

UNIVERSITÉ DE BLIDA 1

Faculté de Technologie

Département de Génie Civil

Laboratoire de Géo matériaux et Génie Civil

THÈSE DE DOCTORAT

Spécialité : Génie civil

PERFORMANCE STRUCTURALE D'UN BÉTON AUTOPLAÇANT A BASE DE GRANULATS RECYCLÉS ET LAITIER

Par

Omar Kouider Djelloul

Devant le jury composé de :

Kenai Said	Professeur, U de Blida 1	Président
Azzouz Lakhdar	Professeur, U de Amar Telidji Laghouat	Examineur
Bouhicha Mohamed	Professeur, U de Amar Telidji Laghouat	Examineur
Debieb Farid	Professeur, U de Yahia Fares Médéa	Examineur
Menadi Belkacem	Professeur, U de Blida 1	Rapporteur
George Wardeh	Maître de conférences, U de Cergy Pontoise, France	Co-Rapporteur

Blida, 2018

RÉSUMÉ

L'impact environnemental de la production des granulats est considérable. En parallèle, l'élimination des déchets de démolition de bétons est un enjeu important en Algérie. Dans ce contexte, une des solutions proposées est d'envisager l'utilisation de ces déchets comme granulats dans le béton autoplaçant (BAP). Le BAP est un béton fluide, très déformable, homogène et stable qui se met en place par gravitation et sans l'utilisation d'un moyen de vibration. 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 du BAP. En effet, la combinaison de plusieurs matériaux cimentaires ayant des granularités différentes permet également d'améliorer de façon générale la compacité du béton. Les additions minérales telles que le laitier, la pouzzolane ou même les fillers sont disponibles en abondance en Algérie, mais malheureusement non exploitées suffisamment comme additions aux mélanges cimentaires. L'objectif de ce travail est d'étudier l'effet des gros et fins granulats recyclés sur les propriétés rhéologiques, mécaniques et durabilité du BAP contenant du laitier de haut fourneau comme substitution de ciment. La méthode Okamura a été utilisée pour formuler le BAP. Toutes les compositions ont été fabriquées avec un rapport eau/liant fixe ($E/L=0,38$), un même rapport de $G/S=1$ et $S/M = 0,50$ et un dosage en superplastifiant de 1,5% du poids du ciment selon les résultats d'optimisation sur mortier. Le taux de substitution du ciment par laitier en poids est de 0%, 15% et 30%. Pour chaque mélange, on a fabriqué cinq bétons différents en remplaçant partiellement le gravier et le sable naturel 0%, 25%, 50%, 75% et 100% par de gros et fins granulats recyclés en poids. Des essais à l'état frais ont été réalisés à l'aide des essais de l'étalement, le temps d'écoulement en entonnoir en V, l'essai à la boîte en L (L-Box), l'essai de la stabilité de tamisage et l'essai au rhéomètre. Les résistances mécaniques en compression et les propriétés de transport (perméabilité à l'eau, l'absorption capillaire) des BAP sont également étudiés. Les résultats des essais expérimentaux ont montré une amélioration de l'ouvrabilité des mélanges de BAP qui a été observée avec l'augmentation de la teneur en laitier de 0% à 30%. Une teneur en granulats recyclés de 25% à 50% et avec 15% de laitier semble être le taux optimal pour produire un BAP stable sans ressuage ni ségrégation. De plus, l'addition de laitier dans le BAP contenant les granulats recyclés réduit les pertes de résistance à la compression à long terme (56 et 90 jours). Cependant, une légère augmentation de l'absorption capillaire et de la profondeur de perméabilité à l'eau dans les mélanges de BAP à base des granulats recyclés, mais ils sont améliorés par la présence du laitier, notamment, pour un taux de 15% de substitution.

Mots clés : Béton autoplaçant, Laitier, Granulats recyclés, Rhéologie, Résistance à la compression, Perméabilité à l'eau, Absorption d'eau.

ABSTRACT

The impact environmental of aggregate production is considerable. In parallel, the elimination of demolition waste is an important issue in Algeria. In this context, one of the proposed solutions is to consider the use of this waste as aggregates in self-compacting concrete (SCC). The 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. In fact the combination of many cementary materials having different granularities permits also the improvement of the compacity of concrete. Mineral additions such as slag, pouzolane or even fillers are available in abundance in Algeria but unfortunately non used sufficiently as additions to concrete mixtures. The objective of this work is to study the effect of coarse and fine recycled aggregates on rheological properties, mechanical and durability of the SCC containing ground granulated blast-furnace slag as cement replacement. The Okamura method was used for making SCC. All SCC mixes were made with fixed water /binder ratio ($w/b = 0.38$), aggregate /sand ratio ($G/S=1$) and sand /mortar ratio ($S/M=0.50$). The superplasticizer was fixed at 1.5% of weight cement according to the results of optimization on self compacting mortar. Cement was partially substituted by slag at different levels of 0%, 15% and 30% by weight of cement. From each mixture, a series of five SCC mixtures were produced using different replacement levels of 0%, 25%, 50%, 75% and 100% of both fine and coarse recycled aggregates. Fresh tests were carried out using the slump flow test, flow time test (V-funnel), L-Box, sieve stability test and rheometer test. Compressive strength and transport properties (water permeability, water absorption) of SCC are also investigated. The results revealed that an enhancement of workability of SCC mixes was noticed as increasing slag from 0 to 30%. RCA content of 25% to 50% as natural aggregates (NA) replacement and cement replacement of 15% slag seems to be the optimum level to produce satisfactory SCC mixes without any bleeding or segregation. Furthermore, the additions of slag to recycled concrete aggregates of SCC mixes reduce strength losses at the long term (56 and 90 days). However, slight increase in the capillary water absorption and water permeability depth was noticed, when using RCA for mixes, but they are improved by the presence of the slag, in particular, for a rate of 15% substitution.

Key words: Self-Consolidating Concrete, Slag, Recycled aggregates, Rheology, Compressive strength, Water permeability, Water absorption.

الركام له تأثير كبير على البيئة في موازاة ذلك، يعتبر القضاء على نفايات الهدم قضية مهمة في ا . وفي هذا السياق يتمثل أحد الحلول المقترحة في اعتبار استخدام هذه النفايات بمثابة ركام في الخرسانة المرصوصة ذاتيا. 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 الإفرازات المائية، يجب على الخليط أن يحتوي على نسبة عالية من المواد المعدنية الرقيقة جدا في الخليط لتصميم جيد . ف إدماج عدة مواد رقيقة ذات أبعاد مختلفة تسمح بالحصول على خرسانة مضغوطة. بعض المواد المعدنية الرقيقة مثل (فضلات الأفران، البوزولان، مواد الحشو) موجودة بكثرة في الجزائر ولكن لسوء الحظ غير مستغلة بالقدر الكافي كمادة إضافية في الخليط الإسمنتي. و الهدف من هذا العمل دراسة تأثير الحصى والرمل المعاد استعماله الناتج عن نفايات الخرسانة على الخصائص الريولوجية والميكانيكية، والديمومة للخرسانة المرصوصة ذاتيا باحتوائها كبديل للإسمنت. طريقة تحضير الخلطات تمت بطريقة أو كامورا . كل التراكيب حضرت بنسب ثابتة منها : نسبة الماء / الرابط = 0.38 نسبة الرمل / الحصى = 1 نسبة مونة / الحصى = 0.50. التقييمية على المونة أثبتت أن نسبة اللدنات الممتازة هي 1.5 من وزن إسمنت. تم إستبدال نسبة : 0 15 30 . لكل خليط ، تم إجراء خمسة مخاليط مختلفة عن طريق إستبدال 0 25 50 75 100% جزئيا من الحصى والرمل المستخرج طبيعيا بأخرى معاد إستعمالها. أجريت لخرسانة المرصوصة ذاتيا في حالتها السائلة قبل التصلب باستخدام إختبارات الإنتشار،

ريولوجيا.	L	V
-----------	---	---

تم أيضا دراسة مقاومة الانضغاط الميكانيكية وخصائص النقل (إمتصاص الماء، قابلية النفوذ للماء) للخرسانة ذاتيا. أظهرت نتائج الإختبارات التجريبية تحسن في قابلية التشغيل للخرسانة المرصوصة ذاتيا مع زيادة محتوى فضلات الأفران من 0 إلى 30 يبدو أن احتواء الخليط بنسبة 25 إلى 50% من الركام المعاد استعماله مع فضلات الأفران بنسبة 15% هو المستوى الأمثل لإنتاج الخرسانة المرصوصة ذاتيا ن تفرقة لمكوناتها أو إفرازات مائية. زيادة على ذلك ، فإن إضافة فضلات الأفران للخرسانة المرصوصة ذاتيا التي تحتوي ركام المعاد استعماله يقلل من فقدان قوة الإمداد الطويل (56 90 يوما). ومع ذلك، فإن زيادة طفيفة في وعمق نفاذية الماء في مخاليط خرسانة المرصوصة ذاتيا التي تحتوي علي الركام المعاد استعماله. على وجه الخصوص 15 % كبديل .

الركام المعاد استعماله ، الريولوجيا

الكلمات المفتاحية : الخرسانة المرصوصة ذاتيا

، قابلية النفوذ للماء.

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.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements à mon directeur de thèse Monsieur Menadi Belkacem, Professeur à l'Université de Saad Dahlab Blida 1, ici j'écris ce que je devais dire avant d'écrire, merci beaucoup monsieur de nous avoir guidé et suivi. Je ne saurais oublier son aide efficace lors de la réalisation de la partie expérimentale, sa grande disponibilité, ses encouragements et de la confiance qu'il m'a accordée.

Je remercie vivement mon co-directeur de thèse, Monsieur George Wardeh, maître de conférences-HDR à l'Université de Cergy-Pontoise, de m'avoir apporté la rigueur scientifique nécessaire à son bon déroulement, je tiens également à le remercier de sa gentillesse et sa grande disponibilité. Le partage de l'ensemble de ses connaissances m'a toujours permis de travailler dans les meilleures conditions.

Un grand merci à Monsieur Kenai Said, Professeur à l'Université de Saad Dahlab Blida 1 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 qu'il a consacré pour corriger ce mémoire.

J'exprime ma profonde reconnaissance à Monsieur El Hadj Kadri, professeur à l'Université de Cergy Pontoise pour leur collaboration scientifique précieuse.

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

- ◆ Monsieur S. Kenai, Professeur à l'université de Blida 1, président du jury ;
- ◆ Monsieur L. Azzouz, Professeur à l'université de Amar Telidji Laghouat, examinateur ;
- ◆ Monsieur M. Bouhicha, Professeur à l'université de Amar Telidji Laghouat, examinateur ;
- ◆ Monsieur F. Debieb, Professeur à l'université de Yahia Fares Médéa, examinateur ;

Je souhaiterai également remercier Monsieur Fortas Abdelkader, laborantin de laboratoire de la Géomatériaux du département de Génie Civil de l'Université de Saad Dahlab Blida 1 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, Yahiaoui Walid, Azzaz Rahmani Abdessamed, Debbih Amina, Hammat Siham, 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 de tout mon cœur à ma famille, ma femme, mon enfant Mohammed, à mes chers frères, ma sœur et en particulier à mes parents qui m'ont soutenu durant mes études et qui m'ont toujours encouragé et dont leurs générosité est inestimable.

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

TABLE DES MATIERES

Résumé	2
Remerciements.....	5
Table des matières	7
Liste des figures	12
Liste des tableaux.....	18
Liste des symboles et des abréviations	19
Introduction générale	23
 Chapitre 1 : Généralités sur les bétons autoplaçants	
1.1 Généralités	26
1.2 Définition des bétons autoplaçants	26
1.3 Historique des bétons autoplaçants	26
1.4 Avantages du BAP (techniques et socio-économiques)	27
1.5 Caractérisation des BAP à l'état frais	27
1.5.1 Lois du comportement rhéologique des BAP	28
1.5.2 Facteurs influençant la rhéologie des BAP	31
1.6 Formulation des BAP	34
1.6.1 Approche Japonaise ou la méthode générale	34
1.7 Influence de laitier sur les propriétés des BAP à l'état frais	39
1.8 Influence des additions minérales sur les propriétés mécaniques des BAP	45
1.8.1 Résistance à la compression	45
1.8.2 Résistance à la traction	48
1.8.3 Module d'élasticité	50
1.8.4 Retrait	52

1.9 Effets des ajouts minéraux sur la durabilité des bétons autoplaçants	56
1.9.1 La porosité	56
1.9.2 Perméabilité	58
1.9.3 Diffusion des ions chlore	59
1.9.4 Absorption capillaire	63
1.9.5 Carbonatation	64
1.10 Conclusion	66

Chapitre 2 : Granulats recyclés et BAP à base de granulats recyclés

2.1 Introduction	67
2.2 Contexte de l'industrie des granulats recyclés	67
2.3 Composition et caractéristique physiques et mécaniques des granulats recyclés	68
2.3.1 Granulométrie	68
2.3.2 Absorption d'eau.....	69
2.3.3 Densité/ Masse volumique	70
2.3.4 Porosité	71
2.3.5 Dureté	72
2.3.6 Caractéristiques chimiques et minéralogiques	73
2.4 Problème des fines du sable recyclé	74
2.5 Propriétés des bétons recyclés à l'état frais	75
2.5.1 Teneur en air du béton frais	75
2.5.2 Densité	75
2.5.3 Ouvrabilité	76
2.5.4 Rhéologie	81
2.6 Propriétés des bétons recyclés à l'état durci	83
2.6.1 Résistance à la compression	83
2.6.1.1 Qualité du béton d'origine	83

2.6.1.2	Etat hydrique des gravillons recyclés	83
2.6.1.3	Taux de substitution des granulats naturels en GR	86
2.6.1.4	Nature des ajouts d'origines minérales	89
2.6.1.5	Paramètres de formulation et plus particulièrement le rapport E/C	90
2.6.2	Résistance à la traction	90
2.6.3	Module d'élasticité	92
2.6.4	Retrait	93
2.7	Durabilité des bétons recyclés	95
2.7.1	Porosité et absorption d'eau des bétons	95
2.7.2	Perméabilité à l'eau	101
2.7.4	Migration des chlorures	102
2.8	Conclusion	104

Chapitre 3 : Matériaux et méthodes d'essais

3.1	Introduction	106
3.2	Caractéristiques des matériaux utilisés	106
3.2.1	Ciment	106
3.2.2	Laitier	107
3.2.3	Granulats naturels	109
3.2.4	Granulats recyclés	110
3.2.5	Eau de gâchage	112
3.2.6	Superplastifiant	112
3.3	Formulations des BAP adoptées	113
3.3.1	Formulation du mortier	113
3.3.1.1	Confection des mortiers	114
3.3.2	Formulation du BAP de Référence	115
3.3.2.1	Confection des BAP	115

3.3.2.2	Substitution du ciment par du laitier et les GN par des GR	116
3.4	Essais de caractérisation des BAP à l'état frais	117
3.4.1	Essais relatifs au mortier à l'état frais	117
3.4.1.1	Essai d'étalement au mini-cône	117
3.4.1.2	Essai à l'entonnoir en V (V-Funnel test)	118
3.4.2	Essais relatifs au BAP à l'état frais	119
3.4.2.1	Ouvrabilité	119
3.4.2.2	Essai de rhéomètre	124
3.4.2.3	Densité	126
3.5	Démoulage et conservation des éprouvettes	127
3.6	Essai relatifs au BAP à l'état durci	127
3.6.1	Résistance mécanique à la compression	127
3.6.2	Absorption capillaire	128
3.6.3	Perméabilité à l'eau	130
3.7	Récapitulatif du programme des essais réalisés	131

Chapitre 4 : Résultats expérimentaux et discussion

4.1	Introduction	134
4.2	Optimisation du rapport Superplastifiant/Liant (S/L)....	134
4.2.1	Effet du dosage de superplastifiant sur l'ouvrabilité du mortier autoplaçant ...	135
4.3	Effet du taux de substitution des GN par des GR et laitier sur l'ouvrabilité des BAP	137
4.3.1	Densité	140
4.3.2	Mesure d'étalement et du temps T_{50} au cône d'Abrams	140
4.3.3	Mesure du temps d'écoulement par l'essai d'entonnoir en V (V-Funnel)	144
4.3.4	Mesure du rapport (H_2/H_1) de l'essai de la boîte en L (L-Box)	147

4.3.5	Mesure de résistance à la ségrégation par tamisage	150
4.3.6	Mesure des propriétés rhéologiques	151
4.4	Effet du taux de substitution des GN par des GR et laitier sur des BAP à l'état durci..	156
4.4.1	Résistance à la compression	156
4.4.2	Perméabilité à l'eau	159
4.4.3	Absorption capillaire	162
4.5	Conclusion	166
	Conclusion générale et perspectives	167
	Références bibliographiques	170
	Annexes A : Exemple de calcul de la composition du mortier	193
	Annexes B : Exemple de calcul de la composition du béton	196
	Annexes C : Publication internationale	201

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1:	Les différents comportements rhéologiques des fluides	28
Figure 1.2:	Différents Comportements d'écoulement	30
Figure 1.3:	Exemples de comportement rhéologique pour différents types de béton	31
Figure 1.4:	Phénomène de blocage d'un granulat au droit d'un obstacle	36
Figure 1.5:	Mécanisme de principe de la répulsion électrostatique et stérique	37
Figure 1.6:	Effet de superplastifiant sur l'étalement et la viscosité d'un béton	38
Figure 1.7:	Variation de l'étalement en fonction de temps et la teneur en laitier	41
Figure 1.8:	Perte d'ouvrabilité en fonction du temps de BAP avec de laitier à différents pourcentage	42
Figure 1.9:	Effet du taux de substitution de laitier sur les propriétés rhéologiques de la pâte de ciment	43
Figure 1.10:	Propriétés des BAP à l'état frais à base de laitier	44
Figure 1.11:	Variation de la résistance à la compression des BAP avec l'âge	46
Figure 1.12:	Variation de la résistance à la compression des BAP à base de laitier en fonction de l'âge	46
Figure 1.13:	Résistance à la compression des BAP an fonction de l'âge	47
Figure 1.14:	Variation de la résistance à la traction en fonction du temps	49
Figure 1.15:	Influence du laitier sur la résistance à la flexion	49
Figure 1.16:	La résistance à traction du BAP avec laitier	50
Figure 1.17:	Module d'élasticité en fonction de la résistance en compression	51
Figure 1.18:	L'effet de laitier sur le module d'élasticité des BAP	51
Figure 1.19:	Retraits endogène et totale d'un BV et de deux BAP de résistance 60 MPa	53

Figure 1.20:	Retrait plastique des BAP et de BO	54
Figure 1.21:	Influence de laitier sur le retrait de séchage des BAP	55
Figure 1.22:	Influence du laitier et E/C sur la perméabilité au gaz des BHP	59
Figure 1.23:	Diffusion des ions chlores dans les BAP au laitier	61
Figure 1.24:	Effet de laitier et le rapport E/C sur le béton à 42 jours	62
Figure 1.25:	Effet de laitier et du métakaolin sur le coefficient de diffusion des ions chlorures	62
Figure 1.26 :	La sportivité du béton contenant de laitier	63
Figure 1.27:	Profondeur de carbonatation des bétons étudiés	65
Figure 1.28:	Profondeur de carbonatation des BAP à base de laitier	65
Figure 2.1:	Compositions des GR de béton	68
Figure 2.2:	Absorption d'un granulats recyclés en fonction du temps	70
Figure 2.3:	Relation entre la densité et le taux de mortier résiduel	71
Figure 2.4:	Relation entre le mortier résiduel et la valeur d'abrasion Los Angeles	72
Figure 2.5:	Analyse DRX d'une coupure recyclée (0,6 - 0,125 mm)	73
Figure 2.6:	Granulométrie de sable naturel et sable recyclé	75
Figure 2.7:	Evolution de la rhéologie dans le temps pour un béton incorporant 100% en volume de gravillons recyclés	76
Figure 2.8:	Comparaison entre l'étalement des BAP ordinaires et recyclés	77
Figure 2.9:	Effet des GR sur l'étalement (A), temps d'écoulement T50(B), temps d'écoulement TVf (C) et pourcentage de laitance (D) des BAP	78
Figure 2.10:	Variation de la capacité de remplissage et de passage des BAP	79
Figure 2.11:	Variation de l'ouvrabilité du béton en fonction de taux des GR	80

Figure 2.12:	Evolution dans le temps de l'affaissement des mortiers incorporant du SR	81
Figure 2.13:	Variation des paramètres rhéologique en fonction de taux des GR	82
Figure 2.14:	Evolution de la résistance à la compression dans le temps	84
Figure 2.15:	Observations de l'ITZ des mortiers à base de sable recyclé	85
Figure 2.16:	Evolution dans le temps des résistances en compression pour des taux variables de remplacement en GR	86
Figure 2.17:	Evolution de la résistance à la compression du béton en fonction taux de substitution des GR	87
Figure 2.18:	Résistance à la compression pour des BAP avec (0, 50 et 100%) de GR	88
Figure 2.19:	La résistance à la compression des mélanges de BAP	88
Figure 2.20:	Résistance de mortier incorporant différentes coupures de sable recyclé	89
Figure 2.21:	Effet de GR et métakaolin sur la résistance à la compression	90
Figure 2.22:	Résistance à la traction pour des BAP avec (0, 50 et 100%) de GR	91
Figure 2.23:	Résistance à la traction pour des BAP avec des GR	91
Figure 2.24:	Résistance à la traction pour des BAP	92
Figure 2.25:	Retrait de séchage pour BAP à base des GR et avec un rapport $E/L=0,53$	94
Figure 2.26:	Retrait de séchage pour BAP à base des GR et avec un rapport $E/L=0,44$	94
Figure 2.27:	Evolution du retrait des bétons recyclés à base de gros et fins granulats de bétons concassés	95
Figure 2.28:	Volume poreux du béton recyclé, à 28 jours (a), à 180 jours (b) et 365 jours	96
Figure 2.29:	Coefficient d'absorption d'eau du béton recyclé, à 28 jours et à 180 jours	96

Figure 2.30:	Absorption d'eau par capillarité	97
Figure 2.31:	Absorption d'eau pour des BAP avec (0, 50 et 100%) de GR	98
Figure 2.32:	Absorption d'eau pour des BAP	99
Figure 2.33:	Image par microscope optique d'un BAP à base des GR	99
Figure 2.34:	Effet des granulats recyclés sur l'absorption de l'eau par capillarité	100
Figure 2.35:	Coefficient de capillarité de l'eau des mélanges de BAP	100
Figure 2.36:	Profondeur de pénétration de l'eau de BAP	101
Figure 2.37:	Evolution de la résistance à la pénétration des ions Cl^- en fonction de la présence et de l'état de surface des gravillons recyclés	103
Figure 2.38:	Pénétrations des ions Cl^- pour des bétons à base de SR	103
Figure 2.39:	Résistance à la pénétration des ions chlorure des BAP	104
Figure 3.1:	Laitier granulé de haut fourneau utilisée, (a) avant broyage, (b) après broyage	107
Figure 3.2:	Broyage de laitier, (a) Broyeur à boulet, (b) Broyeur en rotation, (c) Laitier après broyage	108
Figure 3.3:	Finesse du laitier en fonction du temps de broyage	109
Figure 3.4:	Courbes granulométriques des granulats naturels et recyclés	111
Figure 3.5:	Concasseur à mâchoire	112
Figure 3.6:	Séquence de malaxage du mortier	115
Figure 3.7:	Séquence de malaxage du béton autoplaçant	116
Figure 3.8:	Essai d'étalement pour mortier	118
Figure 3.9:	Essai à l'entonnoir en V pour mortier	118
Figure 3.10:	Essai d'étalement au cône d'Abrams (slump flow)	120
Figure 3.11:	Mesure du diamètre d'étalement	120
Figure 3.12:	Dispositif de l'essai d'entonnoir en V (V-Funnel)	122

Figure 3.13:	Essai de la boîte en L	123
Figure 3.14:	Essai de résistance à la ségrégation au tamis	124
Figure 3.15:	Agitateur	125
Figure 3.16:	Croisillon	125
Figure 3.17:	Récipient	125
Figure 3.18:	Rhéomètre à béton	125
Figure 3.19:	Profil de vitesse	126
Figure 3.20:	Eprouvettes conservées dans l'eau	127
Figure 3.21:	Dispositif de l'essai de compression simple	128
Figure 3.22:	Dispositif expérimental de mesure d'absorption d'eau par capillarité	129
Figure 3.23:	Essai de perméabilité à l'eau	130
Figure 3.24:	Mesure de la profondeur de pénétration d'eau	131
Figure 3.25:	Organigramme de la procédure expérimentale	133
Figure 4.1:	Etalement et le temps d'écoulement T_v de mortier à base de sable naturel en fonction de dosage en S_p	136
Figure 4.2:	Densité des BAP en fonction du pourcentage de remplacement des GR et laitier	140
Figure 4.3:	Etalement et le temps d'écoulement T_{50} en fonction de la teneur en laitier et taux de substituant des GN par des GR	141
Figure 4.4:	Temps d'écoulement T_{vf} en fonction de la teneur en laitier et taux de substituant des GN par des GR	145
Figure 4.5:	Corrélation entre T_{50} et le temps de V-funnel	147
Figure 4.6:	Rapport H_2/H_1 en fonction de la teneur en laitier et taux de substituant des GN par des GR	148

Figure 4.7:	Résistance à la ségrégation au tamis en fonction de la teneur en laitier et taux de substituant des GN par des GR	150
Figure 4.8:	Variation des paramètres rhéologiques en fonction de la teneur en laitier et taux de substituant des GN par des GR	152
Figure 4.9:	Corrélation entre seuil de cisaillement et l'étalement	155
Figure 4.10:	Variation de la résistance à la compression en fonction du temps	158
Figure 4.11:	La perméabilité à l'eau en fonction de la teneur en laitier et taux de substituant des GN par des GR	161
Figure 4.12:	Corrélation entre la résistance à la compression et la perméabilité à l'eau en fonction de la teneur en laitier et taux de substituant des GN par des GR	162
Figure 4.13:	Effet de taux de substituant des GN par des GR sur l'absorption capillaire par unité de surface des grands pores des BAP à base de 0% de laitier	163
Figure 4.14:	Effet de taux de substituant des GN par des GR sur l'absorption capillaire par unité de surface des grands pores des BAP à base de 15% de laitier	163
Figure 4.15:	Effet de taux de substituant des GN par des GR sur l'absorption capillaire par unité de surface des grands pores des BAP à base de 30% de laitier	164
Figure 4.16:	Sorptivité des petits pores des BAP en fonction de la teneur en laitier et taux de substituant des GN par des GR	164
Figure 4.17:	Corrélation entre la résistance à la compression et la sorptivité en fonction de la teneur en laitier et taux de substituant des GN par des GR	166

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1:	Essais relatifs aux BAP	28
Tableau 3.1:	Caractéristiques chimiques et minéralogiques du ciment	106
Tableau 3.2:	Propriétés physique et mécanique de ciment utilisé	107
Tableau 3.3:	L'analyse chimique de laitier d'El Hadjar	108
Tableau 3.4:	Caractéristiques physiques des granulats utilisés	111
Tableau 3.5:	Classification des BAP selon domaine d'utilisation	121
Tableau 3.6	Critères de stabilité	121
Tableau 3.7:	Echelle pour l'essai de perméabilité à l'eau	131
Tableau 4.1:	Composition de mortier à base de sable naturel	135
Tableau 4.2:	Composition des BAP étudiés	138
Tableau 4.3:	Valeurs préconisées pour les essais (EFNARC) du BAP	139
Tableau 4.4:	Résultats d'essai d'ouvrabilité des BAP à l'état frais	139
Tableau 4.5:	Valeur du seuil de cisaillement et la viscosité plastique en fonction de la teneur en laitier et taux de substituant des GN par des GR	151
Tableau 4.6:	Valeurs moyennes de la profondeur de pénétration d'eau sous pression des BAP	160
Tableau A:	Feuille Excel donnant composition du mortier	195
Tableau B:	Feuille Excel donnant composition du béton	200

LISTE DES SYMBOLES ET DES ABREVIATIONS

A	Quantité d'air (m^3)
A_{bs}	Coefficient d'absorption du sable
A_{bG}	Coefficient d'absorption du gravier
A_{ep}	Section de l'éprouvette
AFGC	Association Française de Génie Civil
Al_2O_3	Alumine
BAN	Béton autonivelant
BAP	Béton autoplaçant
BHP	Béton à hautes performances
BN	Béton de résistance normale
B_J	Différence d'hauteur de béton au J-Ring
BO	Béton ordinaire
BR	Béton recyclé
BV	Béton vibré
C_3A	Aluminate tricalcique (célite)
CaO	Oxyde de calcium
C	Coefficient d'absorption capillaire
C_3S	Silicate tricalcique (Alite)
C_2S	Silicate bicalcique (bélite)
C_4AF	Alumino-ferrite tétracalcique
Ca CO ₃	Carbonate de calcium
Ca(OH) ₂	Portlandite

CEM II/A 42.5	Ciment Portland composé de Classe 42,5
Cl ⁻	Les ions chlorure
CV	Cendre volante
CH	Hydroxyde de calcium
CO ₂	Dioxyde de carbone
C-S-H	Silicate de calcium hydraté
C+A	Ciment+Addition
D _f	Affaissement Final
DRX	Diffraction des rayons X
D _{max}	Diamètre maximal des granulats
E	Eau
E _{ij}	Module d'élasticité différé
E/C	Eau/Ciment
E/F	Eau/Fines
E/L	Eau/Liant
E/P	Eau/Poudre
FC	Filler calcaire
ft28	Résistance à la traction à 28 jours d'âge
G	Gravier
GBR	Granulats de béton recyclé
GN	Granulat naturel
GR	Granulat recyclé
G/S	Gravier/Sable
G _{lim}	Volume absolu 1 m ³ de gros granulats

H_2/H_1	Taux de remplissage
H_2SO_4	Acide sulfurique
ITZ	Interfacial transition zone
K_{sf}	Taux de fines particules
L	Laitier de haut fourneau
LA	Coefficient de Los Angeles
MAP	Mortier autoplaçant
MBE	Mortier de béton équivalent
MEB	Microscopie électronique à balayage
Na_2SO_4	Sulfate de sodium
P	Poudre (Ciment+ajout)
PZ	pouzzolane
Q	Volume d'eau absorbé
R	Remplissage moyen
R_b	Risque de blocage
R_c	Résistance à la compression
R_m	Vitesse d'écoulement relative
R_f	Résistance à la flexion
r_1	Diamètres d'étalement (xx)
r_2	Diamètres d'étalement (yy)
S	Coefficient de sorptivité
S_v	Volume du sable
SCC	Self-Compacting Concrete
SiO_2	Silice
SO_3	Trioxide de soufre
S/M	Sable/Mortier

Sp	Superplastifiant
Sp/L	Superplastifiant/Liant
SR	Sable recyclé
T	Temps d'affaissement (sec)
t	Temps d'écoulement à l'entonnoir en V du mortier (sec)
T ₅₀	Temps d'écoulement pour que le diamètre d'étalement atteigne une valeur de 50 cm (sec)
T _{vf}	Temps d'écoulement à l'entonnoir (sec)
V _p	Volume de pâte (m ³)
V _w	Volume d'eau (m ³)
a	Pourcentage de laitance
	Masse volumique du béton frais
app	Masse volumique apparente
abs	Masse volumique absolue
c	Masse volumique du ciment
E	Masse volumique d'eau
G	Masse volumique du gravier
s	Masse volumique du sable
PS	Masse volumique du superplastifiant
Γ _m	Etalement relatif
	Contrainte de cisaillement (Pa)
u	Contrainte de cisaillement ultime (Pa)
0	Seuil de cisaillement (Pa)
μ	Viscosité plastique, (Pa.s ⁻¹)
.	Vitesse de déformation (s ⁻¹)

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Le béton est un composite hétérogène qui résulte du mélange intime de ciment, de granulats, d'eau, et éventuellement d'adjuvants pour modifier ses propriétés. Ses constituants sont dosés de manière à obtenir après durcissement, un produit rocheux artificiel dont la capacité de résistance à la compression soit élevée. C'est le matériau de construction le plus utilisé au monde, que ce soit en bâtiment ou en travaux publics. Selon le conseil mondial des entreprises pour le développement durable, environ 25 milliards de tonnes de béton sont fabriquées chaque année.

Pour améliorer sa résistance, des chercheurs ont, successivement mis au point des nouveaux bétons comme : bétons à haute performance (BHP), bétons à très haute performance (BTHP) et béton ultra haute performance (BUHP). Dans le but d'améliorer la maniabilité et d'assurer une mise en place correcte de béton, des chercheurs de l'Université de Tokyo ont mis au point des bétons fluides qui peuvent être mis en œuvre sans vibration. Il s'agit des bétons autoplaçants (BAP) utilisés pour le coulage d'éléments verticaux (poteaux, voiles) et des bétons autonivelants (BAN) destinés aux éléments horizontaux (dalles de compression, dallages, chapes flottantes).

L'introduction du BAP représente des progrès technologiques importants, ce qui conduit à un béton de meilleure qualité et un processus de construction efficace. Les principaux avantages de l'utilisation du BAP dans la construction consistent à raccourcir la période de construction et d'augmenter ainsi la productivité, en assurant le compactage de la structure (en particulier dans des zones confinées où il est difficile en général), permet le pompage du béton à une grande hauteur et ainsi améliorer la qualité de construction et d'éliminer le bruit dû aux vibrations conduit à une amélioration substantielle de l'environnement de travail sur le site.

Les exigences que doit satisfaire un BAP par rapport à un béton vibré (BV) pour aboutir aux avantages cités précédemment sont sensiblement plus élevées, en ce qui concerne sa formulation et sa caractérisation à l'état frais. Ces bétons sont élaborés selon une formulation spécifique ; fort dosage en sable et en éléments fins (filler calcaire, laitier, pouzzolane, cendres volantes ou fumées de silice), emploi du superplastifiant et éventuellement d'un agent colloïdal qui permet d'assurer l'homogénéité du mélange. Les

différentes approches visant à concevoir des bétons autoplaçants ont abouti à des formulations de bétons ayant un volume de pâte plus important que celui des bétons ordinaires pour des résistances mécaniques égales. La réalisation d'un BAP est devenue de ce fait une opération plus complexe que celle d'un béton vibré. En effet, il s'agit de combiner un nombre plus élevé de matériaux. Cette opération pourrait être accompagnée d'éventuels problèmes de compatibilités entre matériaux.

Malgré les avantages pratiques des BAP, leur point faible réside dans leur coût, qui est relativement plus élevé que les bétons ordinaires en raison de l'emploi du superplastifiant et d'un dosage important en ciment, limitant ainsi son utilisation. L'usage des additions minérales comme le laitier, la pouzzolane et le calcaire, en tant que substitution du ciment peut garantir deux principaux avantages : la première réside sur le fait que certains additions ont le même effet que le superplastifiant dans l'amélioration de la fluidité. Et d'autre, ils ont le même effet que les agents de viscosité dans l'augmentation de la viscosité du mélange, ce qui réduit de manière significatif le coût global du matériau. Le deuxième avantage réside dans le fait que l'utilisation de ces additions présente une solution efficace pour l'industrie du ciment afin de diminuer ses émissions de CO₂, qui représentent 5% du total des émissions anthropiques dans le monde. D'où l'utilisation des déchets et des sous-produits industriels qui sont les principales actions à prendre, afin de réduire l'utilisation des ressources non renouvelables et l'impact négatif sur l'environnement.

Dans le même sens, l'exploitation des matériaux locaux provenant des déchets de démolition, dans la fabrication des BAP, a toujours été une préoccupation d'autant plus qu'elle contribue à l'économie dans le domaine de construction. En plus des catastrophes naturelles (séismes, inondations,...), les différentes activités de génie civil (construction, démolition, réhabilitation), engendrent des quantités très importantes de débris constitués principalement de béton et de brique. Ces débris sont souvent orientés vers l'enfouissement ou l'incinération, quand ceci est possible dans des décharges légales ou même illégales. Pourtant dans certaines régions du pays comme Alger, les ressources naturelles sont épuisées, le sable de mer interdit, les granulats utilisés sont transportés de très loin, les décharges publiques sont saturées et les carrières restent parfois incapables de satisfaire les besoins industriels ; notamment dans le cas des grands projets (routes, barrage,...etc). A titre d'exemple le grand projet d'autoroute (Est-Ouest) à lui seul,

a nécessité environ soixante millions de tonnes d'agrégats selon les estimations du ministère des travaux publics. Celles-ci imposent de trouver une nouvelle source d'approvisionnement en granulats. Pour éviter aussi la création de décharge sauvage des déchets de l'industrie du béton, les déchets sont sollicités pour cette nouvelle source.

Notre idée était donc, d'orienter notre recherche en vue d'étudier l'influence de la substitution des granulats naturels (GN) par les granulats recyclés (GR) provenant du concassage du béton démolé, et l'effet de substitution du laitier par le ciment sur les paramètres de formulation du BAP et ses propriétés rhéologiques, mécaniques et durabilité, afin d'explorer son utilité comme matériau de structure. Pour cela nous avons réparti notre travail comme suit :

Après une introduction générale, le présent travail est divisé en quatre chapitres. Nous présentons tout d'abord une synthèse bibliographique qui regroupe deux chapitres. Le premier est destiné à initier le lecteur et à mieux comprendre certaines notions fondamentales relatives aux différentes formulations, le comportement d'ouvrabilité et rhéologie des BAP à l'état frais. Les résultats donnés dans la littérature sur l'influence des additions minérales sur les propriétés mécaniques et physico-chimiques et durabilité des BAP sont aussi exposés. Le deuxième chapitre porte sur les propriétés des granulats recyclés et les caractéristiques du béton autoplaçant à base de ces granulats à son état frais et durci. Ce chapitre sera suivi d'un troisième chapitre qui est consacré à l'étude expérimentale. Nous décrivons les matériaux utilisés et les formulations du BAP et nous présentons aussi l'ensemble des essais effectués au laboratoire pour l'élaboration d'un BAP, en donnant à chaque fois le principe de base de l'essai et en décrivant le mode opératoire. Le quatrième chapitre présente et regroupe les différents résultats obtenus et leurs discussions. Enfin, une conclusion générale sur nos travaux ainsi que d'éventuelles perspectives clôture ce travail de recherche. L'exposé des différentes étapes pour le calcul de la composition du mortier et du béton autoplaçant sont donnés en annexe de cette thèse.

CHAPITRE 1

GÉNÉRALITÉS SUR LES BETONS AUTOPLAÇANTS

1.1 Généralités

Dans le présent chapitre, on présente une synthèse bibliographique sur les propriétés de BAP. Dans un premier temps, on présente les caractéristiques des BAP à l'état frais et leurs propriétés rhéologiques, puis on expose les approches de formulation des BAP. Une revue bibliographique est ensuite présentée sur l'influence des additions minérales sur les propriétés des BAP à savoir : l'état frais et durci, ainsi que leurs propriétés physico-chimiques et de durabilité.

1.2 Définition des bétons autoplaçants

Les BAP se distinguent des bétons ordinaires principalement par leurs propriétés à l'état frais, qui sont le résultat d'une formulation spécifique. En effet, qu'ils sont extrêmement fluides, c'est-à-dire très déformables et capables, sous le seul effet de la pesanteur, de se mettre en place dans les coffrages sans nécessiter pour autant des moyens de vibration afin de consolider le mélange avec, comme résultat, un produit très homogène.

1.3 Historique des bétons autoplaçants

Beaucoup de structures actuelles se caractérisent par la complexité de leur architecture (formes variables et courbures multiples), ainsi que par une forte concentration en armatures, ce qui rend souvent difficile l'utilisation des bétons de plasticité conventionnelle. Afin d'adapter le béton à ces ouvrages, des recherches ont été menées au cours des dernières années dans le but de développer des formulations de béton se caractérisant par une haute ouvrabilité, tout en étant stables (ségrégation, ressuage), avec de bonnes caractéristiques mécaniques et de durabilité [1].

Les bétons autoplaçants ont été développés au Japon à la fin des années 80. Leur origine semble provenir de la nécessité d'utiliser des matériaux de plus en plus performants pour palier une réduction de la qualité des constructions due à une mauvaise mise en place du matériau [2].

1.4 Avantages du BAP (techniques et socio-économiques)

La qualité de matériau autoplaçant confère au béton plusieurs avantages techniques et socio-économiques par rapport au béton ordinaire. On peut résumer les avantages du BAP dans les points suivants :

Avantages techniques :

- Facilité et rapidité dans la mise en œuvre du béton (coulage en un seul point, augmentation du débit de béton pompé) ;
- Bétonnage en milieux fortement ferrailés ;
- Amélioration de la qualité esthétique des parements et de l'enrobage des aciers ;
- Réalisation d'éléments de formes plus complexes ou de grande hauteur.

Avantages socio-économiques :

La fluidité des BAP est telle qu'il n'est plus nécessaire de les vibrer pour les mettre en œuvre. La suppression de la phase de vibration est particulièrement bénéfique pour les personnes chargées de la mise en place, puisque cela implique :

- Une diminution du bruit sur site,
- Une diminution de la pénibilité des tâches,
- Une réduction des risques d'accident.

L'utilisation d'un BAP peut s'avérer plus économique que celle d'un béton ordinaire, et ce malgré un surcoût de formulation. Ce surcoût est principalement lié à l'adjuvantation, puisque la fluidité doit être instantanée. Cependant, ces frais supplémentaires peuvent rapidement être compensés par la diminution des coûts de main d'œuvre, du temps de coulage et des délais de fabrication.

1.5 Caractérisation des BAP à l'état frais

La fluidité et l'homogénéité (la stabilité) constituent les deux paramètres qui permettent de donner une appréciation sur les caractéristiques du béton à l'état frais. Ces paramètres sont étudiés sur plusieurs aspects, et peuvent se diviser en quatre critères mesurables par des tests empiriques. Ces critères sont : la capacité au remplissage, la capacité de passage, la résistance à la ségrégation, et la rhéologie [3-6]. Les essais de ces caractéristiques résumés dans le tableau 1.1.

Tableau 1.1 : Essais relatifs aux BAP

Critère	Essais à réaliser
Capacité au remplissage	Etalement au Cône d'Abrams (Slump-flow) ♦ Temps à T_{50} au cône d'Abrams (T_{50} Slump-Flow) ♦ Temps d'écoulement à l'entonnoir en V (VFunnel)
Capacité de passage	♦ Etalement au cône d'Abrams en présence d'anneau de bars (J-Ring test) ♦ Temps à T_{50} au cône d'Abrams en présence du J-Ring ♦ Différence d'hauteurs au J-Ring ♦ Essai de la boîte en L (L-Box test) Mesure de H_2/H_1 ♦ Essai de la boîte en U (U-Box test) Différence d'Hauteur
Résistance à la ségrégation	♦ Essai au Tamis de 5 mm
Rhéologie	♦ Essai aux rhéomètres

1.5.1 Lois du comportement rhéologique des BAP

Il existe plusieurs modèles de comportement rhéologique qui peuvent s'appliquer aux corps fluides. La figure 1.1 présente des courbes de comportement pour les deux grandes familles de corps fluides. Le comportement rhéologique de ces corps est illustré à partir de la relation taux de cisaillement- contrainte de cisaillement.

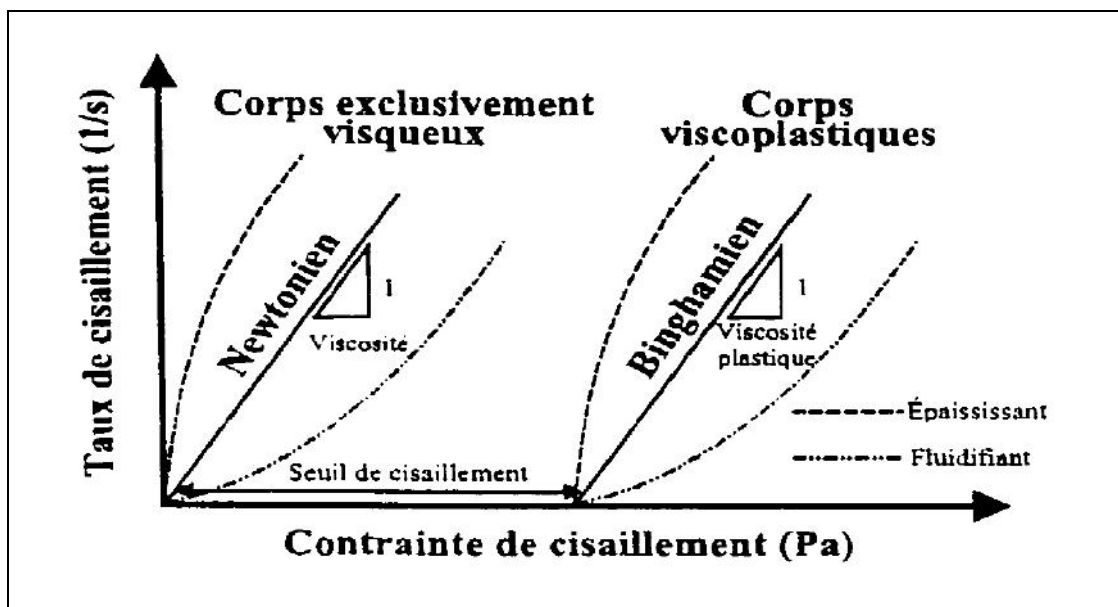


Figure 1.1 : Les différents comportements rhéologiques des fluides [6].

La première famille de comportement rhéologique comprend les corps exclusivement visqueux. Dans cette famille, on peut retrouver, entre autres, les corps Newtoniens. L'écoulement de ces corps se produit aussitôt qu'une contrainte est appliquée et le comportement est alors déterminé uniquement par la viscosité. Elle est une grandeur physique qui caractérise l'existence d'une résistance à l'écoulement. La viscosité est une propriété intrinsèque au fluide; son effet se manifeste seulement lorsqu'il y a mouvement et la résistance qui en résulte est parallèle à la direction de l'écoulement [7].

La seconde famille de comportement rhéologique comprend les corps viscoplastiques. Pour ces corps, en plus de la viscosité, il faut vaincre une résistance supplémentaire avant que l'écoulement puisse s'amorcer. Il s'agit d'un seuil de plasticité aussi appelé seuil de cisaillement dans le cas des corps Binghamiens. La courbe d'écoulement d'un corps Binghamien est une droite dont l'équation à la forme suivante :

$$\tau = \tau_0 + \mu \dot{\gamma} \quad (1.1)$$

Avec : τ la contrainte de cisaillement (Pa), τ_0 le seuil de cisaillement (Pa), μ la viscosité plastique de la pâte (Pa.s⁻¹) et $\dot{\gamma}$ la vitesse de déformation (s⁻¹) [8].

Pour chacune des deux familles de comportement, il existe des modèles complémentaires pour lesquels la viscosité n'est pas constante mais dépendant du taux de cisaillement. Dans le cas où la contrainte de cisaillement augmente lorsque le taux de cisaillement augmente, il s'agit de corps épaississants ; si la contrainte de cisaillement diminue lorsque le taux de cisaillement augmente, il s'agit alors de corps fluidifiants.

Le comportement rhéologique des fluides le plus simple est le comportement newtonien qui a une relation linéaire entre contrainte de cisaillement et taux de cisaillement. Mais les mesures réalisées sur bétons [9] montrent que ces matériaux ne sont pas des fluides newtoniens, mais qu'ils présentent un comportement viscoplastique. Cela veut dire qu'au-dessous d'une valeur de la contrainte critique (c.-à-d. le seuil de cisaillement), la matière se comporte comme un solide mais s'écoule comme un liquide visqueux, quand cette contrainte est dépassé ($\tau > \tau_0$).

Différents modèles peuvent être utilisés pour décrire le comportement rhéologique des bétons. Dans la pratique, deux modèles sont couramment utilisés pour les BAP : le modèle de Bingham et le modèle de Herschel-Bulkley représentés sur la figure 1.2.

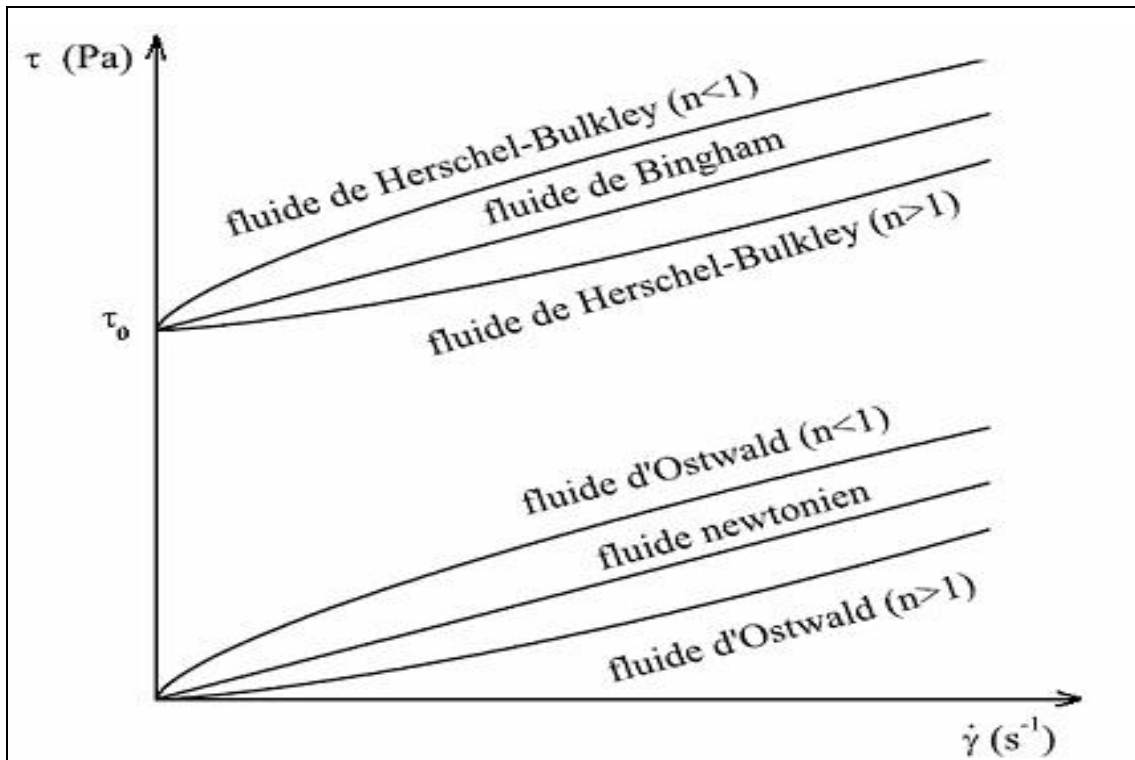


Figure 1.2 : Différents comportements d'écoulement [1].

Plusieurs auteurs [9-12] ont utilisé fréquemment le modèle de Bingham pour modéliser le comportement des BAP avec un seuil de cisaillement τ_0 de faible valeur. Cependant, d'autres auteurs [13-15] ont montré que le comportement des BAP, comme celui de nombreuses autres suspensions de particules, peut être décrit par un comportement non linéaire épaississant, et suivent une loi de type Herschel-Bulkley. Celui-ci fait intervenir trois paramètres intrinsèques (τ_0 , K , n) qui permettent de décrire l'écoulement en régime permanent du matériau si celui-ci reste homogène (pas de ségrégation des particules). La contrainte de cisaillement est reliée au taux de déformation par la relation suivante :

$$\tau = \tau_0 + k \dot{\gamma}^n \quad (1.2)$$

Pour un comportement épaississant la valeur de n est supérieur à 1 par contre si n inférieur à 1 le matériau est dit fluidifiant. Ces paramètres intrinsèques sont accessibles à l'aide des différents essais donnée au tableau 1.1.

Malgré le fait que la réalisation d'essais rhéologiques est difficile, les différentes données indiquent que la valeur du seuil d'écoulement des BAP est bien plus faible que celui des autres bétons [16]. La figure 1.3 représente le comportement de quelques bétons fluides.

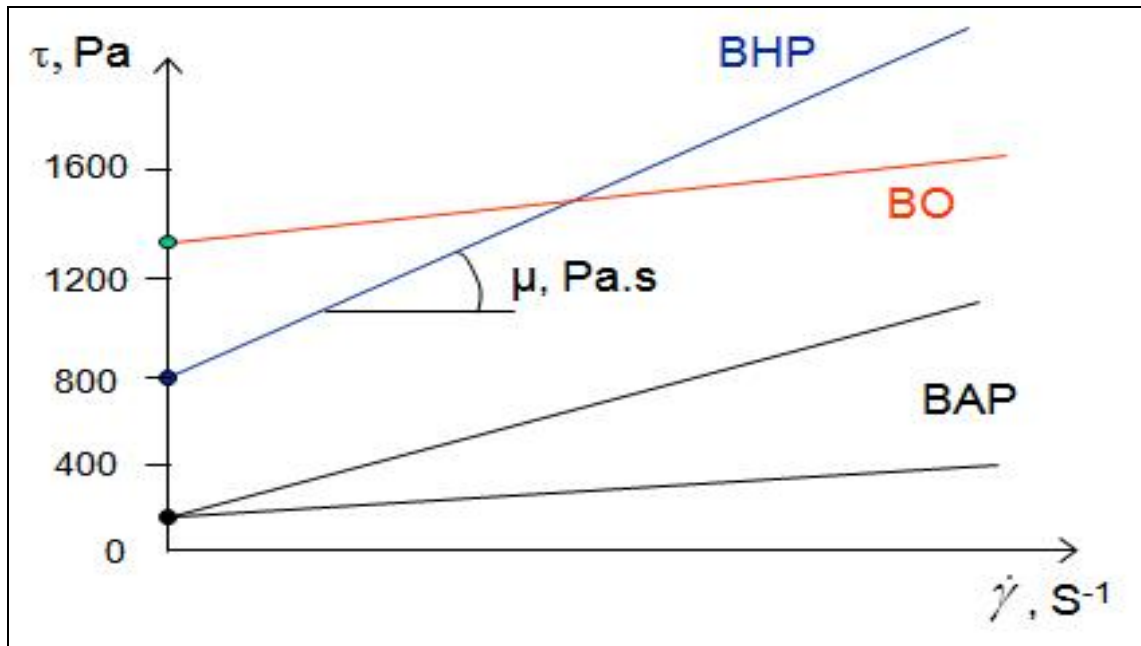


Figure 1.3 : Exemples de comportement rhéologique pour différents types de béton [16].

1.5.2 Facteurs influençant la rhéologie des BAP

Les facteurs qui affectent la rhéologie du béton frais sont nombreux. Tous les changements effectués sur la composition d'un mélange de béton influencent à des niveaux différents ses propriétés. En isolant chacun de ces facteurs cités dans le paragraphe suivant, il est possible de distinguer des tendances générales à savoir quel sera l'effet sur le seuil de cisaillement ou sur la viscosité plastique. Cependant, ces facteurs ne sont pas indépendants les uns face aux autres et la prévision du seuil de cisaillement et/ou de la viscosité devient relativement compliquée quand tous les facteurs sont considérés. Parmi les principaux facteurs sont :

a- Type de ciment

L'influence des caractéristiques du ciment sur la rhéologie est non négligeable, particulièrement pour les mélanges riches en ciment [9]. Les principales caractéristiques du ciment influençant la rhéologie sont :

- La composition chimique du ciment (en particulier, la teneur en C_3A) ;
- La finesse du ciment ;
- La quantité de ciment dans le mélange.

L'influence de la composition du ciment, en particulier la quantité de C_3A qui réagit très rapidement, va déterminer la rhéologie du mélange. Pour les pâtes de ciment, le seuil de cisaillement augmente brutalement quand la teneur en C_3A varie d'environ 7,5 à 9,5% [9]. Mais en dehors de cette zone, le seuil ne dépend pratiquement pas de la teneur en C_3A . Quand à la viscosité, elle augmente régulièrement en fonction de cette teneur.

D'autres chercheurs [17] ont montré que le seuil de rigidité d'une pâte de ciment varie avec sa teneur en alcalis et en C_3A . Cette étude a aussi montré que le seuil de cisaillement augmente proportionnellement à la teneur en C_3A et diminue quand la concentration en SO_3 augmente.

