GN/GR et GR à l'âge 28 jour est supérieure à 4500m/s alors la qualité du BAP est excellente.
- ✓ La résistance à la compression diminuée avec l'augmentation de la quantité des granulats recyclés.
- ✓ la profondeur de pénétration de l'eau des BAP augmente avec l'augmentation des granulats recyclés de 22.13% pour BPA GN/GR et de 35.96% pour BAP GR par rapport à BAP GN.

PERSPECTIVES

Les travaux réalisés dans le cadre de ce mémoire ont été limités à étudier les performances du BAP à base de granulats recyclés à l'état frais et durci. D'autres aspects restent à aborder, nous recommandons ce qui suit pour les futures études :

- Etudier un BAP à base de granulats recyclés avec des pourcentages variés (25% et 75%) ;
- Etudier un BAP à base de granulats recyclés et avec un pourcentage varié des ajouts ;
- Utiliser des ajouts minéraux tels que les fillers calcaire ou les fumées de silice dans la formulation du BAP.

RÉFÉRENCES

RÉFÉRENCES

- [1] Okamura. H, and M. Ouchi, «*Self Compacting Concrete: Development, present use and future*», In self-compacting concrete: Proceedings of the first international RILEM symposium, A. Skrendahl, and O. Petersson, Eds. RILEM Publications, Cachan, France, 1999.
- [2] Ozawa. K, et al. «*Development of high performance concrete based on the durability design of concrete structures*», Proceedings of the second East-Asia and Pacific Conference on Structural Engineering and Construction (EASEC), Vol.1, pp 445-450, January, 1989.
- [3] Okamura. H, Ozawa. K. «*Self-compactable high performance concrete in Japan* » ACI International Workshop on high Performance Concrete, Bangkok, Thailand, (1994).
- [5] Okamura H., and Ouchi M., 2003, ‘Self compacting concrete’, Journal of advanced Concrete Technology, vol. 1, n°1, pp. 5-15.
- [6] Sedran T., 1999, ‘Rhéologie et Rhéomètre des bétons. Application aux BAP’, Thèse de Doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.
- [7] Turcry P., 2004, ‘Retrait et Fissuration des Bétons Autoplaçants Influence de la Formulation ’, Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Nantes.
- [8] Persson B., 2003, ‘Sulphate resistance of self-compacting concrete’, Cement and Concrete Research, vol.33, pp.1933-1938.
- [9] Khayat K., 1999, ‘Les Bétons Autonivelants, Les Bétons : Bases et données pour leur Formulation’, Association technique de l’industrie des liants hydrauliques, sous la direction de J. Baron et J-P. Ollivier, Troisième ed, Eyrolles, Paris.
- [10] Association Française de Génie Civil (AFGC), 2002, ‘Bétons Autoplaçants - Recommandations provisoires’, Annales du bâtiment et des travaux publics.
- [11] Bensebti S., 2008, ‘Formulation et Propriétés des Bétons Autoplaçants à Base de Matériaux Locaux’, Thèse de Doctorat, Université Mentouri –Constantine. Algérie.

- [12] Okamura H., and Ozawa K., 1995, 'Self-Compacting high Performance Concrete in Japan', Second CANMET/ACI International Symposium on Advances In Concrete Technology, Las Vegas, ACI, SP 159-2, pp 31- 44.
- [13] Kenai S., 2010, 'Cours de technologie du béton première année Magister', Université Saad Dahlab Blida.
- Ravindrarajah et al., 1985 Ravindrarajah R.S, Loo.Y.H. And Tam C.T, "Properties of concrete made with crushed concrete as coarse aggregates", Magazine of Concrete Research, vol.3, 1985.
- [15]
- [16] Debieb F., "Performance et durabilité du béton à base de granulats recyclés contaminés par les chlorures et les sulfates", Thèse de Doctorat de l'USTHB, 2007, 163 pages.
- [17] Gasti T., « Caractérisations et formulation d'un béton compacté au rouleau à partir de granulats recyclés », Mémoire de Magister de l'Université Yahia Fares – Médéa, 2010, 112 pages.
- [18] Pani L., Francesconi L. and Concu G., « Influence of replacement percentage of recycled aggregate on recycled aggregate concrete properties », fib Symposium PRAGUE 2011, pp.1-10.
- [19] Hachana AK., Benaichi E., Mezguiche B. et Melles M., « Etude des bétons à base des agrégats des déchets de démolition », Université Mohamed Khider Biskra, 2008.
- [20] Berredjem L. et Arabi N., « Les matériaux de démolition une source de granulats pour béton : Formulation et caractérisation d'un béton à base de ces recycles », SBEIDCO – 1st International Conference of Sustainable Built Environment Infrastructure in Developing Countries ENSET Oran (Algeria), Octobre 12-14, 2009, pp. 255-262.
- [21] Québaud, 1996 Québaud M., "Caractérisation des granulats recyclés-Etude de la composition et du comportement de béton incluant ces granulats ", Thèse de doctorat, Université d'Artois, France, décembre 1996.