Beaupré et Mindess [18] ont effectués des essais avec trois types de ciment. Quand tous les autres paramètres sont constants, un mélange fabriqué avec du ciment type 50 (classe 52,5 selon la norme européenne) montre le plus faible seuil de cisaillement, un mélange réalisé avec du ciment type 30 (classe 32,5 selon la norme européenne) avec fumée de silice montre le plus grand seuil de cisaillement et un mélange fait avec du ciment type 30 présente un seuil de cisaillement entre les deux précédents. La viscosité plastique demeure constante en général.

b- Dosage en eau

L'eau est connue comme étant l'un des facteurs les plus importants au niveau de l'ouvrabilité du béton [9]. L'augmentation de la teneur en eau de la pâte conduit à une augmentation de la teneur en eau libre du système, ce qui a pour effet d'éloigner les grains les uns des autres, diminuant ainsi les attractions électrostatiques (forces de Van der Waals : elles décroissent avec la distance entre particules chargées). Il en résulte une baisse du seuil de cisaillement.

De plus, cet apport d'eau permettant une meilleure lubrification (du fait de l'éloignement des particules, on diminue la friction lors de l'écoulement), il en résulte une diminution de la viscosité [19].

c- Superplastifiant

Les superplastifiant ont été développés pour donner au mélange une plus grande maniabilité et faciliter ainsi la mise en place. L'addition de superplastifiant produit une diminution du seuil de cisaillement sans affecter la viscosité plastique [6]. D'autres chercheurs [20] ont montré que pour un dosage en superplastifiant donné, le seuil de cisaillement est beaucoup plus affecté par le temps que la viscosité c'est-à-dire que le seuil

de cisaillement augmente avec le temps, alors que la viscosité plastique reste pratiquement constante.

Un autre effet des superplastifiants est la perte rapide de l'affaissement dans le temps. Un béton non superplastifié sera relativement stable dans le temps quant à ses propriétés rhéologiques alors qu'un béton superplastifié peut montrer une prise beaucoup plus rapide ou une prise anormalement retardée à de très hautes concentrations en superplastifiant [9].

d- Granulats

La granulométrie des granulats est un facteur très important pour avoir un béton autoplaçant très maniable et résistant à la ségrégation. Plus un granulat est petit, plus la demande en eau est importante et ceci réduit la fluidité du mélange.

D'après Hu [21], l'ajout de granulats n'a qu'un effet secondaire du point de vue rhéologique. Par contre, l'état de saturation en eau des granulats peut avoir une influence sur les paramètres rhéologiques, donc sur le comportement rhéologique du béton. L'utilisation de granulats non saturés influence la quantité d'eau disponible pour le mélange, d'où une augmentation de seuil de cisaillement et de la viscosité. En ce qui concerne la forme des granulats, l'utilisation de granulats roulés donne un mélange maniable (diminution de la viscosité) à cause de deux phénomènes : l'effet de roulement à billes les unes sur les autres et la faible surface spécifique d'une sphère. Il s'ensuit qu'une quantité moindre de pâte de ciment est nécessaire pour enrober les particules, permettant ainsi d'avoir un mélange plus fluide [6].

e- Temps

L'hydratation du ciment se fait dans le temps. C'est la période dormante qui donne de deux à quatre heures de maniabilité au béton. Cependant, même si la réaction d'hydratation du ciment est ralentie à ce moment, une perte de maniabilité est observable. La perte de maniabilité dans le temps peut être mesurée en termes d'augmentation du seuil de cisaillement et de l'augmentation également de la viscosité plastique.

f- Température

La température a un effet indirect sur la rhéologie du béton. Habituellement, la température joue directement sur la viscosité d'un matériau. Pour le cas du béton frais, la température est une des causes de l'augmentation de la vitesse d'hydratation du ciment qui provoque la

perte de maniabilité rapide dans le temps. La température exerce une influence sur la viscosité de la pâte de ciment et par conséquent sur les propriétés rhéologiques du béton, mais cet effet est négligeable.

1.6 Formulation des BAP

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, plusieurs approches ont été conçues pour l'optimisation de la formulation des BAP à savoir : l'approche japonaise d'Okamura (1999), l'approche française LCPC, L'approche basée sur l'optimisation des mortiers [22], l'approche suédoise du CBI par Peterson et al. [23] qui est basée sur le plan d'expérience, et d'autre basée sur l'optimisation du volume de pâte [22].

I.6.1 Approche Japonaise ou la méthode générale

Okamura et Ozawa ainsi que Ouchi et al. [2,24] sont les précurseurs en matière de formulation des BAP. Les caractéristiques requises sont d'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 :

$$G = \frac{50}{100} G_{lim} (1 - A) \quad (1.3)$$

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 :

$$S = \frac{40 (1 - A - G)}{100 (1 - K_{sf})} \quad (1.4)$$

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 :

$$\Gamma_m = \frac{(r_1 r_2 - r_0^2)}{r_0^2} \quad (1.5)$$

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

La viscosité du mortier, donnée par :

$$R_m = \frac{10}{t} \quad (1.6)$$

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

Ces deux grandeurs représentent la fluidité (plus la valeur de Γ_m est élevée, plus le mortier est fluide) et la viscosité (plus la valeur de R_m est faible, plus la viscosité est élevée) du mortier. Le dosage du superplastifiant et le rapport E/C sont optimisés pour obtenir simultanément $\Gamma_m = 5$ et $R_m = 1 \pm 0,1$. Le béton obtenu est testé pour vérifier les propriétés d'ouvrabilité, et le dosage du superplastifiant peut être réajusté si nécessaire pour obtenir un BAP satisfaisant.

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 formules de bétons autoplaçant actuellement réalisées au Japon et au Canada se caractérisent par un fort dosage en liant. En effet, ces bétons ont souvent des teneurs en liant supérieures à 500 kg/m^3 [1]. De plus les chercheurs japonais et canadiens ont montré l'intérêt d'utiliser des fortes teneurs en additions minérales (laitiers, cendres volantes, fumées de silice, additions calcaires, etc.) afin d'obtenir à la fois une grande fluidité et une bonne stabilité du béton [25].

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 400 L/m^3 , dont le rôle de limiter les contacts entre les différents gravillons et d'empêcher la formation de voûtes susceptible de bloquer l'écoulement (Figure 1.4).

Le volume de pâte dans un BAP représente 35 à 45% du volume total, alors que dans un béton traditionnel il est de 20 à 35% [26], et qu'un superplastifiant est employé pour fluidifier la pâte.

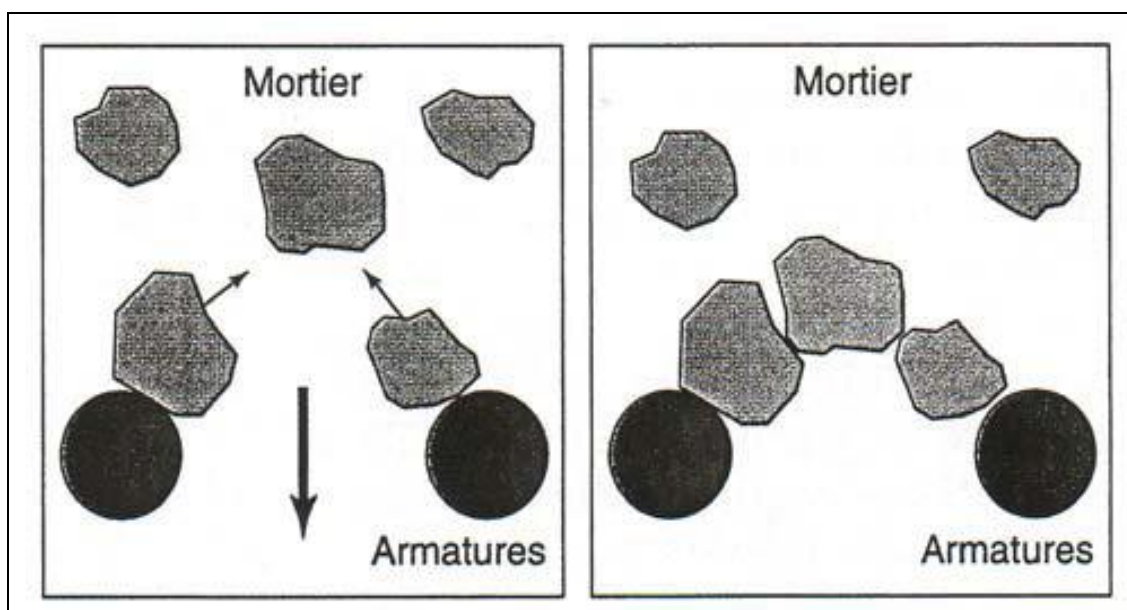


Figure 1.4 : Phénomène de blocage d'un granulat au droit d'un obstacle [16].

Girish et al. [25] ont étudié l'effet du volume élevé de la pâte dans le BAP. Ils ont montré que l'étalement augmente linéairement avec l'augmentation du volume de la pâte de 0,38 à 0,43 dans le mélange.

b. Utilisation de superplastifiant

Les superplastifiants sont des polymères organiques solubles dans l'eau dont la synthèse est réalisée par une opération complexe de polymérisation produit de longues chaînes de molécules de masses moléculaires élevées et de ce fait, sont relativement chers.

Les superplastifiants permettent en effet de défloquer les grains de ciment. Ils agissent par répulsion électrostatique en neutralisant les charges électriques présentes à la surface des grains et/ou par répulsion stérique en écartant les grains les uns des autres, grâce à des chaînes moléculaires très longues. L'eau initialement piégée entre les floccs est de nouveau disponible pour l'hydratation ou pour fluidifier le mélange (Figure 1.5) [27]. Il devient donc possible de fabriquer des bétons très fluides, même avec moins d'eau qu'il n'en faut pour hydrater le ciment, donc de fabriquer des bétons à faible rapport E/C, faciles à mettre en place (Figure 1.6) [28].

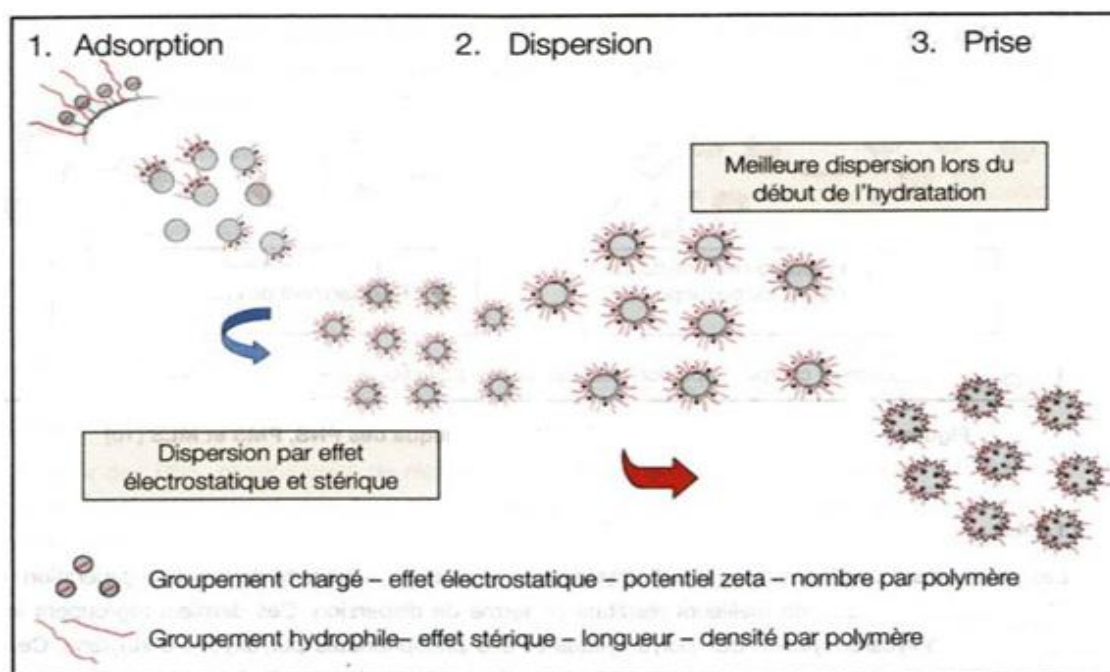


Figure 1.5 : Mécanisme de principe de la répulsion électrostatique et stérique [27].

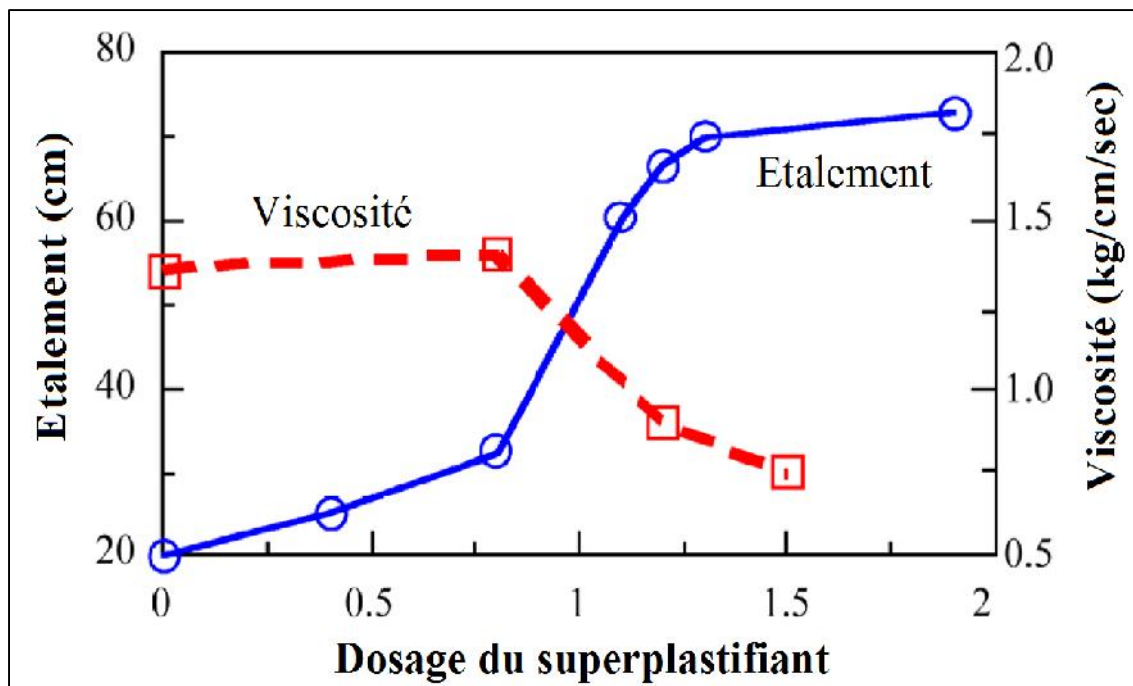


Figure 1.6: Effet de superplastifiant sur l'étalement et la viscosité d'un béton [28].

Boukendakdji et al. [29] ont étudié l'influence de différents superplastifiants et de leurs dosages sur le maintien rhéologique dans le temps d'un mortier. Leurs résultats montrent que l'augmentation du dosage de superplastifiants n'a plus d'influence sur la fluidité du mortier à partir d'une certaine valeur. Cette caractéristique est maintenant bien connue. Il s'agit du dosage à saturation, c'est-à-dire le dosage au-dessus duquel l'adjuvant ne permet plus de modifier de façon significative la fluidité du mélange.

Actuellement, les superplastifiants sont donc utilisés à un dosage proche du dosage à saturation [30]. Donc 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, ce qui nécessite l'utilisation d'un agent colloïdal ou de viscosité, qui a pour rôle d'assurer une meilleure stabilité. Son utilisation doit être restreinte pour des raisons de coût.

Les agents de viscosité sont des hypocycloïdes extraits dans les produits naturels qui ont pour rôle d'empêcher le ressuage lié à la séparation des phases entre solides et liquides, et de limiter les risques de ségrégation en rendant la pâte plus épaisse [31]. Les agents de viscosité permettent un maintien de la fluidité et de la capacité de remplissage au cours du temps estimé à environ une heure [32].

c. 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.

Ces deux facteurs conduisent à prendre pour les BAP un rapport G/S de l'ordre de 1, et le diamètre maximal D_{max} des gravillons est compris entre 10 et 20 mm. Selon les résultats obtenus par une étude [33], la fluidité des BAP a été améliorée en utilisant une combinaison de 70% de gros granulats d'un diamètre maximale de 14 mm et 30% d'un diamètre de 20 mm.

e- Utilisation des additions minérales

Pour assurer une maniabilité suffisante tout en limitant les risques de ségrégation et de ressuage, les BAP contiennent une quantité de fines supérieure à celle des bétons conventionnels. Ces fines proviennent du ciment, des additions et des granulats.

La quantité de pâte joue un rôle important dans la fluidité car l'ajout de fines réduit les interactions entre les plus gros grains. Il est donc nécessaire dans le cas des BAP de remplacer une partie du ciment par des additions minérales. Différentes additions sont citées dans la littérature, les plus courantes sont les fillers calcaires, les cendres volantes, la fumée de silice et le laitier de haut fourneau qui sont utilisées en général pour diminuer le coût du béton en remplacement d'une partie du ciment, ou pour améliorer la continuité du squelette granulaire et ainsi réduire les problèmes de ressuage et/ou ségrégation.

Parmi les ajouts minéraux cités ci-dessus, nous avons choisi le laitier pour être un élément de substitution au ciment dans ce présent travail. On étudiera son influence sur la formulation et la performance d'un béton autoplaçant dans la présente partie.

1.7 Influence de laitier sur les propriétés des BAP à l'état frais

Les laitiers de haut fourneau sont des sous-produits de la fabrication de la fonte brusquement refroidie par aspersion d'eau, ce sont des matériaux hydrauliques lorsqu'ils sont activés. Ils trouvent leurs utilisations surtout dans les ciments et pour les travaux routiers dans les bétons et les matériaux de construction [34].

Le laitier se présente sous forme de nodule dont la composition chimique comporte de l'oxyde de calcium CaO dans des proportions de l'ordre de 40 à 50%, de la silice SiO₂ entre 25 à 35%, de l'alumine Al₂O₃ entre 12 et 30% ainsi que la magnésie et d'autres oxydes en très faibles quantités. Tous ces éléments étant pratiquement les mêmes que ceux du clinker [34]. Selon la valeur de leur rapport CaO/SiO₂ les laitiers peuvent être divisés en laitiers acides (CaO/SiO₂ < 1) et en laitiers basiques (CaO/SiO₂ > 1).

L'utilisation des additions minérales est intéressante sur le plan rhéologique car elles sont, d'une part, moins réactives à court terme que le ciment, ce qui permet d'avoir un temps prolongé d'ouvrabilité et, d'autre part, la combinaison de plusieurs matériaux cimentaires ayant des granularités différentes permet également d'améliorer, de façon générale, la granulométrie du mélange de béton, ce qui favorise à la fois une bonne stabilité et une bonne déformabilité du béton à l'état frais [1]. En plus, Sharp et al. [35] ont confirmé que l'utilisation des ajouts minéraux, surtout le laitier aide à abaisser la chaleur d'hydratation et offre plusieurs autres avantages essentiellement environnementaux et économiques. Borsoi et al. [36] ont exposé, dans leur article, l'importance des ajouts minéraux et plus précisément le laitier. En substituant le ciment par du laitier seul puis par du laitier et des cendres volantes puis par des cendres volantes uniquement, ils trouvent que les deux premiers mélanges, contenant du laitier, assuraient plus d'ouvrabilité que le troisième mélange. Manai [37] a expliqué ce phénomène par les caractéristiques des surfaces des grains de laitier qui permettent un meilleur glissement inter granulaire dans la pâte. Il a souligné aussi que les grains se caractérisent aussi par des surfaces vitreuses lisses à faible taux d'adsorption et leur effet est équivalent à une augmentation d'environ 5% de la quantité d'eau. D'après les résultats présentés par Megat Johari et al. [38], ont constaté une amélioration de l'ouvrabilité de béton jusqu'à utilisation de 60% de laitier.

L'étude réalisée par Ramanathan et al. [39] ont cherché l'effet de la teneur de 30, 40 et 50% des additions utilisées cendre volante, fumée de silice et laitier sur la performance du BAP authentifie que ces additions peuvent réduire la quantité de superplastifiant nécessaire pour obtenir une fluidité donné. Le laitier granulé favorise l'écoulement des pâtes, principalement à cause de sa demande en eau qui est moins importante que celle du ciment [40], mais aussi à cause de sa morphologie [41]. L'étude de Boukendakdji et al. [29, 42] consiste à quantifier l'influence de la teneur laitier Algérienne (10, 15, 20 et 25 %) sur les propriétés du BAP à l'état frais et durci montre qu'une teneur optimale du laitier de 15% semble donner un bon mélange avec un maintien de fluidité d'environ 60 min.

La même observation a été faite par Kouider djelloul [43] où la substitution du ciment par le laitier est avérée être très bénéfique pour le BAP. Une amélioration de la maniabilité a été observée en utilisant jusqu'à 25% de laitier de finesse $3500 \text{ cm}^2/\text{g}$.

Behim et Boucetta [44] ont montré que le laitier améliore l'étalement jusqu'à un dosage de 30 % au-delà de cette valeur ils ont noté plutôt une diminution de l'étalement. Debbih [45] a trouvé que le laitier donne une meilleure ouvrabilité pour les BAP, et que la substitution de 15% du ciment par le laitier dans le BAP à base de granulats naturels engendre une amélioration très remarquable de l'ouvrabilité (capacité de passage et de remplissage).

Wang et Lin [46] ont étudié la perte d'ouvrabilité à 0, 30, 60 et 90 minutes après malaxage pour les mélanges contenant 0, 15 et 30% de laitier. Comme présenté sur la figure 1.7, les valeurs d'étalement sont variées à 430-600 mm, 570-620 mm et 480-600 mm pour le taux de remplacement de 0%, 15% et 30% de laitier pour une période de mesure de 0 à 90 minutes, respectivement. La perte d'ouvrabilité maximale est seulement d'environ 20 mm lorsque la quantité de laitier est de 30%.

D'autres chercheurs [47] ont démontré que laitier peut avoir des effets sur le BAP à l'état frais par l'amélioration de la fluidité et l'élimination des risques de ségrégation en relation avec le dosage (Figure 1.8). Ces résultats sont attribués à la forme sphérique de laitier utilisée qui augmente le volume de la pâte, ce qui a réduit les frictions entre les composants solides dans la phase liquide [48].

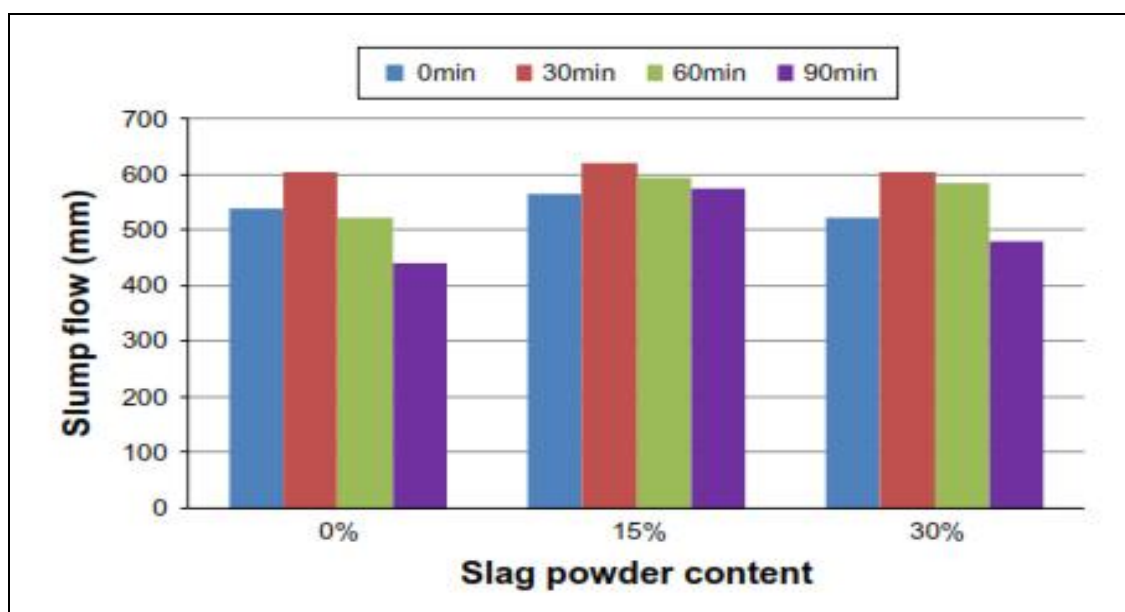


Figure 1.7 : Variation de l'étalement en fonction de temps et la teneur en laitier [46].

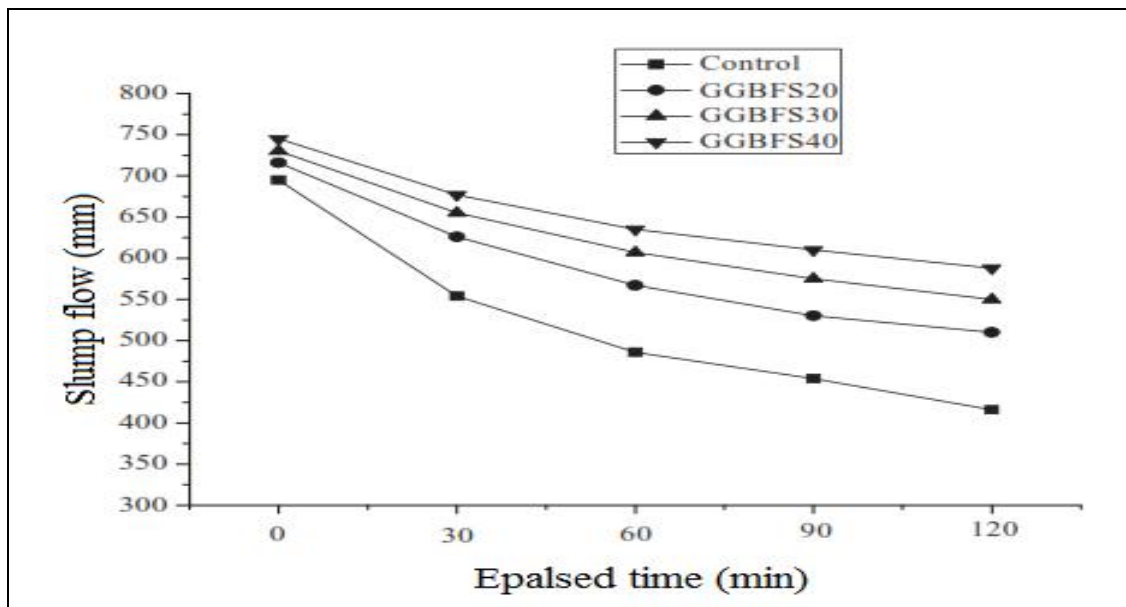


Figure 1.8 : Perte d'ouvrabilité en fonction du temps de BAP à base de laitier [47].

D'autres études antérieures ont été menées pour étudier l'effet de laitier sur les propriétés du BAP. Ils ont été constaté que l'incorporation de laitier améliore les propriétés rhéologiques et diminuent sensiblement pression latérale exercée sur le coffrage d'un BAP [49, 50].

Park et al. [51] ont observé que le remplacement du ciment avec le laitier de haut fourneau jusqu'à 45% avec un incrément de 15% peut réduire et augmenter le seuil de cisaillement. Cependant, la viscosité plastique diminue avec l'augmentation de laitier. Ce dernier se comporte comme une bonne aide à la fluidité jusqu'à 30% (Figure 1.9). Le laitier possède une large distribution granulométrique qui améliore la compacité du mélange et augmente la quantité de l'eau libre ce qui offre un bon comportement rhéologique des ciments composés [6].

Adjoudj et al. [52] ont conclu que la viscosité et le seuil de cisaillement varient sensiblement avec chaque addition minérale et dépend de ses propriétés et de son interaction avec le superplastifiant et les grains du ciment. Pour le mortier non adjuvanté, le seuil de cisaillement augment de 25, 36 et 62% respectivement pour les mortiers contenant 10, 20 et 30% de laitier. Lorsque le laitier est combiné avec un superplastifiant, la valeur mesurée du seuil de cisaillement diminue proportionnellement avec la présence de chaque superplastifiant. La substitution le ciment par 10, 20 et 30% du laitier, 45, 42 et 38% de baisse de viscosité sont respectivement enregistrés avec superplastifiants à base de lignosulfonate et 44, 34 et 17% avec le polycarboxylates.

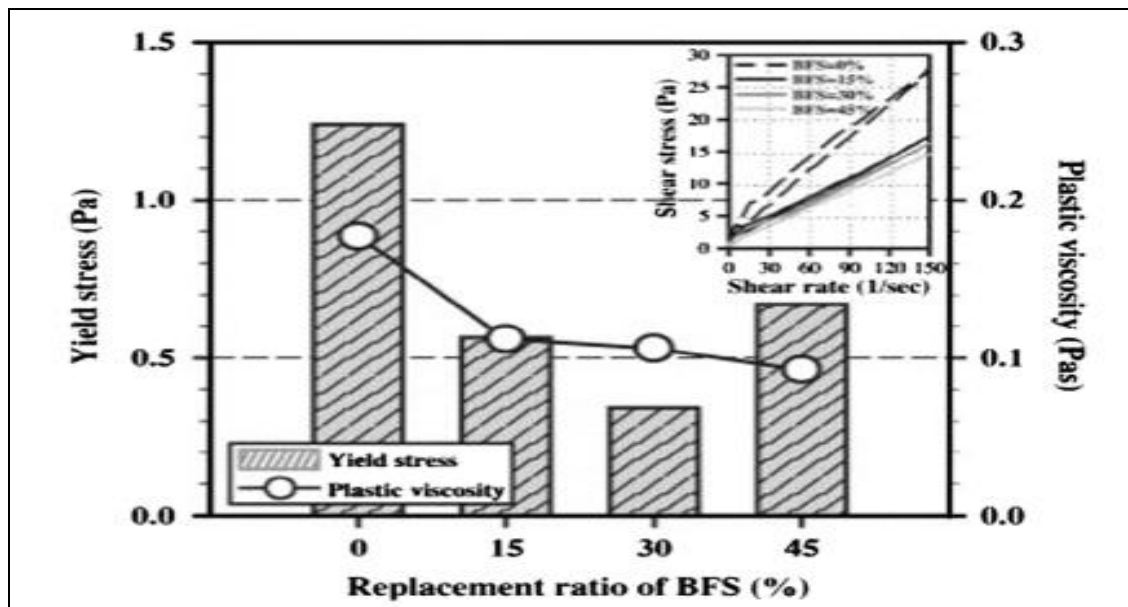


Figure 1.9 : Effet du taux de substitution de laitier sur les propriétés rhéologiques de la pâte de ciment [51].

Sethy et al. [53] ont trouvé que le remplacement de ciment par le laitier jusqu'à 90% contribue à diminuer la viscosité plastique du BAP, par conséquent, une augmentation du diamètre d'étalement (Figure 1.10), mais tous les mélanges présentent une valeur de seuil de cisaillement similaire proche de zéro.

Une autre étude menée par Nécira et al. [54] constatent que l'introduction de 30% à 40% en masse de liant du filler calcaire, pouzzolane naturel et laitier offre des formulations de BAP qui répondent aux critères requis par l'AFGC [26] et améliore de manière significative les propriétés rhéologiques du BAP.

Dans le cas des combinaisons binaire, ternaire et quaternaire des additions, Ahari et al. [55] ont montré que la combinaison binaire de la fumée de silice et laitier granulé a diminuée les valeurs de la viscosité plastique et du temps V-funnel en par comparaison avec du BAP de référence sans addition. Par contre Vejmelkova et al. [56] arrivent à conclure que pour des fluides newtoniens, le BAP au laitier a montré une viscosité typique plus élevée par rapport au BAP au métakaolin.

Des conclusions ont été tirées par Gunevisi et Gesoglu [57] qui ont trouvé que l'utilisation des ciments portland composés à base de pouzzolane et de calcaire a diminué le T_{50} et le $T_{V-Funnel}$ des BAPs par rapport au ciment portland artificiel notamment dans le cas où le laitier est utilisé avec des teneurs de 0 à 45% dans la composition du BAP.

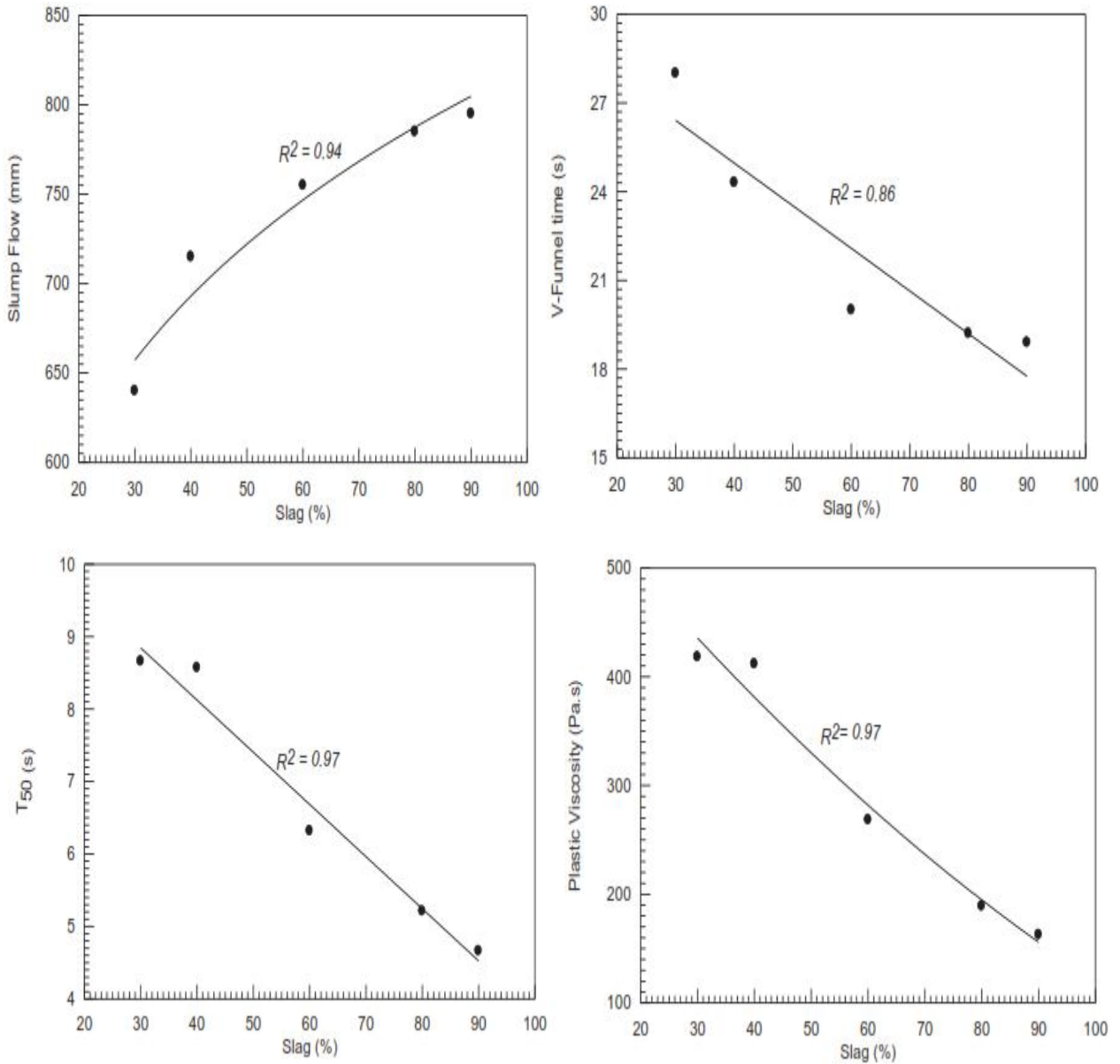


Figure 1.10 : Propriétés des BAP à l'état frais à base de laitier [53].

Boudchicha [58] a étudié l'effet du taux de substitution (de 10 à 50%) du ciment par du filler calcaire, laitier et de la pouzzolane sur l'amélioration des propriétés rhéologiques et mécaniques des BVs. Il affirme que le comportement rhéologique dépend de la nature, la quantité et la finesse des additions, indépendamment de la nature du ciment utilisé. Pour le laitier ces améliorations sont significatives à 20% du taux de substitution et une finesse équivalente à celle du ciment, permet de garantir ces améliorations. Avec un rapport constant E/C et un dosage constant de SP, Menadi et al. [59] ont affirmé que l'augmentation de la finesse du laitier de 350 m²/kg à 420 m²/kg a négativement affecté la déformabilité et la mobilité de BAP.

1.8 Influence des additions minérales sur les propriétés mécaniques des BAP

Les particularités de composition des BAP conduisent à étudier les différentes propriétés mécaniques de ces bétons et plus particulièrement les déformations instantanées et différées, supposées différentes de celles des BVs.

1.8.1 Résistance à la compression

La résistance en compression à 28 jours de 30 à 60 MPa ne pose pas de problèmes avec les BAP, il est d'ailleurs difficile d'obtenir des résistances faibles, du fait de la richesse en éléments fins du mélange et de la limitation du dosage en eau (pour des problèmes de ségrégation) [60]. D'autre part, le BAP possède une structure plus homogène que le BV, grâce notamment à une résistance à la ségrégation élevée. La structure d'un BAP est donc supposée être plus compacte et plus homogène que le BV, conférant au BAP une amélioration de résistance mécanique. Selon Klug et Holchemacher [61], les résistances mécaniques des BAP et des BVs sont similaires sous des conditions comparables, mais les BAP montrent des résistances plus élevées pour un même rapport Eau/Ciment. Domone [62] a montré que la résistance à la compression tend à être régie par le type et la proportion d'addition de poudre que par le rapport de Eau/Poudre (E/P).

Oner et Akyuz [63] montrent qu'à l'âge de 365 jours, la substitution de laitier d'environ de 55% de ciment semble être le niveau optimal pour la résistance à la compression souhaitée, au-delà de cette valeur l'effet de rapport de remplacement de laitier sera négligeable.

L'étude de Boukendakdji [29] montre que la résistance à la compression diminue avec l'augmentation de la teneur en laitier (10, 15, 20 et 25%) (Figure 1.11). Néanmoins, il faut souligner que l'incorporation de laitier au BAP réduit la résistance à la compression durant les premiers jours, cependant, cette résistance se développe à partir du vingt-huitième (28) jour jusqu'à 90 jours [29, 64 - 66]. Zhao et al. [47] ont constaté aussi une amélioration de la résistance en compression pour les BAP au laitier (jusqu'à 40%), après 90 jours de maturation en cure humide (Figure 1.12).

Dinakar et al. [67] ont montré que le développement de la résistance mécanique des mélanges de BAP à base de laitier avec une résistance à la compression allant de 30 à 100 MPa. Ils ont également signalé que des volumes élevés de laitier, jusqu'à 80%, peuvent être utilisés dans le développement de BAP. De même, des études expérimentales sur des BAP avec de laitier en volume élevé montrent que des résistances plus faibles telles que 20 et 30 MPa peuvent être facilement produites à un remplacement de laitier d'environ

80 à 90%, alors que des résistances élevées d'environ 60 à 100 MPa peuvent être développées avec 30 à 60% du laitier comme le montre dans la figure 1.13 [53].

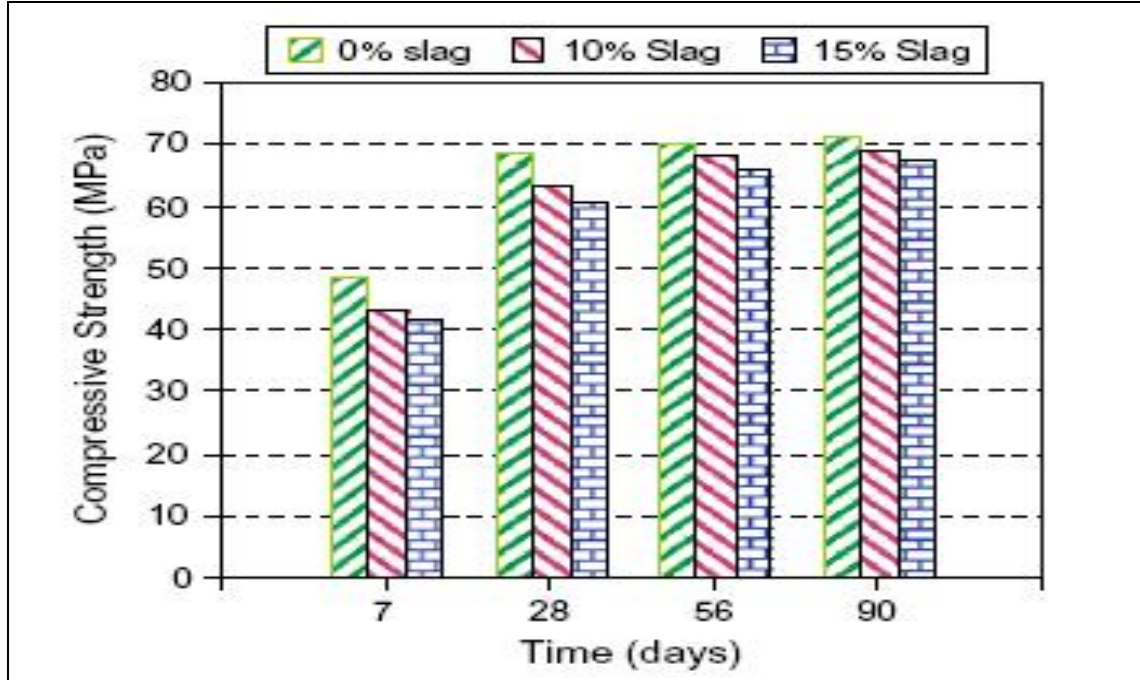


Figure 1.11 : Variation de la résistance à la compression des BAP avec l'âge [29].

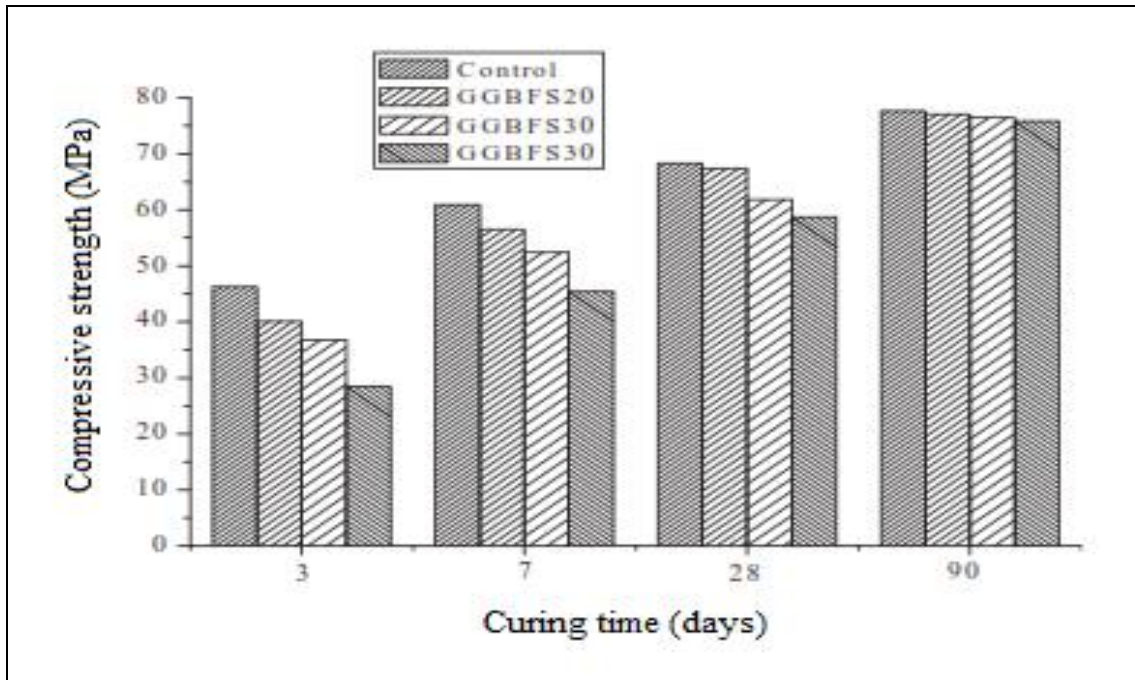


Figure 1.12 : Variation de la résistance à la compression des BAP à base de laitier en fonction de l'âge [47].

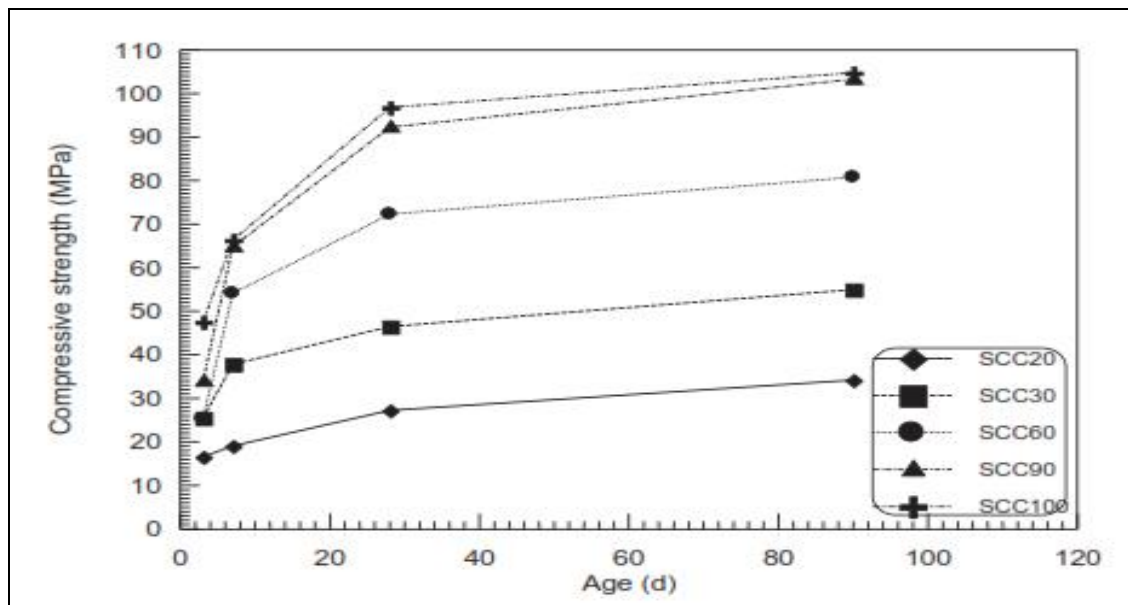


Figure 1.13 : Résistance à la compression des BAP an fonction de l'âge [53].

Menendez et al. [68] ont étudié le développement de la résistance des liants ternaires contenant des fillers calcaires et du laitier. Ils ont trouvé que la combinaison des fillers calcaire et du laitier de haut fourneau est complémentaire. Les fillers calcaires améliorent la résistance du ciment au jeune âge tandis que le laitier de haut fourneau améliore la résistance à long terme. Ils ont montré que le mélange de ciment ternaire offre un avantage par rapport aux ciments binaires et aux ciments portland sans ajouts. Ces auteurs ont trouvé une combinaison optimale renfermant 70% de ciment portland, 20% de laitier et 10% de filler calcaire.

Ali Boucetta [69] a montré que le fillers calcaires améliore les résistances mécaniques à court terme, ces dernières ayant tendance à se stabiliser au-delà de 28 jours. Le laitier et le verre réduisent la porosité parallèlement à l'augmentation de la durée de cure, et permettent ainsi d'obtenir de bien meilleures résistances à plus longues échéances, principalement par effet hydraulique et pouzzolanique, significatifs au-delà de 28 jours à cause d'une densification de la matrice cimentaire.

Ramanathan et al. [39] et Yahia et al. [70] ont révélé que les additions minérales ont la capacité d'assurer un bon remplissage des vides entre les particules de ciment de grande taille, et l'augmentation de la production d'hydrates secondaires par des réactions pouzzolaniques avec la chaux résultant de l'hydratation primaire ce qui améliore la résistance à la compression.

Les superplastifiants et les agents de viscosité ont des répercussions sur la résistance mécanique des bétons autoplaçants. Selon Felekoglu et al. [71], l'agent de viscosité diminue la résistance aux jeunes âges. Par contre, certains superplastifiants entraînent des effets secondaires comme le retard de la prise qui aboutit à l'augmentation du développement de la résistance mécanique au jeune âge [27].

Un autre élément influençant la résistance à la compression est le volume de la pâte. Turcry [22] ont montre que le volume de la pâte a un effet réel mais limité sur la résistance en compression. Ils ont observé une diminution de 12% de la résistance pour une augmentation de 57% du volume de pâte. De même, Pineaud [72] a constaté que le volume de la pâte a une faible influence sur la résistance en compression.

1.8.2 Résistance à la traction

La particularité des BAP peut entraîner des variations de résistance à la traction, qui peuvent être dues à la quantité des fines ou bien au volume des granulats. Felekoglu et al. [73] ont montré que les mélanges de BAP présentent des résistances aux tractions élevées comparées à celles des bétons traditionnels. Selon Klug et Holschemacher [61], la résistance à la traction des BAP est nettement supérieure à celle des BVs et peut aller jusqu'à 40% ce qui implique qu'il y a nécessité de revoir la section minimale de ferrailage.

Selon Guneyisi et Gesoglu [74] la variation de la résistance à la traction d'un béton contenant du laitier est similaire à celle d'un béton sans laitier. En général la résistance à la traction est en baisse avec l'augmentation de la quantité de laitier dans le mélange, exception est faite pour les dosages en laitier à 50 et 60% dans le cas de 90 jours de cure dans l'eau. Boukendakdji [75] a constaté aussi que la résistance à la traction diminue avec l'augmentation de la teneur en laitier jusqu'à 25% mais cette diminution est moins importante à 90 jours (Figure 1.14).

La microstructure de la pâte cimentaire et la porosité de l'auréole de transition sont fréquemment utilisées pour expliquer les variations ou les résultats de résistance à la traction obtenus. Pineaud [72] a suggéré que la qualité de l'interface pâte-granulats est meilleure dans les BAP et la faible proportion de granulats diminue le risque de propagation des premières fissures. Par conséquent, la résistance en traction des BAP est supérieure à celle des BV (de l'ordre de 10%).

Sivasundaram et Malhotra [76] ont étudié la variation de la résistance à la flexion des bétons avec des volumes élevés de laitier de 50% à 75%. Ils ont conclu que la résistance à la flexion à 14 jours des bétons à base de laitier plus élevées que celles des bétons témoins d'environ 8 MPa. Par contre, Khatib et Hibbert [77] ont étudié l'influence de laitier (0%, 40%, 60% et 80%) sur la résistance à la flexion du béton et ils démontrent que la résistance à la flexion du béton contenant 60% de laitier, est nettement plus élevée que le béton témoin, alors qu'une légère diminution à 40% et une diminution élevée à 80% de taux de substitution (Figure 1.15).

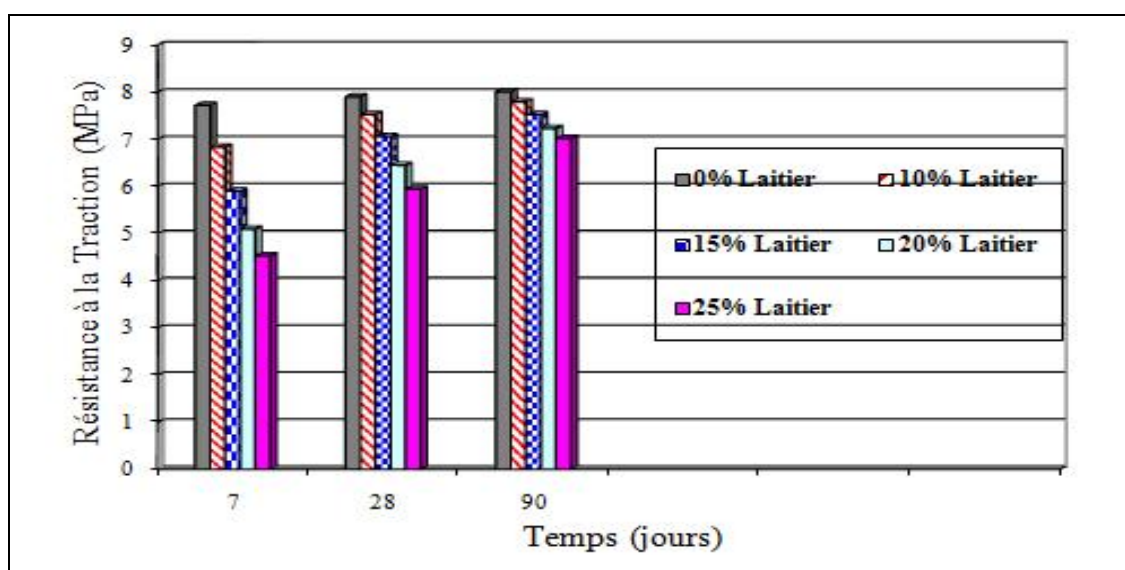


Figure 1.14 : Variation de la résistance à la traction en fonction du temps [75].

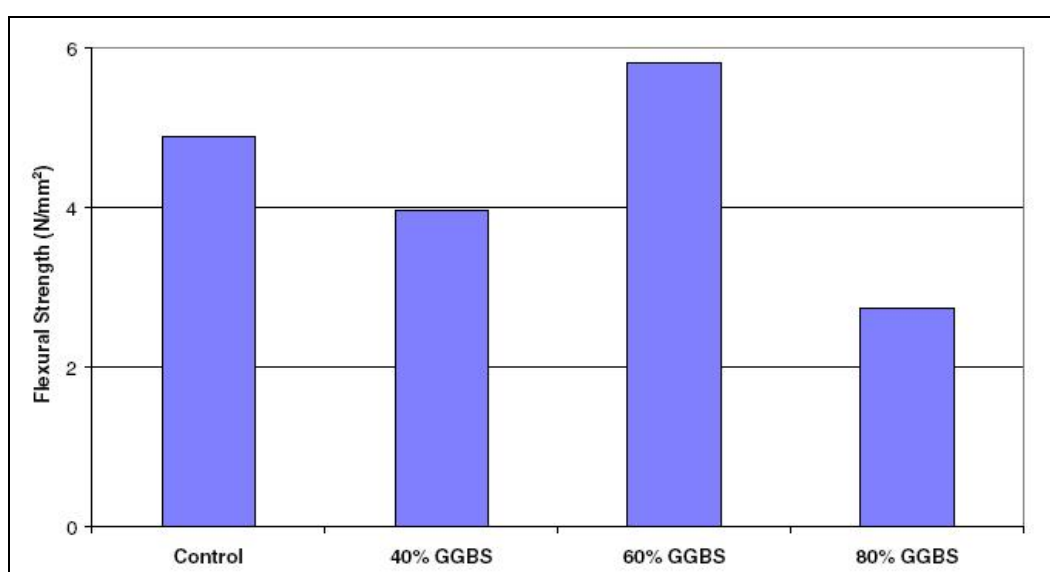


Figure 1.15 : Influence du laitier sur la résistance à la flexion [77].

Dans l'étude menée par Zhao et al. [47], visent à étudier l'effet de laitier sur la résistance à la traction des BAP incorporant différents taux de substitution 20, 30 et 40% et en maintenant le rapport E/C constante. Les résultats, présentés en figure 1.16, montrent une diminution significative de 11,63%, 16,30%, 40,30%, par rapport au béton témoin à l'âge de 3 jours. La même tendance pourrait également être trouvée de la résistance à la traction du BAP à diminuer avec l'augmentation du taux de remplacement du laitier aux périodes de durcissement de 7, 28 jours.

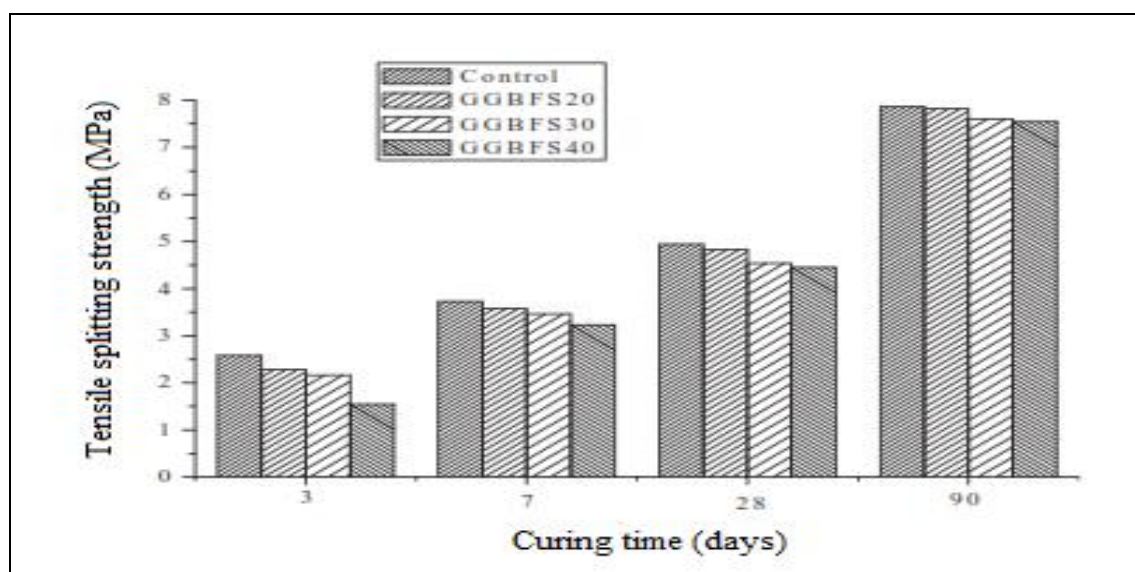


Figure 1.16 : La résistance à traction du BAP à base de laitier [47].

1.8.3 Module d'élasticité

Le module d'élasticité dépend à la fois des proportions et des modules des différentes phases constituant un béton. Or, un BAP est composé d'un volume de pâte important et de rapport G/S plus faible qu'un BV. Si on se réfère à la formule réglementaire, ($E_{ij} = 11000 \sqrt[3]{f_{cj}}$) le module d'élasticité est fonction de la résistance en compression des bétons. Donc, à résistance égale, un BAP à base de différentes additions minérales devrait avoir le même module qu'un BV. Or, Assié [78] a trouvé que, pour trois classes de résistance (20, 40, 60MPa), le module d'élasticité est équivalent entre BAP et BV. La même tendance a été constatée par autre chercheurs [73,79] que les mélanges de BAP présentent un module d'élasticité semble être très similaire à celui du béton traditionnel.

Domone [62] a montré que le module d'élasticité des BAP peut être plus faible jusqu'à 40% que celui correspondant aux BV et cela à des faibles valeurs de résistance en

compression (20 MPa) (Figure 1.17), mais cette différence décroît jusqu'au moins de 5% à des valeurs de résistance élevé (90 – 100 MPa).

Plusieurs études [47, 80, 81] ont menées sur l'influence de l'utilisation du laitier sur le module d'élasticité des BAP. Ils ont conclu que par rapport à la résistance à la compression, le module d'élasticité est moins sensible avec l'augmentation du remplacement du ciment par laitier (Figure 1.18). Ce résultat est attribué à la réduction de la porosité due à la formation de C-S-H par la réaction pouzzolanique, et en particulier à des âges plus avancés. Le module d'élasticité est significativement affecté par la porosité, avec une porosité inférieure conduisant à un module d'élasticité plus élevé [82].

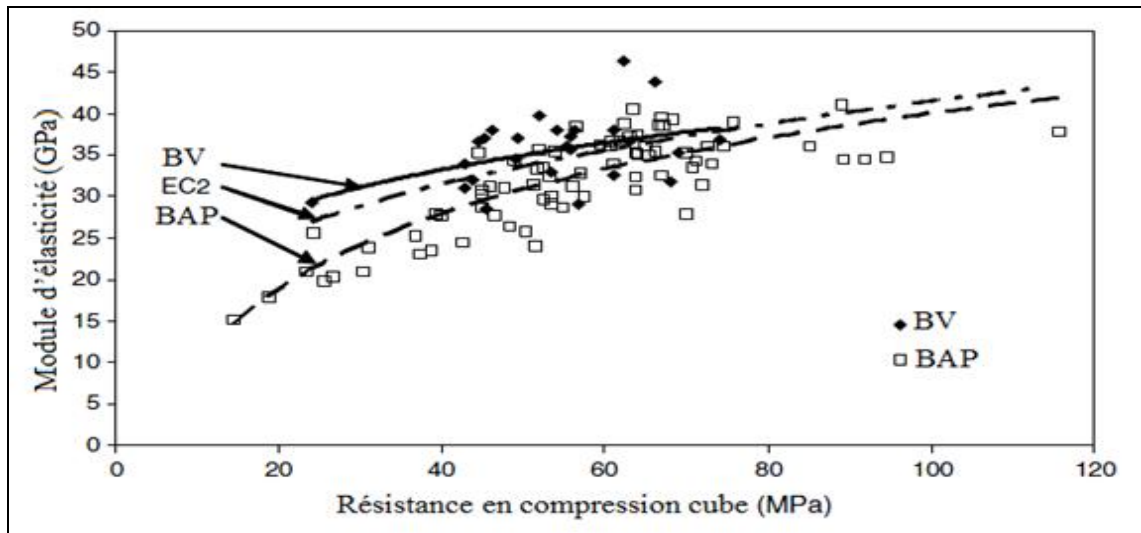


Figure 1.17 : Module d'élasticité en fonction de la résistance en compression [62].

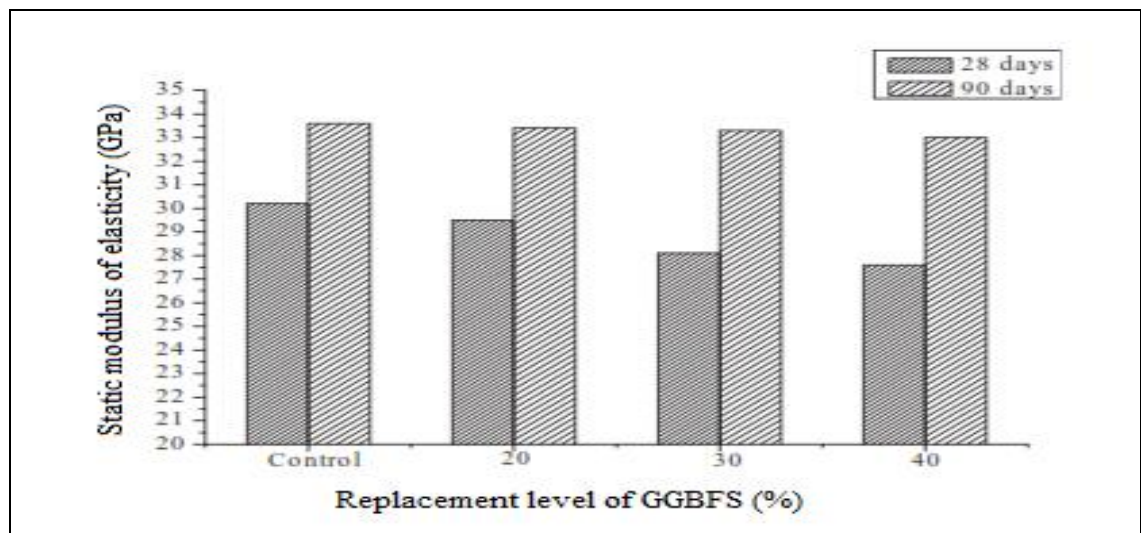


Figure 1.18 : L'effet de laitier sur le module d'élasticité des BAP [47].

Megat Johari et al. [38] ont étudié l'impact de la substitution du laitier par le ciment jusqu'à 60% sur le module d'élasticité des bétons à haute résistance. Dans cette étude, le module élastique statique du béton avec 0%, 20%, 40% et 60% de laitier est de l'ordre de 44,62, 45,10, 44,85 et 43,10 MPa respectivement. Les bétons contenant jusqu'à 60% de laitier présentent des valeurs de module d'élasticité égales ou légèrement supérieures à celles du béton témoin.

Comme pour la résistance à la compression, d'autres paramètres influencent le module d'élasticité. Turcry et al. [22] montrent une diminution du module des BAP avec l'augmentation du volume de pâte. Mais, selon ces mêmes auteurs, l'influence du volume sur le module est négligeable. En effet, Pineaud [72] a observé des valeurs de déformations à la rupture très proches pour les BAP et les BV. Parallèlement au volume de pâte, il est observé une diminution du module avec l'augmentation du rapport E/L.

1.8.4 Retrait

Le retrait est caractérisé par une déformation du béton (diminution du volume) sans aucun chargement extérieur. Il se décompose en quatre formes distinctes : le retrait thermique, le retrait endogène, le retrait de dessiccation et le retrait plastique.

À la vue du volume de pâte plus important, les BAP sont susceptibles d'être plus déformable que les bétons ordinaires. Les données de la littérature dans ce domaine montrent bien une tendance d'un retrait total plus important pour les BAP.

a/ Retrait thermique

Le dégagement de chaleur par les réactions d'hydratation (exothermiques) augmente la température du béton, cette élévation de température provoque une dilatation pendant que le béton est encore déformable. Lorsque le refroidissement débute, le béton durci se contracte, alors que la prise a été déjà faite. La déformation étant limitée par la pâte durcie, les contraintes de traction se développent. Cette dernière provoque le retrait thermique.

b/ Retrait endogène

Le retrait endogène, dû à l'hydratation du ciment. Cette réaction se poursuit après la prise et s'accompagne d'une diminution de volume. Le retrait endogène ou d'autodessiccation, est la conséquence macroscopique de cette contraction d'origine chimique. L'évolution des réactions d'hydratation, à l'origine du retrait endogène, dépend de la quantité d'eau disponible dans le béton pour faire réagir les différents réactifs. Par conséquent,

l'amplitude de ce retrait chimique est directement liée au rapport E/C (autrement dit à la résistance mécanique). Le retrait endogène d'un béton est d'autant plus important que son rapport E/C est faible (ou sa résistance en compression élevée). Ce phénomène existe pour tout type de béton, en particulier les BAP qui ne se distinguent pas des BVs sur ce point (Figure 1.19). De plus, pour des bétons à faible rapport E/C, le retrait endogène des BAP est comparable à celui des BVs [83].

Les ajouts cimentaires ont un effet considérable sur le retrait endogène. Le laitier ralentit la cinétique d'hydratation, densifie la microstructure cimentaire et affine la porosité capillaire. Et par conséquent la diminution de la taille des pores engendrerait une dépression capillaire plus intense et pourrait être à l'origine du retrait endogène plus important des bétons contenant des laitiers de haut fourneau [84]. Par ailleurs, Bouasker [85] a étudié l'effet du laitier sur l'évolution du retrait. L'auteur a montré que le retrait endogène des pâtes de ciment à base de ciment portland est plus important pendant les 60 premières heures. Après cet âge, il a été constaté que le retrait endogène des pâtes à base de ciment au laitier est plus important comparé avec celui du ciment portland.

Lee et al. [86] ont présenté des résultats expérimentaux sur le retrait endogène du béton avec le dosage de E/C allant de 0,27 à 0,42 et le pourcentage de laitier de haut fourneau dans la fourchette de 0% à 50% en masse de ciment. Le BAP fabriqué avec le laitier a montré plus grand retrait endogène que le béton ordinaire sans laitier. L'augmentation de retrait endogène varié en fonction du dosage de laitier pour le même E/C.

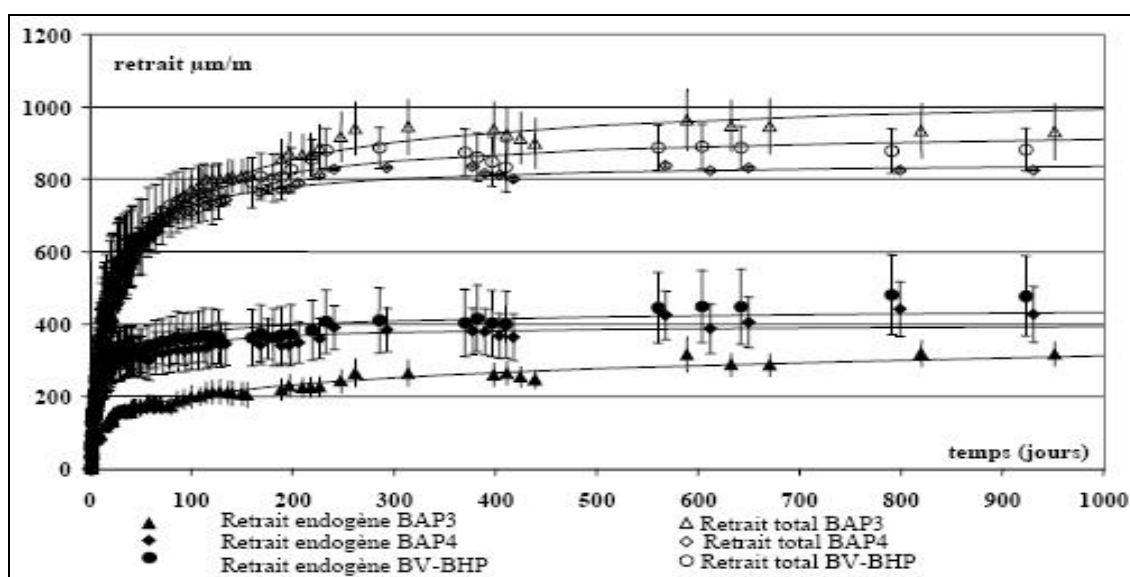


Figure 1.19 : Retraits endogène et totale d'un BV et des BAP de résistance 60 MPa [83].

Le retrait endogène augmente aussi avec la proportion de pâte. L'évolution du retrait en fonction du volume de pâte ne semble néanmoins pas linéaire. Cela peut-être aussi la conséquence des variations de la structure du squelette [22].

c/ Retrait plastique

Le retrait plastique est le retrait avant la prise du ciment, à un moment où la pâte est encore déformable. Il se produit lorsque le flux d'eau évaporée au niveau de la surface est supérieur au flux d'eau ressuée.

Turcry [22] a étudié les différences potentielles de comportement entre BAP et BO. Les résultats des mesures du retrait plastique sont présentés sur la figure 1.20. L'amplitude maximale du retrait plastique des BAP est environ cinq fois supérieure à celle des bétons ordinaires. Ces différences semblent pouvoir s'expliquer par deux paramètres de formulation qui changent d'un type de béton à l'autre : un rapport eau/fines (E/F) plus faible pour les BAP et un dosage en superplastifiant des BAP plus fort qui retarde leur prise. Par conséquent, pour minimiser ce retrait plastique, il est préférable de choisir une addition dont la demande en eau est faible afin de limiter le dosage en superplastifiant.

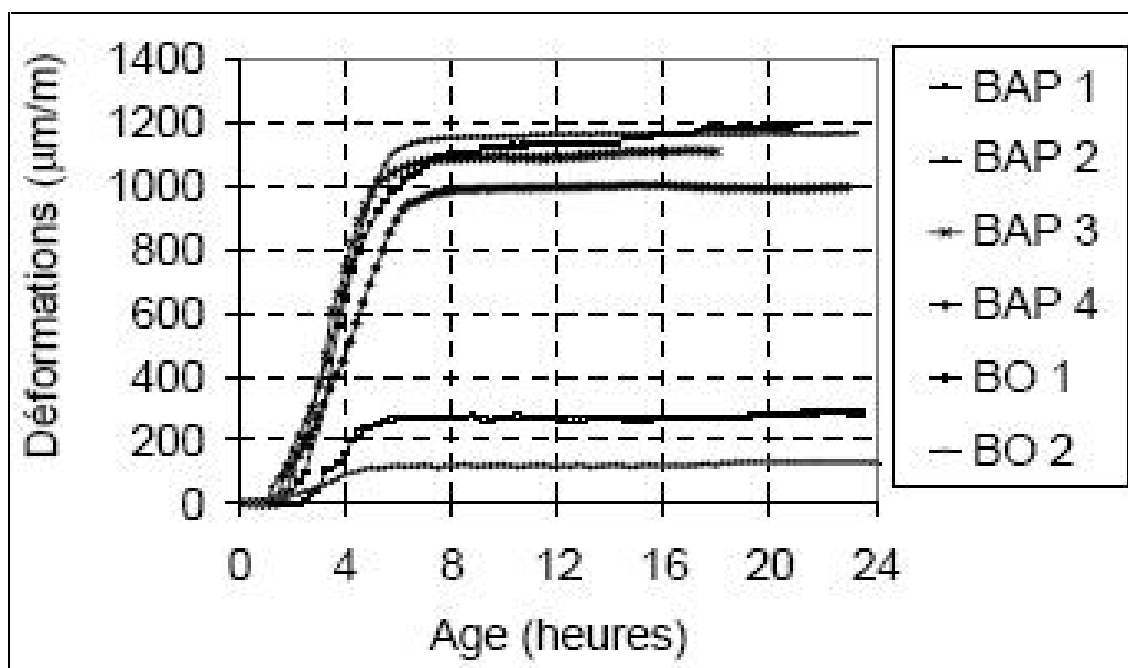


Figure 1.20 : Retrait plastique des BAP et de BO [22].

d/ Retrait de séchage (dessiccation)

Le retrait de séchage, ou de dessiccation, est lié au séchage progressif de la pâte de ciment. L'eau contenue dans les pores de la pâte de ciment (l'eau libre) s'évapore vers le milieu ambiant, il survient lorsqu'on abaisse le taux d'humidité interne du béton. C'est la forme la plus courante et la plus visible du retrait.

Le retrait de séchage est d'autant plus important que le rapport E/C est grand mais paraît d'autant plus faible lorsque le rapport G/S est élevé. Il augmente aussi avec le volume de pâte et il n'évolue d'ailleurs plus après 50 jours pour le mortier avec moins de pâte [22].

El-Cabib et Syed [87] ont étudié le retrait du BAP contenant un volume élevé de laitier, et ils ont conclu que le remplacement de 70% du ciment par laitier diminue plus de 45% de retrait du béton par rapport au béton de référence.

Récemment, Zhao et al. [47] n'ont trouvé aucune différence entre le retrait de séchage du BAP témoin (sans laitier) et celui de BAP avec laitier à 4 jours. Cependant, à 56 jours les mélanges des BAP contient 20%, 30%, 40% de laitier présentent un retrait de séchage est 0,0441%, 0,0416%, 0,0394%. De plus, les échantillons de BAP préparés par laitier présentent un retrait de séchage inférieur à celui du BAP témoin, plus le niveau de remplacement de laitier élevé, plus valeur de retrait de séchage du BAP faible (Figure 1.21). Ceci pourrait être attribué à ce fait que, l'utilisation de laitier dans le BAP a abaissé le taux d'hydratation du ciment et augmenté la porosité du BAP [88].

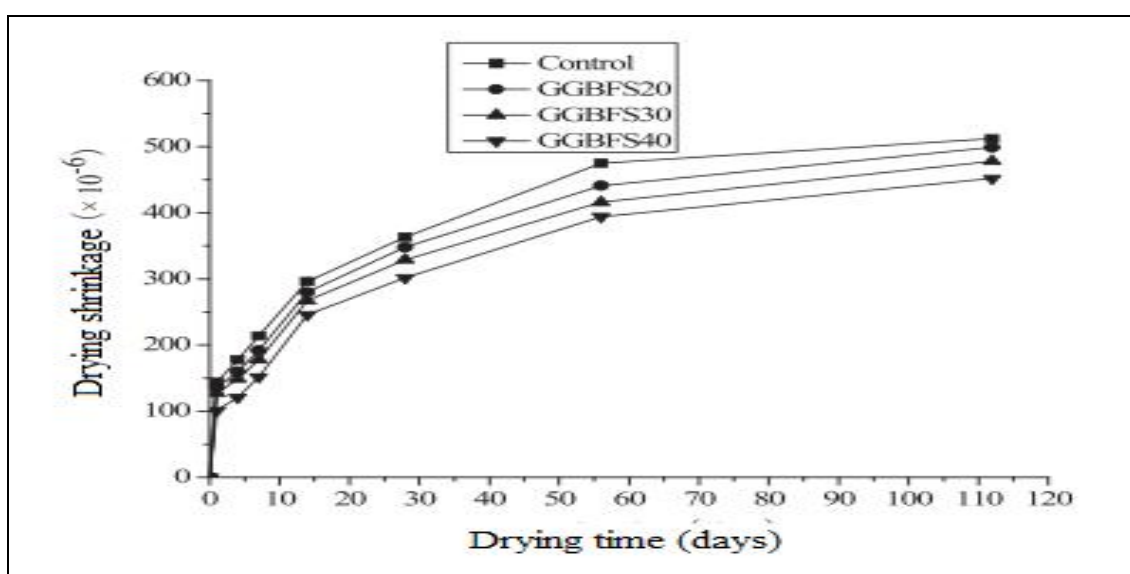


Figure 1.21 : Influence de laitier sur le retrait de séchage des BAP [47].

Güneyisi et al. [89] ont montré que la substitution du ciment par les cendres volantes, le laitier ou le métakaolin réduit le retrait de séchage des BAP alors que l'utilisation de la fumée de silice avec le ciment augmente graduellement le retrait. En outre, plus le niveau de substitution du ciment par les cendres volantes, le laitier ou le métakaolin est grand plus la valeur de retrait est faible. L'effet négatif de la fumée de silice sur le retrait de séchage des BAP a été éliminé dans le cas d'utilisation des liants tertiaires et quaternaires.

1.9 Effets des ajouts minéraux sur la durabilité des bétons autoplaçants

Les trois principaux fluides qui peuvent pénétrer dans le béton et mettre en cause sa durabilité sont : l'eau, pure ou contenant des ions agressifs, le gaz carbonique et l'oxygène. Ils peuvent se déplacer au travers du béton de différentes façons, mais tous les mouvements dépendent principalement de la structure de la pâte de ciment hydraté. La durabilité du béton dépend largement de la facilité avec laquelle les fluides, à la fois liquides et gaz, peuvent pénétrer et se déplacer à l'intérieur du béton sous l'action d'un gradient de pression c'est ce que l'on appelle communément la perméabilité du béton. Cependant, le mouvement des différents fluides dans le béton ne se fait pas seulement par écoulement à travers le réseaux poreux, mais aussi par des mécanismes de diffusion et d'absorption, donc la prise en compte de la durabilité d'un ouvrage est indispensable pour garantir une durée de service et conserver les fonctions d'usage.

La durabilité en général est relative aux paramètres de composition en termes de compacité et de nature chimique du liant. La durabilité est une propriété qui a été relativement peu étudiée pour les BAP jusqu'à présent. Les données de la littérature dans ce domaine concernent la microstructure des bétons autoplaçants, la perméabilité, la migration des ions chlore, l'absorption d'eau et la carbonatation.

1.9.1 Porosité

La porosité est définie comme étant le volume total des vides contenus dans le béton pour 1 m³ de matériau. Cette porosité augmente avec l'augmentation du rapport E/C et est en général comprise entre 11 et 18%. Les dimensions caractéristiques des pores vont d'une dizaine de nanomètres au millimètre. Ils peuvent être remplis d'air ou d'eau libre suivant la teneur en eau libre du béton. Cette teneur en eau libre désigne l'eau présente dans les vides du béton et ne participant pas à l'hydratation du ciment. On recherche particulièrement une faible porosité lors de la formulation du béton, qui assure une meilleure résistance mécanique du béton. La porosité du béton dépend du rapport E/C, un rapport E/C élevé

induisant une plus forte porosité, mais également des conditions de cure ; l'hygrométrie doit être maintenue élevée pendant la cure afin d'assurer la meilleure hydratation possible du ciment, de même une augmentation de la durée de cure diminue le diamètre moyen des pores [90].

Le rapport du RILEM [91] révèle qu'en raison de la vibration, dans le cas d'un BV, il existe une porosité plus élevée dans la zone de transition inter-faciale (ITZ : interfacial transition zone). La raison de cette porosité plus élevée dans l'ITZ lorsque le béton a été vibré est supposée être l'accumulation de fluide interstitiel. Cet effet néfaste n'est pas présent dans le BAP, car il n'est pas soumis à des vibrations. Les résultats de certaines études montrent que la structure des pores dans le BAP, y compris le volume total des pores, la distribution et le diamètre des pores, est très similaire à BHP. Par rapport à un BV, la microstructure du BAP est signalé à être plus dense. Par ailleurs, en particulier le degré d'hydratation et le rapport E/C, en combinaison avec la quantité d'eau influencent fortement la structure des pores. Les produits d'hydratation se remplissent de plus en plus d'espace lorsque le degré d'hydratation augmente. Les dimensions des pores diminuent, ce qui induit une connectivité inférieure. Un faible rapport E/C donne une porosité capillaire et une connectivité inférieure. En général, le BAP a une meilleure ITZ par rapport au BV. Toutefois, un rapport plus élevé E/C augmente l'ampleur et la porosité de l'ITZ.

Jiang [92] a montré que la porosité totale des mortiers à base de ciments au laitier est plus élevée que celle des mortiers fabriqués avec un ciment sans ajout. Cependant, il a trouvé une répartition de la taille des pores plus étroite et plus fine dans les mortiers à base de ciments au laitier. Selon ce chercheur, l'hydratation du laitier au jeune âge est très lente comparée à celle du clinker, les hydrates formés sont principalement des sulfo-aluminates primaires qui se présentent en aiguilles dispersées, laissant des vides accessibles. A long terme, le laitier est activé par les Ca(OH)_2 provenant de l'hydratation du clinker et forme le gel de CSH qui se longe dans la structure formée par les aiguilles d'ettringite. Il en dérive une diminution du volume des pores capillaires, ainsi qu'une structure de pore plus fine que celle existante dans le ciment portland ordinaire.

Bouikni et al. [93] ont analysé la structure poreuse des bétons avec 50 et 65% de laitier. Ils ont constaté une augmentation de la porosité totale avec l'augmentation du taux de laitier. Cette augmentation est plus prononcée pour les bétons au laitier conservés à l'air libre aux conditions du laboratoire.

1.9.2 Perméabilité

La perméabilité de la pâte de ciment hydraté durci est liée à la nature du réseau poreux à l'intérieur même de la pâte de ciment, mais aussi de la zone voisine de l'interface entre la pâte de ciment et les granulats. La perméabilité du béton n'est pas une fonction simple de sa porosité, mais dépend aussi de la dimension, de la distribution, de la forme, de la sinuosité et de la continuité des pores.

La dimension des pores dans le béton est directement liée au rapport E/C de la formulation étudiée. En effet, lorsque le rapport E/C augmente, la porosité devient plus grande et la structure poreuse plus grossière. Les transferts de matières de l'extérieur vers l'intérieur du béton sont alors facilités et la perméabilité du matériau s'amplifie [94].

Les spécificités de composition des BAP ne semblent pas permettre de tirer un premier commentaire quant à une perméabilité différente de celle des BVs. Le volume de pâte plus important peut a priori être un handicap pour ces bétons mais l'utilisation d'addition minérale est susceptible d'améliorer cette propriété : la densification de la matrice cimentaire qu'elle engendre peut éventuellement diminuer la perméabilité du béton [95].

Une différence significative est déterminée par Boel et al. [96] pour la perméabilité apparente de gaz entre le BAP et BV. La différence pourrait être expliquée par la différence en volume des pores des bétons. Il est possible de réduire le transport dans le béton en remplaçant le filler calcaire par des cendres volantes, en réduisant le rapport E/C, ou en utilisant un ciment laitier de haut-fourneau au lieu du ciment Portland.

D'après Hadj sadok [97] la perméabilité à l'oxygène des mortiers à 90 jours, tandis qu'un taux de substitution de 50% de laitier conduit à une augmentation de la perméabilité à l'oxygène, un taux de 30% de laitier ne l'affecte que légèrement. Au contraire, au long terme (360 jours), les mortiers au laitier (particulièrement avec 50%) sont plus imperméables à l'oxygène. Pour les bétons avec un rapport E/L de 0,65, la perméabilité à l'eau et au gaz augmentent avec l'augmentation du taux de laitier dans le béton, particulièrement à 28 jours. Néanmoins, à 90 jours, cet effet est moins visible. D'autre part, les bétons avec 15 et 30 % de laitier et pour un rapport E/L de 0,42 présentent une perméabilité à l'eau et au gaz semblable à celle du béton à base de CEM I, une perméabilité légèrement plus faible a été constatée pour le béton avec 50% de laitier. Selon les travaux de Shi et al. [98] sur des BHP, avec un faible rapport E/C, la perméabilité au gaz d'azote semble être peu influencée par la présence du laitier (Figure 1.22).

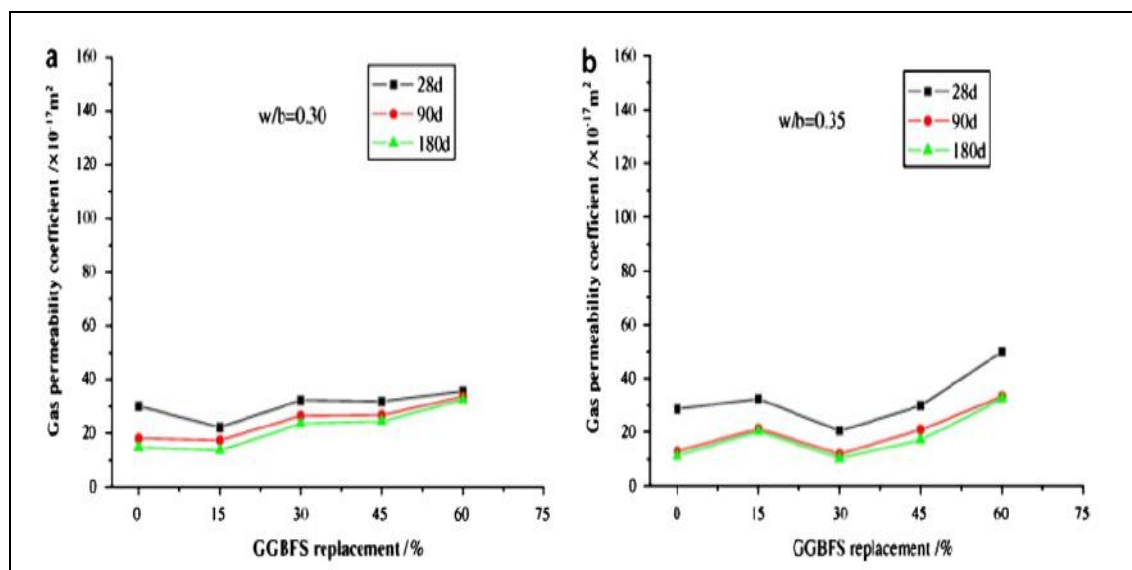


Figure 1.22 : Influence du laitier et E/C sur la perméabilité au gaz des BHP [98].

L'optimum est obtenu pour un taux de laitier de 30%. Le même effet a été constaté pour des rapports E/C de 0,30 et de 0,35. Les auteurs expliquent cette variation par le fait qu'un BHP est plus dense et son hydratation est plus lente que celle d'un béton normal; ainsi l'effet du remplissage et l'effet pouzzolanique du laitier ne sont pas aussi efficaces que dans un béton ordinaire.

Guneyisi et Gesoglu [99] ont montré que l'utilisation de laitier a diminué la profondeur de pénétration de l'eau de 26 mm (béton de référence) à 14 mm. Il n'y avait pas de variation significative entre la profondeur de pénétration de l'eau des bétons contenant différents taux de remplacement du laitier. La profondeur de pénétration de l'eau est de 15 mm, 13 mm et 14 mm a été surveillée en utilisant respectivement 20%, 40% et 60% de laitier.

1.9.3 Diffusion des ions chlore

Les ions chlorures constituent un facteur important de risque pour le béton armé : ils pénètrent, en effet, dans le béton et peuvent provoquer la corrosion des armatures. Ces chlorures, peuvent provenir de diverses sources (sels fondants, eau de mer, nappe phréatique, eaux industrielles et des granulats contaminés ou d'adjuvants contenant des chlorures).

Dans les conditions normales, les ions chlorures se retrouvent en quantité suffisante (concentration minimale) dans l'eau interstitielle du béton, ils engendrent une diminution du pH. Au voisinage des armatures en acier, cette diminution de pH détruit

progressivement la couche protectrice des armatures. Il y a dépassivation de l'acier et le phénomène de corrosion peut alors commencer.

Dans l'étude de Guneyisi et Gesoglu [74], les BHP incorporant différents taux de substitution de ciment par laitier à des quantités variables de 50 à 80% avec un incrément de 10% et en maintenant le rapport E/C constant. Les résultats ont montré que les bétons avec laitier avaient une perméabilité aux ions chlorure nettement inférieure à celle des bétons témoin, indépendamment des conditions de cure et de l'âge de l'essai. Les bétons contenant plus de 50% de laitier ont montré des valeurs considérablement réduites les charges des ions chlorure. Par exemple, à des taux de remplacement de 70% et 80% de laitier et à 90 jours les bétons avaient une valeur de charge inférieure à 1000 Coulombs (pour le béton témoin, cette valeur était de 3750 Coulombs). Ces bétons peuvent être définis comme d'excellents bétons selon la norme ASTM C 1202 [100], en termes de pénétration des ions chlorures. Ce résultat est expliqué par la structure plus dense que présente le béton avec un pourcentage élevé de laitier.

D'autre étude menée par Gesoglu et al. [99], le laitier et les cendres volantes ont été remplacés par le ciment jusqu'à 60% avec un taux d'incrément de 20% et la fumée de silice a été remplacée jusqu'à 15% avec un incrément de 5%. Ils ont conclu que les mélanges des BAP sans laitier présentent des charges électriques totales élevées (environ 2065 Coulombs) et par conséquent une faible résistance vis-à-vis de la pénétration des ions chlorures. Cependant, avec l'utilisation de laitier de 20%, 40% et 60% dans le BAP diminué la charge électrique totale de 2065 à 1053, de 2065 à 403 et de 2065 à 282 Coulombs, respectivement.

Hadj sadok [97] a montré qu'après 90 jours de cure humide, 30% de laitier réduit le temps de passage des chlorures, mais en comparaison avec le mortier de référence, on peut voir qu'il n'y a pas une grande différence dans les coefficients de diffusion. Toutefois, 50% de laitier conduit à une meilleure perméabilité aux ions chlorure, avec un temps de passage important et un faible taux de diffusion. L'augmentation de la période de cure initiale, conduit à une diminution de la diffusion dans les mortiers au laitier.

Chimiquement, il résiste mieux tant à l'action destructrice des sulfates, qu'à la dissolution de la chaux par les eaux pures ou chargées de certains sels, ainsi que par celles contenant du gaz carbonique agressif. Les avantages de la substitution du ciment par du laitier sont également confirmés par d'autres études sur des pâtes de ciment portland pur et de ciment

portland avec 33, 50 et 67% de laitier (à E/C = 0,55). Ils ont constaté qu'une augmentation de la quantité de laitier conduit à une diminution du coefficient de diffusion [101].

Récemment, Zhao et al. [47] ont mesuré le coefficient de diffusion des ions chlorures de BAP à 28 jours avec cendre volante et laitier à différents pourcentages 20%, 30%, 40%. Comme le montre la figure 1.23, le coefficient de diffusion diminue avec l'augmentation du taux de laitier. Il indique que la présence de laitier peut être plus efficace pour empêcher la diffusion de l'ion chlorure dans le BAP. De plus, à un niveau de remplacement donné, les échantillons de BAP avec laitier avaient un coefficient de diffusion d'ions chlorure inférieur à ceux avec cendre volante. La faible diffusion des chlorures dans les bétons au laitier a été expliquée par le fait que les hydrates (CSH additionnel) formés par l'hydratation du laitier, contribuent, non seulement à remplir les pores capillaires, mais également à réduire la connectivité de ces pores et augmenter ainsi la tortuosité. Par conséquent, le chemin de diffusion des ions chlorures sera allongé [102]. Cela est conforme avec les travaux d'autres chercheurs [103], qui ont constaté une augmentation proportionnelle de la diffusion des chlorures avec le diamètre moyen des pores des bétons, avec et sans laitier, indépendamment du rapport de E/C.

Dans le même contexte, Yahiaoui et al. [66] ont étudié les propriétés de durabilité du BAP préparé par 15% et 25% de laitier substitué par ciment en poids. Les auteurs ont observé une tendance à la réduction de la pénétration de l'ion chlorure avec l'augmentation de laitier, et les échantillons exposés à l'air libre présentent la plus forte pénétration d'ions chlorure.

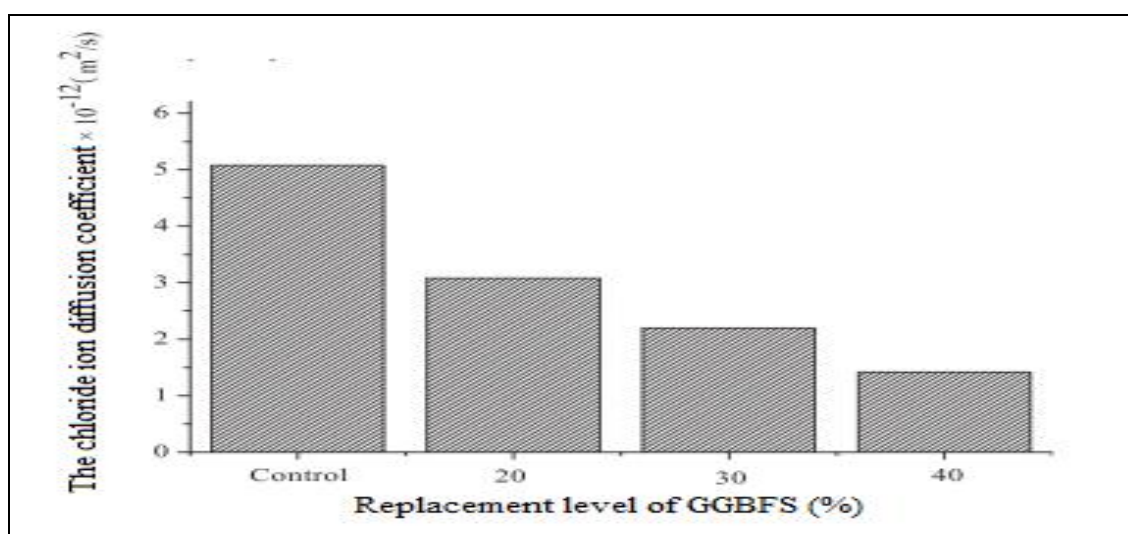


Figure 1.23 : Diffusion des ions chlorures dans les BAP au laitier [47].

Divsholi et al. [104] ont démontré que le remplacement partiel du laitier par du ciment portland réduit significativement la pénétration des ions chlorures. La figure 1.24 révèle qu'un taux de remplacement de 50% de laitier entraîne une réduction significative de la charge totale passant à travers le béton. Duan et al. [105] ont rapporté que le coefficient de diffusion des ions chlorure le plus faible pour les mélanges de béton contenant du laitier et du métakaolin pour toutes les périodes de durcissement. De plus, pour un taux de remplacement de 10% de MK et 10% de laitier dans le béton montre une résistance significative contre la pénétration des ions de chlorure (Figure 1.25).

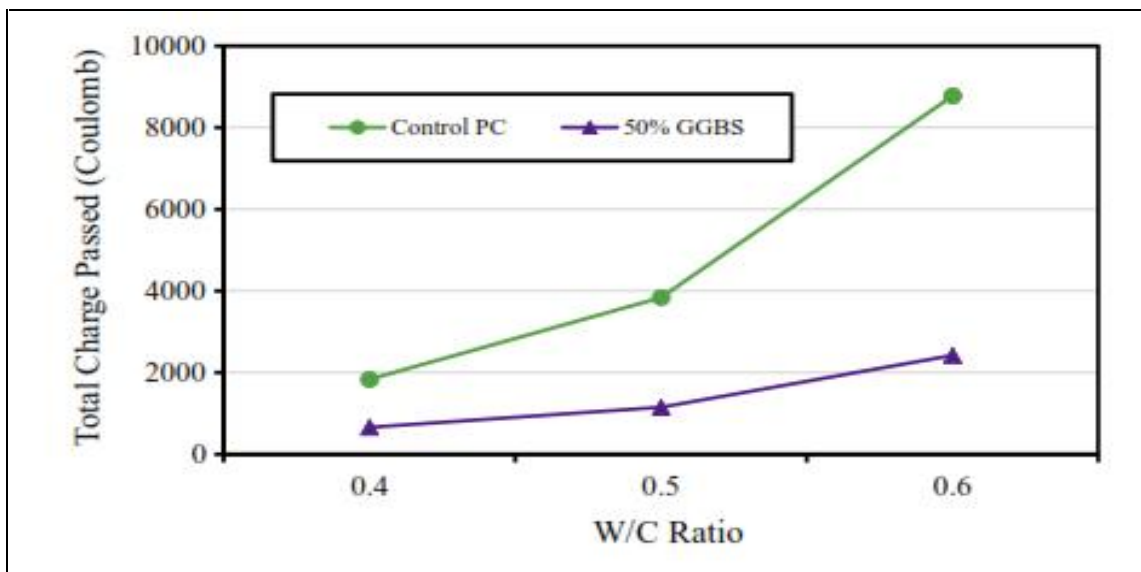


Figure 1.24 : Effet de laitier et le rapport E/C sur le béton à 42 jours [104].

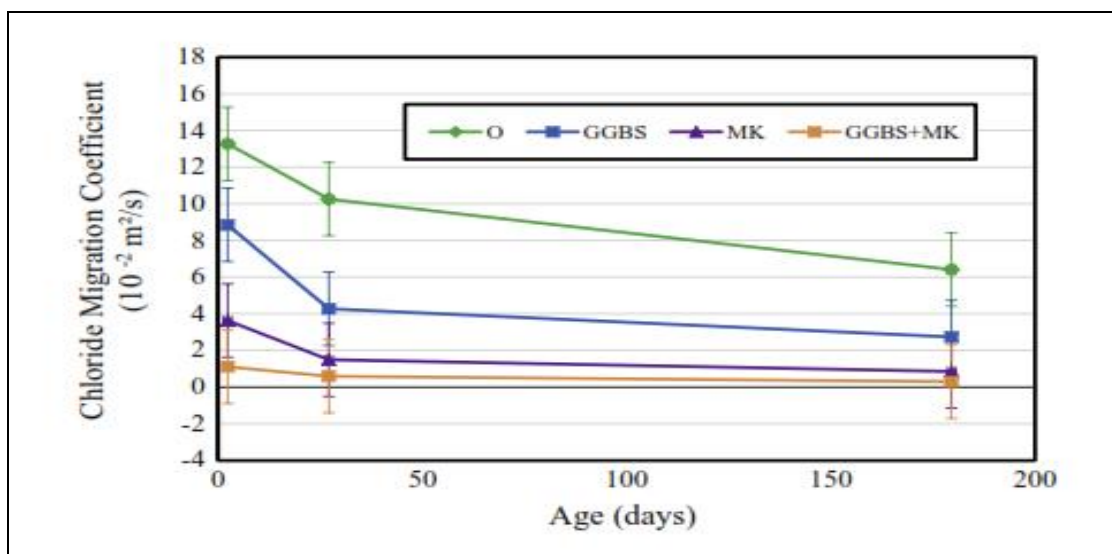


Figure 1.25 : Effet de laitier et métakaolin sur le coefficient de diffusion des ions chlorures [105].

1.9.4 Absorption capillaire

L'absorption est le résultat des mouvements capillaires dans les pores du béton qui sont ouverts sur le milieu ambiant. L'absorption d'eau à l'intérieur du béton sec dépend de la porosité effective du béton et la vitesse d'absorption par remontée capillaire [90].

Selon Guneyisi et Gesoglu [74], les caractéristiques de l'absorption d'eau du béton diminuent avec l'augmentation du dosage en laitier indépendamment des conditions de cure et de l'âge. Par contre, les différences dans ces caractéristiques, entre le béton avec et sans laitier deviennent plus significatives à cause de la méthode de cure après 28 jours et sont remarquablement plus faible pour le béton au laitier.

Dans l'étude de Hadj sadok [97] pour les bétons avec un rapport E/L de 0,65, l'absorption d'eau par capillarité, augmente avec l'augmentation du taux de laitier dans le béton, particulièrement à 28 jours. Néanmoins, à 90 jours, cet effet est moins visible. Par contre, pour un rapport E/L de 0,42, le coefficient d'absorption d'eau reste similaire pour tous les bétons après 28 jours de maturation. Une légère diminution est toutefois observée pour les bétons au laitier à 90 jours. D'autre part, l'absorption capillaire et le taux de saturation sont améliorés par la présence du laitier, notamment, pour un taux de 50% de substitution.

Adam et al. [106] ont étudié les propriétés de durabilité du béton préparé par 30%, 50% et 70% de laitier substitué par ciment en poids. Les auteurs ont observé une tendance à la réduction des valeurs de sorptivité pour les échantillons de béton à base de laitier (Figure 1.26).

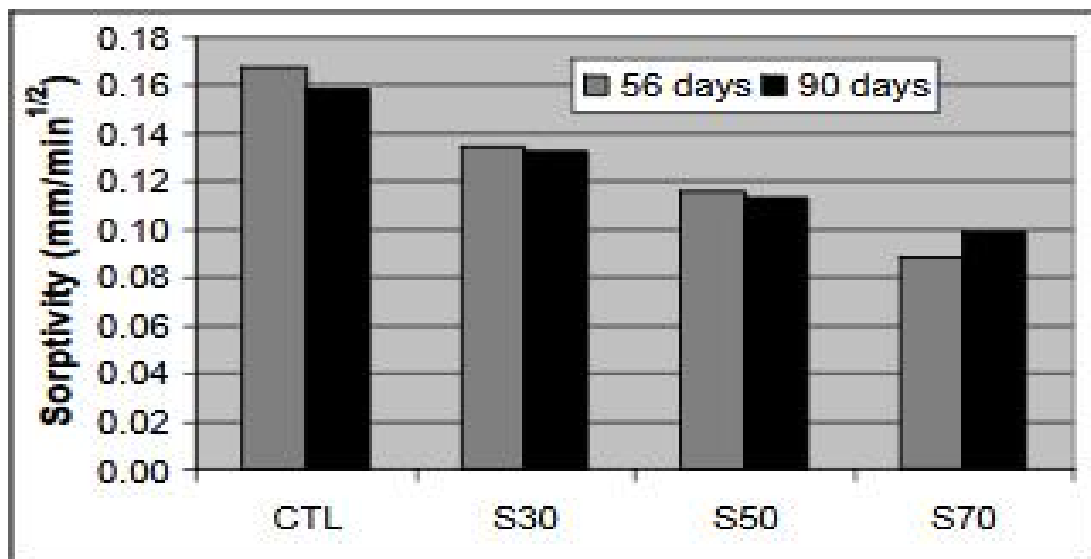
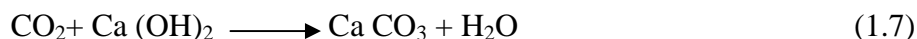


Figure 1.26 : La sorptivité du béton contenant de laitier [106].

1.9.5 Carbonatation

L'air contient du CO₂ qui, en présence d'humidité, réagit avec le ciment hydraté. L'action du CO₂ se manifeste même à de faibles concentrations comme celles que l'on retrouve dans l'air en milieu rural, où la teneur en CO₂ est d'environ 0,03% en volume d'air.

Lorsque le dioxyde de carbone se déplace à travers le réseau poreux dans la pâte de ciment durci, en présence d'humidité, la réaction suivante se produit :



L'un des effets de cette réaction est le retrait de carbonatation. En ce qui concerne la durabilité, l'importance de la carbonatation réside dans le fait qu'elle réduit le pH de la solution interstitielle dans la pâte durci de ciment Portland qui passe d'une valeur de l'ordre de 12,6 à 13,5 à une valeur d'environ 9. Si ce front de carbonatation progresse jusqu'à la surface des armatures, la couche protectrice de passivation des aciers (nécessitant un pH élevé) disparaît et la corrosion peut se produire, à condition que l'oxygène et l'humidité nécessaire à la corrosion soient présents. Pour cette raison, il est important de connaître la profondeur de carbonatation.

La carbonatation peut avoir quelques effets positifs, puisque la CaCO₃ occupe un volume plus important que le Ca(OH)₂ qu'il remplace, la porosité du béton carbonaté est réduite. De plus l'eau libérée par le Ca(OH)₂ lors de la carbonatation peut contribuer à l'hydratation du ciment anhydre.

D'après les données de la littérature, on peut remarquer que l'effet du type d'addition minérale sur la carbonatation des BAP est très peu étudié. Toutefois, les travaux dans ce domaine se concentrent sur la comparaison entre BAP et BO de même classe de résistance.

Plusieurs études montrent clairement que les mélanges de BAP sont plus durables que les mélanges de bétons ordinaires vis à vis le coefficient de la carbonatation. Les valeurs obtenues des coefficients de carbonatation étaient assez petites par rapport à celles des mélanges de BV. Par exemple, la réduction des coefficients de carbonatation est de l'ordre de 5,5% de plus dans le cas du BAP que celui dans du BV avec le même rapport E/C [107-109]. Sur la base des études antérieures, la présence de plus fortes teneurs en hydrates de calcium (CH) et hydrates de silicate de calcium (CSH) sont les facteurs responsables de réduction des profondeurs de carbonatation dans le BAP comparé à BV [110].

Duan et al. [105] ont mesuré la profondeur de carbonatation (Figure 1.27) des éprouvettes de béton où le ciment a été remplacé par métakaolin et laitier. La profondeur de carbonatation du béton a été significativement réduite en raison de l'addition de métakaolin et laitier. Ils ont rapporté que le phénomène était principalement dû à la réaction pouzzolanique de métakaolin et laitier lorsque la quantité de produit d'hydratation de Ca(OH)_2 diminue par le remplacement de ciment par métakaolin et laitier.

Zhao et al. [47] ont étudié la résistance à la carbonatation accélérée sur des BAP incorporant à différentes taux de substitution de ciment par laitier ou cendre volante (Figure 1.28). Ils ont montré que la présence de cendre volante et laitier améliorent la profondeur de carbonatation du BAP.

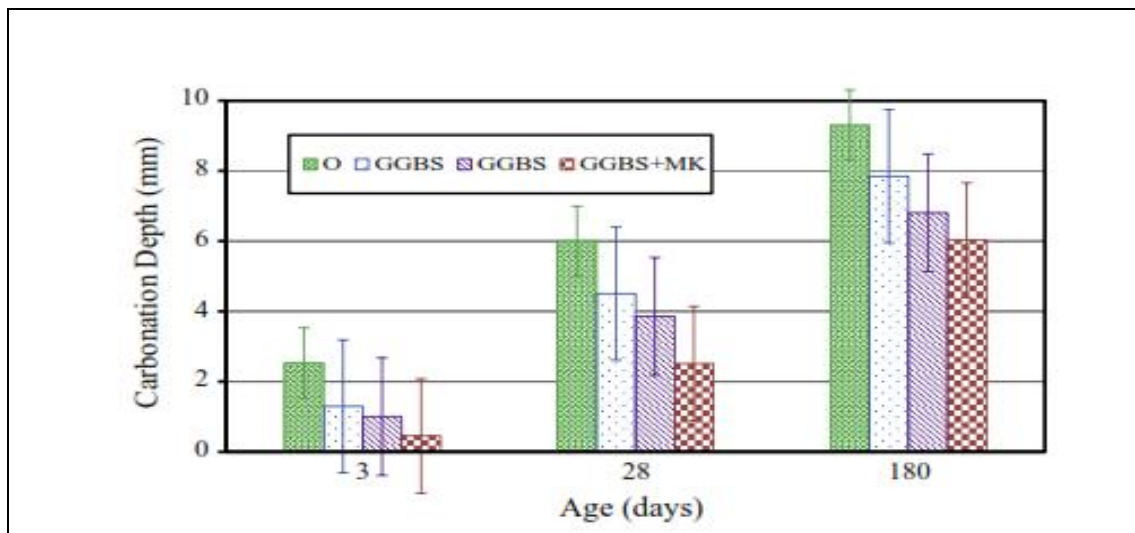


Figure 1.27 : Profondeur de carbonatation pour les bétons étudiés [105].

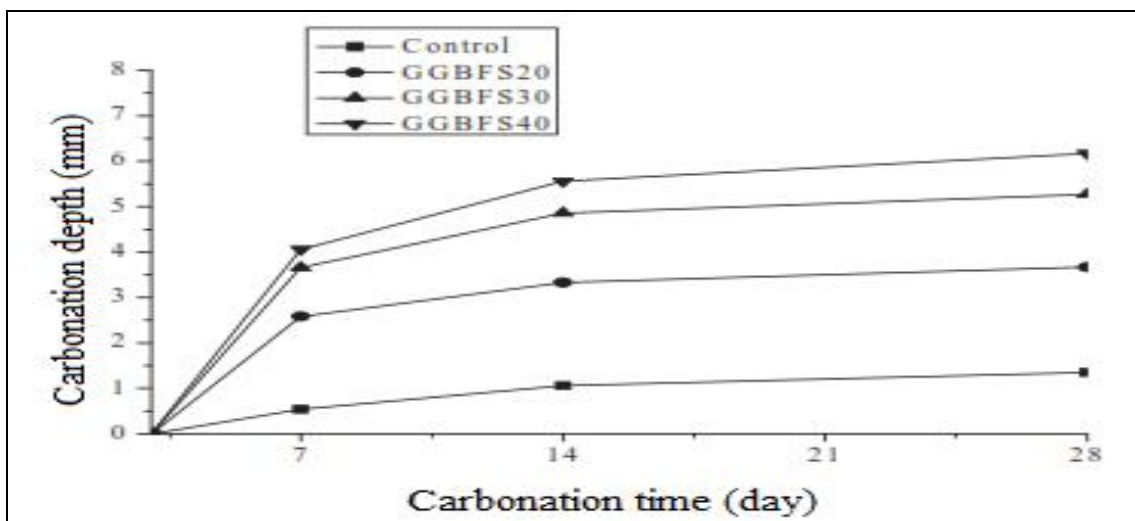


Figure 1.28 : Profondeur de carbonatation des BAP à base de laitier [47].

1.10 Conclusion

L'étude bibliographique a mis en évidence que les BAP constituent une véritable alternative aux bétons traditionnels, comme le montre certains exemples. Cette partie bibliographique a été menée pour faire le point sur l'état des connaissances relatives aux caractéristiques à l'état frais et à l'état durci des BAP formulés à base d'additions minérales. Ces caractéristiques sont très influencées par la composition des bétons notamment la nature des constituants et leurs dosages. Les méthodes de formulation des BAP dans cette synthèse sont multiples et sont tous des méthodes empiriques, elle nécessite un certain nombre d'essais pour caractériser les constituants ou leurs interactions.

Les BAP ont besoin à un grand volume de pâte riche en fines. Par souci technique et économique, on a souvent recours aux additions minérales qui se présentent sous formes de poudres fines, moins réactives que le clinker. Ces additions peuvent améliorer l'ouvrabilité et des propriétés rhéologiques des BAP à l'état frais et faciliter leur mise en œuvre. A l'état durci, les propriétés mécaniques et physico-chimiques sont fortement influencées par la composition. La microstructure des BAP diffère de celle des bétons ordinaires. L'emploi des ajouts minéraux améliore considérablement la distribution de la taille des pores emmenant à une densification de la microstructure. Du point de vue mécanique, leur l'emploi améliore la résistance à la compression à long terme et en particulier à 56 jours.

Pour les indicateurs de durabilité, l'emploi des ajouts minéraux dans le BAP présentent une amélioration de la perméabilité au gaz, la diffusion des ions chlore, et l'absorption capillaire.