- [22] Sánchez et al., 2004 M. Sánchez de Juan et P. Alaejos Gutierrez, "Influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate", RILEM, Actes du colloque Use of Recycled Materials in Building and Structures, 9-11 Novembre 2004, Barcelone, Espagne.
- [23] Grdic Z.J., A. Topilic-Curcic G., Despotovic I.M. and Ristic N.S., « Properties of self-compacting concrete prepared with coarse recycled concrete aggregate », Construction and Building Materials, 2010, Vol. 24, pp. 1129-1133.
- [24] Evangelista et al., 2004 Evangelista L., de Brito J. , Criteria for the use of fine recycled concrete aggregates in concrete production", RILEM, Actes du colloque Use of Recycled Materials in Building and Structures, 9-11 Novembre 2004, Barcelone, Espagne.
- [25] Djerbi et al. 2010 Assia Djerbi, Tien Dung. Nguyen, Sandrine Ramanich, Autogenous shrinkage of at very early Age: Effect of recycled aggregates, 3rd fib International Congress – 2010.
- [26] Angulo et al., 2010 S. C. Angulo, P. M. Carrijo, A. D. Figueiredo, A. P. Chaves et V. M. John, On the classification of mixed construction and demolition waste aggregate by porosity and its impact on the mechanical performance of concrete, Materials and Structures (2010) 43: 519–528.
- [27] Mahmoud, 2005 Mahmoud S., Classification of Recycled Sands and their Applications as Fine Aggregates for Concrete and Bituminous Mixtures, Thèse de doctorat, Université de Kassel, Allemagne, 2005.
- [28] Tam, 2005 V.W.Y. Tam, New approach in measuring water absorption of recycled aggregates, Construction and Building Materials, 2005 (35), pp. 1195-1203.
- [29] Karthik, 2007 Karthik Obla, Crushed Returned Concrete as Aggregates for New Concrete, Final Report to the RMC Research & Education Foundation Project 05-13, September 2007.
- [30] Katz, 2003 Katz, A., Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete. Cement and Concrete Research, 2003. 33(5): p.

703-711.

- [31] Kou et al., 2010 Kou, S.-C. and C.-S. Poon, Properties of concrete prepared with PVA-impregnated recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 2010. 32(8) : pp. 649-654.
- [32] Tu T-Y., Chen Y-Y. And Hwang C-L., “Properties of HPC with recycled aggregates”, *Cement and Concrete Research*, 2006, Vol. 36, pp. 943-950.
- [33] Hansen et al., 1985 Hansen T.C., Boegh E. “ Elasticity and drying shrinkage of recycled aggregate concretes, *ACI Journal*, pp. 648-652, 1985.
- [34] Benhoua M., Nezergui B. et Boudraa S., « Valorisation des granulats recyclés dans la formulation d’un béton autoplaçant », *SBEIDCO – 1st International Conference of Sustainable Built Environment Infrastructure in Developing Countries ENSET Oran (Algeria) Octobre 12-14, 2009*, pp. 295-301.
- [35] Kou S.C. and Poon C.S.,”Properties of self-compacting concrete prepared with coarse and fine recycled concrete aggregates”, *Cement and Concrete Composites*, 2009, Vol. 31, pp.622-627.
- [36] Corinaldesi V. and Moriconi G., “Self compacting concrete: A great opportunity for recycling materials”, *International RILEM Conference on the Use of Recycled Materials in Building and Structures*, 8-11 November 2004, Spain, pp. 600-609.
- [37] Chakradhara et al., 2011 Chakradhara R. M., Bhattacharyya S., and Barai S., Influence of field recycled coarse aggregate on properties of concrete, in *Materials and Structures*. 2011, Springer Netherlands, p. 205-220.
- [38] Kou S.C. and Poon C.S.,”Properties of self-compacting concrete prepared with coarse and fine recycled concrete aggregates”, *Cement and Concrete Composites*, 2009, Vol. 31, pp.622-627.
- [39] Casuccio et al., 2008 Casuccio M., Torrijos M.C., Giaccio G., Zerbino R.,” Failure mechanism of recycled aggregate concrete” *Construction and Building Materials* 22 (2008) 1500–1506.
- [40] González-F. et al., 2011 González-Fonteboá Belén , Martínez-Abella Fernando,