De cette lecture rapide de la littérature sur les BAP, on peut sortir que la diversité dans la qualité des matériaux utilisés ne permet pas d'admettre une méthode universelle pour la fabrication d'un BAP. En plus, le comportement à l'état frais et à l'état durci de BAP est fortement influencé par le volume de pâte et la présence d'ajouts minéraux. Parmi les objectifs de notre travail, est justement de contribuer à la formulation et d'étudier les propriétés rhéologiques des BAP à base de matériaux locaux avec l'incorporation du laitier d'El Hadjar.

CHAPITRE 2

GRANULATS RECYCLÉS ET BAP A BASE DE GRANULATS RECYCLÉS

2.1 Introduction

La thématique des bétons de GR est un sujet très vaste qui couvre un grand nombre d'études. Cette partie bibliographique ne présente que les éléments essentiels à l'étude des propriétés physiques des GR, la rhéologie du béton à base des GR à l'état frais et la caractérisation des propriétés mécaniques et de durabilité à l'état durci.

2.2 Contexte de l'industrie des granulats recyclés

Le béton est le matériau de construction le plus utilisé au monde, que ce soit en bâtiment ou en travaux publics. Cette pression sur la ressource de béton occasionne une exploitation intensive des carrières de granulats (concassées de roche) qui a entraîné à la longue un épuisement de cette ressource naturelle et des problèmes environnementaux. En Algérie la production des granulats (agrégats et sable concassé), a connue une augmentation considérable dans les dernières années, par exemple, pour l'année 2007, la production des granulats a atteint 32 817 310 m³ en progression de plus de 30% par rapport à l'année 2006. Cette production est assurée par 698 unités d'exploitations minières implantées dans 46 wilayas. Plus de 95% de ces granulats sont des granulats calcaires [111]. Celles-ci imposent de chercher une nouvelle source d'approvisionnement en granulats. Pour éviter aussi la création de décharge sauvage de déchets de l'industrie du béton, ses derniers sont sollicités pour cette nouvelle source. En effet, l'industrie de la construction et de la démolition dans le domaine du génie civil représente une part non négligeable de la production de déchets. Chaque année, qu'environ 200 millions de tonnes de déchet de béton est produit en Chine, 300 millions en France et 70 millions au Brésil [112].

D'autre part, il apparaît que la plupart des matériaux recyclés sont généralement utilisés pour les travaux routiers ou de remblai. Avec le coût croissant des constituants de base des matériaux de construction (additions minérales, granulats), ce type de valorisation, relativement basique, peut s'avérer être très rentable. Une meilleure utilisation de ces matériaux provenant des déchets de la construction et de la démolition peut être envisagée comme, par exemple leur incorporation dans la formulation dans le béton.

2.3 Composition et caractéristique physiques et mécaniques des granulats recyclés

Les déchets de démolition sont essentiellement composés de béton concassé. Les GR de béton diffèrent des GN par leur composition et leur forme. Il s'agit de matériaux composites constitués de GN concassés et de la pâte de ciment hydraté concassée, enrobant les GN [113] (Figure 2.1). Les éléments constitutifs de ces GR sont présents en proportion différente. En effet, le taux de pâte de ciment présent dans les GR de béton varie en fonction de leur origine c'est-à-dire en fonction de la formulation de base du béton initial, procédure de concassage et la dimension des particules [114].

Les propriétés de la pâte de ciment sont à l'origine des éventuelles mauvaises propriétés des GR constatées [113]. En effet, les propriétés physiques des GR dépendent de la quantité et la qualité de pâte de ciment présente sur les granulats concassés [115]. Donc ces propriétés doit être évalué avant d'utiliser les GR. Certaines propriétés des GR sont discutées dans les paragraphes suivants.

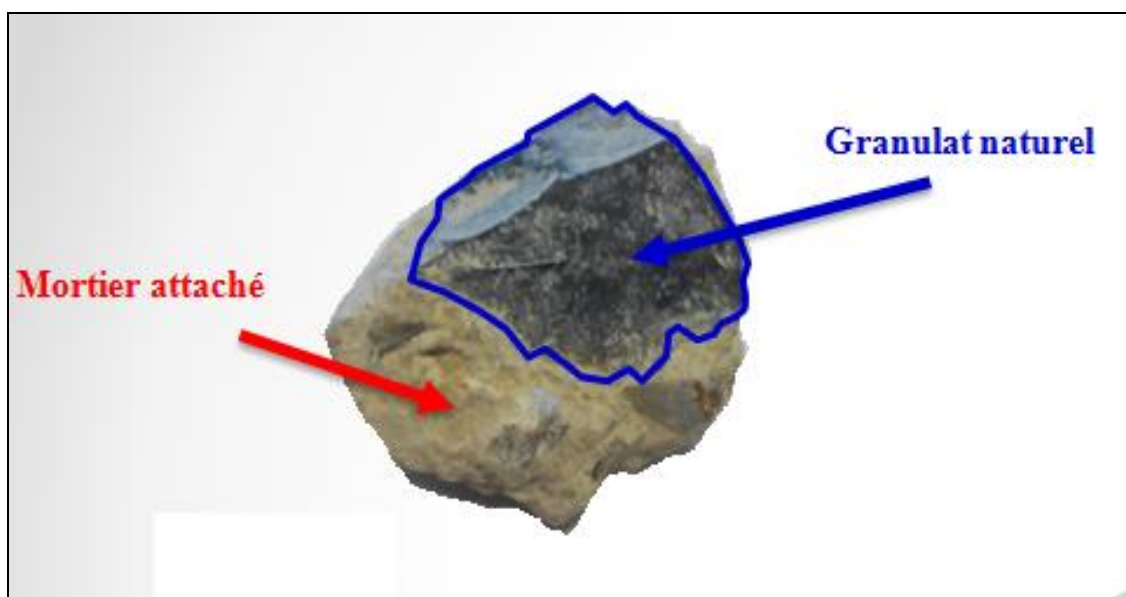


Figure 2.1 : Compositions des GR de béton [113].

2.3.1 Granulométrie

La distribution granulométrique des GR est généralement différente par rapport à celle des GN. Cependant, dans plusieurs travaux de recherches, les GR sont produits en adoptant les procédés de broyage et de criblage et, par conséquent, la taille des GR se situent généralement dans les limites maximales de la gradation du broyeur. Gonzalez-Fonteboea et al. [116] ont mélangé deux fractions de gravier naturel pour obtenir une courbe

granulométrique similaire à celle des GR. La variété dans la dimension des particules contribue à réduire le volume total des vides entre les granulats. La plupart des chercheurs ont trouvé que les GR ont souvent plus de particules fines que les granulats ordinaires [117,118].

2.3.2 Absorption d'eau

Les travaux menés sur les matériaux de démolition en tant que granulats de substitution ne sont pas assez concluants. Ils sont considérés comme "granulats hors normes". On les suspecte d'avoir des conséquences néfastes sur la durabilité des bétons [119]. Celle-ci se trouve compromise à cause d'une forte absorption d'eau (Ab) par ces GR. Ceci est lié à une forte porosité en raison de la présence du vieux mortier collé aux granulats de démolition et surtout si leur granularité est fine [113].

De nombreuses études ont confirmé que les GR ont des valeurs d'absorption d'eau beaucoup plus grandes que les GN [114, 115, 120-122]. Des études antérieures [123-125] ont montré que les agrégats grossiers et fins ont une absorption d'eau de l'ordre de 3,5 à 7,7% et de 4,6 à 13,1%, respectivement.

Cette propriété est vraisemblablement la plus grande différence entre les GR et les GN [114]. Les valeurs d'absorption des GR se situent généralement entre 3 et 10% alors que pour des GN sont souvent en dessous de 1%, mais peuvent augmenter jusqu'à une valeur de 5% [126]. Khoshkenari et al. [127] ont trouvé les valeurs d'absorption d'eau des gros et fins GR obtenues à partir d'un béton de classe de résistance à la compression égale 30 MPa sont plus élevée d'environ 11,5 et 3,5 fois que les gros et fins GN, respectivement.

On peut conclure que la capacité d'absorption d'eau des GR est toujours supérieure à celui des GN. Ils doivent normalement être utilisés à une teneur en eau supérieure à leur capacité d'absorption. Ils doivent être aussi stockés de façon à permettre de garder ces conditions constantes. Les GR sont plus sensibles aux conditions environnementales lors du stockage que les GN. Il faut systématiquement mesurer leur teneur en eau et l'ajuster avant leur utilisation. Le pré-mouillage est une bonne solution pour maintenir le niveau de saturation souhaitée. Certains auteurs préconisent d'ailleurs de pré-saturer par immersion dans l'eau les GR avant utilisation en béton prêt à l'emploi [128].

La figure 2.2 présente l'absorption d'un granulat recyclé durant les 30 premières minutes [129]. Ce graphe montre que la plus grande partie d'eau absorbée par le granulat se fait

dans les 30 premières minutes. On remarque aussi l'absorption très élevée même après seulement 5 minutes (89,2%). La vitesse de cette absorption diminue significativement par la suite. Il est donc estimé que 90% du potentiel d'absorption du granulat s'effectue lors des 5 premières minutes.

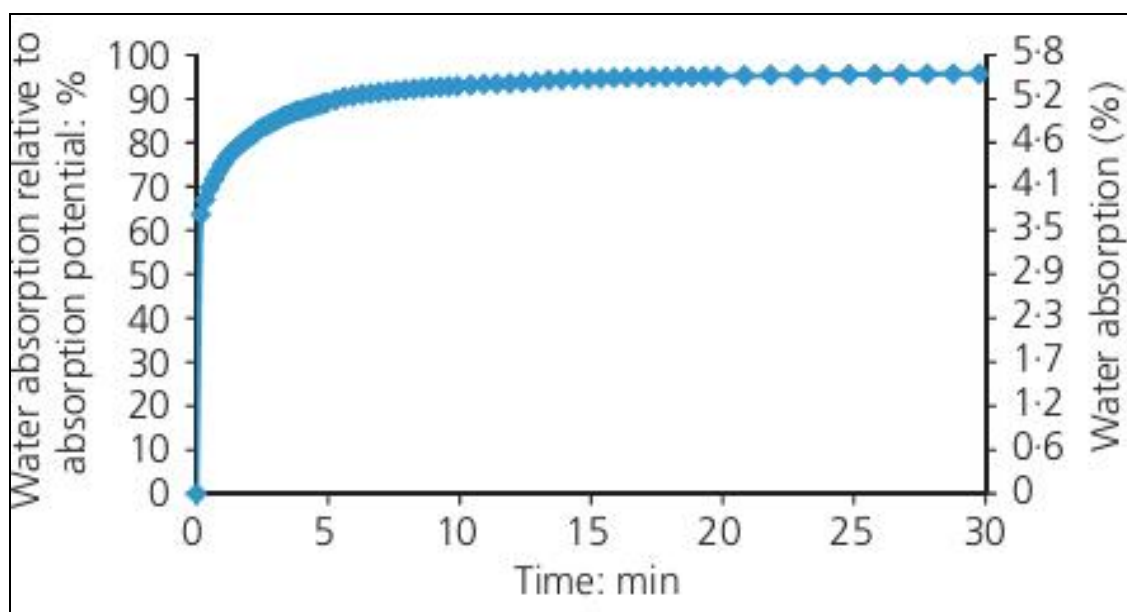


Figure 2.2 : Absorption d'un granulat recyclé en fonction du temps [129].

2.3.3 Densité/ Masse volumique

La densité est l'un des paramètres fondamentaux des granulats pour la composition des mélanges de béton et influe sur plusieurs propriétés du béton résultant. La densité relative des GR est moins grande que celle des GN [113, 114, 130]. La densité des GR à base de béton démolé, est inférieure de l'ordre de 5 à 15% à celle des GN [131]. Khoshkenari et al. [127] ont trouvé que la densité des GR est inférieure d'environ 20% à celle des GN. Les bétons contenant des GR ont une densité inférieure de 8 à 13,5% à celle des GN et peuvent être classés dans la catégorie des agrégats semi-légers puisque la densité trouvée est de l'ordre de 1840-2240 kg/m³. Cette baisse est due relativement à la densité faible de pâte de ciment d'ancien mortier attachée aux particules d'agrégats recyclés. La densité est plus élevée pour les GR qui ont moins de mortier attaché, comme l'indique la figure 2.3 [113].

La masse volumique des GN varie généralement de 2100 à 2500 kg/m³ pour les gros granulats et de 1970 à 2200 kg/m³ pour les granulats fins [34]. D'autres études menées sur

le sujet, ont révélé que les masses volumiques des GR sont nettement plus faible que celles des GN [120, 132].

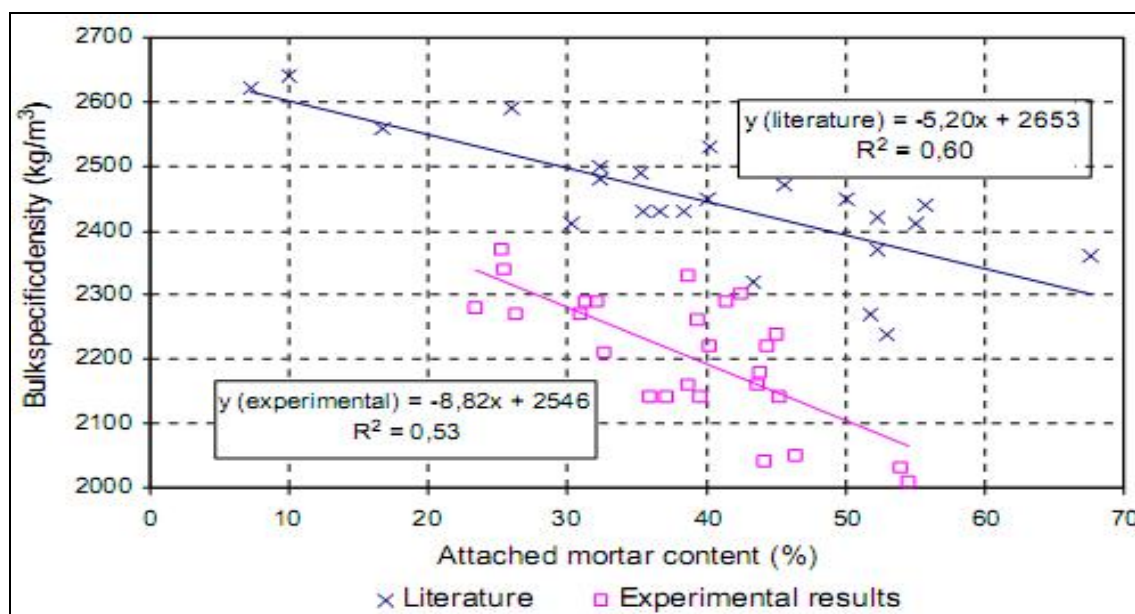


Figure 2.3 : Relation entre la densité et le taux de mortier résiduel [113].

2.3.4 Porosité

La porosité des granulats est généralement corrélée à leur capacité d'absorption. La forte capacité d'absorption des GR est liée à une forte porosité de ce matériau [127]. Le taux de ciment dans le béton parent influe également sur la porosité des GR. Celle-ci augmente significativement avec l'augmentation de la quantité de pâte de ciment [133].

Grâce à des analyses microscopiques, Tam et al. [134] ont décrit la géométrie de la porosité de GR. Des pores sont présents entre les granulats naturels et la pâte de ciment selon eux. Ces pores fragilisent le matériau et limitent l'emploi de ces GR dans la fabrication des bétons. Ces pores engendrent une forte porosité des bétons de GR.

Il semblerait que le béton de GR et le béton mixte possèdent un volume de pores plus important qu'un béton classique. Néanmoins, la remontée capillaire d'un béton mixte semble être nettement plus élevée (1,6 fois plus importante) que les autres bétons [122].

Des essais de porosité par injection de mercure montrent tout d'abord un volume important des gros pores dans les bétons à base des GR. Une étude comparative entre béton mixte et béton recyclé confirme le fait que la porosité dépend de la quantité de GR et donc du taux de pâte de ciment présent sur les granulats. Ces essais d'injection de mercure montrent

également une baisse de la porosité totale des éprouvettes de béton à base des GR en fonction de son âge [115]. En effet, la porosité totale passe de 19%, à 7 jours, à 15% à 90 jours pour les bétons recyclés. Il serait donc intéressant de savoir si au-delà de ces 90 jours, la porosité totale des bétons à base des GR pourrait encore varier et jusqu'à quelle valeur.

Des relations sont établies entre la porosité totale des bétons de GR et leurs performances mécaniques. La résistance à la traction, à la compression et le module d'Young semblent diminuer lorsque la porosité augmente [115].

2.3.5 Dureté

Comme pour les GN, la résistance mécanique des GR peut être caractérisée par le coefficient Los-Angles, le coefficient micro-Duval et le coefficient de friabilité (pour la fraction fine).

Le coefficient de Los Angeles pour les GR est élevé comparé à celui exigé par la norme. Cette tendance est confirmée par plusieurs auteurs [120, 132], qui expliquent que cette valeur élevée du coefficient de Los Angeles est due à la quantité de pâte de ciment présente autour des GN concassés ce qui réduit la résistance aux chocs. De Juan et Gutierrez [113] ont constaté une augmentation de la valeur de Los Angeles avec la croissance du contenu en mortier résiduel (Figure 2.4).

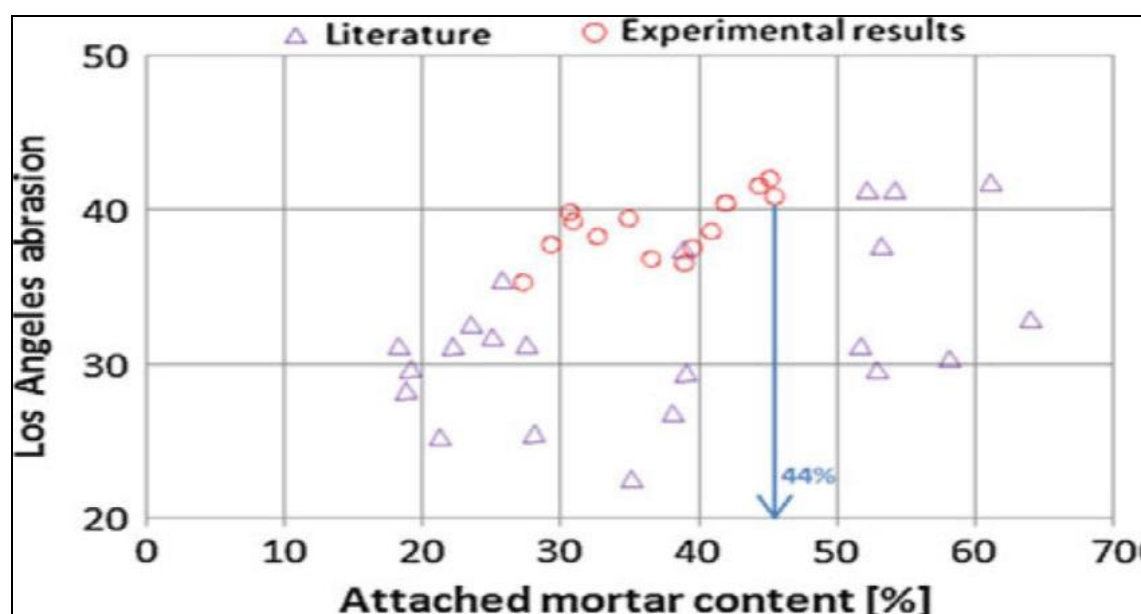


Figure 2.4 : Relation entre le mortier résiduel et la valeur d'abrasion Los Angeles [113].

En général, les granulats de béton recyclé (GBR) sont constitués de GN avec environ 30% du mortier attaché [135]. Ce mortier attaché donne au GBR une surface rugueuse avec de nombreux pores et de micro-fissures [136], ce qui justifie les principales caractéristiques des GBR : la grande porosité, l'absorption d'eau beaucoup plus élevée, la densité plus faible, la grande angularité et la forme irrégulière [137].

2.3.6 Caractéristiques chimiques et minéralogiques

Peu d'auteurs ont abordé la caractérisation chimique et minéralogique des GR [138,139]. En relation avec la phase granulaire initiale, il ressort de l'étude de GR que les phases granulaires initiales sont essentiellement de nature calcaire, siliceuse ou silico-calcaire. A partir de ce constat, il est naturel de retrouver en grande quantité du carbonate de calcium (calcite, dolomite et formes dérivées.), ou des phases siliceuses ou silicatées (quartz, feldspath...) (Figure 2.5). Ensuite, on retrouve la présence de phases provenant des vestiges du mortier attaché ; on identifie ainsi :

- ✓ Des phases anhydres (C_3S , C_2S , C_4AF), mais en très faible proportion voire inexistante,
- ✓ Des phases hydratées comme des CSH,
- ✓ Les carbonates de calcium peuvent aussi provenir de phases carbonatées de la matrice ancienne.

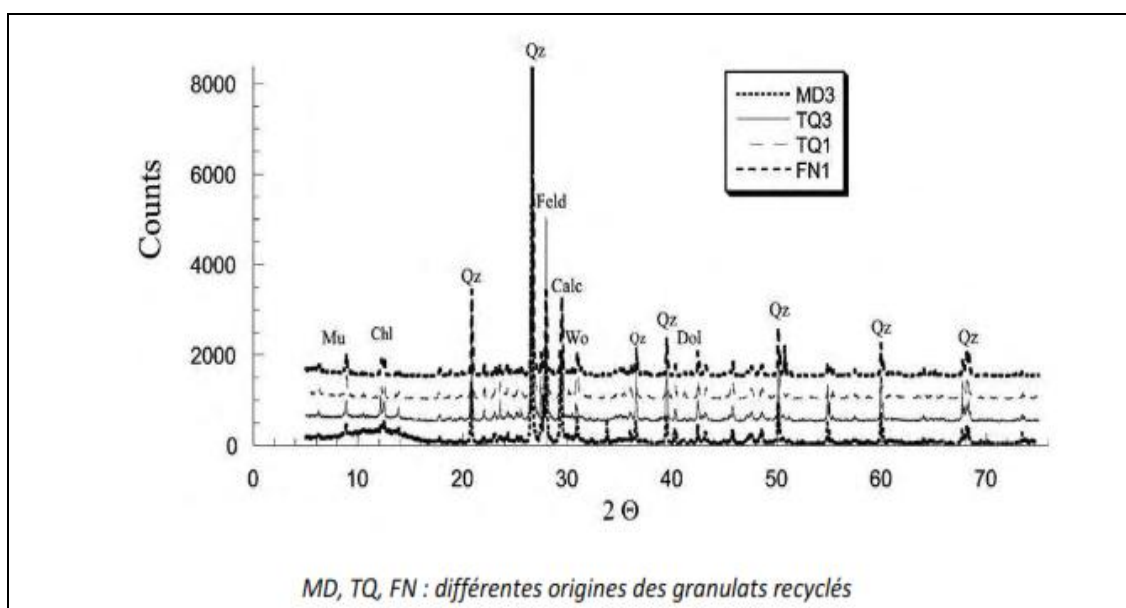


Figure 2.5 : Analyse DRX d'une coupure recyclée (0,6 - 0,125 mm) [138].

Finalement, présence de phases plus problématiques pour la durabilité du béton, tels que les chlorures (risque de corrosion des armatures). Pour les GR issus de maçonnerie, la teneur en sulfate peut varier de 0,003% à 6% [139].

2.4 Problème des fines du sable recyclé

Un des paramètres les plus importants est la teneur en fines contenue dans une coupure de sable recyclé. Elle est définie comme étant la quantité de particule passant au tamis de 63 μm . La figure 2.6 montre que cette teneur en fines est beaucoup plus élevée dans le cas des sables recyclés [140].

Les fines, tout comme les éléments grossiers des GR, sont constituées de GN concassés (ici en l'occurrence des fines provenant du concassage des GN) et de pâte de ciment relativement friable (des fines issues du ciment hydraté). Il serait ainsi intéressant d'identifier la part qui provoque la rigidification importante du béton recyclé, fines de GN concassés ou fines de pâte de ciment. Une forte densité de particules fines peut perturber l'empilement granulaire et ainsi provoquer une diminution de la résistance en compression. Pour ces deux raisons (demande en eau excessive et modification de compacité), l'emploi du sable recyclé n'est pas recommandé pour la formulation des bétons de structure, voire purement interdit pour certaines applications (la préfabrication) [114].

Plusieurs études ont permis de cibler le problème des fines des granulats recyclés en comparant l'ouvrabilité d'un béton constitué de 100% de granulats recyclés (béton recyclé) à celle d'un béton de gravillons, graviers recyclés et de sable naturel (béton mixte). Il en ressort que le besoin en eau d'un béton recyclé est plus important que celui d'un béton mixte, soit 5 % d'eau supplémentaire [141].

L'utilisation de fines recyclées dans la formulation des bétons est souvent limitée. Cette fraction présente des propriétés physico-mécaniques et chimiques mauvaise, telles que plus grande quantité de pâte de ciment, une porosité, une absorption d'eau et une teneur en sulfate soluble plus élevé, ce qui peut limiter son utilisation dans le béton [142]. D'autre part, l'incorporation de fine recyclée réduit la résistance mécanique, augmente le retrait et a un effet négatif sur le comportement de durabilité de béton [121].

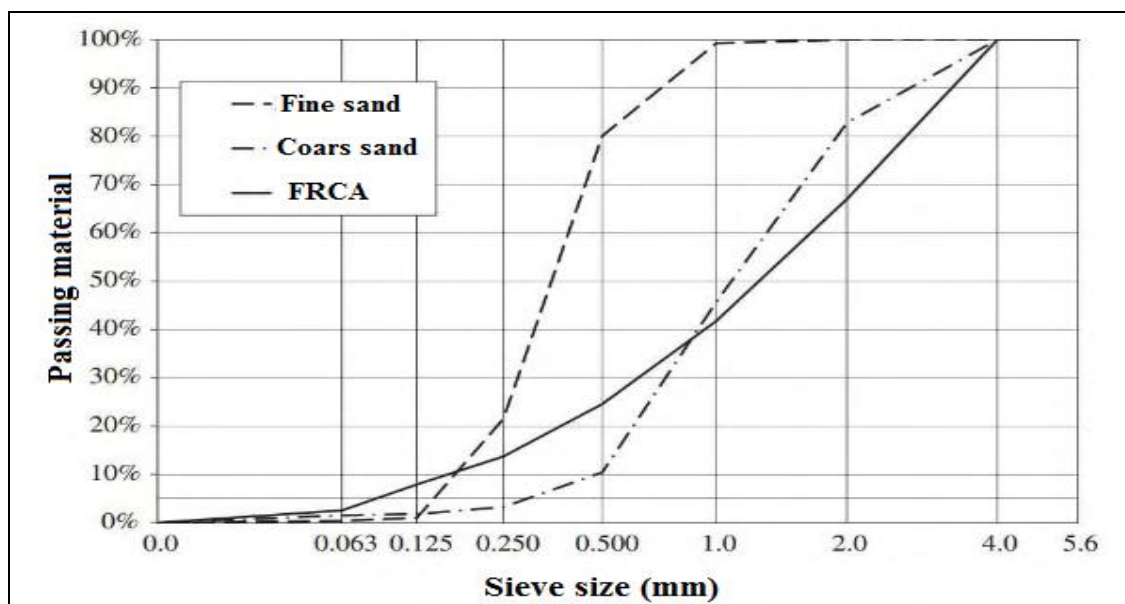


Figure 2.6 : Granulométrie de sable naturel et sable recyclé [140].

2.5 Propriétés des bétons recyclés à l'état frais

2.5.1 Teneur en air du béton frais

Selon Katz [133], il a été observé que la teneur en air d'un béton frais est plus importante dès lors que des gravillons recyclés sont incorporés. Avec un taux de remplacement de 100%, l'augmentation est de 4% à 5,5%. D'après l'auteur, cela peut être attribué à une porosité plus élevée des gravillons recyclés. En effet, lors de la phase de vibration, la forme et la rugosité des gravillons recyclés peuvent empêcher le dégazage des bulles d'air.

2.5.2 Densité

A l'état frais, le béton recyclé présente des densités plus faibles en comparaison à celle du béton de référence (à base de 100% de GN). Une chute de densité d'environ 8% pour bétons à base de granulats de béton concassé, 17% pour bétons à base de granulats de briques concassées et de 7% pour bétons à base du mélange de granulats de béton et de briques concassées, par rapport au béton naturel qui est due principalement à la densité faibles des GR [143].

La substitution de GN par des GR diminué la densité du BAP d'environ 2% pour 50% de gravier recyclés et de 4% pour 100% de gravier recyclés [124].

2.5.3 Ouvrabilité

La masse du mortier d'un béton ancien qui recouvre la surface des gros GR et leur angularité, sont deux facteurs critiques qui influencent considérablement sur la consistance du béton à base de GR.

Plusieurs études ont montré que pour un même rapport E/C l'utilisation des GR diminuent l'affaissement du béton par rapport à un béton à base d'un GN [130, 144]. Ceci a été attribué aux GR ayant une surface plus rugueuse et une forme plus anguleuse, créant ainsi plus de friction interne dans le béton [129].

D'autres études ont montré une perte de l'ouvrabilité de béton dans le temps. Cette perte s'avère importante pour les 30 premières minutes. Elle semble d'autant plus importante que les gravillons recyclés utilisés sont secs (Figure 2.7). Cela peut s'expliquer par un phénomène rapide d'absorption d'eau par les recyclés qui intervient essentiellement durant les premières minutes après la mise en œuvre du matériau [135, 145].

Selon l'étude menée par Cartuxo et al. [146], la valeur d'affaissement visée était de 120 mm. Pour respecter cet objectif, une augmentation du rapport E/C de 16,3% a été nécessaire pour le béton incorporant 100% volumique de sable recyclé (SR) comparativement au béton de référence (0% SR).

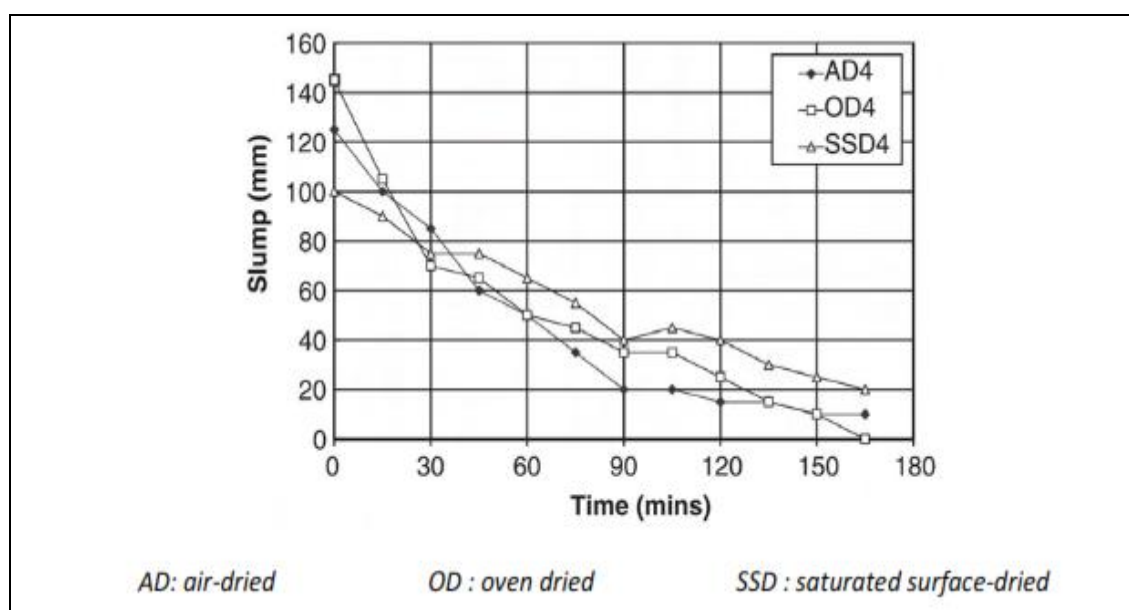


Figure 2.7 : Evolution de la rhéologie dans le temps pour un béton incorporant 100% en volume de gravillons recyclés [135].

Pour le BAP une comparaison a été faite par Benhouana et al. [147] entre l'étalement d'un BAP à base de GN et un BAP à base GR. Le béton avec 50% de GN et 50% de GR présente un étalement supérieur à celui du béton avec 100% GN et 100% GR, pour un rapport E/L égal à 0,46 et 0,47 (Figure 2.8). Concernant l'essai de la boîte en L, les exigences requises pour un BAP ne satisfait pas avec un rapport E/L égale 0,45 à 0,47 et 100% de GR. Par contre, pour un mélange de GN et GR, ils ont constaté que pour un rapport E/L égal à 0,46 le béton présente un taux de remplissage similaire au BAP de référence avec un rapport $H_2/H_1 = 0,86$. D'autre part, Kou et Poon [123] ont constaté que l'étalement d'un BAP augmente avec l'accroissement de la quantité des fines des GR, l'étalement minimal est de 760 mm et le rapport de remplissage varie entre 0,85 et 0,94. La même tendance a été constatée par plusieurs études [148,149] pour le béton ordinaire dont, ils ont observé une augmentation de l'affaissement du béton avec l'augmentation de la teneur en fines remplacé par les fines naturelle (0, 25, 50, 75 et 100%).

Safiuddin et al. [150] ont étudié l'effet des GR sur les propriétés des BAP à l'état frais. Ils ont trouvé que la capacité de remplissage du BAP a été améliorée pour 30% et 50% de substitution des GR. En revanche, la capacité de remplissage a été réduite pour une teneur en GR supérieure à 50%. Les résultats de temps d'écoulement en Vfunnel et T_{50} montrent que les mélanges de BAP avec une teneur en GR supérieur à 50% sont plus visqueux par rapport au mélange témoin. La résistance à la ségrégation par tamisage montre que les mélanges contiennent 75% et 100% des GR présente une stabilité critique (Figure 2.9).

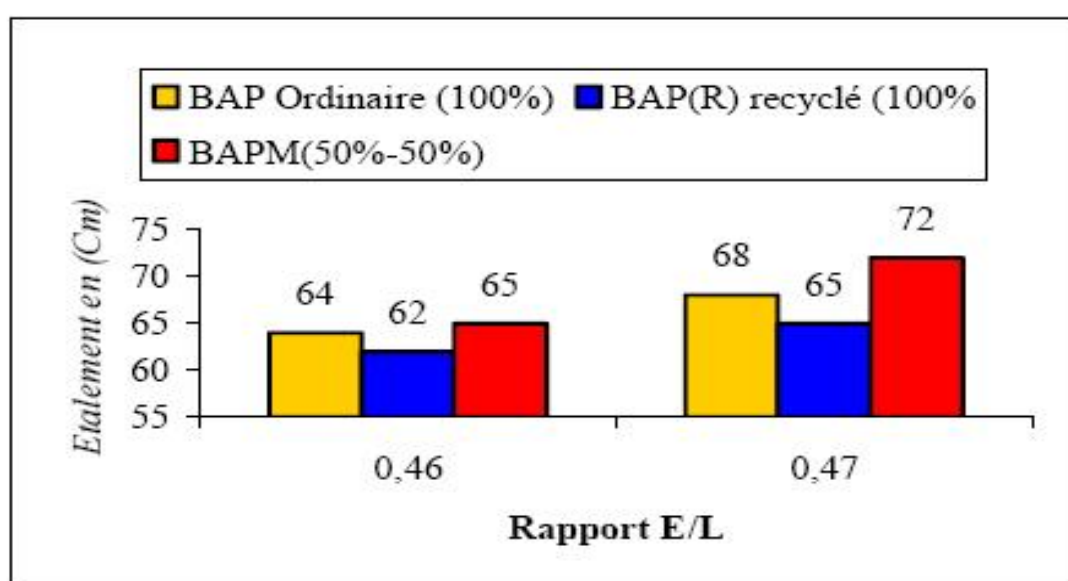


Figure 2.8 : Comparaison entre l'étalement des BAP ordinaires et recyclés [147].

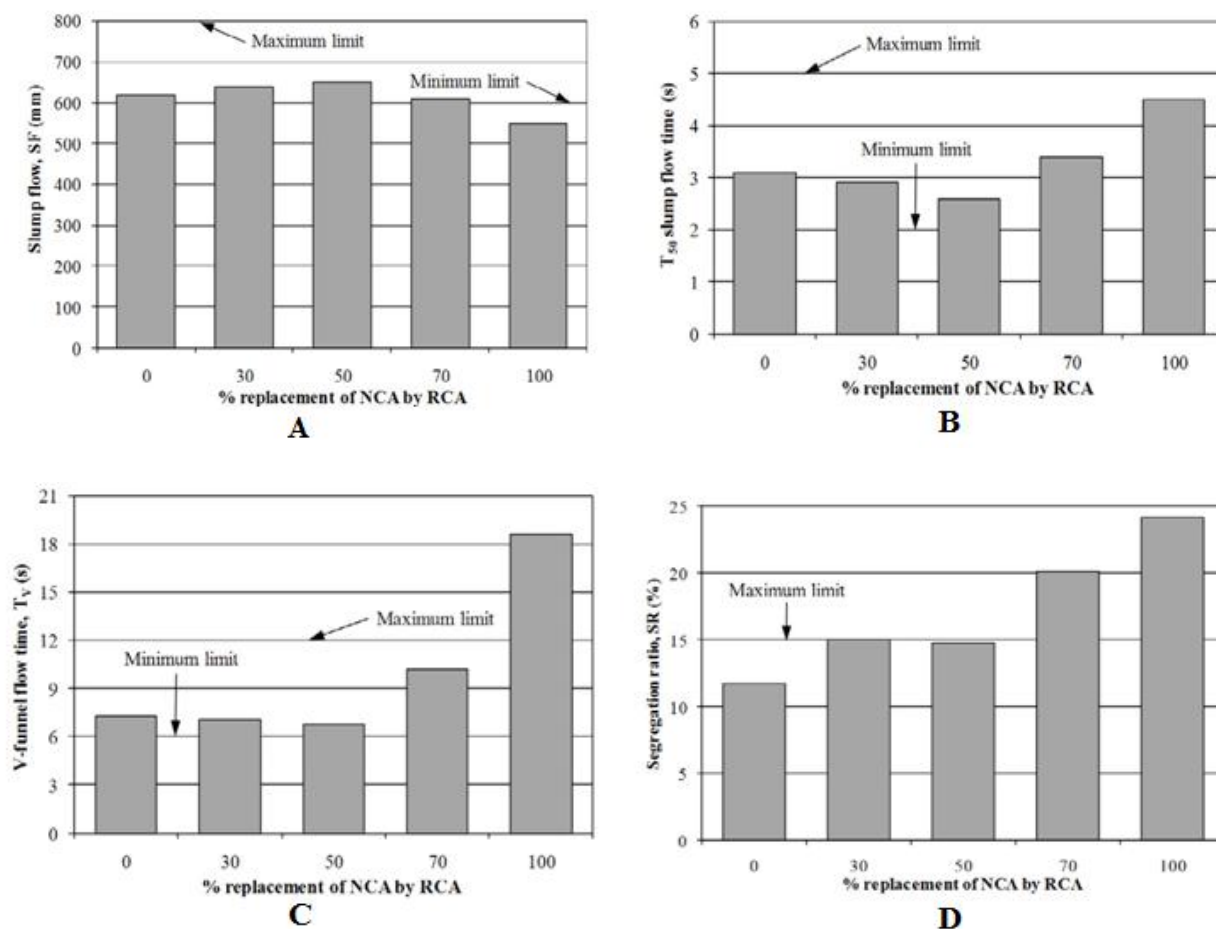


Figure 2.9 : Effet des GR sur l'étalement (A), temps d'écoulement T_{50} (B), temps d'écoulement T_{VF} (C) et pourcentage de laitance (D) des BAP [150].

Kenai et al. [151] ont trouvé que la substitution de 50% et 100% des GN par des GR 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 GN.

Carro-Lopez et al. [152] ont étudié la perte d'ouvrabilité à 15, 45 et 90 minutes après le malaxage pour les mélanges de BAP contenant des fines recyclés à l'aide des essais étalement, L box et le J Ring. Ils ont trouvé que les mélanges avec 100% des fines recyclées perdent complètement leurs caractéristiques des BAP à 90 min et cette perte de capacité de passage et de remplissage a débuté à partir de 45 min. Ceci est dû à l'absorption d'eau très élevée de fines recyclées. Güneyisi et al. [153] ont constaté que la capacité de remplissage et de passage sont améliorées de manière significative avec l'augmentation de la quantité des fines et des GR. Les BAP avec 50 et 100% des GR

contenant 25, 50, 75 et 100% des fines recyclées présentent un étalement variant entre 70 et 76 cm et un rapport de remplissage supérieur à 0,8 comme l'illustre la figure 2.10.

Récemment, Omrane et al. [154] ont montré que les mélanges des BAP à base de 50% des GR possèdent des propriétés rhéologiques comparables à celle du BAP à base de GN. Cependant, la substitution le ciment par la pouzzolane diminué l'ouvrabilité des BAP.

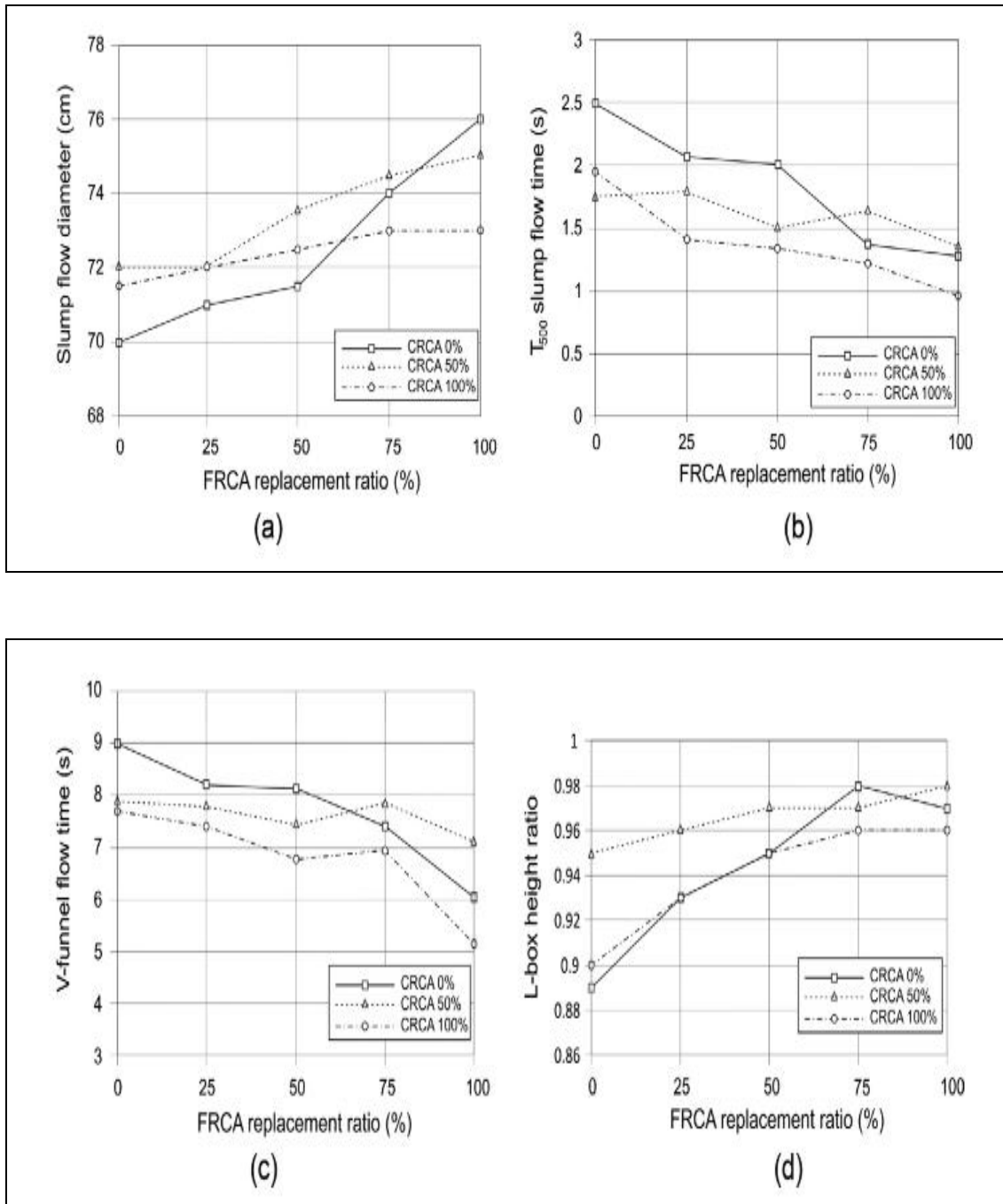


Figure 2.10 : Variation de la capacité de remplissage et de passage des BAP [153].

D'autre part, il est nécessaire d'estimer la quantité d'eau de gâchage qui est absorbée par les GBR pour déterminer et préciser le temps de malaxage ce qui peut affecter l'ouvrabilité du béton. Padmini et al. [114] ont également signalé que 10 minutes d'immersion des GBR dans l'eau satisfait d'atteindre l'ouvrabilité désirée du béton.

Amer et al. [155] ont montré que le béton sans superplastifiant et contenant 60% des GR sec, avec un rapport E/C de 0,6, l'ouvrabilité est 2,5 fois inférieure à celle du béton de référence. Pour un béton de 60% de GR pré-saturé, l'ouvrabilité reste presque constante en comparaison à celle du béton contenant des granulats secs (Figure 2.11).

Selon Zhao et al. [156] l'état de saturation initial du sable joue un rôle important sur le comportement à l'état frais. Les auteurs ont comparé les propriétés d'un mortier incorporant du SR sec et saturé. Les observations faites montrent que, quelque que soit le rapport E/C, les mortiers à base de sable sec donnent toujours un affaissement plus élevé que ceux avec du sable à l'état saturé. Pour une composition avec un sable sec, cela peut s'expliquer par une perturbation initiale de la quantité d'eau disponible pour le maintien de rhéologie et ce malgré l'apport initial d'une quantité d'eau excédentaire correspondante à la part d'eau d'absorption du SR. Il y aurait un effet de la cinétique d'imbibition du SR. En revanche, lorsque les SR sont saturés, l'eau absorbée est présente dans la porosité de la gangue de mortier. Cette eau est donc piégée initialement et il n'y a pas de modification de la quantité d'eau par imbibition lors de la phase de malaxage (Figure 2.12).

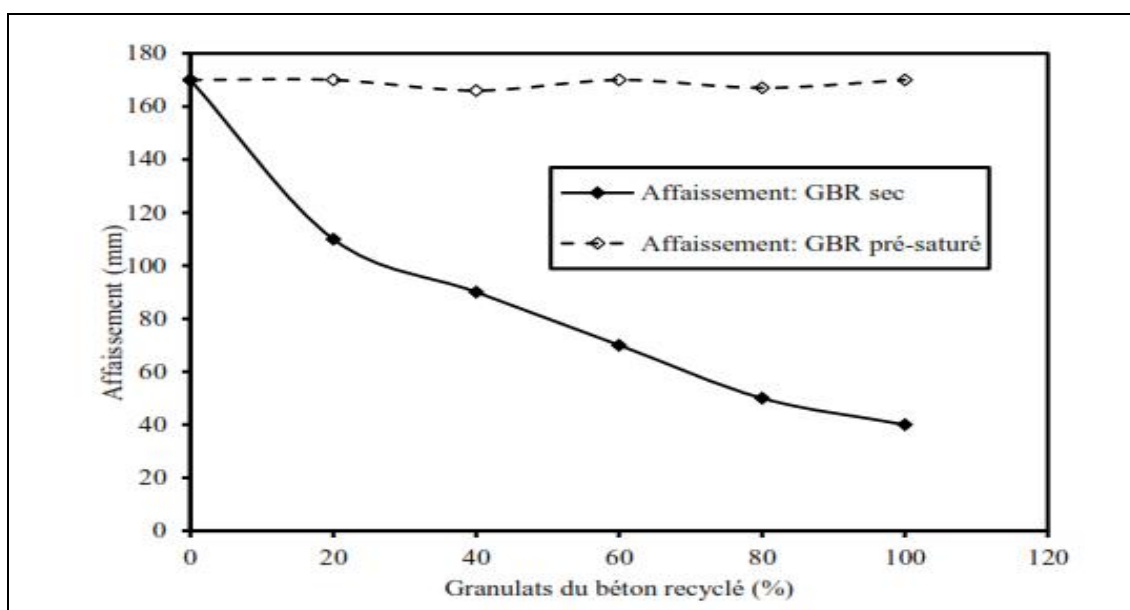


Figure 2.11 : Variation de l'ouvrabilité du béton en fonction de taux des GR [155].

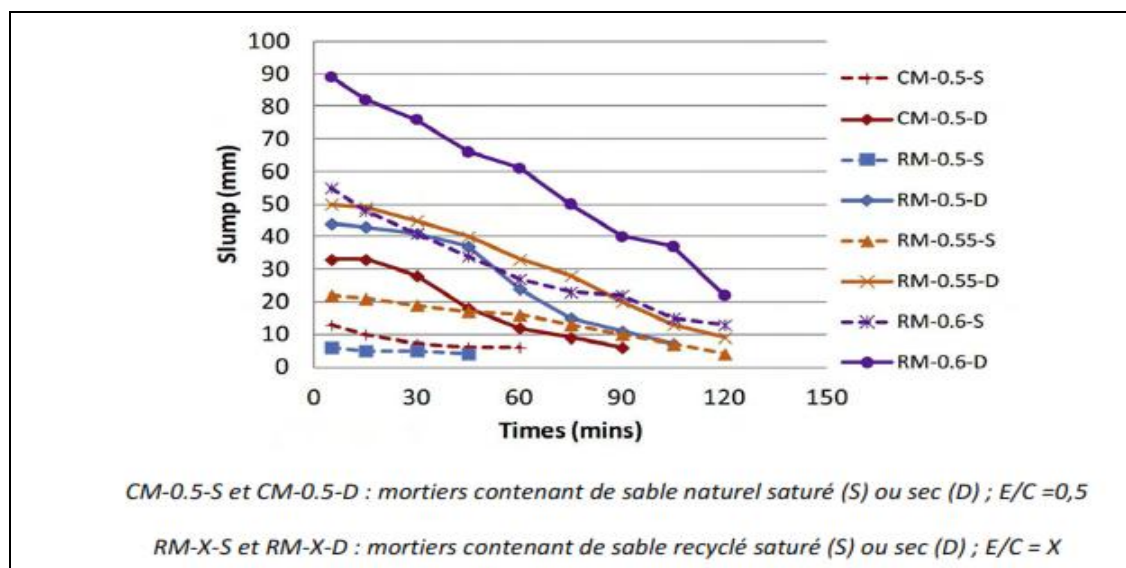


Figure 2.12 : Evolution dans le temps de l'affaissement des mortiers à base du SR [156].

2.5.4 Rhéologie

Dû à un coefficient d'absorption d'eau généralement plus élevé que celui d'un GN, les GR vont grandement influencer la rhéologie du béton à l'état frais. Les conditions hydriques du matériau au moment du malaxage sont primordiales (granulat à l'état sec ou mouillé, pré-humidification, temps de saturation...), et sont associées aux conditions de mise en œuvre (introduction des constituants et temps de malaxage). Elles auront des effets directs sur le rapport E/C efficace du béton et par conséquent sur son aptitude à l'écoulement.

Dans la littérature, à l'exception des mesures de l'étalement, très peu d'études associées aux paramètres rhéologiques ont été effectuées, afin d'étudier l'écoulement du béton incorporant des GR. Selon l'étude de Hu et al. [157], portant sur les BAP à base du SR, dont l'état hydrique initial est semi-saturé, les auteurs ont utilisé le rhéomètre ICAR pour étudier le couple en fonction de la vitesse d'écoulement, et en déduire le seuil de cisaillement et la viscosité, avec l'hypothèse que le comportement d'écoulement est de type Bingham. Les résultats reportés montrèrent aucune tendance de l'influence du taux de remplacement massique en fines sur les caractéristiques rhéologiques du BAP.

Tuyan M et al. [158] ont estimé le comportement rhéologique du BAP contenant 20, 40 et 60% des GR à l'aide de l'essai de l'étalement, L-box et l'essai de V-funnel. Les résultats montrent que la viscosité des mélanges contenant du GR a augmenté de manière significative par rapport à celle des mélanges témoins. Pour la même valeur de l'étalement de BAP, la teneur en superplastifiant augmente légèrement avec l'augmentation de la

teneur en GR. Indépendamment de la teneur en GR, une mauvaise aptitude au passage (L-box) a été observée dans les mélanges ayant un rapport E/C de 0,53.

Les résultats de Amer et al. [155] ont constaté que l'augmentation de la substitution des GR sec augmente les valeurs des paramètres rhéologiques. Le seuil de cisaillement augmente de 30% à 90% lorsque le béton contient respectivement 20% à 60% de GR. Tandis que la viscosité atteint une augmentation de 50% et 170% pour les mêmes pourcentages utilisés. Au-delà de 60%, le béton devient plus ferme et les paramètres rhéologiques n'ont pas pu être mesurés par le rhéomètre. Pour des GR pré-saturés, les paramètres rhéologiques du béton deviennent moins affectés et l'exigence de superplastifiant est réduite (Figure 2.13). Avec 60% de GR pré-saturé, l'augmentation de la viscosité est réduite de 170% à 60% et celle du seuil de cisaillement de 90% à 35% en les comparants à celles du béton contenant des granulats secs. Plusieurs chercheurs [146] ont montré que la diminution des paramètres rhéologiques des bétons peut être attribué à la texture rugueuse de la surface, l'angularité et à la présence de résidus de mortier.

Güneyisi et al. [153] ont étudié le comportement rhéologique de BAP contenant des fines recyclées (25, 50, 75 et 100%) et des GR (50 et 100%) selon l'hypothèse de modèle du Herschel Bulkley. Les auteurs ont montré que le modèle de Bingham modifié donne une meilleure représentation. Ils ont démontré également que, ce comportement de BAP est clairement réduit par l'utilisation des fines et des GR par rapport aux mélanges témoins.

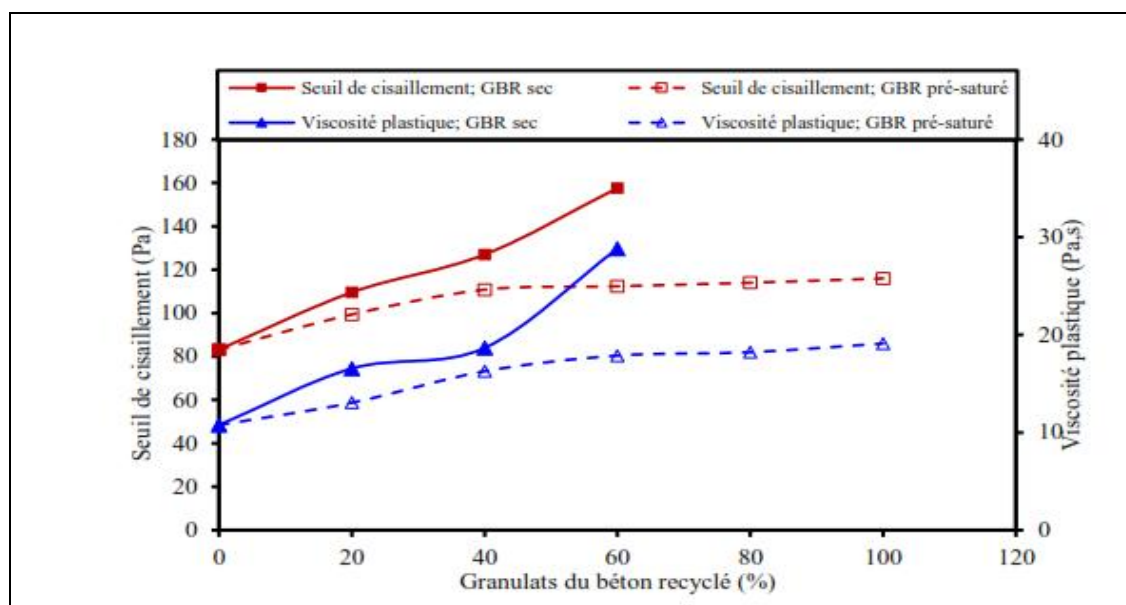


Figure 2.13 : Variation des paramètres rhéologique en fonction de taux des GR du béton [155].

2.6 Propriétés des Bétons recyclés à l'état durci

2.6.1 Résistance à la compression

La résistance à la compression du béton incorporant des GR a été largement étudiée. Il ressort de manière unanime qu'une incorporation de graviers et/ou sable recyclés engendre une perte de résistance à la compression. Cela est attribué aux mauvaises caractéristiques intrinsèques (résistance du grain, forte capacité d'absorption, structure poreuse) des GR comparativement aux GN. Dans cette partie, nous allons faire présenter un aperçu sur les paramètres influençant la résistance à la compression.

2.6.1.1 Qualité du béton d'origine

La qualité des grains composant la coupure granulaire joue un rôle important dans la qualité du béton. En parallèle, la qualité des GR dépendra fortement de la source d'origine. Une étude a été menée par Kou and Poon [159] avec 100% de gravillons recyclés et un rapport E/C de 0,35. La gamme de bétons qui était à recycler possédait des résistances initiales de 30 à 100 MPa. Les gravillons recyclés provenant de bétons à hautes performances (80 MPa et 100 MPa) confèrent des résistances similaires, voire plus élevées (+3,9%) que celles obtenues avec des gravillons naturels. Les auteurs expliquent cette observation comme étant une conséquence de la partie résiduelle de mortier attaché. En effet, lors de la phase de concassage, ce résidu étant très difficile à extraire pour les bétons de bonne qualité, il conduira à augmenter la part de vieux mortier dans la formulation des nouveaux bétons.

Cependant, les travaux de Padmini et al. [114] ont présenté des résultats contradictoires avec les recherches précédentes. Trois bétons possédant des résistances différentes (35, 48 et 55 MPa) ont été testés. Les résultats ont montré que la résistance des nouveaux bétons diminue avec l'augmentation de la résistance initiale des bétons à recycler.

2.6.1.2 Etat hydrique des graviers recyclés

Avec un coefficient d'absorption d'eau élevé, l'état hydrique initial des gravillons recyclés, avant malaxage, doit bien être maîtrisé, car il peut influencer la résistance à la compression du matériau final [145]. Poon et al. [135] ont montré que les graviers recyclés à l'état saturé peuvent conduire à une diminution de la résistance. Cette baisse de performance est expliquée par un phénomène de ressuage du béton après la phase de malaxage. L'eau liquide contenue dans la porosité des GR serait relarguée en faible quantité, ce qui

modifierait localement le rapport E/C entraînant ainsi une augmentation locale de la porosité et un affaiblissement de l'auréole de transition matrice/gravillon. Etxeberria et al. [115] ont confirmé ces observations pour un état de saturation similaire.

La figure 2.14, issue des travaux de Koenders et al. [160] présente l'évolution la résistance en compression, de deux bétons (rapports E/C différents) et dont les GR présentent des états hydriques différents (sec et saturé). Les résultats ont montré une réactivité plus marquée dans le cas où les gravillons étaient secs conduisant par la suite à des résistances en compression plus élevées à toutes les échéances testées.

Les résultats de Amer et al. [155] ont montré que la pré-saturation des granulats du béton recyclé provoque une augmentation du rapport E/C effectif, ce qui conduit à une légère baisse de la résistance à la compression, en particulier au jeune âge. Pour un béton contenant au moins 60% des GBR pré-saturés, une baisse de la résistance à la compression de 1% et 13% est observée, respectivement pour des rapports E/C de 0,6 et 0,5. Pour un rapport E/C de 0,4, une augmentation de 73% de la résistance à la compression est obtenue, alors que le dosage en superplastifiant est réduit. Ils ont conclu que lors de l'utilisation des GBR avec des faibles rapports E/C, il est préférable d'utiliser des GBR pré-saturés pour garder un dosage en superplastifiant adéquat.

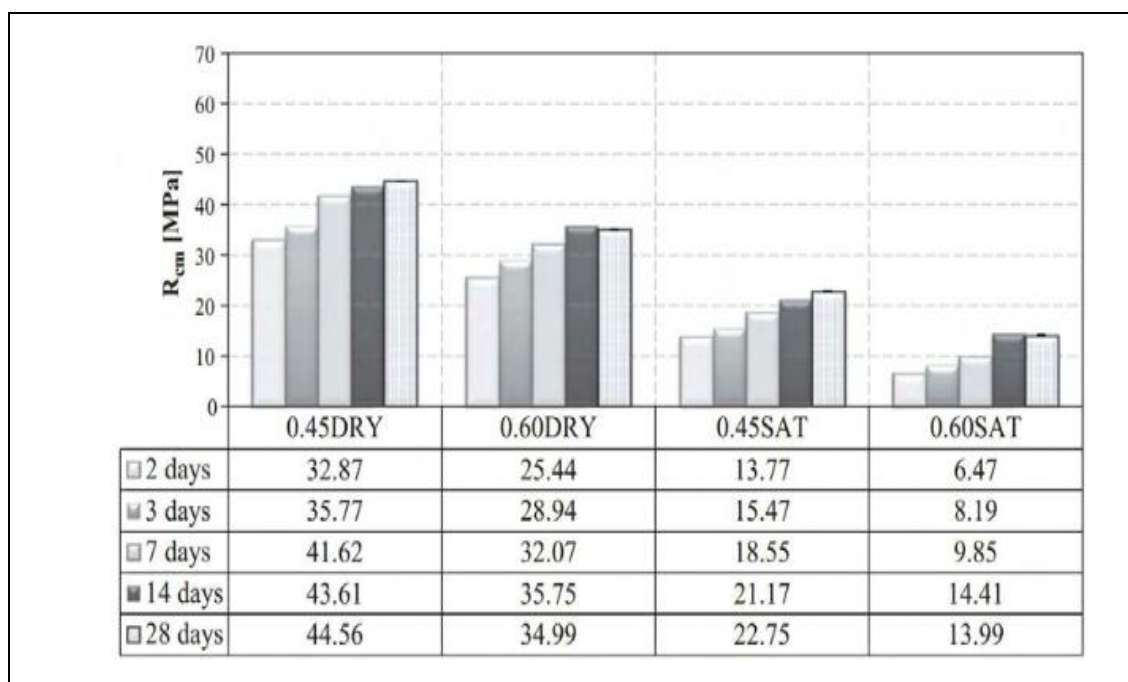


Figure 2.14 : Evolution de la résistance à la compression dans le temps [160].

Zhao et al. [156] ont utilisé les SR avec deux états hydriques différents pour la confection de mortiers (état sec et saturé). L'état sec a été obtenu après un séchage dans une étuve à 105°C pendant 24 heures. L'état saturé a été atteint après une pré-saturation de 24 heures. Les résultats montrent que quelque soit le rapport E/C, les mortiers avec le sable sec présentent toujours des résistances équivalentes ou supérieures à celles obtenues pour les mortiers avec du sable saturé. Par la suite, des investigations complémentaires ont été menées sur l'auréole de transition (ITZ) de ces mortiers, déterminées par observation MEB (Figure 2.15).

Selon les observations du MEB l'épaisseur de l'ITZ dans le cas du SR saturé est plus importante ($80\mu\text{m}$) que celle dans le cas du sable sec ($10\mu\text{m}$). Dans le cas du SR saturé, les auteurs expliquent cette tendance par un mouvement de l'eau allant des particules saturées vers la matrice cimentaire augmentant ainsi le rapport E/C localement. Dans ce cas, la conséquence directe de cet excès d'eau local est un élargissement de l'ITZ autour du grain recyclé. Dans le cas du SR sec, le sable peut absorber l'eau et ainsi réduire le rapport E/C localement rétrécissant ainsi l'épaisseur de l'ITZ [156].

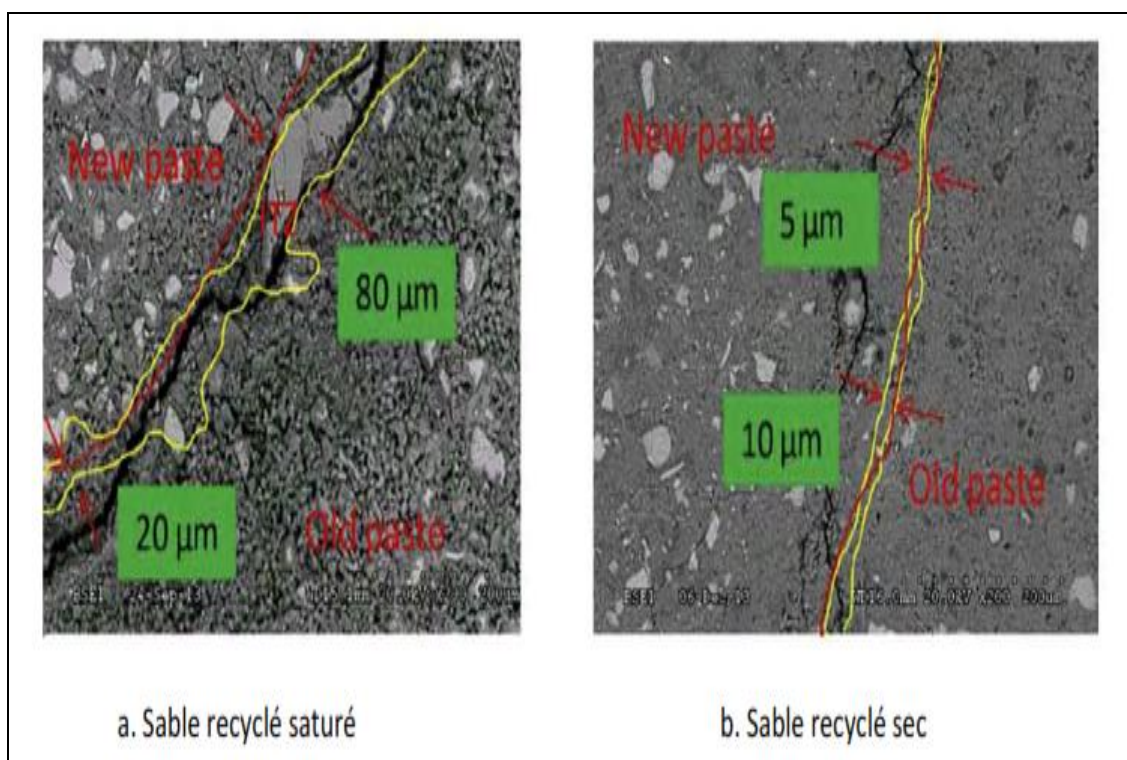


Figure 2.15 : Observations de l'ITZ des mortiers à base de sable recyclé [156].

2.6.1.3 Taux de substitution des granulats naturels en GR

En général, la majorité des chercheurs ont observés une diminution dans la résistance à la compression avec l'augmentation du taux de remplacement en GR. Dans l'étude menée par Kwan et al. [161] visant une résistance à 28 jours de 25 MPa, les bétons incorporant différents taux de substitution en recyclés et en maintenant le rapport E/C égal à 0,58 ont été étudiés. Les résultats, présentés en figure 2.16, montrent une diminution significative lorsque le taux de remplacement est supérieur à 30%. Généralement, cette diminution est attribuée à une porosité plus importante dans les bétons de GR, et une mauvaise interface granulats/liant.

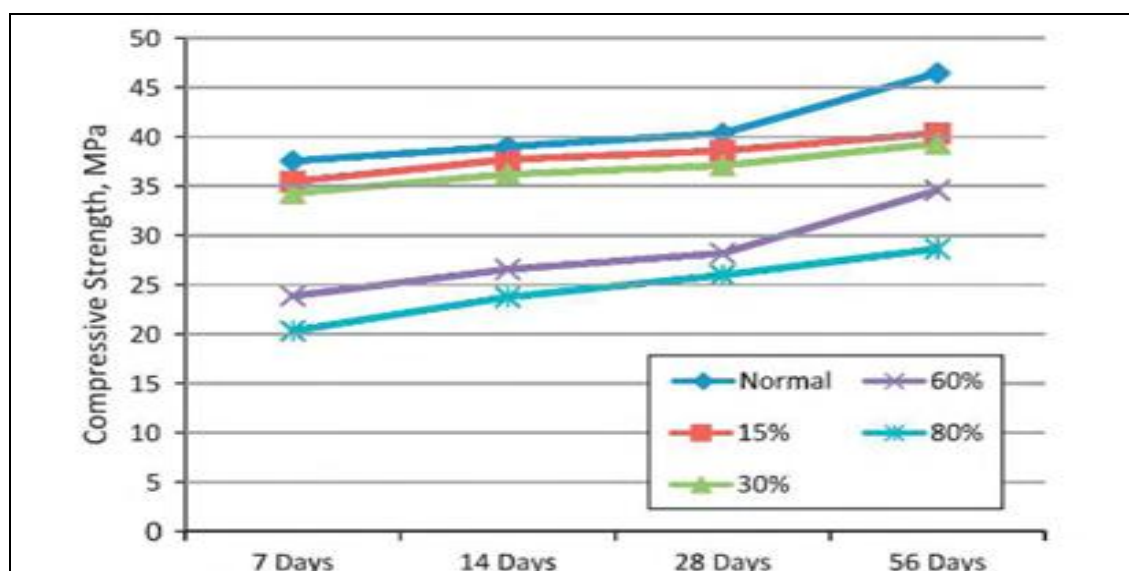


Figure 2.16 : Evolution dans le temps des résistances en compression pour des taux variables de remplacement en GR [161].

De la même façon, Etxeberria et al. [115] pour le même type d'étude (R_c visée de 35 à 40 MPa, avec $E/C=0,55$), ont montré qu'il n'y a aucune variation de performance mécanique pour des bétons jusqu'à 25% de remplacement en gravillons recyclés. Une autre étude menée par Tahar et al. [162] ont conclu que, les propriétés des bétons et des mortiers de béton équivalent à base de GR dépendent du couple ciment/adjuvant et du dosage de substitution en GR. Cela signifie qu'il existe effectivement une influence du GR sur la compatibilité du couple ciment/adjuvant. Cette influence est plus remarquable sur le sable que sur les graviers. Les résultats montrent aussi que pour des bétons à base de GR, plus le pourcentage de substitution est élevé et plus la résistance à la compression diminue (Figure 2.17).

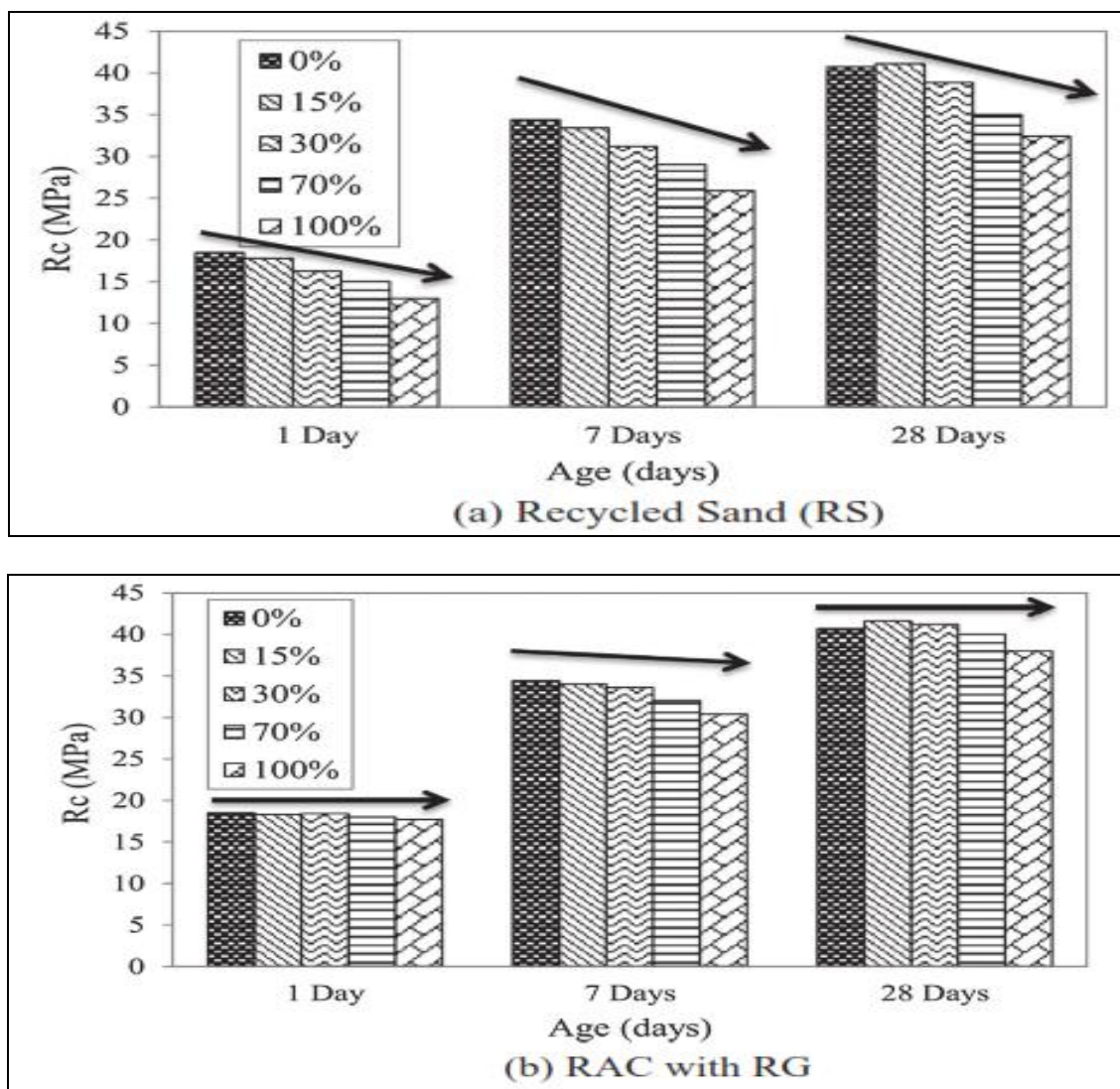


Figure 2.17 : Evolution de la résistance à la compression du béton en fonction taux de substitution des GR [162].

Une étude antérieure [163] a montré une légère différence de la résistance à la compression entre les BAP avec les GR et les BAP avec les GN, de telle sorte que la résistance à la compression de 90 jours a été atteinte jusqu'à 80 MPa avec 100% de GR. Safiuddin et al. [164] ont remarqué que la diminution maximale de la résistance à la compression à 28 jours due à l'incorporation de GR n'était que de 12,2%. Selon les résultats de Pereira et al. [165], ont été observé une perte de la résistance de l'ordre de 3,3% pour les BAP à base de 100% de gravier recyclé. Selon Grdic et al. [124], la réduction varie entre 3,88% à 8,55% lorsque la substitution de 50% et 100% de gravier naturel par un gravier recyclé, respectivement (Figure 2.18). Par contre, Gesoglu et al. [166] ont montré que les BAP avec des granulats et fines recyclées présentent la valeur de résistance à la compression la plus

faible, de sorte que ces mélanges présentent une réduction allant jusqu'à 30,9% par rapport aux mélanges de référence.

Des résultats divergeant sont, par contre, présentés dans d'autres études. Selon les résultats de Tuyan et al. [158] l'emploi des gros granulats recyclé jusqu'à 40% dans les mélanges de BAP améliore la résistance à la compression de 5,0 à 9,4%. L'addition des GR jusqu'à 60% n'a pas eu d'effet significatif sur la résistance à la compression comme le montre dans la figure 2.19.

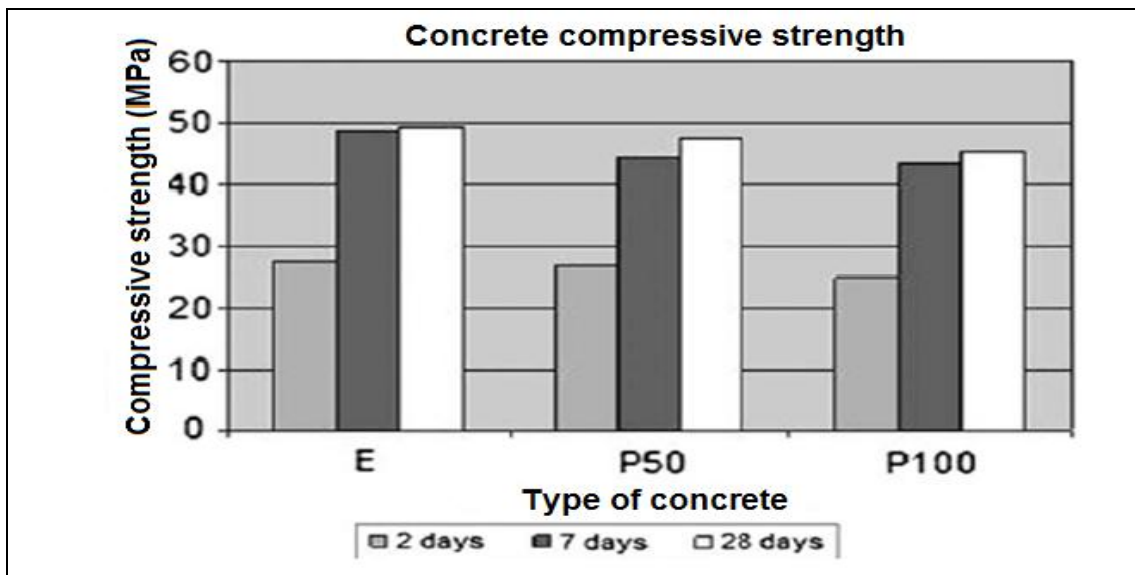


Figure 2.18 : Résistance à la compression pour des BAP avec (0, 50 et 100%) de GR [124].

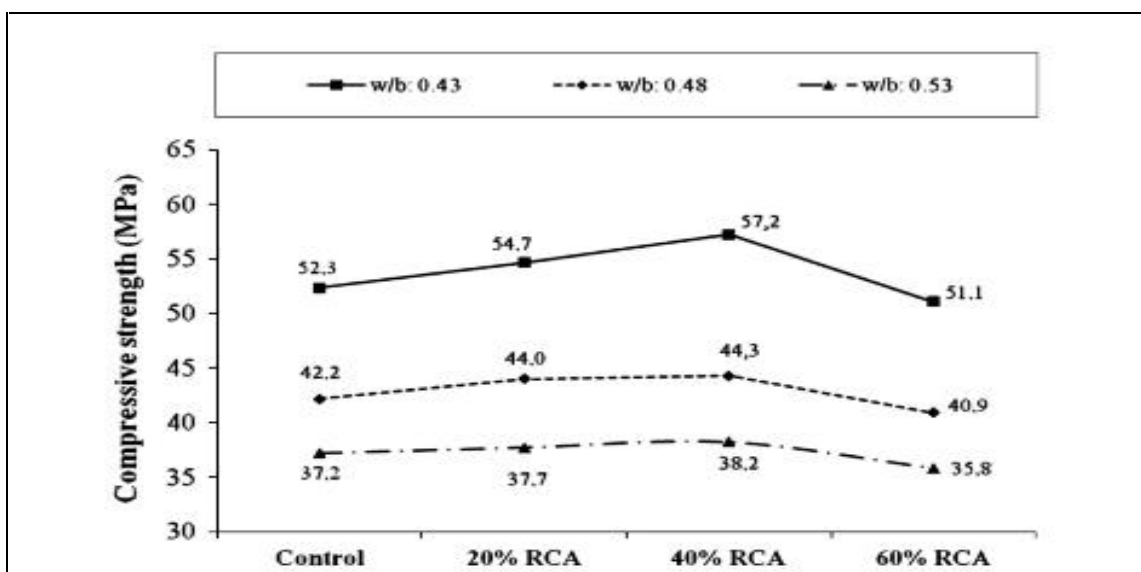


Figure 2.19 : La résistance à la compression des mélanges de BAP [158].

La substitution de différentes coupures de sable naturel par du sable recyclé a été étudiée sur la résistance de mortier par Zhao et al. [156] (Figure 2.20).

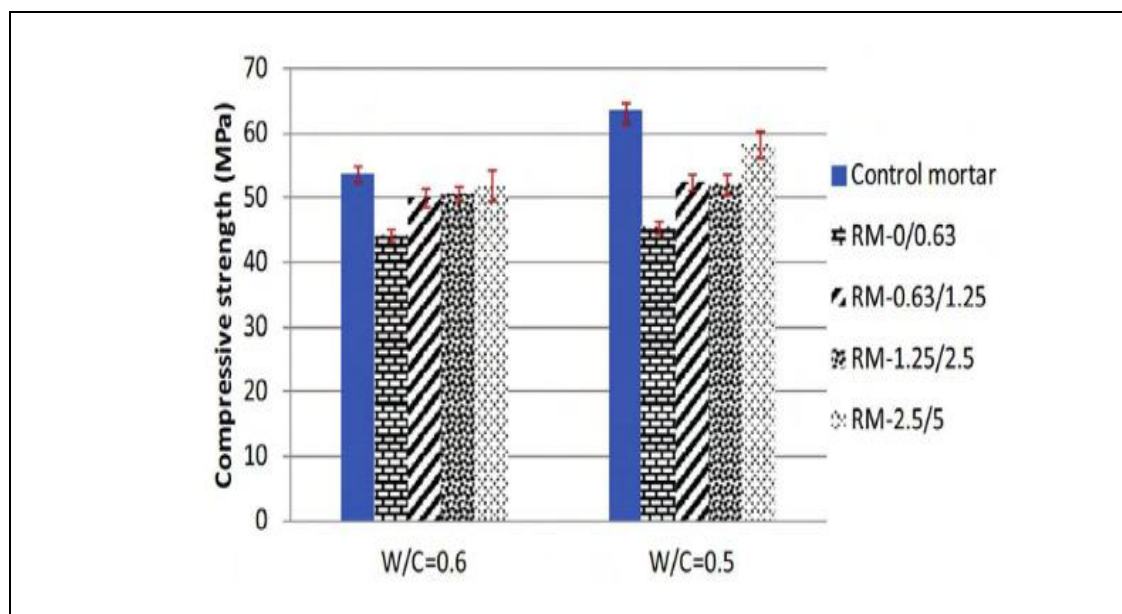


Figure 2.20 : Résistance de mortier incorporant différentes coupures de sable recyclé [156].

La figure 2.20 montre la résistance la plus faible pour le mortier dans lequel la partie très fine ($<0,63$ mm) a été remplacée. Cette baisse de résistance est due à de mauvaises caractéristiques : une teneur en mortier plus importante, un coefficient d'absorption d'eau plus élevé et de mauvaises propriétés mécaniques des particules fines.

2.6.1.4 Nature des ajouts d'origines minérales

Singh et Singh [167] ont montré que l'évolution de la résistance à la compression pour un BAP à base de 25% de GR est presque similaire à celle d'un BAP de GN. L'ajout de métakaolin au mélange de BAP fabriqué avec 50% de GR a permis d'améliorer la résistance à la compression en comparaison avec le mélange témoin fabriqué avec 100% de GN (Figure 2.21).

Corinaldesi et Moriconi [168] ont étudié l'effet des cendres volantes et des fumées de silice sur l'amélioration de résistance à la compression du BGR. Ils ont observé que la résistance peut être améliorée pour égaler ou voire dépasser celle du béton de granulats normaux en ajoutant des cendres volantes ou la fumée de silice dans le mélange.

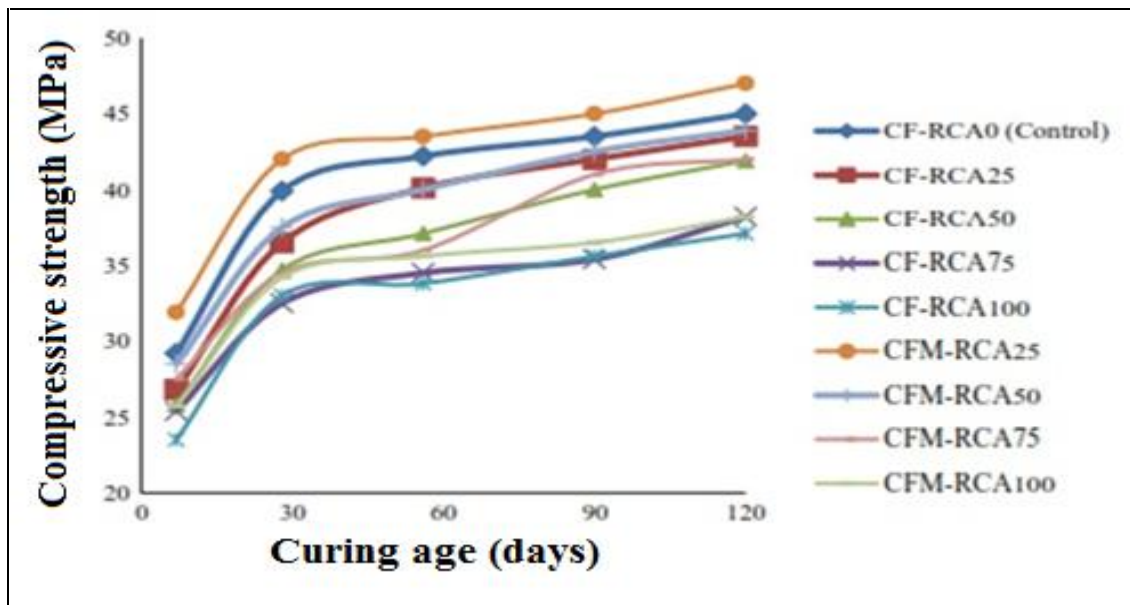


Figure 2.21 : Effet de GR et métakaolin sur la résistance à la compression [167].

Kanish kapour et al. [169] ont montré que la résistance à la compression à 28 jours a diminué de 13%, lorsque tous les GN ont été substitués par des GR. Cependant, lorsque la fumée de silice ou le métakaolin ont été ajoutés à 10% en poids du ciment aux BAP à base de granulats recyclés, la diminution de la résistance a été réduite à 8% et 3%, respectivement.

2.6.1.5 Paramètres de formulation et plus particulièrement le rapport E/C

Katz [133] a également constaté que pour le rapport E/C supérieur ou égal à 0,55, les résistances des bétons recyclés étaient comparables à celles des bétons standards même au taux de remplacement de 100%. Cette tendance est liée au fait qu'à un rapport E/C élevé, la résistance à la compression est liée à la qualité de la pâte et de l'interface pâte-granulats, moins résistantes que les granulats. En revanche, avec un rapport E/C réduit à 0,4, la valeur de la résistance chute de 25%.

2.6.2 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 des BAP diminue en augmentant le taux de substitution en GR (Figure 2.22) [124, 164, 166, 170].

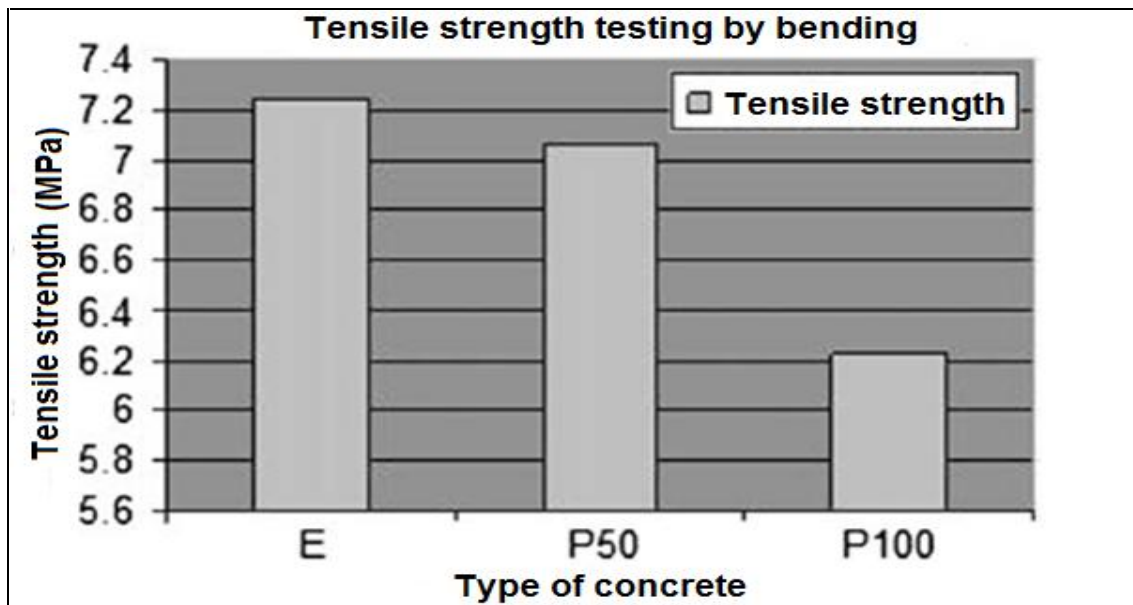


Figure 2.22 : Résistance à la traction pour des BAP avec (0, 50 et 100%) de GR [124].

Kou et Poon [123] ont montré que la résistance à la traction des BAP atteint la valeur maximale avec un taux de substitution de 25-50% de sable de rivière par un sable recyclé (Figure 2.23). D'autres résultats expérimentaux montrent une réduction de 8,8 à 16% de la résistance à la traction des mélanges de BAP incorporant de 20% et 60% des GR (Figure 2.24) [158].

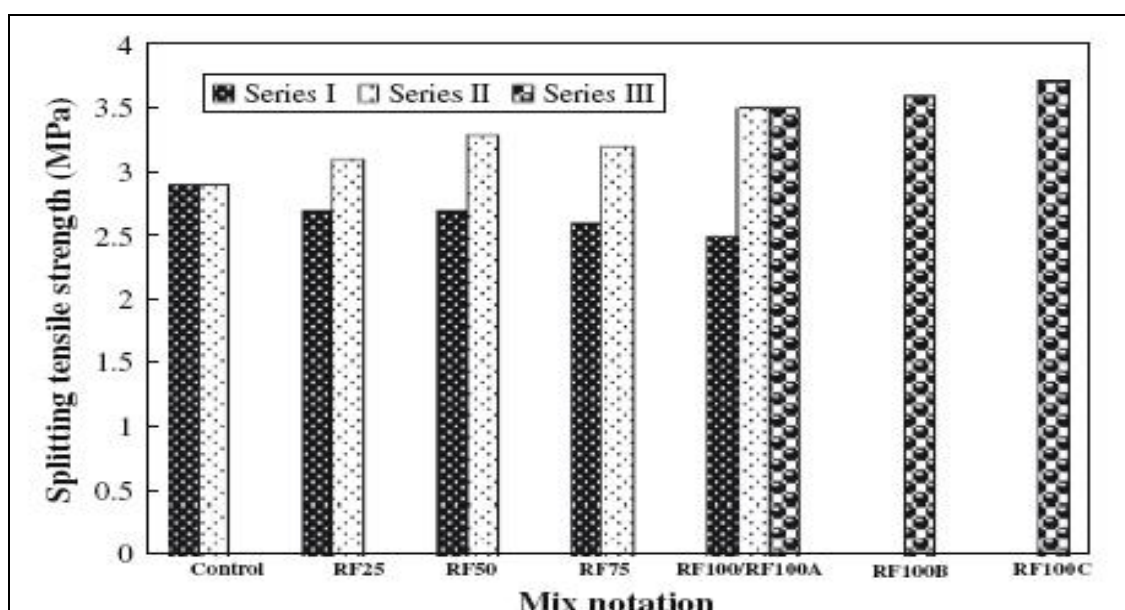


Figure 2.23 : Résistance à la traction pour des BAP avec des GR [123].

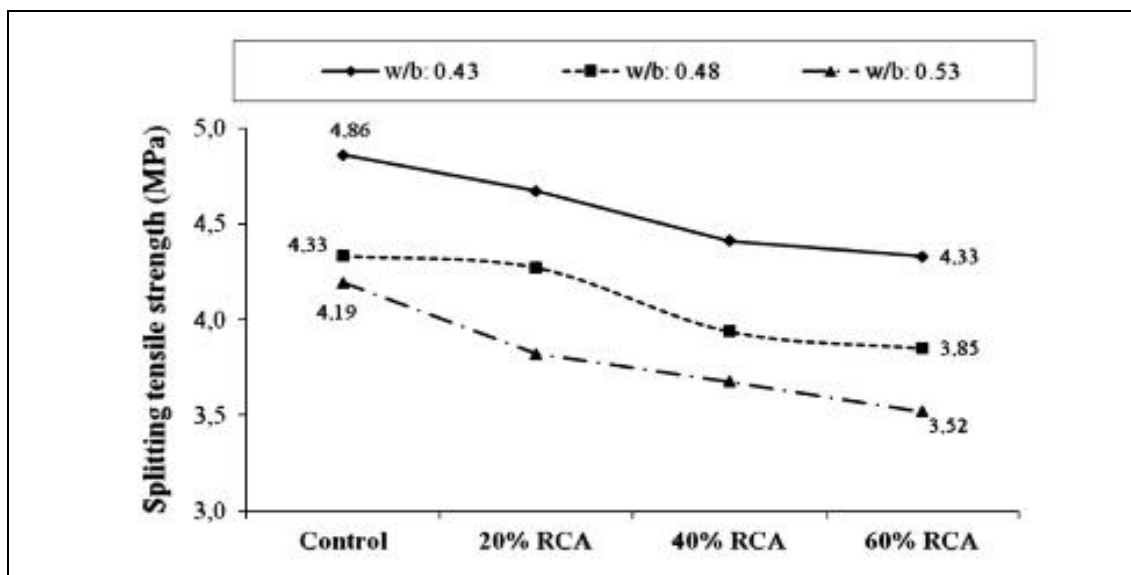


Figure 2.24 : Résistance à la traction pour des BAP [158].

2.6.3 Module d'élasticité

Le module d'élasticité ou module de Young est représenté par la pente de la section linéaire de la courbe contrainte-déformation. Les facteurs les plus importants affectant le module d'élasticité sont la teneur en mortier résiduel, le rapport E/C et la teneur en air entraînée [171]. Le module d'élasticité du béton est principalement lié par celui des granulats et par la quantité de pâte de ciment. Les GR présentent un module plus faible que celui des GN. Il en résulte donc un module d'élasticité du béton recyclé inférieur à celui d'un béton primaire, constitué de granulats naturels [114].

Le module d'élasticité d'un BGR fabriqué à partir de fins et gros granulats est d'environ 25% à 40% de moins que celui du béton ordinaire, tandis que pour un béton fabriqué avec de gros granulats seulement, il est d'environ 10% à 33% de moins, avec une variation en fonction du rapport E/C et du taux de remplacement des granulats [172]. Cette baisse sera directement liée à la proportion massique de GR contenue dans le béton recyclé. La probable augmentation du volume de pâte de ciment du béton recyclé accentuera encore cette baisse de module. Selon Pereira et al. [165] ont trouvé que le module d'élasticité des BAP à base de GR diminue d'environ 8,0% par rapport au BAP témoin.

Récemment, Amer et al. [155] ont montré que le module d'élasticité des bétons ayant un rapport E/C de 0,60 reste presque constant jusqu'à un taux de remplacement des GR de 40%, au delà de ce taux une nette diminution a été observée. Pour des rapports E/C de 0,5 et 0,4, le module d'élasticité diminue linéairement quand le taux de remplacement augmente.

Corinaldesi et Moriconi [168] ont étudié l'effet de la fumée de silice et des cendres volantes sur l'amélioration du module d'élasticité du BGR. Ils ont observé que la résistance peut être améliorée pour égaler ou dépasser celle du béton de GN en ajoutant des cendres volantes ou de la fumée de silice dans le mélange.

2.6.4 Retrait

a. Retrait endogène

Ce phénomène est lié à l'auto-dessiccation, qui apparaît préférentiellement dans les bétons à faible rapport E/C. On a dit que le rapport eau efficace/ciment est plutôt plus bas pour les bétons de GR. 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 [173].

D'autre étude de Gomez-Soberon [174] a montré que le retrait endogène avec un taux de remplacement des GR supérieur à 60% indique une déformation moyenne de 0,050 mm/m, par contre une moyenne de 0,007 mm/m est indiquée pour un taux de l'ordre 30%, qui est l'équivalent de 7 fois moins. Les augmentations considérables de retrait correspondent à la forte porosité et la perméabilité des GR venant du mortier attaché aux GR.

b. Le retrait de séchage

Du fait de la forte présence d'ancien mortier à la surface des granulats et de la forte porosité des granulats, la plupart des recherches indiquent que le retrait de séchage est nettement supérieur à celles des bétons à GN [125,175].

Le retrait de séchage du BAP avec des GR 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 2.25 et 2.26) [123].

Gómez-Soberón [174] a fait une analyse expérimentale pour obtenir les propriétés de retrait endogène et de séchage du béton contenant des granulats de béton recyclé. Pour le retrait de séchage, il indique que le taux de retrait est élevé aux jeunes âges, puis ralentit avec le temps. Les facteurs de remplacement des granulats de béton recyclé par des granulats naturel supérieur à 30% provoquent une augmentation rapide dans les valeurs de retrait de séchage.

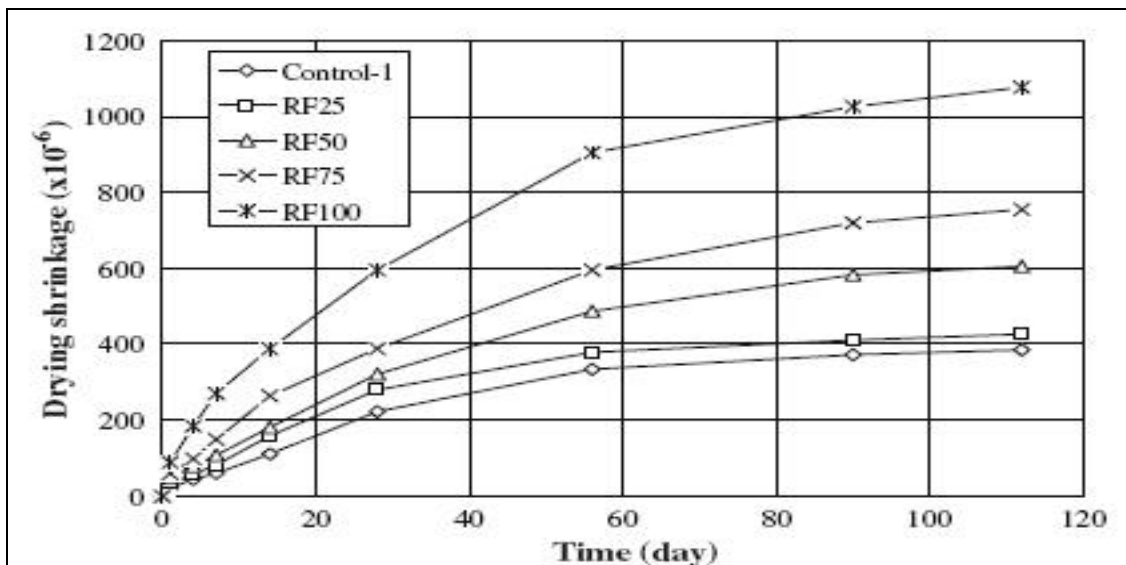


Figure 2.25 : Retrait de séchage pour BAP à base des GR et avec un rapport $E/L=0,53$ [173].

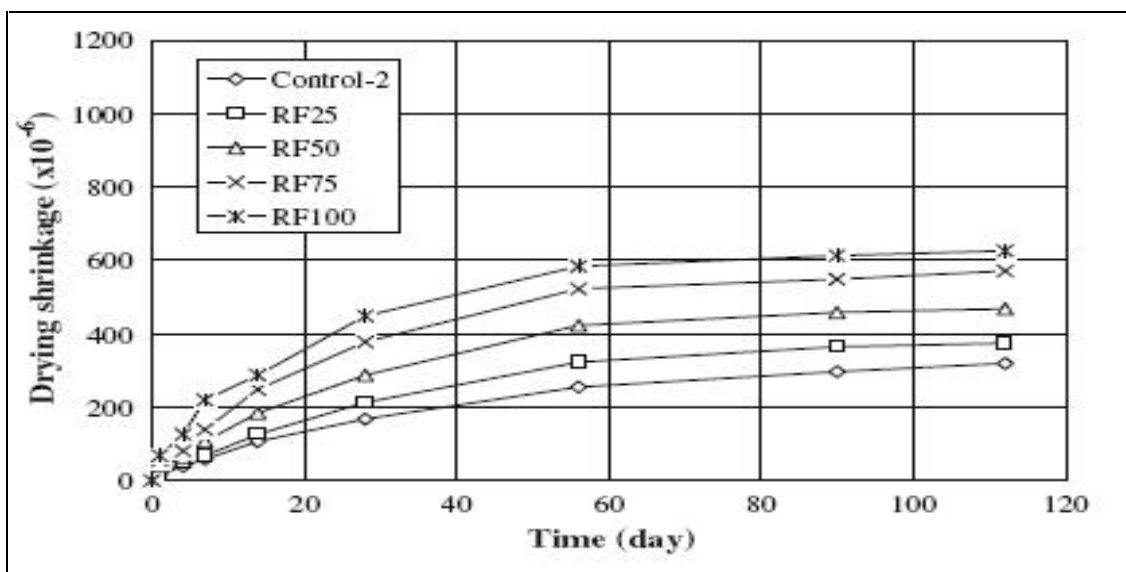


Figure 2.26 : Retrait de séchage pour BAP à base des GR et avec un rapport $E/L=0,44$ [173].

Les résultats de Kenai et Debieb [143] montrés dans la figure 2.27, illustrent que le retrait de séchage à l'air libre des bétons recyclés est nettement plus important que celui du béton de granulats naturels, cela est probablement dû à la porosité élevée des GR ainsi qu'au degré important d'absorption d'eau du mortier de l'ancien béton qui recouvre ces granulats. Ils ont observé un retrait important qui ne se manifeste qu'au-delà d'une certaine période de temps; au départ il est limité en intensité.

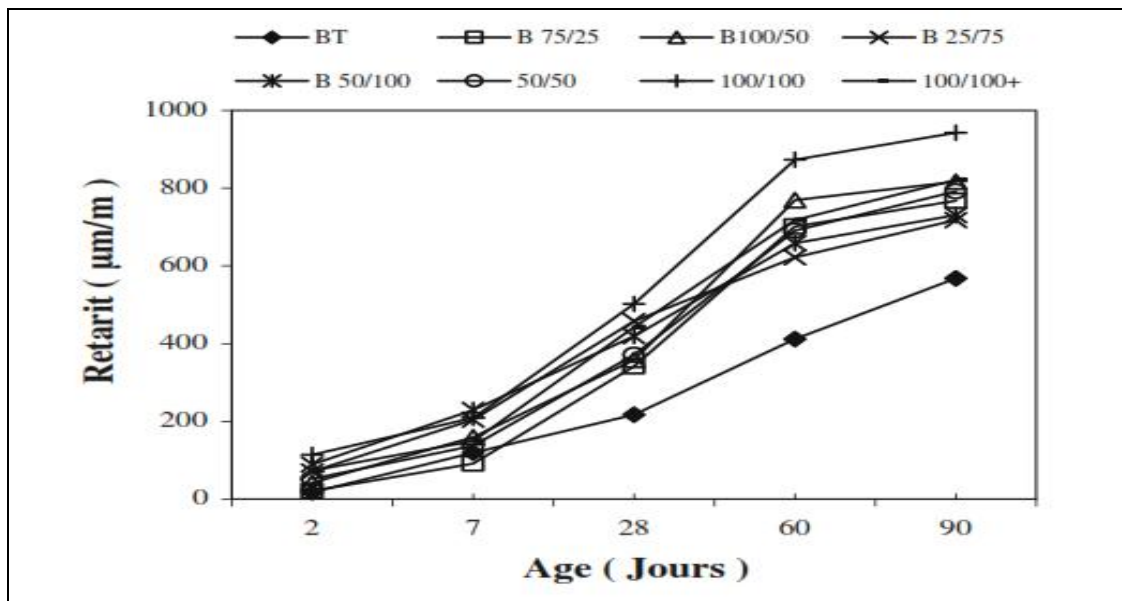


Figure 2.27 : Evolution du retrait des bétons recyclés à base de gros et fins granulats de bétons concassés [143].

2.7 Durabilité des bétons recyclés

De nombreuses études ont été réalisées pour étudier le comportement en durabilité du béton contenant des GR. En préliminaire, il faut signaler qu'il existe plusieurs façons de générer une formule de béton recyclé par rapport à une formule témoin, selon le choix du paramètre gardé constant ; ce choix influe bien entendu sur le résultat de la comparaison. Certains des résultats disponibles dans la littérature sont discutés dans la suite du paragraphe.

2.7.1 Porosité et absorption d'eau des bétons

Du fait de la présence de mortier résiduel entourant la particule de GR et de la présence de fissures en surface des mêmes particules (conséquence de la phase de concassage), le béton incorporant ce type de présente une porosité et une absorption supérieure à un béton à base de gravillons naturels. La porosité et la capacité d'absorption d'eau du béton ont tendance à augmenter avec le taux de substitution en masse de graviers recyclés [176]. Ces deux propriétés sont d'autant plus élevées que le rapport E/C est important (Figure 2.28 et Figure 2.29). Pour un rapport E/C de 0,65 le coefficient d'absorption d'eau augmente de 6,2% à 8,4% (+35%) lorsque la totalité des graviers naturels est remplacée par des graviers recyclés (Figure 2.29).

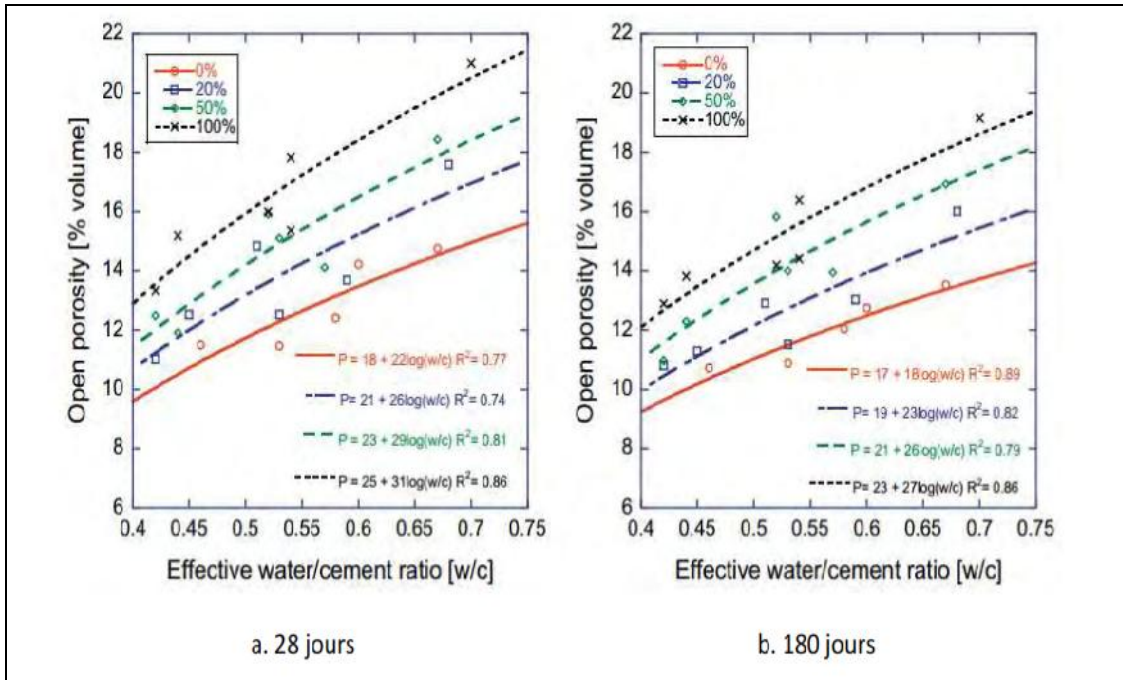


Figure 2.28 : Volume poreux du béton recyclé, à 28 jours (a), à 180 jours (b) [176].

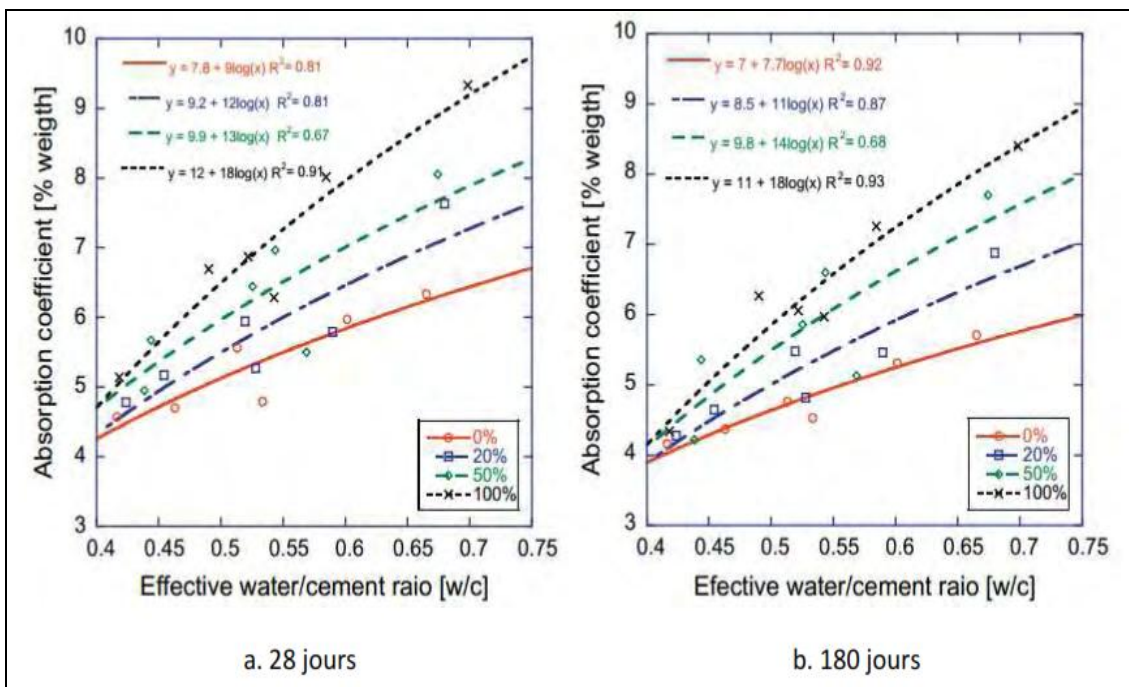


Figure 2.29 : Coefficient d'absorption d'eau du béton recyclé, à 28 jours et à 180 jours [176].

Selon certains auteurs [130], le volume des pores augmente en fonction du taux de remplacement des GR. Cependant, cette augmentation n'a pas été observée pour un taux de remplacement de 20%. Des résultats divergents sont, par contre, observés dans l'étude de Kou et al. [177] où les bétons à GR et GN ont une porosité similaire à 28 jours. La porosité

du béton à base de GR diminue, par contre, davantage entre 28 jours et 5 ans que celle du béton à base de GN.

Evangelista et de Brito [121] ont effectué des essais d'absorption d'eau par immersion totale et par remontée capillaire sur des bétons incorporant de 30% et 100% en masse de SR (Figure 2.30). Par rapport au matériau de référence (0% SR), les résultats d'immersion montrent une augmentation de 16,8% et de 46%, respectivement pour les bétons avec 30% et 100% de SR. Pour le test de remontée capillaire, la sorptivité augmente d'une manière encore plus significative (+70,3% avec 100% de SR).

L'absorption d'eau pour les bétons recyclés est plus élevée que celle du béton témoin. Le pourcentage d'absorption d'eau augmente (en générale de 1,5 à 3,5 fois) quand le pourcentage de substitution en GR augmente. Ce comportement est attendu à cause des gros et fins granulats de bétons et de briques concassées, qui présentent un pourcentage d'absorption d'eau plus élevé (2 à 11 fois pour les gros et 5 à 14 fois pour les fins), que celui des GN. Les valeurs élevées d'absorption d'eau du béton à base de GR sont une indication propre de la porosité et de la perméabilité élevées de ce type de béton et, par conséquent, de l'effet négatif de l'emploi des ces granulats sur la durabilité des bétons [143].