- Carro López Diego, Seara-Paz Sindy “Stress–strain relationship in axial compression for concrete using recycled saturated coarse aggregate », *Construction and Building Materials*, 25 (2011), 2335–2342.
- [41] Evangelista et al., 2007 Evangelista L. ,de Brito J. « Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates » *Cement & Concrete Composites*, 29 (2007) 397–401.
- [42] Gomez-Soberon, 2002 Gomez-Soberon J.M.V., “Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate. An experimental study », *Cement and Concrete Research*, 32 (2002), 1301– 1311.
- [43] Corinaldesi et al., 2009 Corinaldesi V., Moriconi G., « Influence of mineral additions on the performance of 100% recycled aggregate concrete », *Construction and Building Materials*, 23 (2009), 2869–2876.
- [44] Corinaldesi, 2010 Corinaldesi V., « Mechanical and elastic behaviour of concretes made of recycled-concrete coarse aggregates » *Construction and Building Materials*, 24 (2010) 1616–1620.
- [45] Gonzalez-F. et al.,2008 Gonzalez-Fonteboa B., Martinez-Abella F.« Concretes with aggregates from demolition waste and silica fume. Materials and mechanical properties », *Building and Environment*, 43 (2008), 429–437.
- [46] Xiao et al., 2006 Xiao, J.-Z., J.-B. Li, and C. Zhang, On relationships between the mechanical properties of recycled aggregate concrete: An overview, in *Materials and Structures*, 2006, Springer Netherlands, pp. 655-664.
- [47] Achtemichuk et al., 2009 Achtemichuk S., Hubbard J., Sluce R., Shehata M. H., “The utilization of recycled concrete aggregate to produce controlled low-strength materials without using Portland cement”, *Cement & Concrete Composites* 31 (2009), pp. 564–569.
- [48] Yang et al., 2011 Yang, J., Q. Du, and Y. Bao, Concrete with recycled concrete aggregate and crushed clay bricks, *Construction and Building Materials*, 2011. 25(4), pp. 1935-1945.

- [49] Li, 2008 Li Xuping, « Recycling and reuse of waste concrete in China Part I. Material behaviour of recycled aggregate concrete”, Resources, Conservation and Recycling, 53 (2008), 36–44.
- [50] Cusson et al., 2006 Cusson D., Hoogeveen T., “Preventing Autogenous Shrinkage of High-Performance Concrete Structures by Internal Curing”, Measuring, Monitoring and Modeling Concrete Properties, An International.
- [51] Sato et al., 2007 Sato R., Maruyama I., Sogabe T. et al., “Flexural behavior of reinforced recycled concrete beams”, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol. 5, pp. 43–61, 2007.
- [52] Kim, 2009 Kim H., “Crushed Returned Concrete Aggregate in New Concrete: Characterization, Performance, Modeling, Specification, and Application”, PhD thesis, University of Maryland, College Park, 238 p., 2009
- [53] Domingo-Cabo et al., 2009 Domingo-Cabo A., Lázaro C. , López-Gayarre F., Serrano-López M.A., Serna P., Castaño-Tabares J.O. “Creep and shrinkage of recycled aggregate concrete”, Construction and Building Materials, 23 (2009) 2545–2553.
- [54] Hasaba et al., 1981 Hasaba S., Kawamura M., Torril K. “ Drying shrinkage and durability of concrete made of recycled concrete aggregates, Japan concrete institute , 3, pp.55-60, 1981.
- [55] Evangelista et al., 2010 Evangelista L., De Brito J., Durability performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates, Cement and Concrete Composites, 32, 9-14, 2010.
- [56] De Brito et al., 2010 De Brito J. et Alves F., (2010) Concrete with recycled aggregates: the Portuguese experimental research. RILEM.
- [57] Rasheeduzzafar et al., 1984 Rasheeduzzafar, Khan A. (1984) Recycled concrete – a source of new aggregate. Cement, Concrete and Aggregates (ASTM), 6, No 1, pp. 17-27, 1984.
- [58] Boukendakdji O., 2010, ‘Etude de l’influence des paramètres de formulation sur les propriétés d’un béton autoplaçant : optimisation des conditions opératoires’,