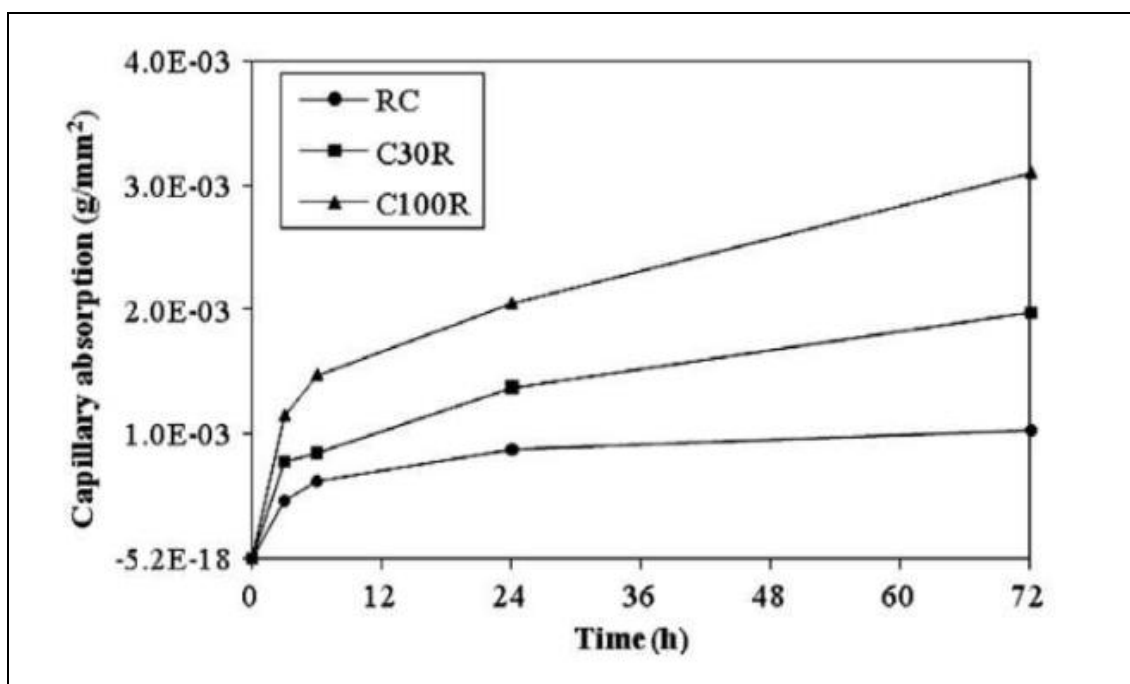


Figure 2.30 : Absorption d'eau par capillarité [121].

L'augmentation de la quantité de GR dans le BAP 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 2.31) [124].

Dans une autre étude similaire, réalisée sur le BAP [158] montre que l'absorption d'eau des mélanges de référence (sans granulats recyclés) augmentent de 2,4% à 3,9% avec un rapport E/C croissant de 0,43 à 0,53 (Figure 2.32). L'absorption d'eau a augmenté également de 19,2 à 32,1% avec l'augmentation du taux de remplacement des GR de 0% à 60%, respectivement. Cela peut être dû à une capacité d'absorption d'eau plus élevée de granulats de béton recyclé par rapport à celle de granulats naturels. L'image du mélange de BAP contenant les GR obtenu à partir d'un microscope optique est illustrée à la figure 2.33. Les granulats et le mortier collé peuvent être vus dans le béton à granulats recyclés. Plusieurs macros pores ont été trouvés dans le mortier collé sur les GR. Ces macros pores conduisent à une absorption d'eau plus élevée du mélange de BAP qui affecte négativement la perméabilité du béton.

Dans le même contexte, Pereira et al. [165] ont élaboré des BAP à base de 20, 40, 60 et 100% des GR et les résultats de l'absorption d'eau par capillarité à été mesuré à 3, 6, 24 et 72 heures (Figure 2.34). Les résultats montrent un comportement similaire pour tous les mélanges. La perméabilité du BAP avec les GR est affectée en même temps par les pores capillaires de l'ancien mortier recouvrant les GR et par les pores capillaires du nouveau mortier.

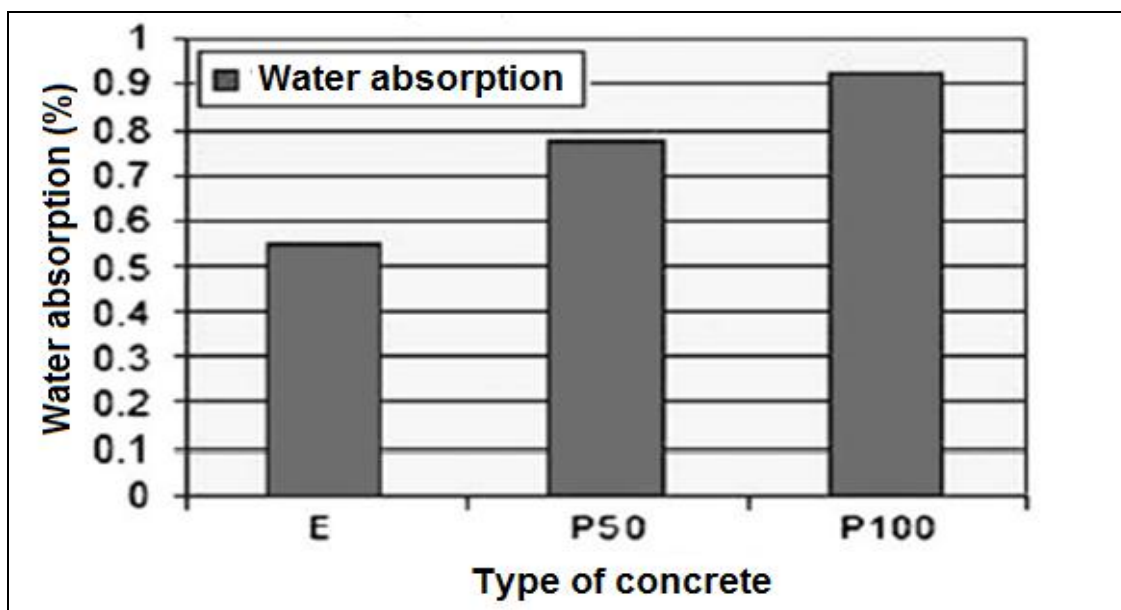


Figure 2.31 : Absorption d'eau pour des BAP avec (0, 50 et 100%) de GR [124].

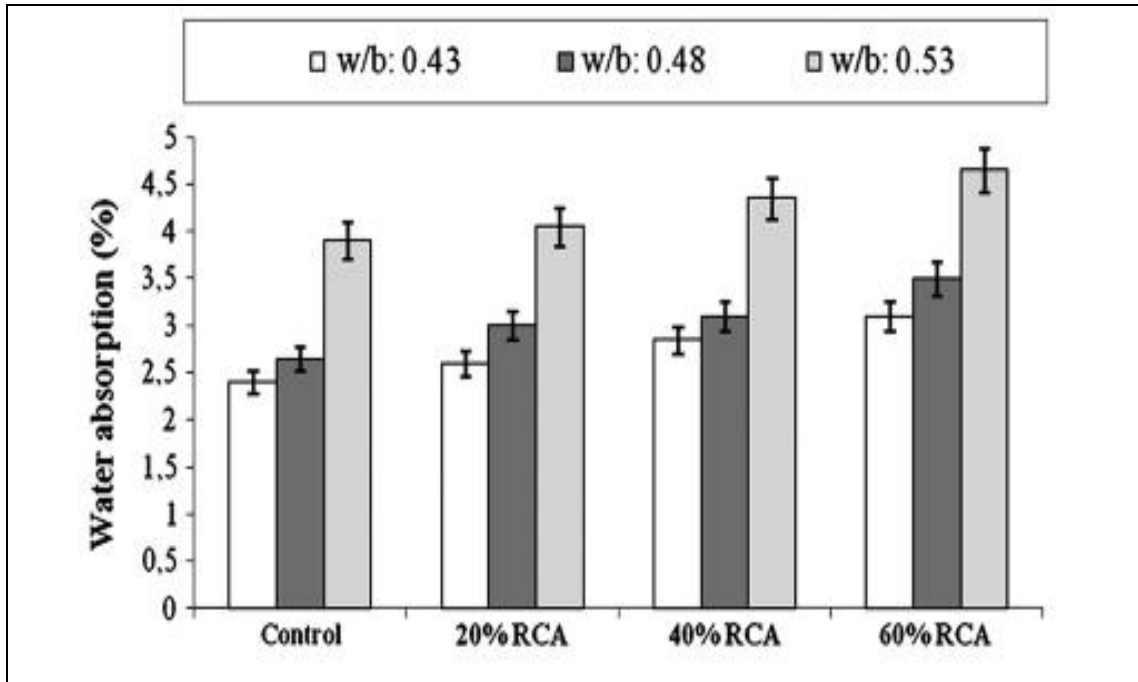


Figure 2.32 : Absorption d'eau pour des BAP [158].

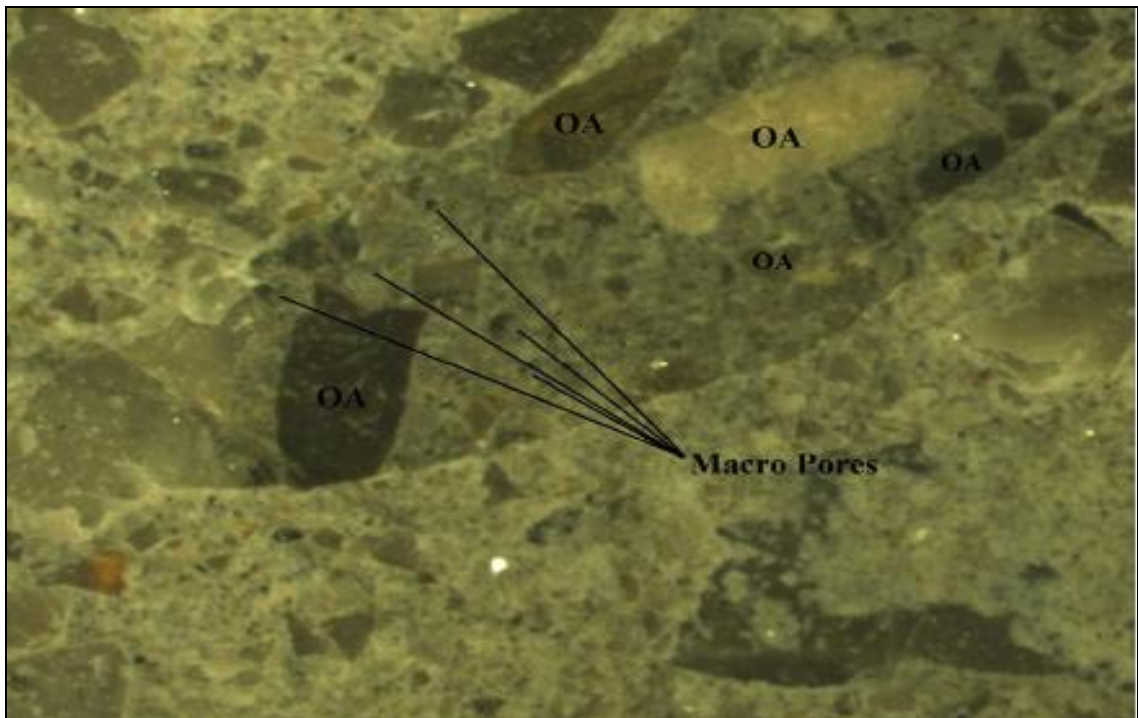


Figure 2.33 : Image par microscope optique d'un BAP à base des GR [158].

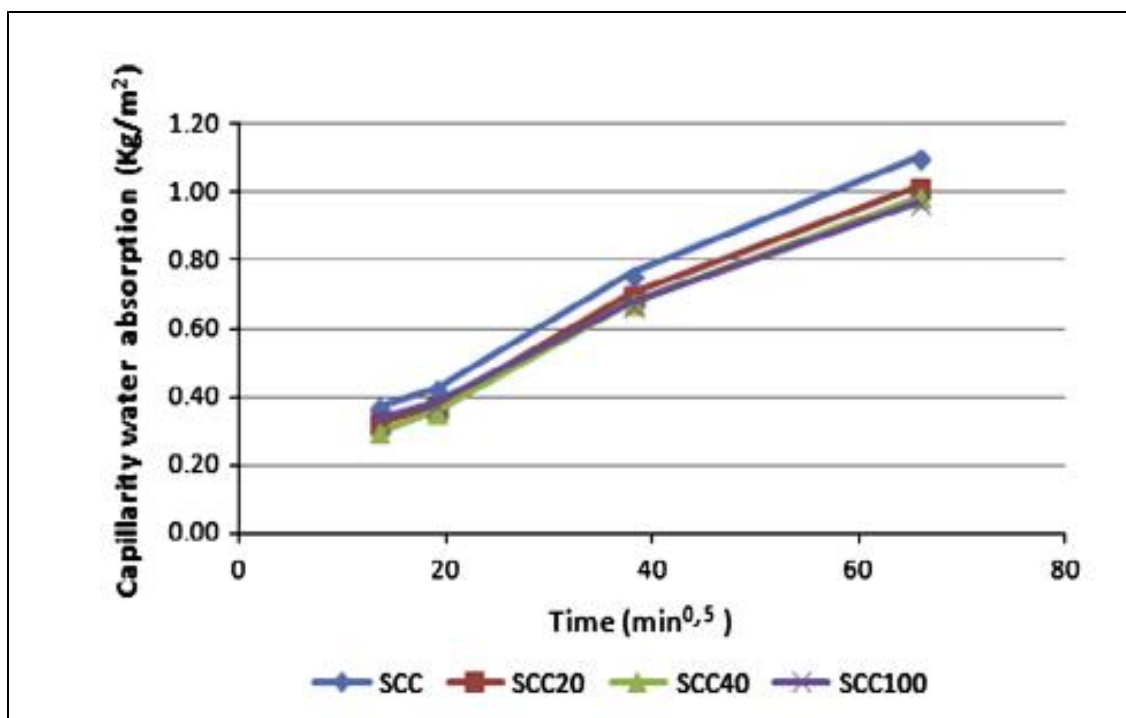


Figure 2.34 : Effet des GR sur l'absorption de l'eau par capillarité [165].

En ce qui concerne, le coefficient de la capillarité de l'eau, Pereira et al. [165] ont montré une diminution de 5% jusqu'à 13% lorsque les GN sont totalement remplacés par les GR (Figure 2.35).

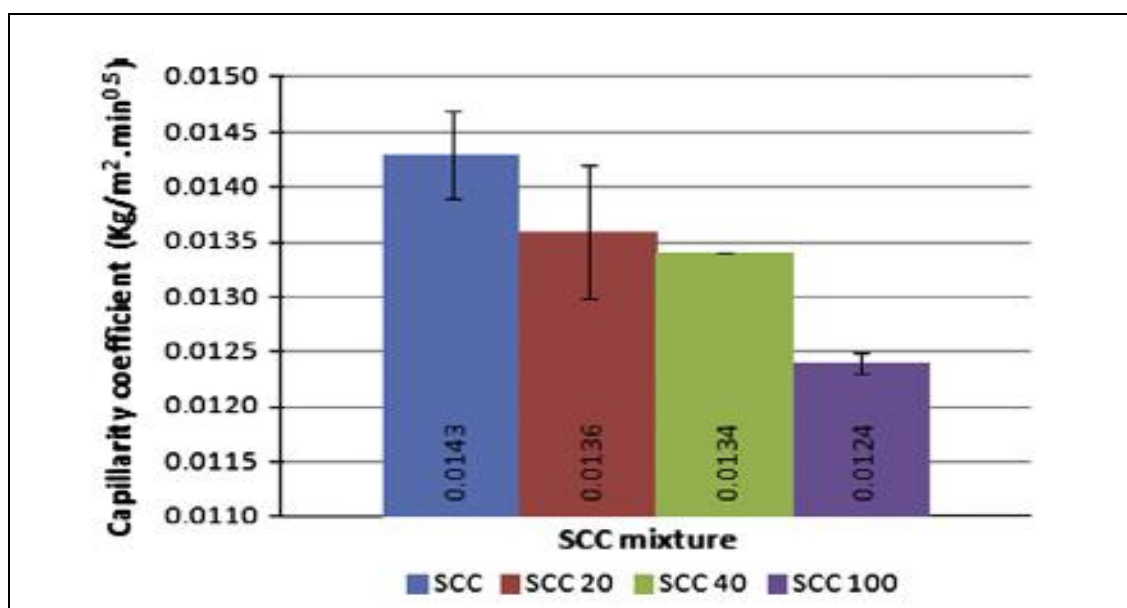


Figure 2.35 : Coefficient de capillarité de l'eau des mélanges de BAP [165].

2.7.2 Perméabilité à l'eau

La perméabilité du béton se définit comme la capacité d'un fluide à passer à travers un solide poreux tel que le béton. Comme la perméabilité du béton détermine la facilité avec laquelle le béton peut devenir saturé avec de l'eau, elle a un impact important sur plusieurs propriétés liées à la durabilité du béton, telles que la résistance au gel/dégel et la résistance à la pénétration des ions de chlorures [178].

La perméabilité à l'eau des bétons recyclés est influencée par la nature et le pourcentage des GR [115, 143]. Cette augmentation est principalement due à l'absorption d'eau des GR qui est beaucoup plus grande que celle des GN. Cependant, cette augmentation n'a pas été observée pour un taux de remplacement de 20%, selon certains travaux [179].

Dans la littérature, les avis divergent. Pereira et al. [165] notent à l'âge de 28 jours, la profondeur de pénétration de l'eau augmente légèrement pour le mélange de BAP contient 20% des GR et réduit d'environ 30% et 25% respectivement pour BAP à base de 40% et 100% des GR (Figure 2.36). Ces résultats montrent que l'incorporation des GR dans les mélanges de BAP a un effet préjudiciable sur la pénétration de l'eau dans le béton.

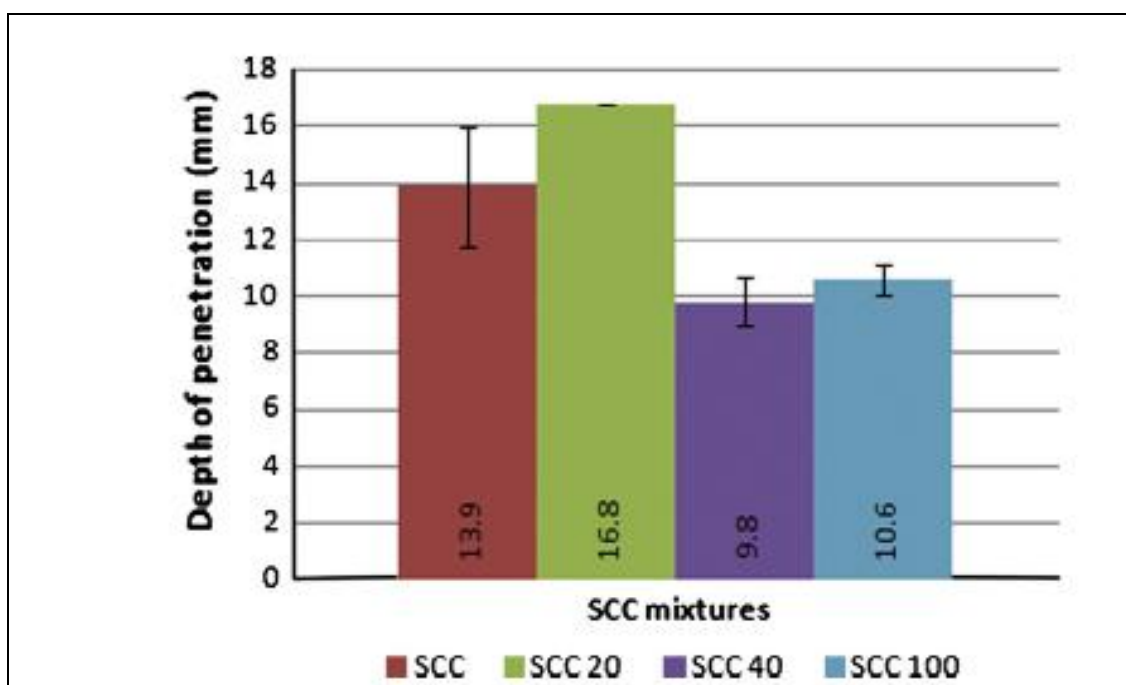


Figure 2.36 : Profondeur de pénétration de l'eau de BAP [165].

2.7.3 Migration des chlorures

Les études réalisées sur la migration des chlorures dans le béton donnent des résultats contradictoires. Abbas et al. [180] ont observé que le coefficient de diffusion apparent du mortier de béton équivalent est du même ordre de grandeur si l'on compare un matériau avec gravillons recyclés et gravillons naturels (de l'ordre de 10^{-12} m²/s).

Selon les résultats représentés en figure 2.37 obtenus par Kou et Poon [122] ont montré que la résistance à la pénétration des ions Cl⁻ diminue nettement dans le temps lorsque 100% en volume de gravillons recyclés sont utilisés (R-100). En revanche, lors d'une imperméabilisation des GR par imprégnation d'une solution de polyvinyle alcool (PI-R(0)-100 et PIR(A)-100), une amélioration significative de cette propriétés est observée à 28 et à 90 jours.

D'après Evangelista et de Brito [121], le coefficient de migration des ions chlorure est augmenté avec l'augmentation du taux de remplacement en sable recyclé. En effet, avec sa teneur élevée en mortier attaché, le sable recyclé peut aider au développement d'un réseau poreux supplémentaire au sein du nouveau béton favorisant ainsi la pénétration des ions du milieu extérieur. Pour le béton avec 100% de substitution massique, le coefficient de migration croît de 34% par rapport au béton de référence. Cette observation est aussi confirmée par les recherches de [148].

Au contraire, dans une étude [123] relative aux BAP composés de sable et de gravillons issus de béton concassé, montrent une pénétration plus difficile des ions Cl⁻ avec un taux croissant de remplacement en SR (Figure 2.38). Ils attribuent ce phénomène à l'effet filler engendré par les grains fins présents dans le SR (< 0,3 mm).

Plusieurs auteurs ont montré que la résistance à la pénétration des ions chlorure des bétons diminue avec l'augmentation du taux de remplacement de GR [124, 181]. Tuyan et al. [158] ont montré également l'augmentation du taux de remplacement de GR et le rapport E/C provoque une diminution de la résistance à la pénétration des ions chlorure des BAP comme le montre dans la figure 2.39.

Kanish Kapoor et al. [169] ont montré que la fumée de silice (SF) et le métakoalin (MK) sont très efficaces pour réduire la pénétration des ions chlorures dans le BAP à base des GR. Les mélanges à base de 10% de FS ou MK réduit plus la pénétration des ions chlore pour les mélanges de BAP à base des GR que les mélanges de BAP à base de GN.

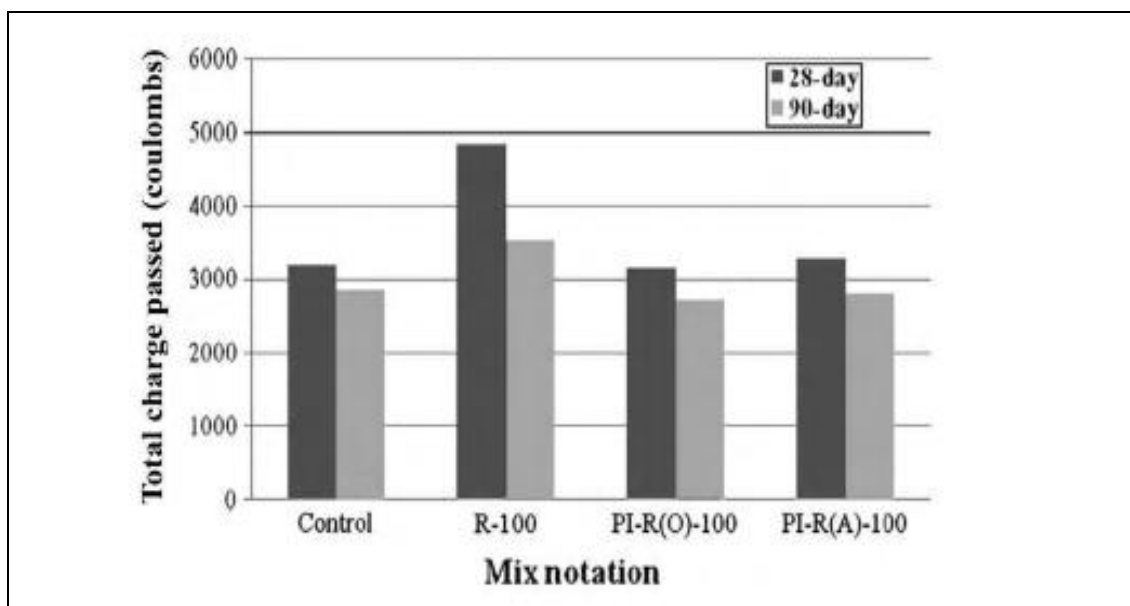


Figure 2.37 : Evolution de la résistance à la pénétration des ions Cl^- en fonction de la présence et de l'état de surface des gravillons recyclés [122].

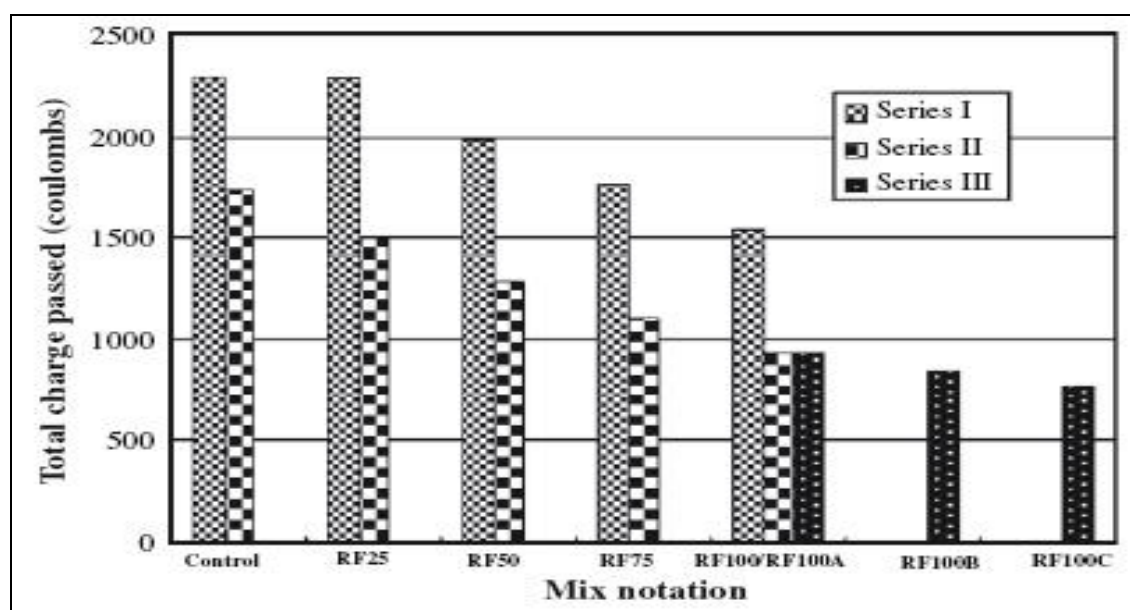


Figure 2.38 : Pénétrations des ions Cl^- pour des bétons à base de SR [123].

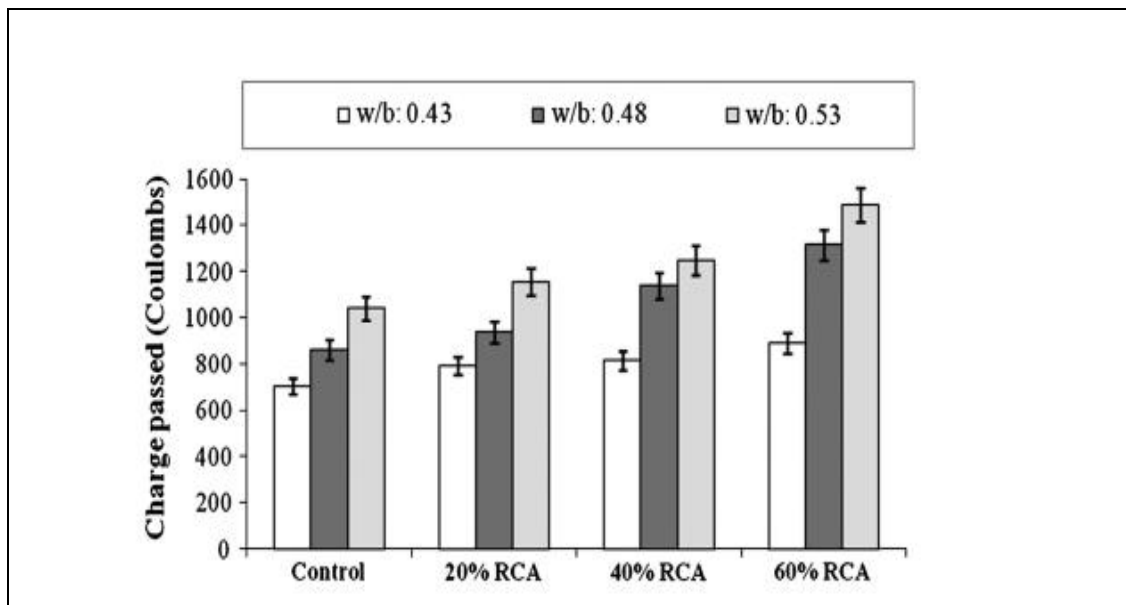


Figure 2.39 : Résistance à la pénétration des ions chlorure des BAP [158].

2.8 Conclusion

La lecture bibliographique nous a permis de savoir que la qualité des GR semble être inférieure à celle des GN. Physiquement, les GR sont de surface rugueuse, de forme anguleuse, de faible densité, de forte porosité, d'absorption d'eau élevée et de faibles résistances mécaniques. Ceci est expliqué par la porosité élevée de la pâte cimentaire qui influence les propriétés des bétons à base des recyclés à l'état frais et durci. Il est donc essentiel de contrôler la quantité et la qualité de la pâte de ciment présent sur les granulats d'origine afin de comprendre leur influence sur les propriétés des GR et, par conséquent, les propriétés des bétons à base des GR.

Des nombreux auteurs ont conclu que la substitution des GN par les GR dans le béton, nécessite une augmentation de la quantité d'eau de gâchage supplémentaire pour palier aux difficultés d'écoulement du béton frais et par conséquent ceci provoque des pertes de résistance à la compression, à la flexion ainsi que le module d'élasticité. La littérature consultée pour cette thématique montre l'utilisation des GR provoque une dégradation significative de certaines propriétés telles que les résistances à la pénétration de l'eau sous pression, la pénétration des ions chlorure et l'absorption d'eau par immersion. Il a été également constaté des valeurs plus élevées de retrait. Ces conséquences négatives sur les performances mécaniques et la durabilité des bétons à base des GR peuvent être

compensées de manière adéquate par l'utilisation des ajouts minéraux, telles que les cendres volantes, fumée de silice et le métakoalin soit en remplacement du ciment, soit par addition dans la composition du mélange de béton. Il est à noter que peu de travaux ont été reportés dans la littérature sur effet de la substitution simultanée des GR (gros et fins) et laitier de haut fourneau sur les propriétés rhéologiques, les performances mécaniques et la durabilité des BAP. Le but de cette étude expérimentale est justement d'adopter une méthode de formulation, pour la fabrication d'un BAP à base des gros et fines GR et laitier et étudie l'influence de ces derniers sur les propriétés rhéologiques, mécaniques et durabilité.

CHAPITRE 3

MATÉRIAUX ET MÉTHODES D'ESSAIS

3.1 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.

3.2 Caractéristiques des matériaux utilisés

Le comportement du BAP est le résultat d'une interaction complexe entre ses divers constituants, c'est la raison pour laquelle, nous commençons ce chapitre par une présentation des matériaux mis en œuvre pour confectionner nos mélanges et les proportions avec lesquelles ils entrent dans les compositions.

3.2.1 Ciment

Le ciment utilisé est un ciment Portland composé, du type CEM II/A 42.5 provenant de la cimenterie de M'sila. Ce ciment présente une résistance minimale à la compression à 28 jours de 42,5 MPa pour un rapport E/C = 0,5 selon la norme NF P 15-471 [182]. Les caractéristiques chimiques et minéralogiques de ce ciment sont présentées dans le tableau 3.1.

Tableau 3.1 : Caractéristiques chimiques et minéralogiques du ciment

Composition chimique (%)									
CaO	SiO₂	Al₂O₃	Fe₂O₃	MgO	SO₃	Na₂O	K₂O	PAF	RI
61,74	20,92	5,33	3,43	1,58	1,83	0,13	0,67	1,65	1,35
Composition minéralogique (%)									
C₃S		C₂S			C₃A		C₄AF		
61,50		16			7,25		11		

Les essais physico-mécaniques du ciment ont été réalisés au laboratoire Géomatériaux et Génie Civil de l'Université de Blida 1, dont les résultats d'identification sont donnés dans le tableau 3.2.

Tableau 3.2 : Propriétés physique et mécanique du ciment utilisé

Essai	CEM II/A 42.5
Masse volumique apparente (ρ_{app}) (kg/m^3)	1170
Masse volumique absolue (ρ_{abs}) (kg/m^3)	3040
Finesse SSB (cm^2/g)	3200
Temps de début de prise (heure, minute)	2h54
Temps de fin de prise (heure, minute)	4h36
Résistance à la compression (N/mm^2)	
2 jours	15,43
7 jours	33,98
28 jours	45,55

3.2.2 Laitier

Dans la présente nous avons utilisé un laitier granulé de haut fourneau du complexe sidérurgique d'El-Hadjar, (Wilaya d'Annaba). Le laitier est obtenu par refroidissement par jet d'eau (trempe à l'eau) et chute dans un grand bassin, il se présente sous forme de grains sphériques de classe granulométrique 0/5 mm, de couleur jaune clair (Figure 3.1)

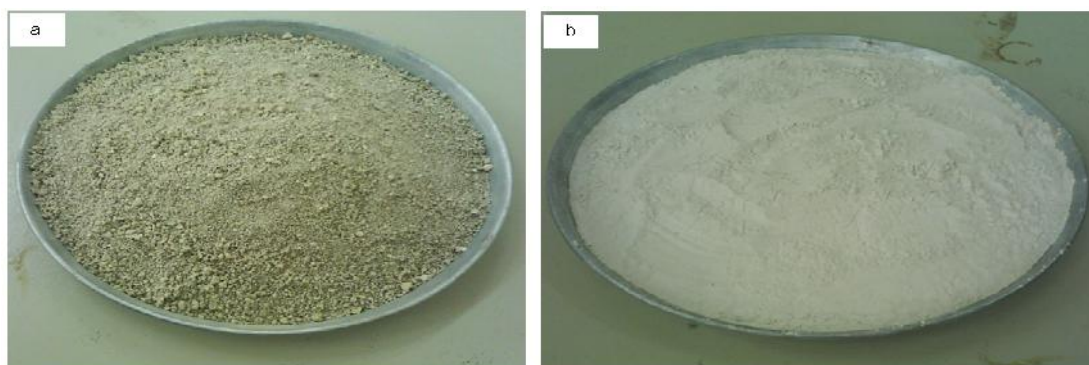


Figure 3.1: Laitier utilisée, (a) avant broyage, (b) après broyage.

Pour pouvoir l'utiliser comme addition dans les différentes compositions de BAP, nous avons d'abord procédé à son étuvage à 50 °C, afin d'éliminer toute éventuelle humidité et faciliter son broyage, nous l'avons ensuite complètement broyé dans un broyeur à boulets (Figure 3.2) d'une capacité de 5 kg (Laboratoire de la chimie industrielle à Blida) et la quantité finale de laitier obtenue après le broyage a été mélangée dans le but d'assurer une bonne homogénéisation du mélange préparé. La figure 3.3 présente la finesse du laitier en fonction du temps du broyage. Dans la présente étude, le laitier a été broyé pendant 125 minutes pour l'obtention d'une finesse de 3500 $\mu\text{m}^2/\text{g}$. La masse volumique apparente du laitier est de 956 kg/m^3 et sa masse volumique absolue est 2850 kg/m^3 . L'analyse chimique de laitier est montrée dans le tableau 3.3.



Figure 3.2 : Broyage de laitier, (a) Broyeur à boulet, (b) Broyeur en rotation, (c) Laitier après broyage.

Tableau 3.3 : L'analyse chimique de laitier d'El Hadjar

Élément	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	K ₂ O	SO ₃	TiO ₂
(%)	40,10	6,00	2,00	42,20	4,70	2,60	1,20	0,15	1,20

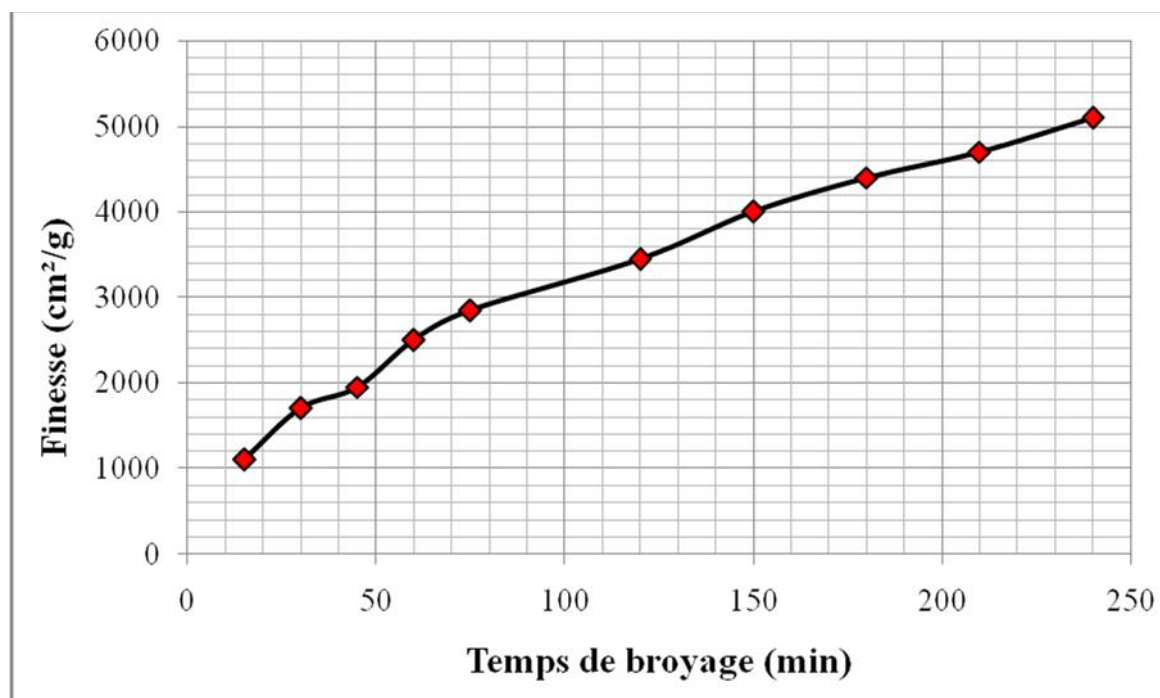


Figure 3.3 : Finesse du laitier en fonction du temps de broyage.

3.2.3 Granulats naturels

a/ Sable

Le sable utilisé dans cette étude provient de la région de Baghlia 'S₁' (wilaya de Tizi-Ouzou), 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, mélange de 57% du sable 'S₁' et de 43% du sable 'S₂', à un module de finesse de 2,80. La figure 3.4 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 3.4.

b/ 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. Ces deux types de graviers provenant de la même station de concassage de Setif. Les principales caractéristiques physiques de gravier sont données dans le tableau 3.4. La figure 3.4 présente les courbes granulométriques des graviers utilisés.

3.2.4 Granulats recyclés

Les granulats recyclés ont été produits par le concassage (moyennant un concasseur à mâchoire) de petites dalles ($1 \times 0,5 \times 0,1 \text{ m}^3$) en béton à base de 100% de gros et fines granulats naturels en laboratoire. La composition d'un mètre cube de béton naturel est basée sur la méthode de Dreux [34], avec 1150 kg de granulats, 725 de sable et 335 kg de ciment. C'est un béton plastique (Slump = 70 mm) de rapport E/C = 0,64 et qui présente une résistance en compression moyenne à 28 jours de 30 MPa.

Les dalles ont été conservées pendant 28 jours dans l'eau afin de subir un concassage préliminaire qui a été fait manuellement, et un concassage final à l'aide d'un concasseur mécanique (Figure 3.5). Le matériau concassé est passé à travers des tamis pour obtenir les différentes fractions de granulats recyclés. Les courbes granulométrique sont présentées dans la figure 3.4. La caractérisation des granulats sont représentés dans le tableau 3.4.

Les valeurs obtenues du calcul du module de finesse de ces différents sables sont 2,80; 3,82, respectivement pour le SN et SR. Le sable SR est plus grossier que les sables naturels. Cela confirme bien les résultats de l'analyse granulométrique. D'autre part, ces résultats montrent que plus le module de finesse est élevé, plus le sable est grossier. Selon le fuseau de la granularité des sables, un bon sable à béton doit avoir un module de finesse comprise entre 2,2 et 2,8. Selon Dreux et Gorisse [34] le bon sable à béton doit avoir un module de finesse qui se situe d'environ de la valeur 2,5. A part le SN, le sable recyclé est situé en dehors de cet intervalle.

En comparant les masses volumiques (absolue et apparente) des GN et des GR 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.

D'autre paramètres se diffèrent entre les granulats naturels et le recyclés. Le paramètre le plus important est le coefficient d'absorption d'eau. A partir de tableau 3.4 on remarque un coefficient d'absorption d'eau élevé pour les GR. Cela s'explique par le faite que le GR est formé essentiellement d'ancien mortier qui aurait une porosité élevée. Au contraire, les GN sont constitués de minéraux issus de l'altération des roches.

Tableau 3.4 : Caractéristiques physiques des granulats utilisés

Caractéristiques physiques des granulats	Sable		Gravier				Norme
	Naturel	Recyclé	Naturel		Recyclé		
	0/5	0/5	3/8	8/15	3/8	8/15	
Masse volumique apparente (ρ_{app}) (kg/m^3)	1640	1258	1475	1465	1172	1154	NF P 18-554
Masse volumique absolue (ρ_{abs}) (kg/m^3)	2530	2266	2730	2700	2386	2400	NF P 18-555
Coefficient d'absorption (%)	1,70	8,87	0,5	0,5	7,39	3,21	NF P 18-554
Humidité (%)	1,70	6,30	0,13	0,13	3,73	2,64	NF P 18-554
Module de finesse	2,80	3,82	/	/	/	/	NF P 18-598
Equivalent de sable visuel (%)	79,50	76,15	/	/	/	/	NF P 18-598
Equivalent de sable au piston (%)	74,75	71,50	/	/	/	/	NF P 18-598

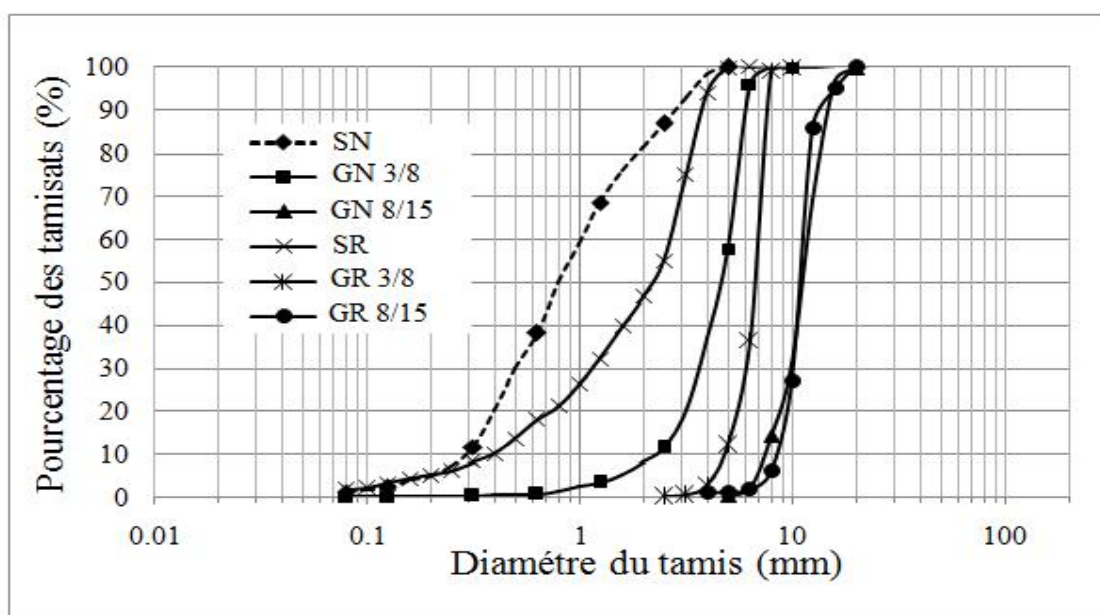


Figure 3.4 : Courbes granulométriques des granulats naturels et recyclés.



Figure 3.5 : Concasseur à mâchoire.

3.2.5 Eau de gâchage

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

3.2.6 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-NP et commercialisé sous le nom de 'MEDAFLOW 30'. Il est à base de polycarboxylates qui fonctionnent par répulsion stérique, de densité $1,07 \pm 0,01$, 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 sec. La plage d'utilisation recommandée varie de 0,5 à 2,0 % du poids du ciment soit 0,5 à 1,850 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.

3.3 Formulations du BAP 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 à 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).

Boukendakdji [75] 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 E/L, le rapport S/M, et la variation du rapport S/L.

Pour mettre en évidence l'effet du laitier et les granulats recyclés sur le comportement rhéologique, mécanique et durabilité du BAP, nous avons fixé tous les autres paramètres, le rapport S/M, le rapport E/L ainsi que le pourcentage en superplastifiant par rapport au liant. 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 E/L ainsi que le rapport S/L. 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.

3.3.1 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 la stabilité du BAP durant l'écoulement.

Des tests sur les mortiers autoplaçants 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.

Afin d'obtenir une composition de bétons autoplaçants, nous avons suivi les mêmes principes de formulations utilisés par Boukendakdji [75]. En se basant sur les résultats trouvés dans ces travaux concernant l'optimisation du rapport sable/mortier, nous avons fixé : le rapport S/M à 0,50, le rapport E/C à 0,38 tout en faisant varier le rapport Sp/L. 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 (mortier ne comportera pas de laitier) obtenu doit être compris entre 270 mm et 330 mm, et par l'essai de l'entonnoir en V (V-funnel), dont le temps d'écoulement obtenu doit être compris entre 2 sec et 10 sec [183].

3.3.1.1 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 ont préconisés 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 [183] qui s'articule sur les étapes suivantes (Figure 3.6) :

- ◆ Malaxer à sec le ciment et le sable pendant environ une (1) minute afin d'homogénéiser le mélange ;
- ◆ 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 (Eau 2 = 30% Eau) mélangé avec le superplastifiant ;
- ◆ Malaxer le mélange pendant 3 minutes.

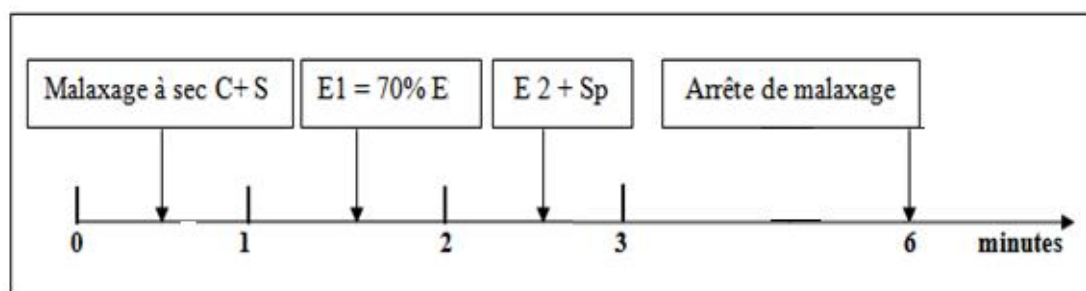


Figure 3.6 : Séquence de malaxage du mortier [183].

3.3.2 Formulation du BAP de Référence

Les essais effectués sur mortier est une étape indispensable, car elle permet de fixer les rapports E/L, S/M ainsi que Sp/L qui facilité par la suite la formulation du BAP de référence (0% Laitier et 0% des granulats recyclés). 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.

3.3.2.1 Confection des BAP

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

Pour notre cas, la séquence suivie est celle décrite dans la figure 3.7 ; 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

$$E_{\text{eff}} = E_{\text{totale}} - E_{\text{teneur en eau}} - E_{\text{adjuvant}} + E_{\text{absorbée par granulats}} \quad (\text{annexe B}) \quad (3.1)$$

- ◆ 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.

Cette séquence de malaxage est adoptée pour tous les mélanges de bétons autoplaçants confectionnés. En ce qui concerne le re-malaxage, il se fait juste avant chaque essai.

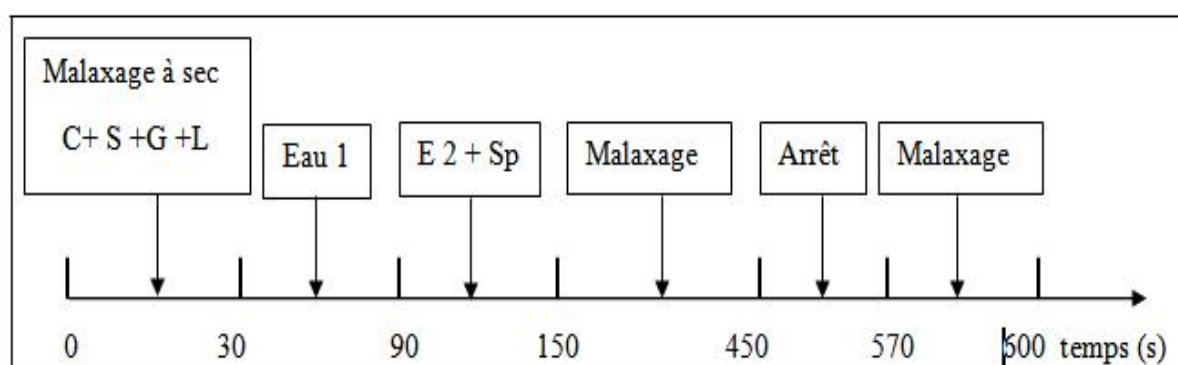


Figure 3.7 : Séquence de malaxage du béton autoplaçant [183].

3.3.2.2 Substitution du ciment par du laitier et les GN par des GR

Après avoir obtenu le BAP de référence, on procèdera à la substitution du ciment par du laitier à différents pourcentages. Des études ultérieures [44, 75] ont montré que le dosage optimal du laitier de haut fourneau Algérien est limité entre 15 et 30% en substitution de ciment. Par conséquent, nous avons décidé de limiter les pourcentages de laitier utilisés dans notre étude à 15 et 30%.

Ainsi, les approches pour formuler un béton sont nombreuses, chacune fixe les paramètres utiles pour comparer et observer l'effet des granulats recyclés sur le comportement physique des bétons. Certains choisissent de travailler à ouvrabilité constante [143] tandis que d'autres auteurs s'intéressent aux temps de malaxage, au degré d'humidité des granulats recyclés et à la quantité d'eau globale et effective à mettre en œuvre [121, 174]. Enfin, certains chercheurs travaillent avec une méthode de mortier équivalent [162]. Dans cette méthode, on considère que le remplacement est massique sans modifier les autres paramètres de composition (rapport E/C, dosage en superplastifiant).

En général il n'existe pas de méthode de composition du BAP qui soit universellement reconnue comme étant la meilleure. La composition du béton est toujours le résultat d'un compromis entre une série d'exigences généralement contradictoires. Cependant, une méthode de composition du béton pourra être considérée comme satisfaisante si elle permet de réaliser un béton qui respecte les cahiers des charges.

Le taux de remplacement du GN par un GR a un impact très important sur les propriétés du béton recyclé. Bien qu'un taux de remplacement de 100% des GN ait dans la plupart des cas un impact négatif sur la résistance à la compression et certaines autres propriétés du béton, il semble exister un taux de remplacement pour lequel l'utilisation de GR n'a pas d'impact négatif observable. Pour ce taux de remplacement, il n'y a pas d'impact significatif lors du remplacement d'une portion des GN par des GR. La valeur de ce taux de remplacement varie, où, beaucoup d'études relient ce taux en fonction des formules de mélanges et des paramètres analysés. Les valeurs de remplacement généralement proposées dans la littérature se situent entre 20 et 50% [115,130]. Dans notre étude les GR sont incorporés dans la formulation du BAP en remplacement des GN dans des proportions variant de 0 à 100 %. Des BAP témoins sont toujours confectionnées pour la comparaison.

3.4 Essais de caractérisation des BAP à l'état frais

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 inadaptes 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.

3.4.1 Essais relatifs au mortier à l'état frais

3.4.1.1 Essai d'étalement au mini-cône

L'essai d'étalement consiste à remplir un moule tronconique, le diamètre d'étalement du mortier est mesuré suivant deux directions perpendiculaires. 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 3.8 montre le dispositif de l'essai d'étalement pour les mortiers.

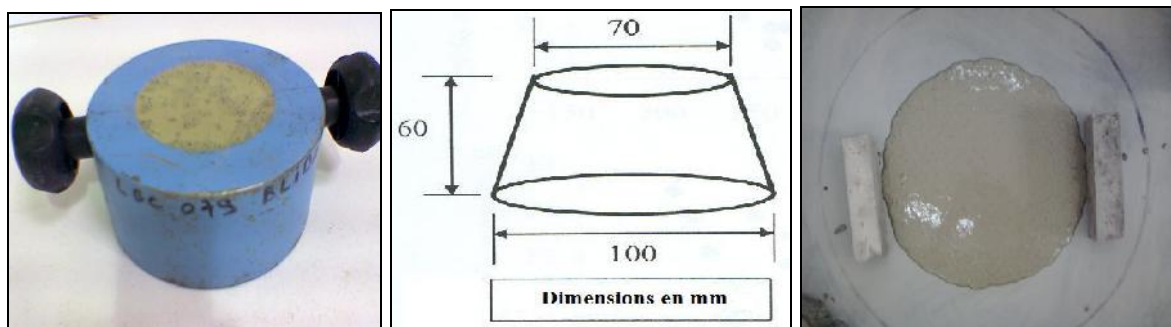


Figure 3.8 : Essai d'étalement pour mortier.

3.4.1.2 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 3.9). 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.

Des essais réalisés avec des matériaux Japonais ont montré que 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 produisent un bon BAP. Des essais sur des matériaux Anglo-Saxon, a suggéré une valeur d'étalement minimale de 300 mm et un temps d'écoulement compris entre 2 et 10 sec [184].

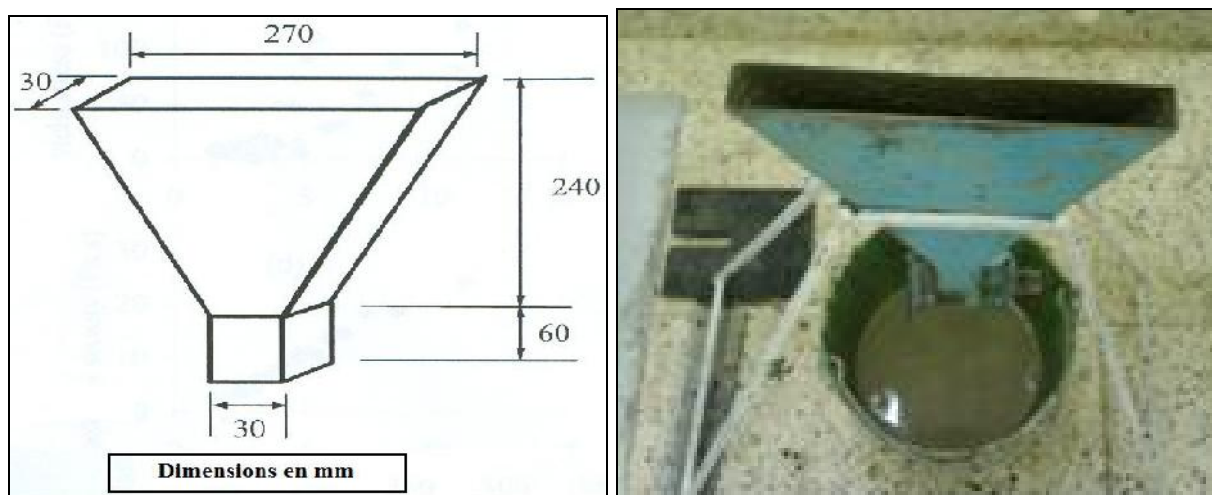


Figure 3.9 : Essai à l'entonnoir en V pour mortier.

3.4.2 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) [26] 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 au cône d'Abrams et V funnel) ;
- La mobilité en milieu confiné (décrit par l'essai d'écoulement à la boîte en L) ;
- La stabilité (décrit par l'essai de stabilité au tamis).

3.4.2.1 Ouvrabilité

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

C'est l'essai le plus courant pour évaluer la fluidité du béton, car il est d'une part facile à transporter, à réaliser sur chantier et à nettoyer et d'autre part, il permet de donner des informations sur la fluidité, la viscosité et le risque de ségrégation du béton.

L'essai d'étalement est réalisé à l'aide du cône d'Abrams (Figure 3.10). Ce dernier est un moule en métal non directement attaquant 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.

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 3.11). 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 [4].

Selon la norme EN 12350-8 [185], les valeurs d'étalement au cône d'Abrams acceptables pour un BAP sont généralement fixées dans la fourchette de 550 à 850 mm (pas de ségrégation visible en fin d'essai c'est-à-dire pas d'amoncellement de gros granulats ni d'auréole de laitance). La mesure de l'étalement au cône d'Abrams, peut être divisée en

trois (03) classes. Le tableau 3.5 définit ces trois classes selon le domaine d'utilisation du BAP.

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

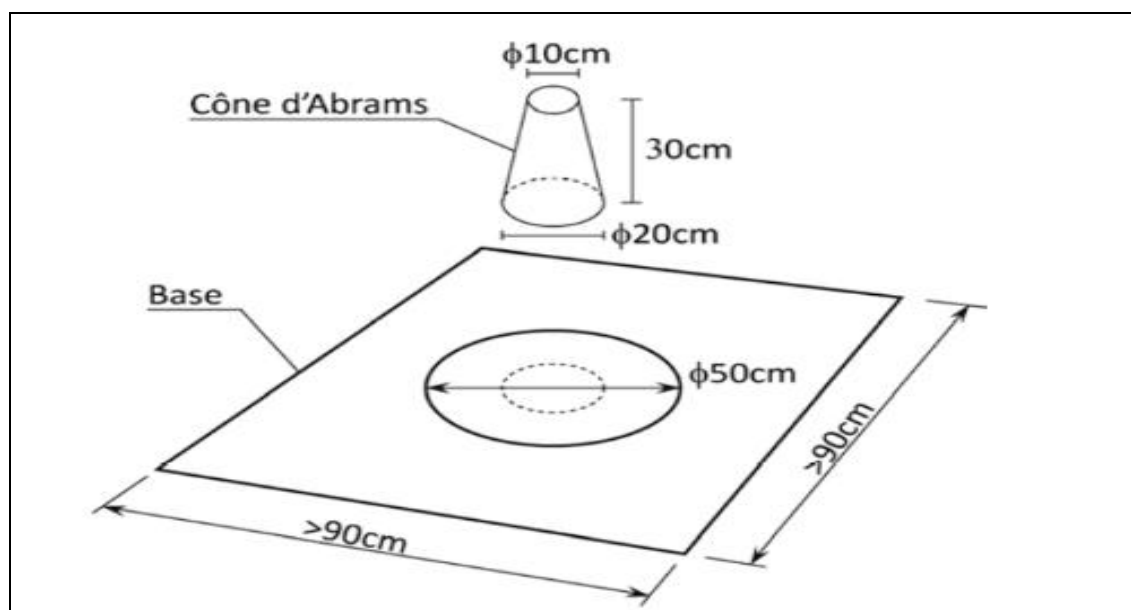


Figure 3.10 : Essai d'étalement au cône d'Abrams [4].



Figure 3.11 : Mesure du diamètre d'étalement.

Tableau 3.5 : Classification des BAP selon domaine d'utilisation [185]

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.

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.

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

Cet essai consiste à évaluer la viscosité et la ségrégation d'un béton en observant l'écoulement d'un volume de 12 litres de mélange à travers un entonnoir en forme de V (Figure 3.12) et à mesurer le temps d'écoulement entre le moment où la trappe de dimensions 7,5 cm x 6,5 cm est libérée et le moment où l'on aperçoit le jour par l'orifice. 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 la norme EN 12350 – 9 [186] définies deux classes de viscosité suivant le temps d'écoulement qui sont :

- VS1/VF1 si le temps d'écoulement t est inférieur à 8 s. Cette classe correspond à $T_{500} \leq 2s$.
- VS2/VF2 pour un temps d'écoulement compris entre 9 et 25 s. Cette classe correspond à $T_{500} > 2s$.

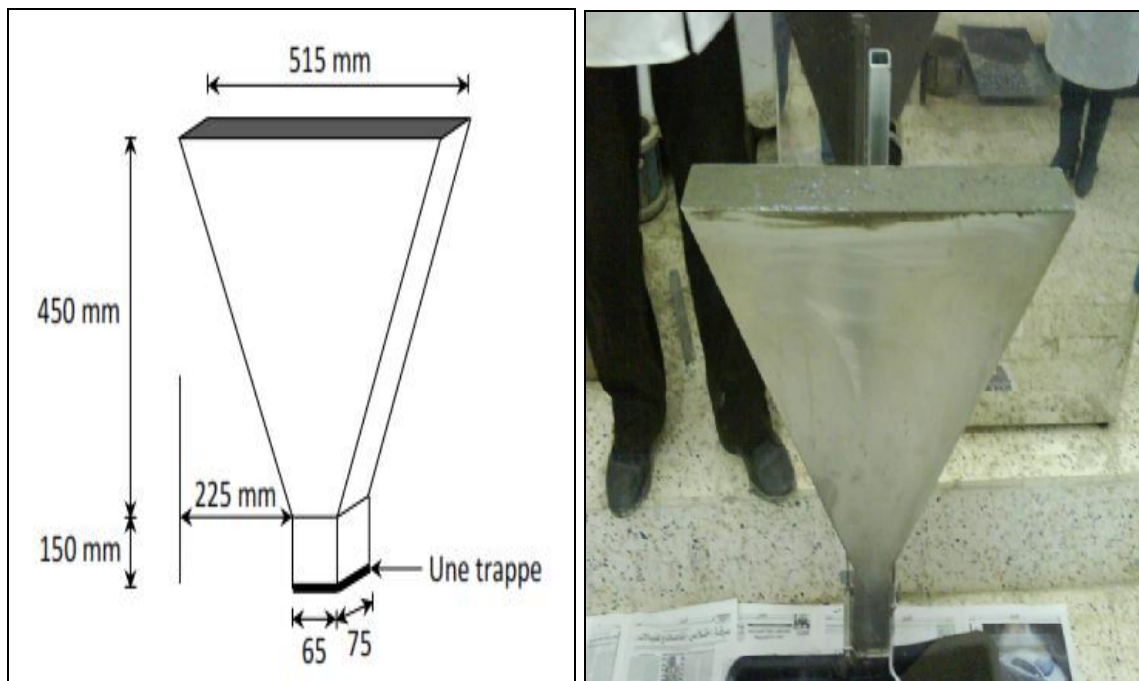


Figure 3.12 : Dispositif de l'essai d'entonnoir en V (V-Funnel).

✓ Essai à la boîte en L (L-Box test)

Ce banc d'essai permet de tester l'écoulement du béton en milieu confiné et d'évaluer sa capacité de passage en vérifiant que sa mise en place ne sera pas contrariée par des phénomènes de blocage. Le dispositif d'essai est constitué d'une boîte en forme de L d'une hauteur totale de 60 cm, de 70 cm de longueur et de 20 cm de largeur (Figure 3.13). La partie verticale est séparée de la partie horizontale par une trappe et une série d'armatures constituée de trois barres de 10 mm de diamètre, espacées de 34 mm.

Dans un premier temps, la partie verticale du dispositif est remplie de béton qui sera laissé au repos pendant 1 min. La trappe est ensuite soulevée afin de laisser s'écouler le béton à travers le ferrailage. A la fin de l'essai, les hauteurs de béton, aux deux extrêmes de la boîte sont mesurées (respectivement H1 et H2). Le rapport H2/H1 permet de caractériser la dénivellation et doit être supérieur à 0,8 [187].

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.

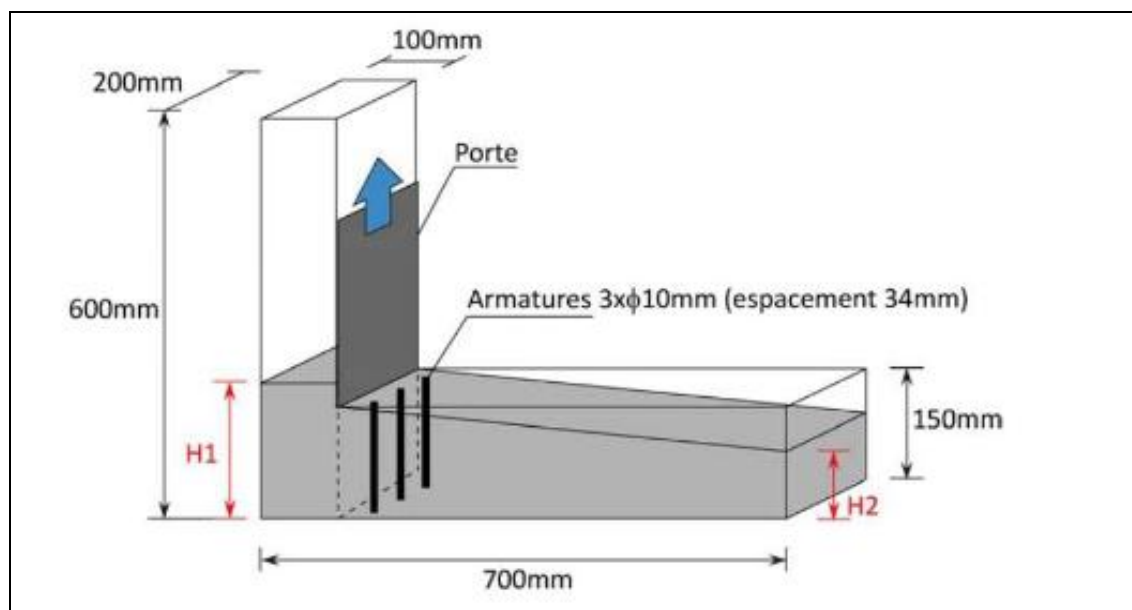


Figure 3.13 : Essai de la boîte en L [3].

✓ 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 3.14). Le BAP doit demeurer stable sous l'effet de la gravité et ne doit pas présenter des signes de ressuage. L'essai 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 :

$$\Pi = \frac{P_{\text{laitance}}}{P_{\text{échantillon}}} \times 100 \quad (3.2)$$

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

Tableau 3.6 : Critères de stabilité [188]

Conditions	Critères de stabilité	Remarques
$0 \leq \Pi \leq 15\%$	Stabilité satisfaisante	Béton homogène et stable
$15 \leq \Pi \leq 30\%$	Stabilité critique	Vérifier les autres critères d'ouvrabilité
$\Pi > 30\%$	Stabilité très mauvaise	Ségrégation systématique, béton inutilisable



Figure 3.14 : Essai de résistance à la ségrégation au tamis.

3.4.2.2 Essai de rhéologie

Pour déterminer, expérimentalement, le comportement rhéologique des BAP, on a utilisé un rhéomètre rotatif ; Heidolph- RZR 2102 Control Z. Ce rhéomètre est composé d'un agitateur avec deux vitesses de rotation (Figure 3.15), un croisillon composé de deux plaques perpendiculaires en forme de U inversée, de dimensions 5x10 cm (Figure 3.16) et d'un récipient cylindrique de dimension 30 x 30 cm (Figure 3.17). Le schéma de la figure 3.18 récapitule le fonctionnement de ce rhéomètre avec un système d'acquisition des données sur ordinateur.

Le rhéomètre utilisé est de type Couette développé par l'équipe de recherche de l'université de Cergy Pontoise [52, 189]. Le principe consiste à mettre en rotation, à différentes vitesses, un cylindre ou une pale dans un échantillon cylindrique de béton frais et de mesurer le couple appliqué. L'utilisation d'une pale a été préférée à celle d'un cylindre où son insertion dans l'échantillon crée une perturbation minimale par rapport à l'insertion d'un cylindre.

Après la mesure de l'étalement, on verse le béton préparé dans le récipient qui sera fixé pour éviter tout mouvement. Ensuite, on fait descendre le croisillon au centre du récipient qui pénètre au centre du béton. Il faut s'assurer que l'extrémité supérieure des ailes du croisillon se situe à l'arasé du béton. A l'aide du logiciel et l'essai rhéométrique, on démarre la rotation du croisillon en suivant un profil de vitesse approprié.

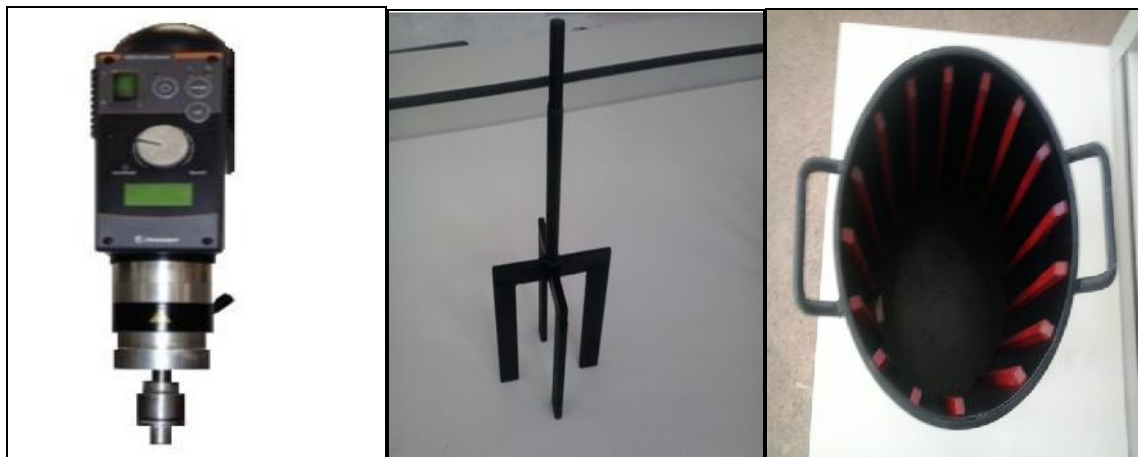


Figure 3.15: Agitateur.

Figure 3.16: Croisillon.

Figure 3.17: Récipient.



Figure 3.18 : Rhéomètre à béton.

Le profil de vitesse utilisé est choisi sur la base d'une série d'essai qui consiste à trouver le profil de vitesse permettant d'avoir les mesures les plus stables en minimisant le phénomène de ségrégation [189]. Le profil utilisé doit avoir suffisamment de points pour pouvoir bien caractériser le comportement du mortier. Les paliers de vitesse imposés doivent être espacés pour bien distinguer les différentes paires (σ , M). La figure 3.19 illustre le profil choisi pour le déroulement des essais.

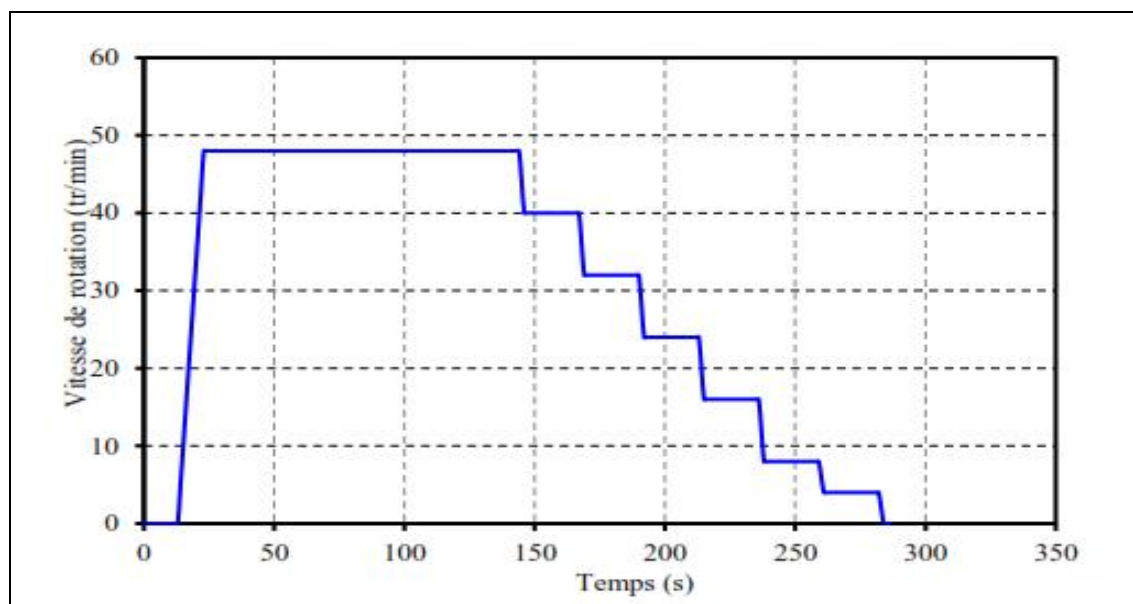


Figure 3.19 : Profil de vitesse [189].

Afin d'étudier le comportement rhéologiques des différents bétons, on a suivi les étapes suivantes :

- **1^{ère} étape** : avant la réalisation des essais, il faut faire chauffer le rhéomètre en le faisant fonctionner suffisamment à la vitesse maximale de 400 tours/min ;
- **2^{ème} étape** : mesurer ensuite les couples à vide (M_{vide}) correspondant aux vitesses imposées selon le profil présenté sur la figure 3.19 ;
- **3^{ème} étape** : remplir le béton jusqu'à l'arase du récipient, mettre en place et centrer le croisillon de sorte que l'extrémité supérieure des ailes du croisillon se situe à l'arase du récipient; mesurer les couples totaux correspondants aux vitesses imposées (M_{total}) ;
- **4^{ème} étape** : exploiter les mesures des couples (M) en fonction de vitesse imposée. Les couples M sont obtenus en faisant la différence entre M_{total} et M_{vide} .

$$M_{total} = M_{plein} - M_{vide} \quad (3.3)$$

3.4.2.3 Densité

Nous avons mesuré la densité du béton frais conformément à la norme NF EN 12350-6 [190]. Connaissant la masse (m_1) et le volume (V) du récipient à vide, on pèse, la masse (m_2) du récipient rempli d'un échantillon de béton frais. La masse volumique est calculée selon la formule suivante:

$$\rho = \frac{m_2 - m_1}{V} \quad (3.4)$$

Avec :

: Masse volumique du béton frais (kg/m³),

m_1 : Masse du récipient (kg),

m_2 : Masse du récipient plus la masse de béton contenu dans le récipient (kg),

V : Volume du récipient (m³).

3.5 Démoulage et conservation des éprouvettes

Après la préparation des mélanges du béton, les moules ont été remplis puis arasé protégées de la dessiccation par un film plastique pour éviter l'évaporation de l'eau. Toutes les éprouvettes ont été démoulées après 24 heures et conservées à l'intérieur du laboratoire dans l'eau à une température moyenne de 20°C ± 2°C et une humidité relative, HR=100%, comme l'illustre la figure 3.20 jusqu'à échéance d'essais.



Figure 3.20 : Eprouvettes conservées dans l'eau.

3.6 Essai relatifs au BAP à l'état durci

3.6.1 Résistance mécanique à la compression

La résistance à la compression est la propriété la plus fréquemment mesurée sur béton durci. Afin de vérifier cette dernière nous avons utilisés des éprouvettes cubiques (10×10×10) cm³ pour l'essai de compression à 7, 28, 56, 90 jours. L'essai de résistance à la compression des bétons a été effectué selon la norme NF P 18-406 [191] à l'aide d'une

presse hydraulique de capacité 3000 KN (Figure 3.21). L'éprouvette est placée et centrée entre les deux plateaux de la presse puis chargée progressivement jusqu'à la rupture. Les résultats de la résistance en compression est correspond à la contrainte moyenne d'écrasement sur trois éprouvettes à chaque âge d'essai.



Figure 3.21 : Dispositif de l'essai de compression simple.

3.6.2 Absorption capillaire

L'essai consiste à mesurer la masse d'eau absorbée par une éprouvette de bétons pré-conditionnés selon les recommandations de la procédure d'ASTM [192]. L'essai a été réalisé à l'âge de 90 jours sur des échantillons moulés de formes cubiques de 100 mm. Les éprouvettes ont été séchées dans une étuve ventilée et régulée, jusqu'à atteindre une masse constante ($M < 0,1\%$ en 24 heures). Les faces latérales des éprouvettes ont été couvertes par une mince couche de résine pour assurer l'écoulement unidirectionnel et éviter l'évaporation latérale de l'eau absorbée. L'essai d'absorption capillaire est réalisé à la suite de ce pré-conditionnement. Il consiste à suivre l'évolution de masse des éprouvettes plongées de 5 mm dans l'eau (Figure 3.22).

A chaque échéance, les éprouvettes sont sorties du récipient, essuyées à l'aide d'une éponge, pesées puis relancer dans le récipient. Les échéances de mesure sont les suivantes : 1 mn, 5 mn, 10 mn, 20 mn, 30 mn, 60 mn. Les différentes pesées ont été faites à l'aide d'une balance de précision de 0.01g.

Le coefficient d'absorption capillaire est défini par l'équation suivante :

$$I = \frac{(M_x - M_0)}{a d} \quad (mm) \quad (3.5)$$

Où :

I : Coefficient d'absorption capillaire (mm) ;

M_x : masse de l'éprouvette à une échéance donnée (g),

M_0 : masse initiale de l'éprouvette (g),

a : section de l'éprouvette (mm²),

d : densité de l'eau (g/mm³)

Le coefficient de sorptivité (s) du béton peut être déterminé de l'expression suivante :

$$S = \frac{(Q/A)}{\sqrt{t}} \quad (3.6)$$

Où :

A : surface du spécimen en contact avec l'eau en cm²,

Q : le volume d'eau absorbé en cm³,

t : temps écoulé en (s),

S : coefficient de sorptivité du spécimen en cm/s^{1/2}.

On trace $\frac{Q}{A}$ en fonction de \sqrt{t} , puis on trace la régression linéaire entre $\frac{Q}{A}$ et \sqrt{t} , ensuite on calcul la pente de la ligne droite qui donne le coefficient de sorptivité (S) des grands pores.

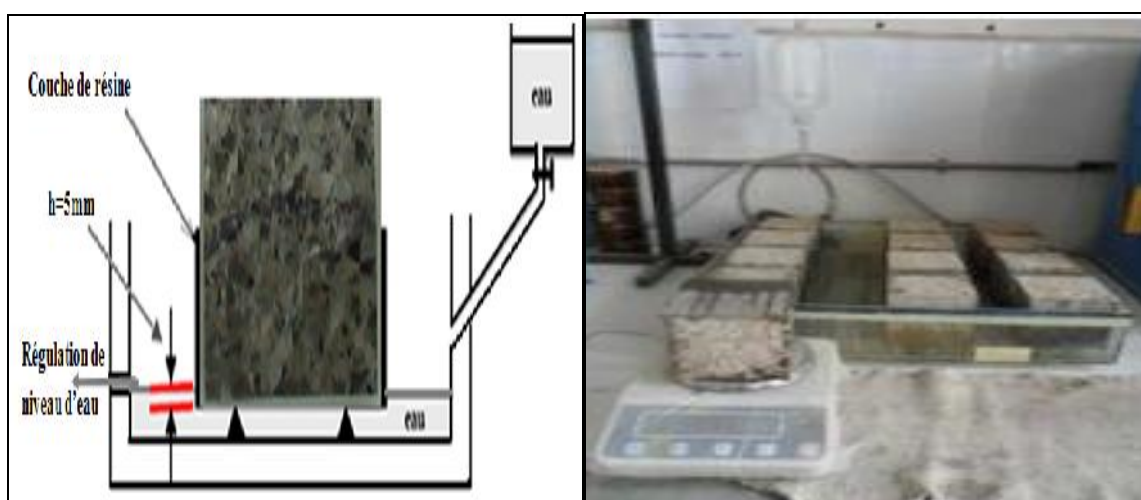


Figure 3.22 : Dispositif expérimental de mesure d'absorption d'eau par capillarité.

3.6.3 Perméabilité à l'eau

Les essais de perméabilité à l'eau ont été effectués selon la norme DIN 1048 [193]. 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 3.23). L'essai a été réalisé à l'âge de 56 et 90 jours sur des éprouvettes conservées dans l'eau à 20°C. 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). A l'aide d'un pied à coulisse, la profondeur de pénétration de l'eau en hauteur est mesurée (Figure 3.24). Les valeurs d'échelle de classement de la perméabilité à l'eau des bétons sont données par le tableau 3.7.

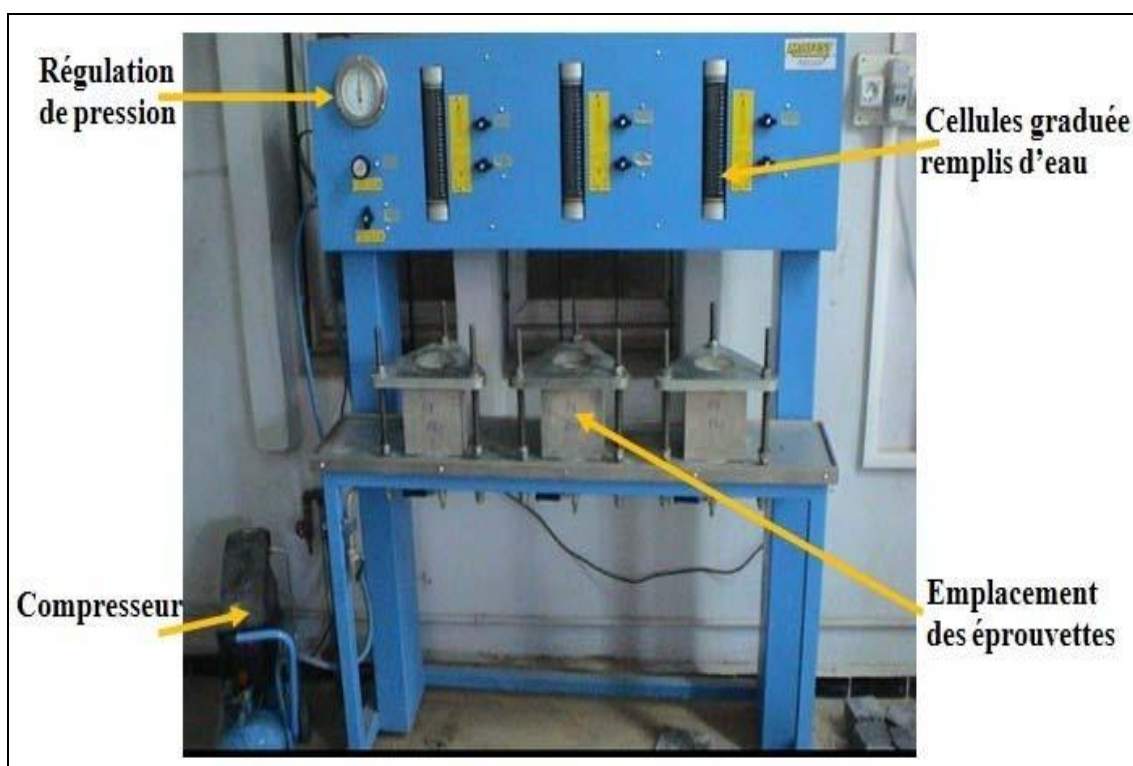


Figure 3.23 : Essai de perméabilité à l'eau.



Figure 3.24 : Mesure de la profondeur de pénétration d'eau.

Tableau 3.7 : Echelle pour l'essai de perméabilité à l'eau [193]

Pénétration d'eau (mm)	Pénétration d'eau (mm)
< 30	Faible
30 – 60	Moyenne
> 60	Elevée

3.7 Récapitulatif du programme des essais réalisés

Dans cette section, nous résumons le programme expérimental réalisé et les variables étudiés. L'étude expérimentale est divisée en plusieurs étapes. Dans la première partie expérimentale, nous avons étudié l'effet de dosage du superplastifiant sur le mortier à base de sable naturel. 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 varier le pourcentage en Sp de 1,20 à 1,80% 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.

Dans la deuxième partie expérimentale, cinq bétons différents ont été fabriqués en remplaçant partiellement les granulats et sable naturels 0%, 25%, 50%, 75% et 100% par les granulats et les sables recyclés en poids afin de connaître l'effet des granulats recyclés seules sur le comportement du béton. En suite, pour chaque mélange, une substitution de ciment par laitier en poids est de 15% et 30% afin de pouvoir étudier l'effet de laitier sur les propriétés de BAP. Pour chaque mélange des essais sur béton ont été réalisés à court et à long terme, notamment les essais rhéologiques sur le BAP (Etalement, V-funnel, L-Box, la stabilité au tamis et essai au rhéomètre), la résistance à la compression et la durabilité du béton (absorption d'eau par capillarité et perméabilité à l'eau).

- Essais sur béton à l'état frais

- ✓ Le nombre d'essais équivaut à 05 pour chaque pourcentage de laitier et chaque taux de substitution des granulats naturels par des granulats recyclés.

Le nombre total d'essais est égale à : $5 \times 3 \times 5 = 75$ essais

Le diagramme (Figure 3.27) résume les essais réalisés sur le béton à l'état frais.

- Essais sur béton à l'état durci :

Les essais sur béton à l'état durci sont au nombre de 3 pour chaque pourcentage de laitier et chaque taux de substitution des granulats naturels par des granulats recyclés.

- ✓ Le nombre total des éprouvettes pour l'essai de la résistance à la compression est égale à : $5 \times 3 \times 4 \times 3 = 180$ éprouvettes ;

- ✓ Le nombre total des éprouvettes pour l'essai de la perméabilité à l'eau est égale à : $5 \times 3 \times 2 \times 3 = 90$ éprouvettes

- ✓ Le nombre total des éprouvettes pour l'essai de l'absorption capillaire est égale à : $5 \times 3 \times 1 \times 3 = 45$ éprouvettes

Le diagramme suivant (Figure 3.25) résume les essais réalisés sur le béton à l'état durci.

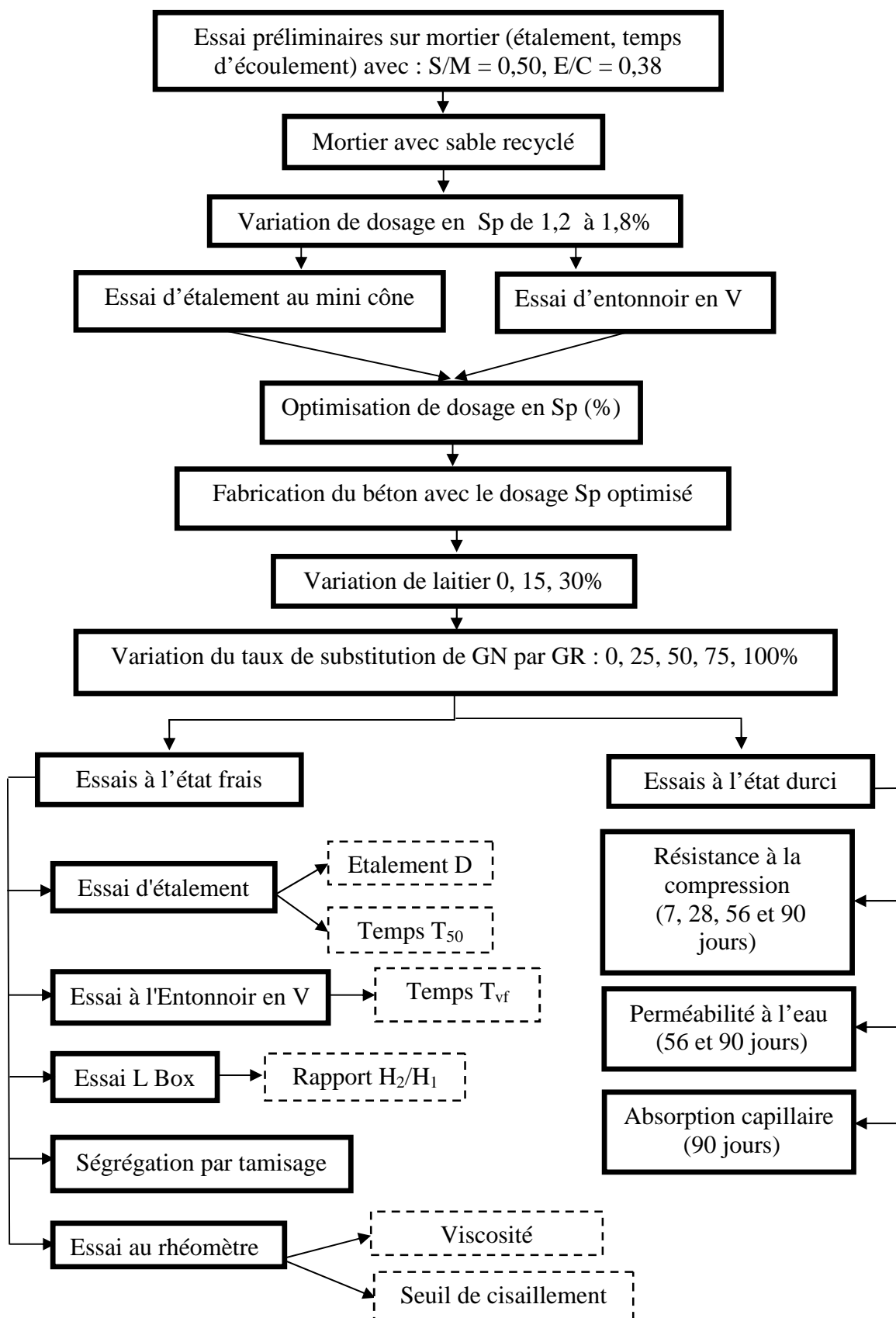


Figure 3.25 : Organigramme de la procédure expérimentale.

CHAPITRE 4

RESULTATS EXPERIMENTAUX ET DISCUSSION

4.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à l'étude des résultats obtenus expérimentalement tout d'abord sur mortier autoplaçant (MAP) à base de sable naturels afin d'optimiser le dosage de superplastifiant dans la composition du béton autoplaçant de référence. Après avoir fixé tous les paramètres de formulation on étudiera par la suite l'effet du granulat recyclé et de laitier sur l'ouvrabilité des BAP, les caractéristiques mécaniques et les propriétés relatives à la durabilité du béton : l'absorption d'eau par capillarité et la pénétration d'eau sous pression.

4.2 Optimisation du rapport Superplastifiant/Liant (S/L)

L'utilisation des superplastifiants permet de réduire la teneur en eau et par conséquent, améliorer la déformabilité, la stabilité et les propriétés mécaniques des BAP. Les superplastifiants agissent par adsorption à l'interface solide-eau, ce qui permet aux grains de ciment d'acquiescer des charges identiques et de créer ainsi un phénomène de dispersion des particules par répulsion électrostatique. Ceci permet de libérer une partie de l'eau piégée par les grains de ciment flocculés et diminue ainsi les frictions intergranulaires. On assistera alors à une amélioration de l'ouvrabilité du béton.

L'optimisation du rapport S/L consiste à déterminer le dosage optimal de superplastifiant capable de donner un maximum d'ouvrabilité au mortier sans ségrégation et ressuage. La détermination de dosage optimal conduit à faciliter la formulation de béton et assurer aussi une meilleure performance du BAP à l'état frais et durci. Le principe de la méthode consiste à réaliser quelques essais relatifs au mortier afin d'optimiser le rapport S/L et par conséquent fixer ce rapport au niveau des essais sur béton. Cette optimisation se fait en se basant sur les résultats trouvés dans les travaux de Boukendakdji [75] ; nous avons fixé : le rapport S/M à 0,50, le rapport E/C à 0,38 tout en faisant varier le rapport S/L. 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 S/L est ajustée par l'essai d'étalement, dont le diamètre de la galette de mortier de référence (mortier ne comportera pas de laitier) obtenu doit être compris entre 270 mm et 330 mm, et par l'essai de l'entonnoir en V (V-funnel), dont le temps d'écoulement obtenu doit être compris entre 2 sec et 10 sec [183].

4.2.1 Effet du dosage de superplastifiant sur l'ouvrabilité du mortier autoplaçant

Pour déterminer l'effet de la variation de la teneur en superplastifiant sur le mortier à l'état frais, nous avons étudié la variation du diamètre d'étalement (cône d'Abrams) et du temps d'écoulement à travers l'entonnoir en V (V-Funnel), en fonction du dosage en superplastifiant (Sp/P) variant de 1,2% à 1,8%.

Les différentes compositions des mortiers obtenues à base de sable naturel, en fonction du rapport S/L sont présentées dans le tableau 4.1.

Tableau 4.1 : Composition de mortier à base de sable naturel

Dosage en Sp (%)	Ciment (kg/m ³)	Sable (kg/m ³)	Eau (kg/m ³)	Sp (kg/m ³)
1,2	705	1253,8	273,8	8,75
1,4	705	1253,8	272,5	10
1,5	705	1253,8	271,9	10,62
1,6	705	1253,8	271,9	11,25
1,8	705	1253,8	270,62	12,5

a/ Etalement au mini-cône

Les résultats d'étalement au mini-cône pour les mortiers à base de sable naturel en fonction du dosage en superplastifiant sont illustrés sur la figure 4.1.

A partir de la figure, nous pouvons remarquer que l'augmentation de dosage en superplastifiant conduit à un accroissement de l'étalement pour les mortiers. Cette augmentation est due par l'effet de superplastifiant qui disperse les grains du ciment et améliore la fluidité du mélange. On remarque que les mortiers préparés avec un dosage de 1,4 et 1,5% ont donné un bon mortier autoplaçant sans ressuage avec un diamètre de 277 et

296,5 mm respectivement sachant que l'intervalle recommandée est comprise entre 270 et 330 mm. Et en plus, les observations visuelles pour le dosage 1,8% détectent une présence d'une laitance en périphérie de la galette du mortier et accumulation de sable au centre de la galette de mélange.

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

Les résultats de l'effet des superplastifiants sur le temps d'écoulement des mortiers sont illustrés sur la figure 4.1.

La figure 4.1 montrent que le temps d'écoulement des mortiers à l'entonnoir en V diminue avec l'augmentation de la teneur en superplastifiant, jusqu'à un certain dosage de 1,5%, où à partir duquel le temps d'écoulement augmente légèrement. On appelle le point d'intersection des deux parties de la courbe point de saturation, c'est-à-dire le point à partir duquel, dans les conditions expérimentales de mesure, toute augmentation de dosage en superplastifiant n'a plus de répercussion sensible sur la rhéologie du mortier alors, il y a une saturation du système par le superplastifiant.

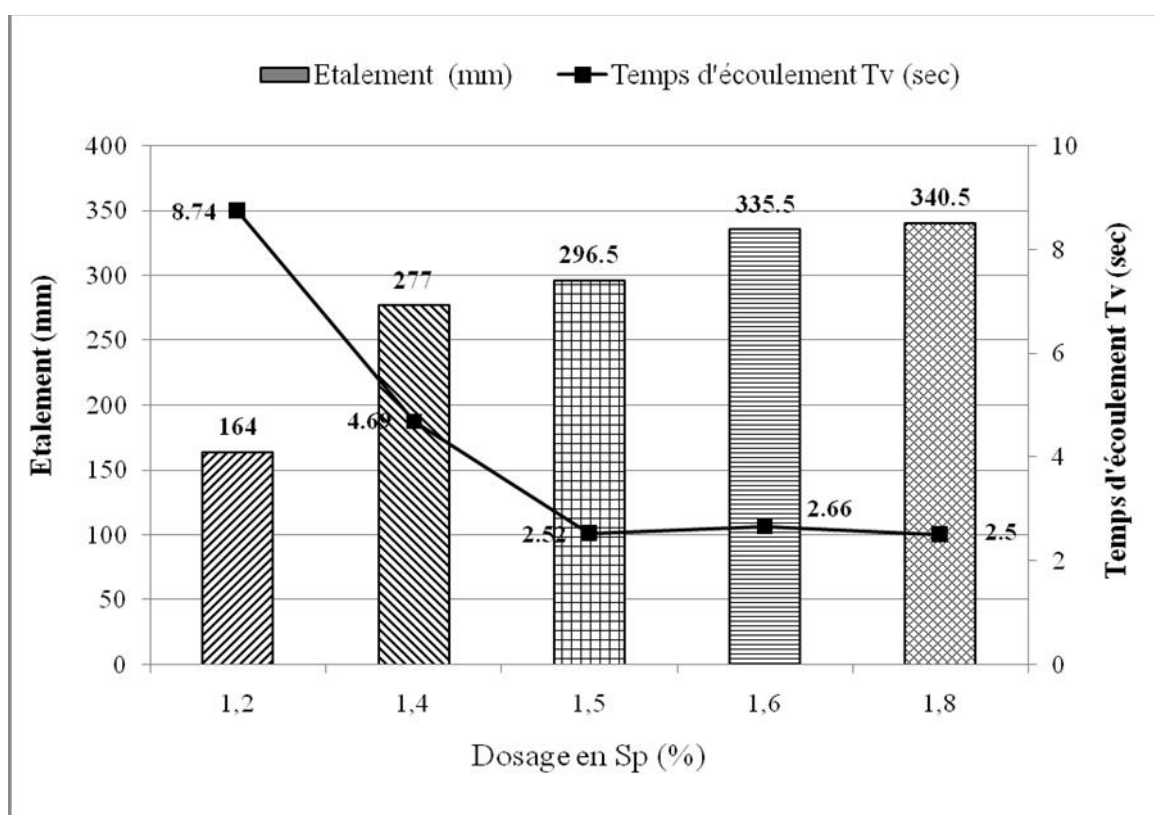


Figure 4.1 : Etalement et le temps d'écoulement T_v de mortier à base de sable naturel en fonction de dosage en Sp.

La quantité de superplastifiant ajoutée peut être divisée selon en une partie consommée par les réactions chimiques et une partie absorbée sur la surface des grains qui n'est pas intégrée dans la composition du produit d'hydratation. Cette partie est la plus importante pour la dispersion des grains par répulsion électrostatique [34]. On peut observer aussi selon la figure 4.1 que tous les dosages en superplastifiant permettent d'atteindre des valeurs de temps d'écoulement acceptables (entre 2 et 10 sec) [183]. On observe également que le dosage en superplastifiant influence graduellement la fluidité des mortiers; son augmentation se traduit par une diminution des temps d'écoulement, ce qui provoque un abaissement du seuil de cisaillement et de la viscosité plastique des mélanges.

L'utilisation du dosage en superplastifiant de 1,6% du poids de ciment donne un mortier autoplaçant avec un diamètre d'étalement important qui facilite considérablement la mise en place du béton même dans le cas d'un ferrailage dense. Cependant, le prix de revient sera très coûteux pour le maître de l'ouvrage et retarde considérablement la prise du béton et provoque une diminution de la cadence du travail. Donc, le dosage en superplastifiant ne doit pas dépasser un seuil au-delà duquel le superplastifiant n'entraîne pas des modifications notables de la rhéologie du mélange, ce dernier peut augmenter la friction entre les granulats et diminuer la cohésion du mélange, on assistera alors à une hétérogénéité du mélange.

En conclusion, le dosage en superplastifiant au point de saturation est le dosage nécessaire pour avoir des meilleures propriétés rhéologiques possibles d'un mélange avec ce superplastifiant. Afin d'éviter les effets secondaires indésirables des superplastifiants, il est préférable d'utiliser le pourcentage optimal S/L dans les mélanges de béton qui est de 1,5%.

4.3 Effet du taux de substitution des GN par des GR et laitier sur l'ouvrabilité des BAP

Il s'agit d'étudier l'effet du taux de substitution des GN et ainsi la substitution du ciment par le laitier sur les différentes propriétés des BAP à l'état frais à travers une série d'essais particuliers aux BAP conformément aux recommandations AFGC [26]. A cet effet, nous avons tout d'abord formulé un BAP à base des GN en s'appuyant sur les résultats d'optimisation obtenus sur le mortier, où on a pu avoir le rapport S/L de 1,5%. 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 0,38, et le rapport Sp/P à 1,5%. Dans cette étude expérimentale, le

taux de substitution de ciment par laitier en poids est de 0%, 15% et 30%. Pour chaque mélange, on a fabriqué quatre bétons différents en remplaçant partiellement les granulats et sable naturels 25%, 50%, 75% et 100% par les granulats et les sables recyclés en poids. Le tableau 4.2 donne la composition des quinze (15) bétons testés avec comme béton de référence le BAPL0R0 qui contient 0% de laitier et 0% des GR.

Les essais de caractérisation de ces bétons ont été effectués selon les procédures décrites par les guides Européens du BAP [3], dont les valeurs limites sont données dans le tableau 4.3. Les résultats expérimentaux des essais sur l'ouvrabilité des différents bétons autoplaçants sont donnés dans le tableau 4.4.

Tableau 4.2 : Composition des BAP étudiés

		Ciment (kg/m ³)	Laitier (kg/m ³)	Sable naturel (kg/m ³)	Sable Recyclé (kg/m ³)	Gravier naturel 3/8(kg/m ³)	Gravier naturel 8/15(kg/m ³)	Gravier recyclé 3/8(kg/m ³)	Gravier recyclé 8/15(kg/m ³)	Eau (kg/m ³)	SP (kg/m ³)
G1	BAPR0 L0	507	0	910	0	245	490	0	0	193	7,61
	BAPR25 L0	507	0	682,5	203,75	183,75	367,5	54	107,75	193	7,61
	BAPR50 L0	507	0	455	407,5	122,5	245	108	215,5	193	7,61
	BAPR75 L0	507	0	277,5	611,25	61,25	122,5	162	323,25	193	7,61
	BAPR100 L0	507	0	0	815	0	0	216	431	193	7,61
G2	BAPR0 L15	434	73	910	0	245	490	0	0	193	7,61
	BAPR25 L15	434	73	682,5	203,75	183,75	367,5	54	107,75	193	7,61
	BAPR50 L15	434	73	455	407,5	122,5	245	108	215,5	193	7,61
	BAPR75 L15	434	73	277,5	611,25	61,25	122,5	162	323,25	193	7,61
	BAPR100 L15	434	73	0	815	0	0	216	431	193	7,61
G3	BAPR0 L30	359	148	910	0	245	490	0	0	193	7,61
	BAPR25 L30	359	148	682,5	203,75	183,75	367,5	54	107,75	193	7,61
	BAPR50 L30	359	148	455	407,5	122,5	245	108	215,5	193	7,61
	BAPR75 L30	359	148	277,5	611,25	61,25	122,5	162	323,25	193	7,61
	BAPR100 L30	359	148	0	815	0	0	216	431	193	7,61

Tableau 4.3 : Valeurs préconisées pour les essais (EFNARC) du BAP [3]

Essai		Classe	Valeurs limites
Essai d'Étalement	Étalement (mm)	SF1	550-650
		SF2	660-750
		SF3	760-850
	Temps d'écoulement T_{50} (s)	VS1/VF1	2
		VS2/VF2	> 2
Essai V-Funnel	Temps d'écoulement (s)	VS1/VF1	8
		VS2/VF2	9-25
Essai L-Box	Rapport des Hauteurs (H2/H1)	PA1	0.8 avec deux barre
		PA2	0.8 avec trois barre
Essai de ségrégation	Laitance passant à travers le Tamis (%)	SR1	20
		SR2	15

Tableau 4.4 : Résultats d'essai d'ouvrabilité des BAP à l'état frais

Groupe	Type de béton	Densité (kg/m ³)	Essai d'Étalement		Essai V-funnel	Essai L-box	Essai de ségrégation
			Étalement (mm)	T_{50} (s)	Temps d'Écoulement (s)	Rapport des Hauteurs (H ₂ /H ₁)	Laitance passant à travers le Tamis(%)
G1	BAP R0 L0	2395	713	4,46	17,40	0,89	5,10
	BAP R25 L0	2350	738	4,05	13,50	0,94	7,40
	BAP R50 L0	2300	750	3,50	9,23	0,97	8,52
	BAP R75 L0	2270	727	4,15	15,56	0,82	10,25
	BAP R100 L0	2235	718	4,38	17,80	0,92	11,00
G2	BAP R0 L15	2360	730	4,00	12,50	0,95	6,90
	BAP R25 L15	2315	752	3,80	10,20	0,97	9,16
	BAP R50 L15	2280	783	2,50	6,16	1,00	12,20
	BAP R75 L15	2245	766	2,90	9,85	0,95	13,75
	BAP R100 L15	2215	737	4,20	15,18	0,90	11,80
G3	BAP R0 L30	2320	762	4,51	16,20	0,94	8,63
	BAP R25 L30	2285	776	4,20	15,23	0,92	11,70
	BAP R50 L30	2260	792	3,90	12,63	0,83	14,70
	BAP R75 L30	2235	781	4,61	20,25	0,80	16,50
	BAP R100 L30	2200	749	4,97	23,20	0,75	15,80

4.3.1 Densité

La figure 4.2 présente la variation de la densité des différents bétons en fonction du pourcentage de remplacement des GR et laitier. La figure montre une baisse de la densité du béton avec l'augmentation de la quantité de GR et ainsi de laitier. Cette diminution a été attribuée à la plus faible valeur de la densité de laitier par rapport au ciment. L'utilisation des GR de 25%, 50%, 75% et 100% entraîne une diminution de la densité par rapport aux mélanges témoins de BAP d'environ 1,25%, 4%, 5,20% et 6,70%, respectivement. Cette baisse est due relativement à la densité faible de pâte de ciment d'ancien mortier attachée aux particules d'agrégats recyclés et également par la présence des pores dans les GR. Ces résultats sont en accord avec ceux obtenus par de nombreux chercheurs [46, 124, 153, 165].

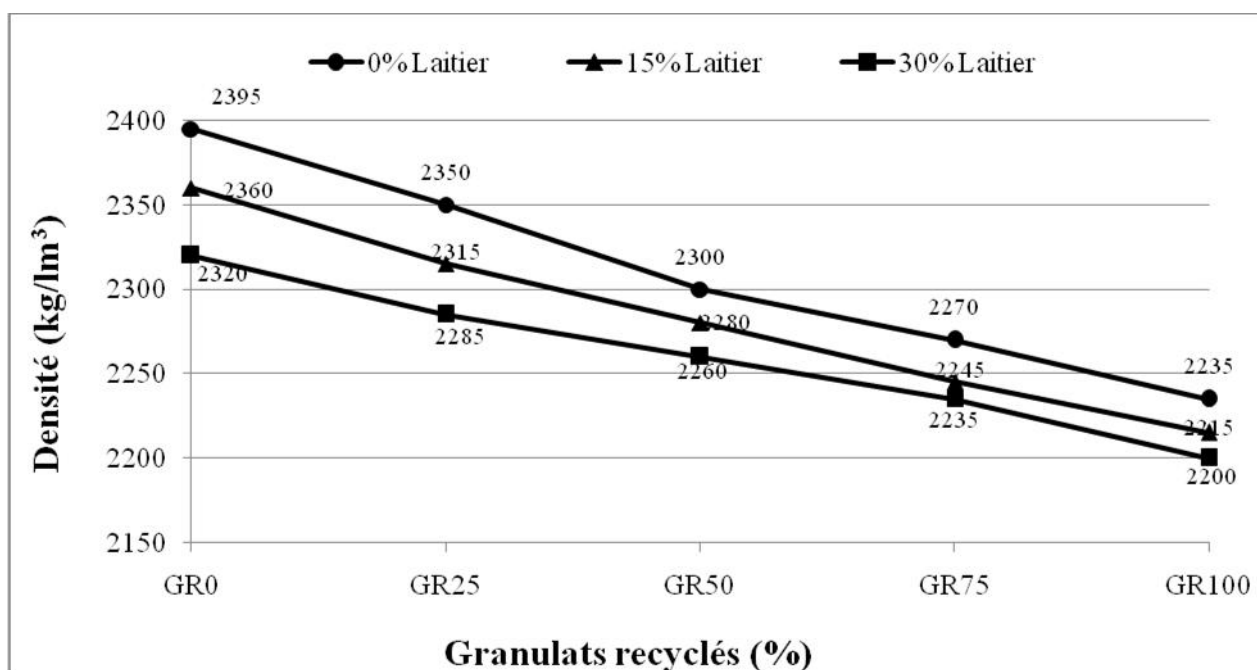


Figure 4.2 : Densité des BAP en fonction du pourcentage de remplacement des GR et laitier.

4.3.2 Mesure d'étalement et du temps T_{50} au cône d'Abrams

L'ouvrabilité caractérise l'aptitude d'un béton à remplir les coffrages et à enrober convenablement les armatures. Le critère d'ouvrabilité pour un BAP c'est le critère d'écoulement non confiné représenté par l'essai d'étalement au cône d'Abrams. Dans cette

étude, la mesure de l'ouvrabilité des BAP a été mesurée conformément à la norme EN 12350-8 [185]. Les résultats obtenus de l'étalement et du temps d'écoulement T_{50} des BAP en fonction de la teneur en laitier et ainsi de taux de substituant des GN par des GR sont représentés sur la figure 4.3.

D'après la figure 4.3, on constate que l'ensemble des mélanges de BAP ont des valeurs d'étalement comprises entre 713 mm et 792 mm, et par conséquent sont situées à l'intérieur du domaine des BAP classe SF2 et SF3 qui sont caractérisé par une bonne déformabilité. Une augmentation de l'ouvrabilité du BAP a été observée lorsque le taux de substitution des GN par des GR augmente jusqu'à 50%. Pour les taux élevés de remplacement de la GR (75 et 100%), une diminution de l'ouvrabilité à été enregistré. Cela peut être attribué à la texture rugueuse de la surface, l'angularité et à la présence de résidus de mortier dans les GBR tel que rapporté par Hansen [128]. Pour la même raison, ce résultat est confirmé par d'autres recherches montre l'étalement de BAP présente une croissance générale en terme de l'augmentation des fines recyclés jusqu'à 100% et le diamètre d'écoulement sont plus élevés pour un remplacement de 50% des GR [153].