Thèse de Doctorat, Département de Génie Civil, Université de Saad Dahleb, Algérie.

- [59] Domone P.L.J., and Jin J., 1999, 'Properties of mortar for self-compacting concrete', Proceeding of RILEM International Symposium on self-compacting concrete, Stockholm, RILEM Proceeding PRO 7, pp.109 - 120.
- [60] Chabi S., 2004, 'Etude de l'influence des additions minérales actives sur le comportement mécanique des ciments et mortiers', N° 5, pp. 3-8.
- [61] Association Française de Génie Civil (AFGC), 2002, 'Bétons Autoplaçants - Recommandations provisoires', Annales du bâtiment et des travaux publics.
- [62] De Schutter G., 2005, 'Guidelines for testing fresh self-compacting concrete', European Research project: Measurement of properties of fresh self-compacting concrete, Growth Contract No. GRD2-2000-30024, pp. 23.
- [63] Soneb M., and Bartos P.J.M., 2002, 'Filling ability and plastic settlement of self – compacting concrete' Materials and Structures, vol 3, pp. 462 – 469.
- [64] EFNARC, 2005, 'The European guidelines for Self -Compacting Concrete ', The European Federation of Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems. WWW.efnarc.org.
- [65] Menai Khaled., 1995, 'Etude de l'Effet d'Ajout Chimiques et Minéraux sur la Maniabilité, la Stabilité et les Performances des Bétons Autonivelants', Mémoire de Maitrise des Sciences Appliquées, Spécialité : Génie Civil, Université de Sherbrooke, Canada.
- [66] Toutou Z., 2002, 'Rhéologie et formulation des géo-suspensions concentrées : évaluation des conditions d'extrudabilité', Thèse de Doctorat de INSA- Rennes, pp. 221.
- [67] Norme française, P 18-406., «Béton-essai de compression», AFNOR, Paris, 1981.
- [68] A. N. Bin Ibrahim, P. Bin Ismail, M. Forde, "*Guidebook on non-destructive testing of concrete structures*", International Atomic Energy Agency, Vienna, 2002, 242p.

- [69] Qasrawi, H. Y. “Concrete strength by combined nondestructive methods simply and reliably predicted“, Cement and Concrete Research, Vol.30, 2000, pp.739-746.
- [70] NF EN 12504-2, “ Essais pour béton dans les structures. Partie 2 : Essais non destructifs - Détermination de l'indice de rebondissement“, AFNOR, 2003, 9p.
- [71] ASTM C805-02, “Standard test method for rebound number of hardened concrete“, ASTM International, 2002, 3p.
- [72] Bungey, J. H. S. G. Millard, “Testing of concrete in structures“, Chapman & Hall, 1996, 292p.
- [73] Govind Khare, R. “Prediction of compressive strength of concrete by various nondestructive tests methods“, Essar Engineering Center, Mumbai, 15p.
- [74] Feidman, R. F. “Essais non destructifs du béton“, CBD-187-F, 2005, 6p.
- [75] NF EN 12504-4, “ Essais pour béton dans les structures. Partie 4 : Détermination de la vitesse de propagation du son“, AFNOR, 2005, 17p.
- [76] ASTM C597-02, “Standard test method for pulse velocity through concrete“, ASTM International, 2003, 4p.

ANNEXE A

EXEMPLE DE CALCUL DE LA COMPOSITION DU MORTIER

ANNEXE B
EXEMPLE DE CALCUL DE LA COMPOSITION DU BETON