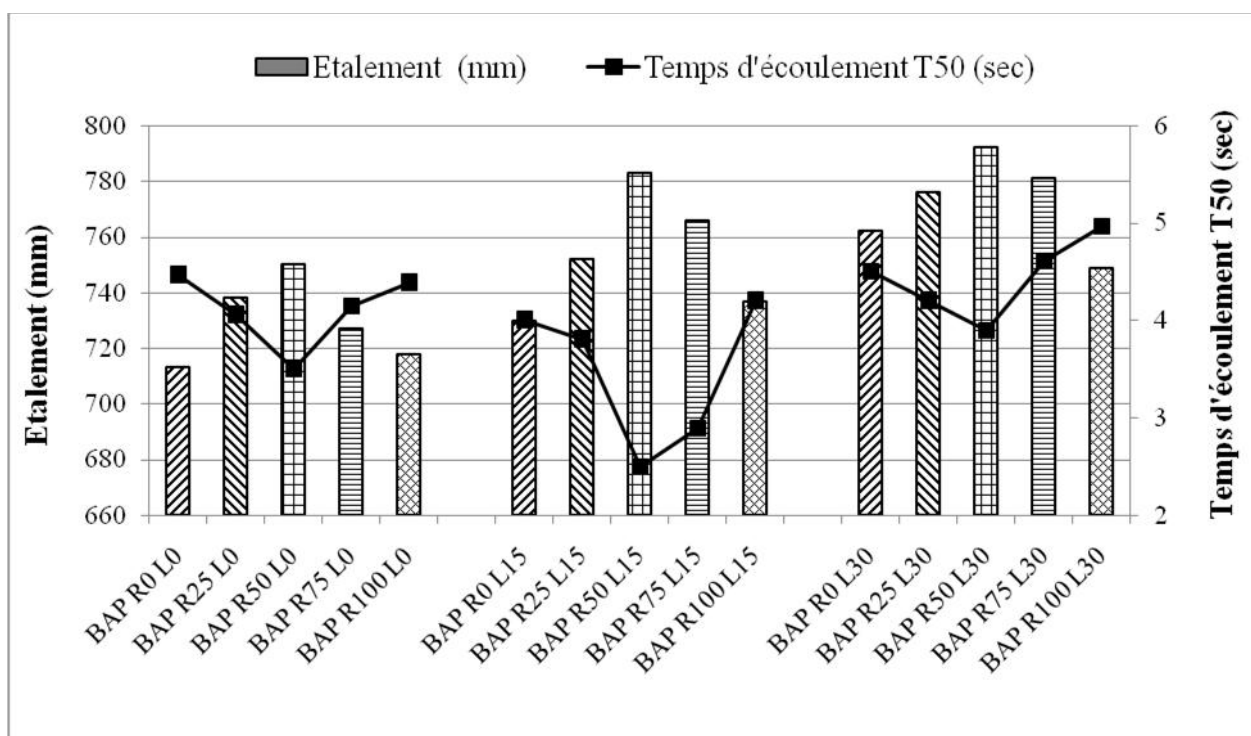


Figure 4.3 : Etatement et le temps d'écoulement T_{50} en fonction de la teneur en laitier et taux de substituant des GN par des GR.

Ces résultats sont conformes également à ceux trouvés par Topçu et Sengel [194] dans lesquels la maniabilité est plus faible dans le béton recyclé et surtout lorsque les taux de remplacement sont supérieurs à 50%.

Yong et Teo [195] ont trouvé que la substitution de 50 et 100% de granulats naturels par les granulats recyclés diminue l'affaissement du BO. Par contre, Khatib [149] a trouvé que l'affaissement au cône d'un béton ordinaire augmente avec l'augmentation de la quantité des granulats recyclés dans le mélange. Kou et Poon [123] ont trouvé que l'étalement du BAP augmente avec l'augmentation de la quantité des fines recyclés.

Kenai et al. [151] ont montré que le diamètre d'étalement du BAP à base de 100% granulats recyclés est supérieur par rapport aux diamètres de BAP à base des granulats naturels ainsi qu'au BAP à base de 50% granulats recyclés.

On note également que, pour les mélanges des BAP préparé avec 15% et 30% de laitier, même tendance a été observée.

D'autre part, les résultats indiquent clairement que la substitution de ciment par laitier de 15 à 30% améliore l'ouvrabilité de béton. Le laitier possède évidemment un pouvoir filler et créent un effet de roulement, entre les grains de ciment, qui les rendent plus mobiles. De plus, leur activité inerte, à ce stade de l'hydratation, libère une partie d'eau de gâchage qui va contribuer à la lubrification des grains et à améliorer l'ouvrabilité [196]. Une autre explication possible de ce phénomène accorde cette amélioration de l'ouvrabilité due à une large distribution granulométrique de laitier de haut fourneau améliore la compacité du mélange et augmente la quantité de l'eau libre ce qui offre un bon comportement rhéologique des ciments composés [52]. Ces résultats sont similaires à celui trouvé par Guneyisi et Gesoglu [57], où l'ajout du laitier de 15 à 30% provoque une augmentation graduelle de l'ouvrabilité de BAP.

Shafigh et al. [197] ont conclu que la gamme de 20 à 30% représente le niveau optimal de substitution du laitier pour atteindre une maniabilité maximale. La même observation a été faite par Boukendakdji et al. [29, 42] où la substitution du ciment par le laitier est avérée être très bénéfique pour le BAP. Une amélioration de la maniabilité a été observée en utilisant jusqu'à 20% de laitier de hauts fourneaux.

D'autre part, Wang et Lin [46], l'addition du laitier comme substitution de ciment améliore les propriétés à l'état frais. Les résultats montrent que l'étalement varie en fonction du taux de substitution de laitier par le ciment Portland. Le dosage optimal est de 15% de laitier.

Gesoglu et al. [99] ont aussi constaté que le laitier a une influence significative sur l'étalement. L'incorporation de laitier à raison de 20 et 40% dans le béton améliore son ouvrabilité. Cependant, une diminution de l'étalement du béton est notée pour des pourcentages de laitier de 60%. Cette réduction est due principalement aux particules du laitier qui est considéré comme une addition à caractère pouzzolanique dont sa demande en eau est importante par rapport au ciment, ce qui peut réduire les propriétés d'ouvrabilité du béton pour certain dosage [44].

Zhao et al. [47] ont montré que pour un rapport E/C de 0,35, les valeurs de l'étalement du BAP avec 20%, 30%, 40% de laitier étaient 716 mm, 730 mm, 745 mm, soit une augmentation de 3,02%, 5,04%, 7,19%, en comparaison avec le BAP témoin. Ces résultats sont attribués à la forme sphérique de laitier utilisée qui augmente le volume de la pâte, ce qui a réduit les frictions entre les composants solides dans la phase liquide [48].

Uysal et Sumer [198], ont analysé la capacité de remplissage (essai d'étalement) des BAP à base de différents ajouts minéraux (le calcaire, la cendre volante, le laitier et la poudre de marbre) comme substituant du ciment. Ils ont constaté que les BAP à base des cendres volante ou de laitier ont montré des valeurs d'étalement supérieur à celle à base des autres ajouts. Concernant les BAP à base des cendres volante, leurs valeurs d'étalement élevé ont été interprétées par leurs formes sphériques, qui leurs donnent la capacité de disperser l'agglomération des particules du ciment, donc les BAP à base des cendres volantes nécessite un faible dosage de superplastifiant pour avoir une capacité de remplissage constante. En plus, il a été remarqué que puisque la substitution du ciment était par poids et que la densité spécifique des cendres (2,17) est plus faible que le ciment (3,08) et des autres ajouts minéraux (varie de 2,71 à 2,92), le volume du liant augmente causant ainsi une réduction des frottements au niveau de l'interface granulats – pâte.

Récemment, Omrane et al. [154] ont montré que le BAP à base de 50% des granulats recyclés possède des diamètres d'étalement proche à celle du BAP à base des granulats naturels, et l'addition de pouzzolane diminuer l'étalement des mélanges de BAP.

Afin d'évaluer la viscosité des mélanges de BAP étudiée, le temps nécessaire pour atteindre un diamètre de 50 cm au cône d'Abrams (T_{50}) a également été mesuré dans la présente étude expérimentale.

Comme le montre sur la figure 4.3, le temps d'écoulement T_{50} dans est inversement proportionnel à l'étalement. D'autre part, on constate que les valeurs de T_{50} sont supérieures inférieures à 2 secondes, et par conséquent, tous les mélanges peuvent être classés comme VS2 ($T_{50} > 2s$) en termes de viscosité [185].

On remarque aussi que les valeurs les plus faibles de T_{50} ont été données par BAP avec 50% de GR et avec 0%, 15% et 30% de laitier, Ceci est expliqué par les valeurs d'étalement élevées et ainsi un manque de cohésion. En conséquence, les mélanges de BAP contiennent 30% de laitier et pour différents taux de GR donnent un temps d'écoulement T_{50} plus élevé par rapport aux autres mélanges.

Güneyisi et al. [153] ont montré que le temps d'écoulement est plus élevé pour le BAP de référence et une diminution a été observée lorsque le pourcentage des fines recyclées augmente, et surtout pour les taux de remplacement des granulats recyclés 50% et 100%. Grdic et al. [124] ont remarqué que T_{50} dépasse les 5 secondes pour les BAP sans ajouts et à la base des granulats naturels, 50 et 100% granulats recyclés mais les valeurs restent très comparables.

Récemment, Fiol et al. [199] ont aussi montré que l'augmentation des granulats recyclés (0, 20, 50, 100%) dans le BAP conduit à une diminution de l'étalement, et tous les mélanges sont à la classe d'étalement SF1, et une classe de viscosité VS2 ($T_{50} > 2 s$).

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

En plus de l'essai étalement au cône d'Abrams, l'essai de V-Funnel a été également réalisé pour évaluer la fluidité et la stabilité du BAP. L'essai consiste à évaluer la capacité du béton à passer à travers les zones confinées grâce à la mesure du temps d'écoulement à l'entonnoir. Les résultats de variation du temps d'écoulement à l'essai d'entonnoir (V-Funnel) en fonction de la teneur en laitier et taux de substituant des GN par des GR sont indiqués sur la figure 4.4.

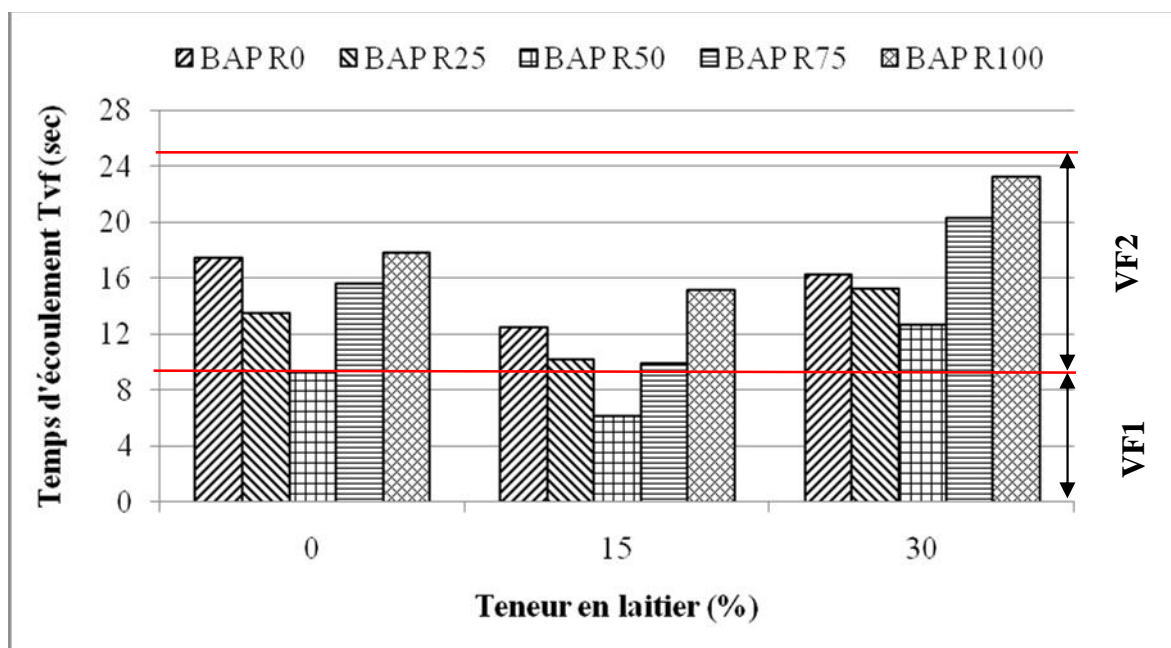


Figure 4.4 : Temps d'écoulement T_{vf} en fonction de la teneur en laitier et taux de substituant des GN par des GR.

A partir de cette figure, on peut voir que les temps d'entonnoir en V funnel pour les trois groupes G1, G2 et G3 est de l'ordre de 9,23 à 17,80 s, de 6,16 à 15,18 s et de 12,63 à 23,2 s respectivement. Selon la norme [186] on peut déduire que tous les BAP ont des valeurs d'étalement situées à l'intérieur de la fourchette de classe VF2 ($T_{vf} > 9$ s) sauf le mélange BAPR50L15 qui est de classe VF1 ($T_{vf} < 9$ s).

En regardant attentivement ces résultats, on observe que la variation de temps d'écoulement de l'entonnoir en V funnel suit la même tendance que celle de temps d'écoulement T_{50} , autrement dit, le temps d'écoulement de l'entonnoir en V funnel du BAP diminue pour une teneur en GR de 25% et 50%, mais il augmente de manière significative dans le cas du remplacement de GR à 75% et 100%. Ceci a été attribué aux granulats recyclés ayant une surface plus rugueuse et une forme plus anguleuse, créant ainsi plus de friction interne dans le béton qui diminue l'affaissement du béton [129]. Par conséquent, le temps d'écoulement en V funnel du BAP augmente. En plus, on a remarqué un flux discontinu dans le cas de 100% GR et avec de 30% de laitier et par conséquent un risque de ségrégation dynamique. Un temps d'écoulement trop long et un flux discontinu peuvent indiquer une séparation des granulats de la matrice et la formation de voûtes bloquant l'écoulement [5].

Güneyisi et al. [153] ont constaté que la réduction du temps d'écoulement de l'entonnoir en V est beaucoup plus élevée lorsque le taux de remplacement de fins recyclés augmente de plus de 75% pour toute de pourcentages des granulats recyclé 50 et 100%.

Les résultats présentés sur la figure 4.4 indiquent également que le temps d'écoulement en V funnel pour les mélanges préparés à 30% de laitier est supérieur par rapport aux temps d'écoulement des BAP sans laitier ainsi qu'aux BAP à base de 15% de laitier. Ce comportement est dû à l'augmentation de la quantité de laitier rend le mélange fluide et moins cohésion, et par conséquent le temps d'écoulement du béton à travers l'entonnoir sera plus important quelque soit de taux de GR. En revanche, le temps optimum est obtenu pour 15% de laitier qui représente le pourcentage optimale du point de vue d'ouvrabilité, tandis que le plus bas temps d'écoulement de 6,16 s a été mesuré pour le BAP à base de 50% de GR (15% L).

Boukendakdji et al. [29] ont constaté que les valeurs de temps d'écoulement à l'essai d'entonnoir (V-Funnel) sont acceptables jusqu'à 20% de laitier pour les mélanges de béton confectionnés avec les deux types de superplastifiant PC et PNS.

Gesoglu et al. [99], ont observé que l'utilisation de ciment ternaire (ciment portland, fumée de silice et laitier) satisfait les recommandations d'EFNARC [3] en termes de temps d'écoulement de V-funnel.

D'après Omrane et al. [154] les valeurs de temps d'écoulement à l'entonnoir en V funnel sont acceptable jusqu'à 15% de pouzzolane pour le BAP à base des granulats naturels et jusqu'à 20% de pouzzolane pour les BAP à base de 50% des granulats recyclés.

La figure 4.5 représente les valeurs expérimentales du temps d'écoulement de V-funnel et en fonction de temps T_{50} des BAP au laitier et des granulats recyclés. Une bonne corrélation exponentielle est proposée entre les deux paramètres avec un coefficient de corrélation, R de 0,882, montrant une augmentation de temps d'écoulement du V-funnel avec l'augmentation de T_{50} . Ceci implique également que l'essai de temps d'écoulement T_{50} et le temps d'écoulement de V-funnel sont adéquat pour évaluer la viscosité et la cohésion du BAP. Cette corrélation est en concordance avec plusieurs auteurs [53, 67, 158]. Bethmont [5], a remarqué que la majorité des auteurs s'accordent sur le fait que la viscosité est bien corrélée au temps d'écoulement mesuré au V-Funnel et éventuellement au T_{50} .

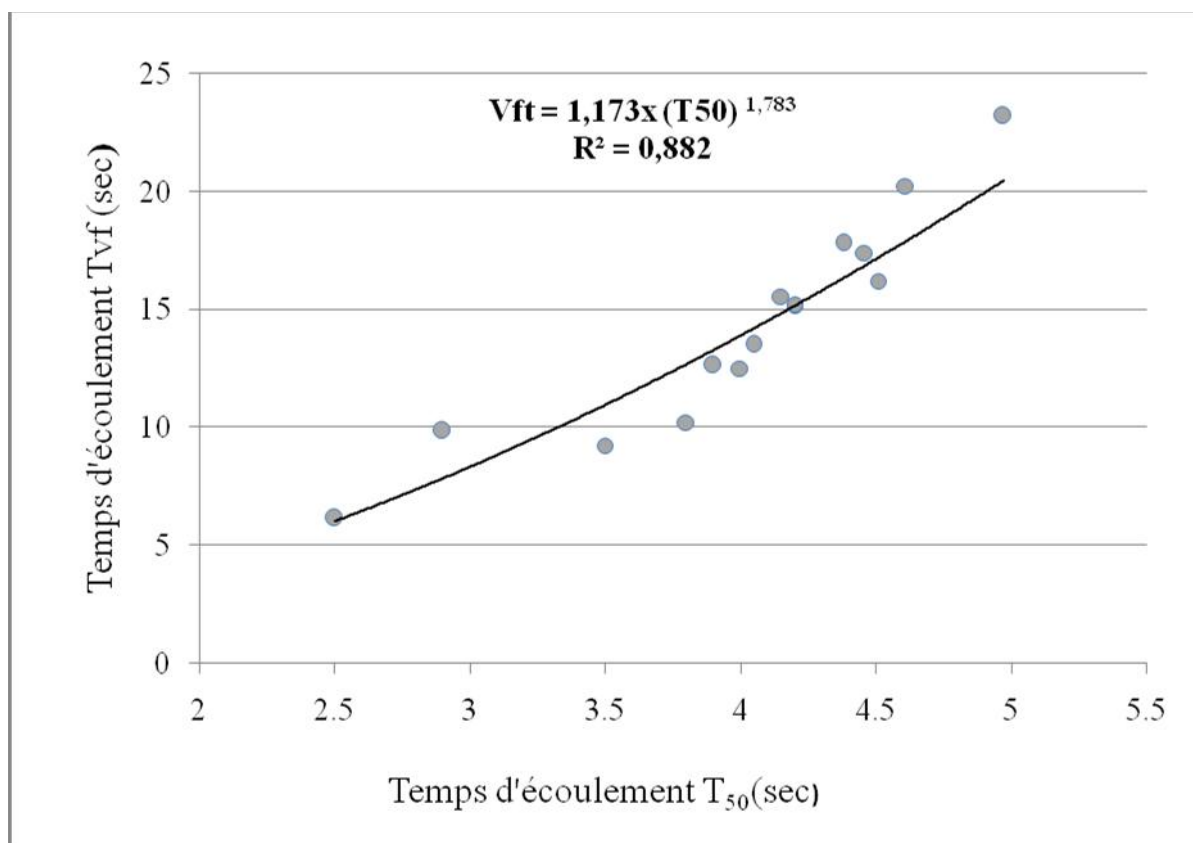


Figure 4.5 : Corrélation entre T₅₀ et le temps de V-funnel.

4.3.4 Mesure du rapport (H_2/H_1) de l'essai de la boîte en L (L-Box)

Dans cette partie, nous avons étudié le l'écoulement des BAP 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.

Les résultats de rapport H_2/H_1 en fonction de la teneur en laitier et taux de substituant des GN par des GR sont présentés sur la figure 4.6. On remarque que, tous les mélanges donnent des taux de remplissage qui s'inscrivent dans le domaine des BAP qui indiquant une bonne capacité de remplissage, à l'exception le mélange BAPR100L30 qui donne une valeur de H_2/H_1 inférieur à 0,8 et les observations visuel montre aucune tendance au blocage entre les barre. Cela confirme le point de vue rapporté par Sethy et al. [53], qui ont démontré que, même si le taux de remplissage est supérieur à 0,65, le BAP a toujours été accepté pour atteindre une bonne capacité de passage.

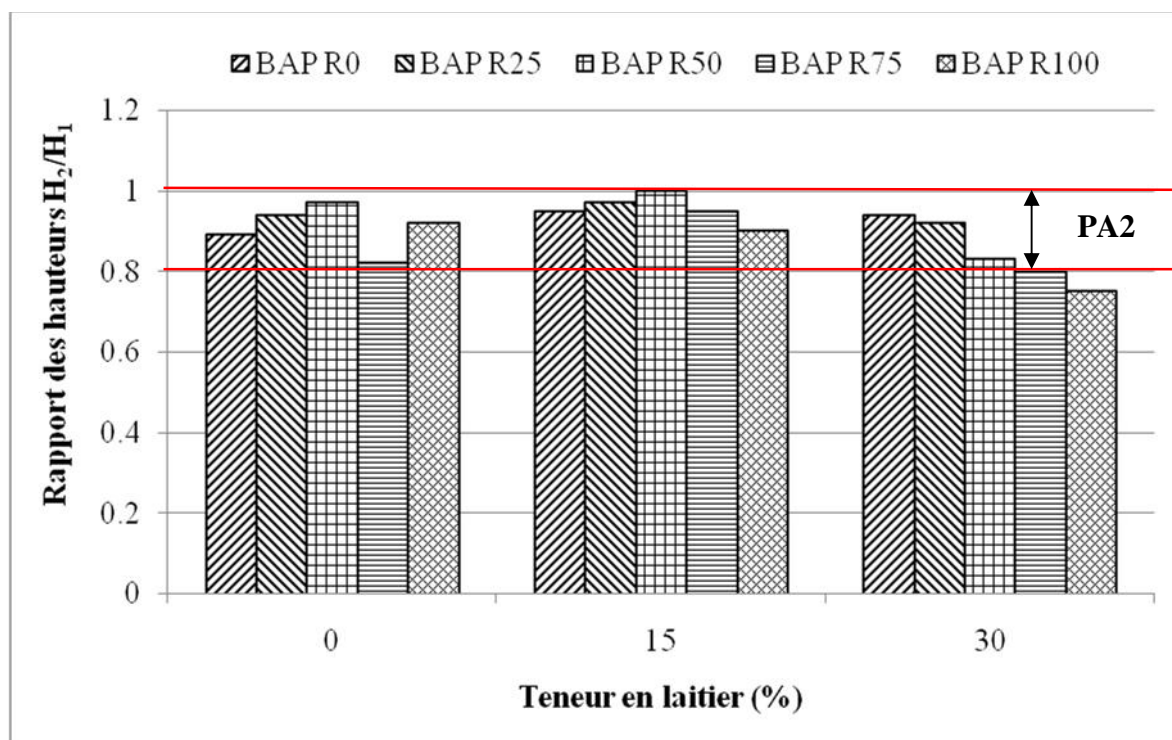


Figure 4.6 : Rapport H_2/H_1 en fonction de la teneur en laitier et taux de substituant des GN par des GR.

La figure 4.6 révèle également pour les mélanges de groupe 1 et 2 une amélioration de la capacité de remplissage avec l'augmentation de la teneur en GR jusqu'à 50%. En revanche, le taux de remplissage de la boîte en L a diminué à 75% et 100% de GR, ce qui indique une capacité de passage plus faible. Pour les mélanges de groupe 3 le rapport H_2/H_1 diminue en fonction de l'augmentation de pourcentage des GR dans les mélanges.

Les résultats trouvés par Güneyisi et al. [153] ont montré que le taux de remplissage de la boîte en L est plus élevé pour un taux de remplacement de 50% des GR et il présente des plus faibles pour un taux de remplacement de 100% GR. Ils ont constaté également que les fines ayant une influence significative sur le taux de remplissage du BAP, et que tous les rapports de hauteur de la boîte en L sont supérieures à 0,80, ainsi tous les mélanges sont classés en tant que PA2 selon la norme [187].

Omrane et al. [154] ont remarqué que le rapport de remplissage (H_2/H_1) du BAP à base de 50% des granulats recyclés (varient entre 81% à 85%) est élevé à celle du BAP à base des granulats naturels.

Debbih [45] a trouvé le rapport de remplissage ne dépasse pas 65% pour le BAP de référence avec léger blocage au niveau des armatures. Par contre, le rapport est très élevé pour les BAP (GR) et BAP (GN/GR) 95% et 98% respectivement et sans présence de blocage. Ceci est peut être due au changement de la granulométrie des granulats lors de malaxage.

Iris et al. [200] ont établi une corrélation entre le diamètre d'étalement et le rapport de remplissage de la boîte en L des bétons recyclés autoplacants contenant différentes pourcentages des granulats recyclés (0, 20, 50, 100%). Une corrélation exponentielle est proposée entre les deux paramètres avec un coefficient de corrélation, R de 0,70, montre que la hauteur de remplissage augmente avec le paramètre d'étalement. La hauteur de remplissage supérieur à 0,8 est facilement atteint si l'étalement est élevé (SF 660 mm). De la même manière, le taux de blocage de la boîte L qui correspond à l'étalement minimum requis pour un BAP (550 mm) est de 0,72. Par conséquent, tous les mélanges ayant des valeurs d'étalement élevées présentent une bonne aptitude au passage mesuré avec le l'essai en boîte-L.

On note également que quelque soit la teneur en GR, la capacité de passage est plus sensible au dosage de laitier. L'augmentation du dosage de laitier a diminué la capacité de passage des mélanges de BAP due à la manque de cohésion du béton, ceci rend difficile l'écoulement et entraîne un blocage du béton. Cependant, les mélanges de BAP contenant un taux de substitution partiel d'approximativement 15% de ciment par laitier donne un effet favorable sur la capacité de passage.

Boukendakdji et al. [29] ont montré que pour les deux types de superplastifiants PC et PNS, plus le pourcentage de laitier augmente plus le rapport H_2/H_1 tend vers 1, mais avec une valeur optimale à 15% de laitier ; au-delà de 15% de laitier, le rapport augmente mais les mélanges accusent une certaine ségrégation.

Gesoglu et al. [99] ont conclu que l'incorporation des ajouts minéraux tels que la fumée de silice, les cendres volantes et le laitier augmentent le rapport de L Box (H_2/H_1), ce qui montre l'amélioration de la capacité de remplissage et de passage des BAP.

4.3.5 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. La figure 4.7 montre la variation de la stabilité en fonction de la teneur en laitier et taux de substituant des GN par des GR.

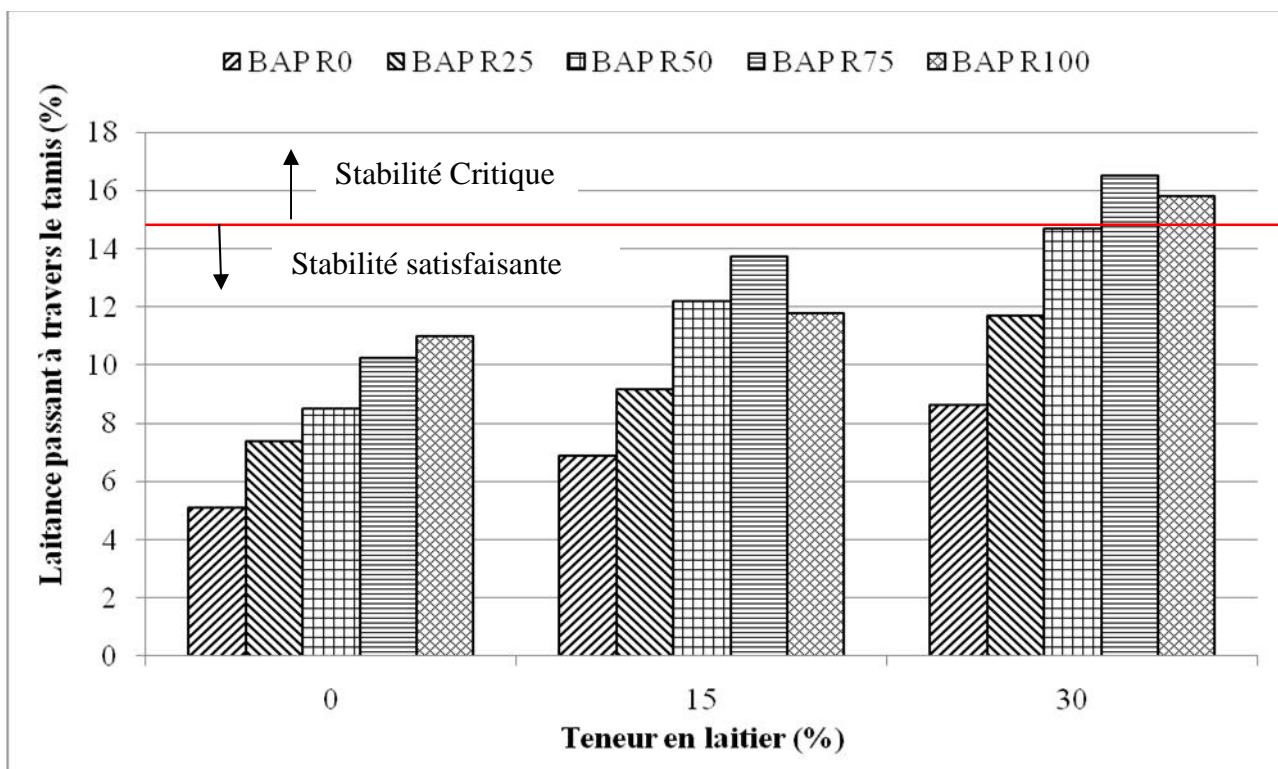


Figure 4.7 : Résistance à la ségrégation au tamis en fonction de la teneur en laitier et taux de substituant des GN par des GR.

L'allure de la variation de la résistance à la ségrégation pour les trois groupes du BAP étudiés est comparable. Les résultats des essais de stabilité au tamis montre que toutes les compositions testées ont une stabilité satisfaisante et peuvent être classés comme SR2 ($0 \leq \Pi \leq 15\%$), selon la norme [188], sauf les mélanges à base de 75 et 100% de GR et préparés avec 30% de laitier qui représente une stabilité critique qui sont dans la classe SR1. Nous pouvons voir également que l'instabilité des bétons est liée à la teneur en laitier et le pourcentage des GR, plus la teneur en laitier et les GR est élevée, plus le pourcentage de laitance est important. Par exemple, le pourcentage de laitance est enregistré de l'ordre de 35,30% et 70% pour des taux de substitution de 15% et 30% par rapport au béton de référence. Autrement dit, le laitier de haut fourneau favorise

l'instabilité du béton quelque soit le taux de substitution des GR et provoque une tendance à la ségrégation statique.

Selon Boukendakdji et al. [29] les mélanges de béton avec 10 et 15% de laitier, et pour les deux superplastifiants (PC, PNS), présentent une résistance optimale à la ségrégation, mais au-delà de 15% de laitier, la présence de ressuage et de ségrégation est confirmée.

El-Chabib et Syed [87] ont étudié l'indice de ségrégation des bétons autoplaçant à haute performance à base des cendres et de laitier. Dans cette étude, le ciment Portland a été remplacé par le laitier jusqu'à 70% et il a été indiqué que les mélanges, y compris le laitier à 70% de substitution, donnent une ségrégation égale à celle du béton sans laitier.

4.3.6 Mesure des propriétés rhéologiques

Les résultats du seuil de cisaillement et la viscosité plastique en fonction de la teneur en laitier et taux de substituant des GN par des GR des différents mélanges de BAP étudiés, sont représentées sur le tableau 4.5 et ainsi sur la figure 4.8

Tableau 4.5: Valeur du seuil de cisaillement et la viscosité plastique en fonction de la teneur en laitier et taux de substituant des GN par des GR

Groupe	Type de béton	Seuil de cisaillement (Pa)	Viscosité plastique (Pa.s)
G1	BAP R0 L0	15,44	15,12
	BAP R25 L0	14,26	13,81
	BAP R50 L0	11,73	6,23
	BAP R75 L0	12,84	7,85
	BAP R100 L0	15,28	10,44
G2	BAP R0 L15	12,25	11,34
	BAP R25 L15	11,13	9,42
	BAP R50 L15	9,7	5,6
	BAP R75 L15	10,96	9,54
	BAP R100 L15	12,15	11,3
G3	BAP R0 L30	10,05	9,19
	BAP R25 L30	7,9	6,55
	BAP R50 L30	7,4	5,75
	BAP R75 L30	8,5	7,26
	BAP R100 L30	9,22	8,95

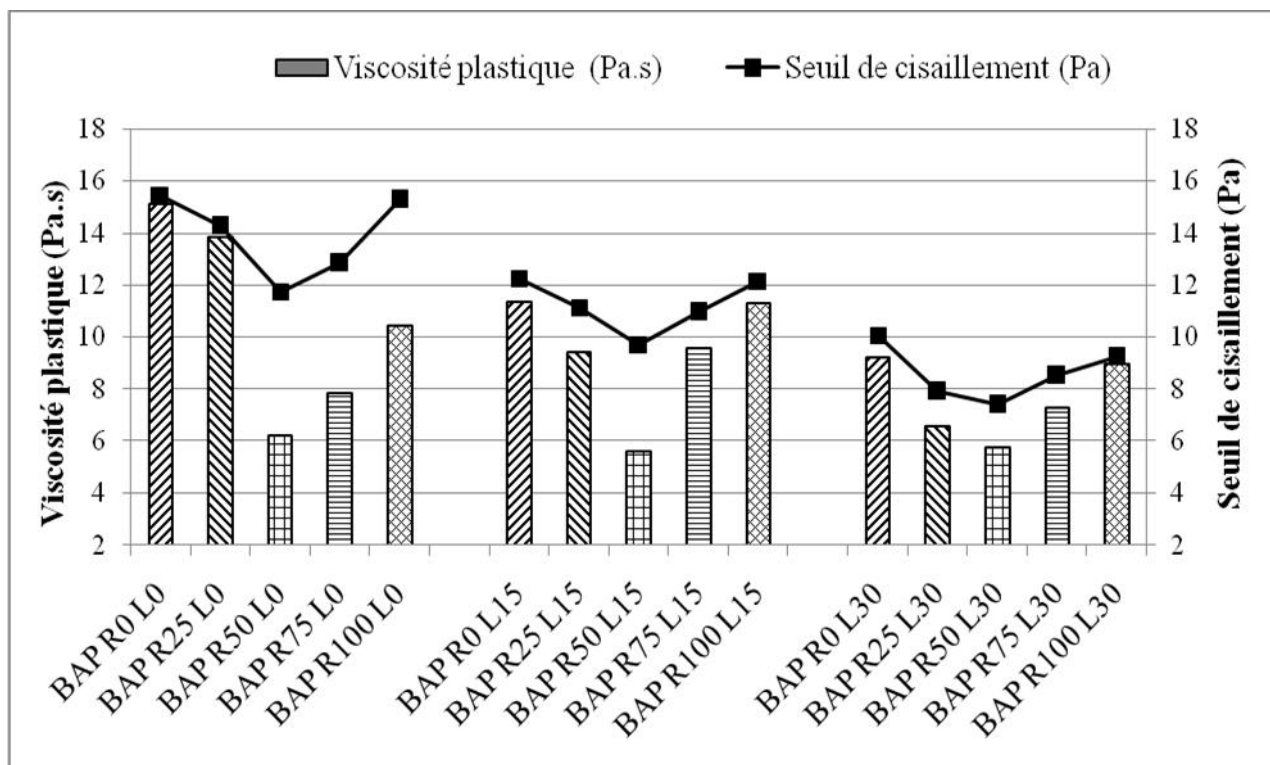


Figure 4.8 : Variation des paramètres rhéologiques en fonction de la teneur en laitier et taux de substituant des GN par des GR.

A partir de figure 4.8, on remarque quelque que soit le taux de substitution des GN par des GR, plus la quantité de laitier est grande plus la valeur de la viscosité plastique et seuil de cisaillement est faible, avec un optimum de 15% de laitier dans le mélange. En effet, pour le BAP de référence cette diminution de la viscosité plastique et seuil de cisaillement de équivaut à 25%, 39,20%, et 19,10%, 33.60% respectivement pour les mélanges avec 15%, 30% du laitier de respectivement.

En plus de la fluidité, la viscosité du béton constitue un second critère important pour caractériser le comportement du BAP. Elle peut être déduite à partir de la mesure des frottements internes d'un matériau sous l'effet de sollicitations imposées (contraintes de cisaillement). La viscosité η est d'autant plus faible que ces forces de frottement internes sont petites. Le béton s'écoule et s'étale d'autant plus rapidement que la viscosité est faible.

La même observation a été faite par Boukendakdji et al. [29] où la substitution du ciment par le laitier est avérée être très bénéfique pour le BAP. Une amélioration de la maniabilité a été observée en utilisant jusqu'à 20% de laitier de hauts fourneaux et quand l'étalement augmente, le seuil de cisaillement et la viscosité plastique des BAP diminuent et

inversement. Dans le même contexte, Yahiaoui et al. [66] ont montré que le seuil de cisaillement des BAP diminue de 15,09 Pa.s à 10,37 Pa.s et 7,74 Pa.s pour 15% et 25% de laitier, respectivement. Et également la viscosité diminue avec l'augmentation de la teneur en laitier. Il diminue de 12,4 Pa pour les mélanges sans laitier à 8,75 Pa et 6,81 Pa pour les mélanges avec 15% et 25% de laitier, respectivement.

Gesoglu et Özbay [201] ont rapporté que contrairement à la fumée de silice, l'incorporation des cendres volantes et du laitier dans les mélanges de béton réduisent la viscosité. Shi et al [202] ont trouvé que la fluidité du béton augmente considérablement et la viscosité plastique diminue lorsque des poudres vitreuses sont partiellement substituées au ciment. Ces derniers ont substitué le ciment par du laitier jusqu'à 50%, et ont trouvé que la viscosité plastique du mortier diminue avec l'augmentation de la teneur en laitier jusqu'à un taux de substitution de 20%, mais au-delà, la diminution est beaucoup moins importante.

Grzeszczyk et Janowska [196] ont remarqué que le remplacement du ciment par des laitiers de haut fourneau plus fins peut améliorer la compacité de la poudre qui laisse plus d'eau libre dans le mélange, ce qui a comme conséquence la diminution des paramètres rhéologiques. Dans ce sens, Kaliprasanna et al. [203] ont étudié la rhéologie des BAP avec le rhéomètre ICAR en substituant partiellement le ciment par des laitiers plus fins dans une fourchette de 30 à 90%. Ces chercheurs ont conclu que les laitiers permettaient de réduire significativement la viscosité plastique ; mais avaient par contre peu d'influence sur le seuil de cisaillement qui est généralement très faible dans le cas des BAP à cause des superplastifiants.

Adjoudj et al. [52] ont étudié l'effet des additions minérales sur les propriétés rhéologiques des mortiers de ciment et constatent que le seuil de cisaillement augmente de la même façon avec l'augmentation du taux de substitution de laitier tandis que ce dernier provoque une diminution significative de la viscosité. Soualhi [189] ont trouvé que l'augmentation du taux de laitier engendre une augmentation non linéaire de la viscosité, due à l'accroissement du rapport \emptyset/\emptyset^* (volume des solides dans la pâte/compacité de la pâte) et donc de la viscosité de la pâte.

La figure 4.8 montre également les valeurs des paramètres rhéologiques sont clairement diminués avec l'augmentation du taux de substitution des GR jusqu'à l'emploi de 50% des GR. Au-delà de ce taux de substitution provoque une augmentation des paramètres rhéologiques indépendamment de taux de substitution de ciment par laitier.

Güneyisi et al. [153] ont remarqué que l'utilisation des granulats recyclés tend à améliorer la fluidité des BAP et réduire les paramètres rhéologiques, et par conséquent, le caractère rhéoépaississant diminue graduellement en augmentant le pourcentage des granulats recyclés. Au-delà d'un taux de 50% de granulats recyclés, cette amélioration est moins importante à cause de l'angularité des granulats.

López et al. [152] ont étudié l'effet de la substitution de différents pourcentages (0, 20, 50 et 100%) de sable naturel par du sable recyclé sur la rhéologie du BAP dans le temps (à 15, 45 et 90 min). Ils ont montré que les mélanges avec 50% et 100% de sable recyclé ont perdu complètement leurs caractéristiques de BAP à 90 min. Au contraire, le mélange avec un taux de remplacement de 20% maintient une capacité de passage et de remplissage convenable. Cela est attribué à l'incorporation de sable recyclé qui provoque une augmentation plus importante de la viscosité plastique et le seuil de cisaillement.

La figure 4.9 représente les valeurs expérimentales du seuil de cisaillement en fonction de l'étalement des BAP au laitier et GR. Une bonne corrélation linéaire est proposée entre les deux paramètres avec un coefficient de corrélation, R de 0,826, montrant une diminution du seuil de cisaillement avec l'augmentation de l'étalement. D'autres chercheurs ont également établi une bonne corrélation entre l'étalement et le seuil de cisaillement [204].

D'après Wallevik [205], le seuil de cisaillement est inversement proportionnel à l'affaissement, ce qui confirme ainsi la corrélation linéaire qu'on a trouvé pour nos résultats expérimentaux pour la teneur en laitier comprise entre 0 et 30%.

Reinhardt et Wüstholtz [206] ont rapporté que l'étalement tend à décroître quand le seuil de cisaillement s'accroît et que la viscosité plastique est mieux représentée par le temps d'écoulement T_{50} de l'essai du cône d'Abrams que par le temps d'écoulement T_v de l'essai à l'entonnoir en V.

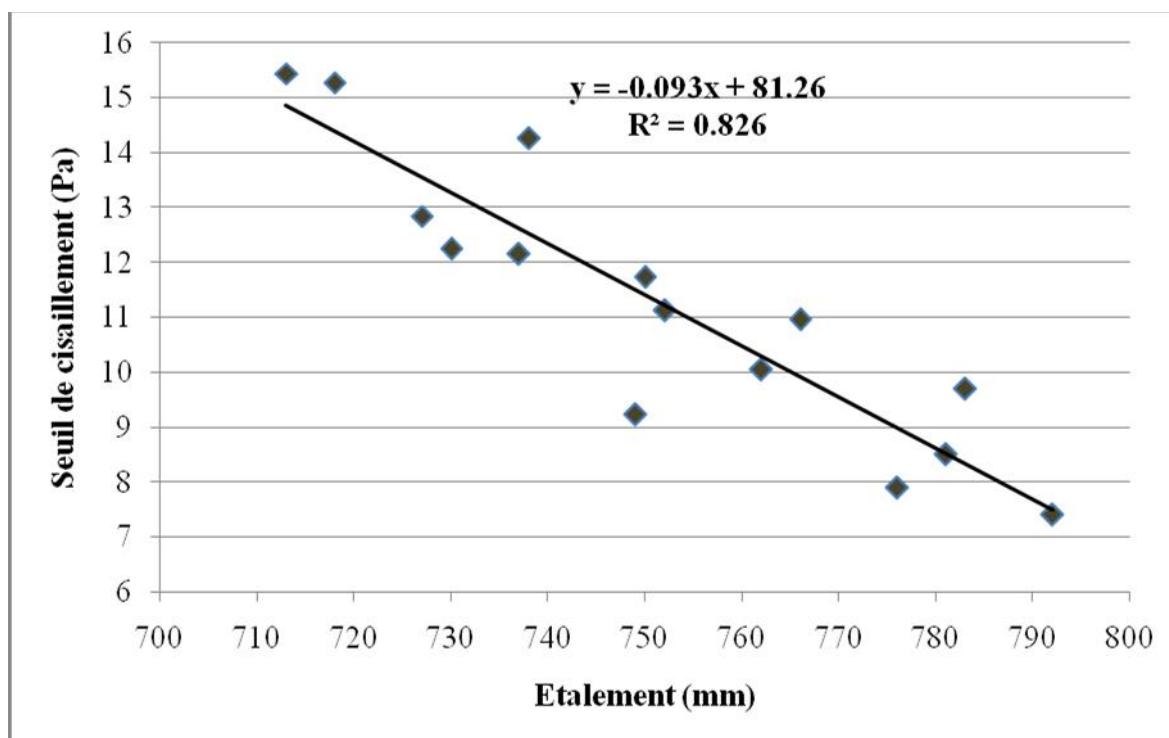


Figure 4.9 : Corrélation entre seuil de cisaillement et l'étalement.

En analysant les résultats obtenus par Iris et al. [207], on peut conclure que certains paramètres empiriques sont liés au seuil de cisaillement tandis que d'autres corréleraient mieux avec la viscosité plastique des bétons recyclés autoplaçants contenant différents pourcentages des granulats recyclés (0, 20, 50, 100%). En ce qui concerne le seuil de cisaillement, une bonne corrélation linéaire de cette propriété avec les valeurs d'étalement ainsi qu'avec le rapport de remplissage de L-box, avec un coefficient de corrélation obtenant de 0,76 et 0,82, respectivement. Les auteurs [208] ont également montré une bonne relation de la viscosité plastique avec T_{50} , avec un coefficient de corrélation de 0,76. On peut affirmer que les mêmes relations entre les paramètres empiriques et rhéologiques peuvent être utilisées pour les bétons autoplaçant conventionnels et recyclés.

Iris et al. [208] ont trouvé que l'augmentation de la teneur des graviers recyclés (0, 20, 50, 100%) entraîne une augmentation des valeurs rhéologiques, c'est-à-dire le seuil de cisaillement et la viscosité plastique, et en particulier pour le taux de remplacement plus élevé. Ils ont vu également que des rapports E/C élevés (0,473) n'impliquent pas de changement significatif sur le seuil de cisaillement, alors qu'à un rapport E/C faible, (0,447) peuvent conduire à de grands changements des paramètres rhéologiques.

Singh et Singh [209] ont étudié le comportement rhéologique de différentes qualités des BAP en terme de résistance (32, 50, 75 MPa) contenant des granulats recyclés (0, 50, 100%). Ils ont constaté que pour un taux de substitution des GN par des GR donné, le seuil de cisaillement accroît avec l'augmentation de la qualité des BAP. De plus, pour une catégorie donnée, les valeurs du seuil de cisaillement augmentent avec l'augmentation du taux de remplacement des GN par des GR. Par exemple, dans la série des BAP avec une résistance de 75 MPa, les seuils de cisaillements sont 13,84 Pa, 16,70 Pa et 30,91 Pa pour les taux de remplacement 0%, 50% et 100% en GR, respectivement.

4.4 Effet du taux de substitution des GN par des GR et laitier sur des BAP à l'état durci

4.4.1 Résistance à la compression

La variation de la résistance à la compression des BAP en fonction de la teneur en laitier et taux de substituant des GN par des GR à différents âges est représentée par les figure 4.10.

Au regard de la figure 4.10, la résistance à la compression des BAP évolue au cours du temps d'une façon similaire que le béton témoin; cependant, elle chute en fonction du pourcentage de substitution en granulats recyclés (gros et fins) que soit la teneur en laitier. A 56 jours, pour le BAP à base de 25%, 50%, 75% et 100% de granulats recyclés et sans laitier, la chute de résistance est de l'ordre de 4,60%, 8,70%, 11% et 14,6%, respectivement, par rapport au béton de référence. Cette chute de la résistance à la compression est due principalement à l'effet du mortier provenant de l'ancien béton qui reste attache aux granulats recyclés et qui gêne le bon déroulement de l'hydratation du ciment et ainsi l'affaiblissement de la zone de transition. Ces résultats expérimentaux confirment les résultats trouvés par plusieurs chercheurs qui ont travaillé sur les matériaux cimentaires incorporant des granulats recyclés ont tous relevé que la substitution de granulats naturels par des granulats recyclés entraînait inévitablement une chute de la résistance en compression [124, 158, 165, 210]. Katz [133], a trouvé une chute de résistance à la compression de 24% pour un béton à base des gros et fins granulats d'ancien béton.

Très récemment, des études similaires [199] utilisant des granulats recyclés (0, 20, 50, 100%) provenant de bétons à une résistance de classe de 30 à 50 MPa. Ils ont permis d'obtenir des réductions de résistance à la compression des BAP de l'ordre de 12% avec

100% des GR. Dans l'application visée, une résistance en compression minimale de l'ordre de 14,6% MPa lui a imposé un taux maximal de substitution de 25 %.

A l'issue de la figure 4.10, on peut observer également une diminution de la résistance à la compression avec l'augmentation de la quantité de laitier dans le mélange à 7 et 28 jours pour même taux des granulats recyclés. En effet, à 28 jours et en chiffres, pour le béton à base de 50% des granulats recyclés cette diminution équivaut à 10%, 12,30%, respectivement, pour des taux de substitution du ciment par du laitier de 15%, 30%. Cette diminution peut être attribuée au caractère hydraulique latent de laitier, la résistance des ciments au laitier se développe lentement, notamment aux jeunes âges. Cet effet est d'autant plus important que le pourcentage de laitier augmente. Bougara et al. [211] ont expliqué les propriétés mécaniques faibles, à jeune âge, du béton à base de laitier par la lente réactivité du laitier d'El-Hadjar. Ils ont aussi trouvé que la résistance à la compression à long terme augmente avec l'augmentation de la finesse du laitier.

Néanmoins, dans le cas des âges avancés (56 et 90 jours), tous les mélanges de BAP étudié préparé par les granulats naturels et/ou granulats recyclés et à base de 15 et 30% de laitier présentent des valeurs de résistance en compression comparable ou supérieur à celle du BAP témoin. A 90 jours, les bétons BAPR100L15, BAPR100L30 présentent, respectivement, une amélioration de la résistance à la compression de l'ordre de 9,6 et 5,15% par rapport au béton sans laitier (BAPR100L0). Cette amélioration se traduit par la bonne réactivité hydraulique de laitier à partir de 28 jours, qui s'hydrate en présence de Ca(OH), libérée par l'hydratation du clinker et confère au ciment une résistance comparable, sinon supérieure à celle du ciment Portland sans ajout [212].

La même tendance est observée par Zhao et al. [47] qui ont trouvé que la résistance à la compression du BAP avec du laitier est plus faible que celle du BAP témoin et en particulier aux jeunes âges. À long terme (90 jours), les résistances à la compression des bétons contenant du laitier se rejoignent avec celles du béton de référence. Cela pourrait être dû au fait qu'aux jeunes âges, le laitier avait une activité de réaction pouzzolanique faible, lors de la dernière période de durcissement, l'hydroxyde de calcium (CH) résultant de l'hydratation primaire du ciment a réagi avec le laitier pour produire une hydratation secondaire.

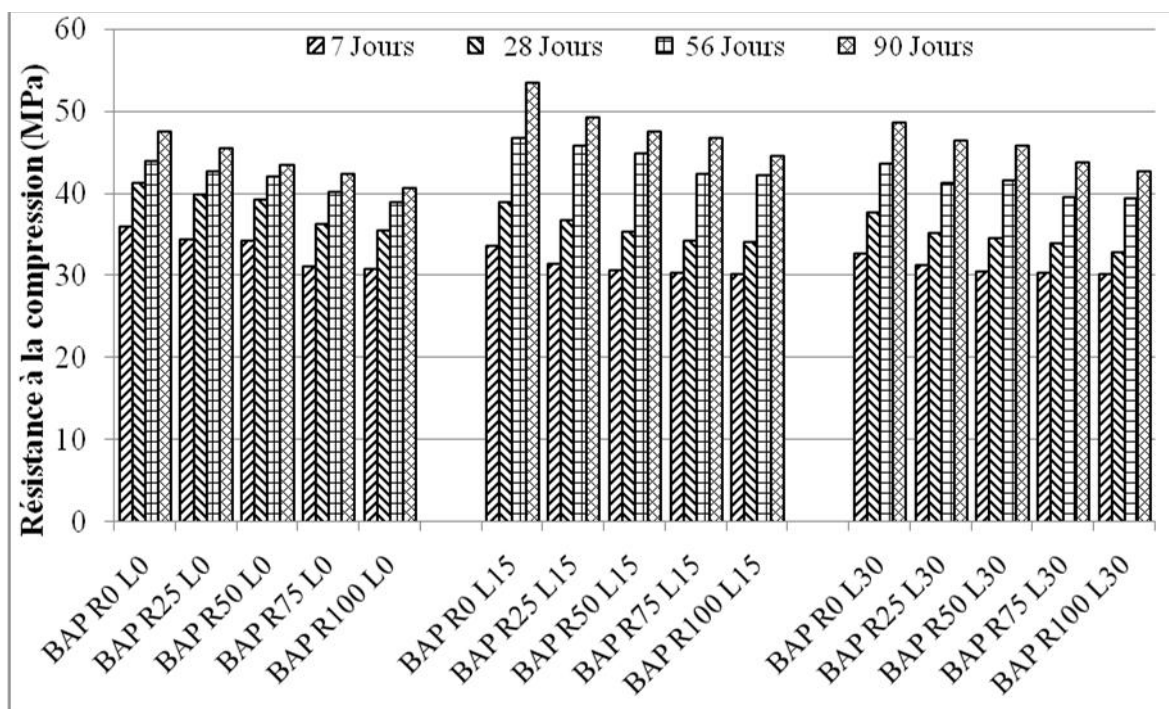


Figure 4.10 : Variation de la résistance à la compression en fonction du temps.

Khatib et Hibbert [77] ont observé un effet similaire du laitier sur le développement de la résistance à la compression sur quatre mélanges de BAP à différentes teneurs en laitier 0%, 40%, 60% et 80%. Ils ont observé une diminution systématique de la résistance à la compression avec l'augmentation de la teneur en laitier durant les stades avancés d'hydratation. Au-delà de 28 jours et jusqu'au moins 90 jours, la présence du laitier a été hautement bénéfique à 40% et 60% de substitution dépassant même la résistance du béton de contrôle. Une remarquable diminution de résistance, pour tous les âges, a été observée pour les mélanges des BAP contenant 80% de laitier.

Boukendakdji [29] a montré que les résistances mécaniques diminuent en présence du laitier toutefois, elles ne sont pas significatives d'autant plus qu'elles sont rattrapées à long terme, au-delà de 28 jours. Hadj Sadok [97] a rapporté que la résistance à la compression des mortiers à base de ciments au laitier d'El Hadjar reste faible à jeune âge, mais se développe assez bien à long terme pour des taux de substitution n'excédant pas les 30%. Li et Ding [213] ont rapporté que l'incorporation du laitier à raison de 20 à 30% dans le mortier améliore nettement sa résistance à la compression.

Chidiac et Panesar [214] ont introduit le laitier jusqu'à 60%. Pour un rapport E/L = 0,38, ils ont trouvé que la résistance à la compression du mélange, à 28 jours est à son maximum pour 20% de laitier et qu'au delà, la résistance rechute. Le gain de résistance à 120 jours par rapport à 28 jours est de 10%. O'Rourke et al. [215] ont trouvé qu'au delà de 28 jours les résistances à la compression des bétons contenant du laitier se rejoignent avec celles du béton de référence.

D'autres chercheurs [216] ont montré que quelque soit l'âge du béton l'augmentation de taux de substitution du laitier de haut fourneau au-delà de 25% diminue la résistance à la compression. Les bétons avec 25% du laitier présente la résistance la plus élevée par rapport au béton témoin. Selon Dadsetan et Bai [217], les BAP confectionné avec du laitier et un rapport E/L =0,40 et avec 30% de laitier a montré une meilleure performance après 28 jours.

Selon ces résultats, on peut noter que l'addition de laitier dans le BAP à base des granulats recyclés améliore sa résistance à la compression. La résistance optimale est obtenue à 15% de laitier. Généralement, les granulats recyclés sont plus poreux que les agrégats naturels. Lorsque BAP contenant les granulats recyclés et les l'additions minéraux, deux mécanismes possibles peuvent améliorer les propriétés du béton : (1) une partie des mélanges minéraux pénétrera les pores de granulats recyclés, ce qui améliorerait ultérieurement la zone de transition interfaciale qui s'assure l'adhérence entre la pâte et les agrégats; (2) les fissures présentées à l'origine dans les agrégats seront remplies par des produits d'hydratation du laitier (formation du gel "CSH") qui modifient la distribution et les dimensions de la porosité capillaire [218].

4.4.2 Perméabilité à l'eau

Les résultats de la perméabilité à l'eau sous pression des BAP à 56 et 90 jours en fonction de la teneur en laitier et taux de substitution de GN par des GR sont représentés dans le tableau 4.6 et illustrés sur la figure 4.11. Une tendance similaire dans les résultats de la profondeur de pénétration de l'eau est observée pour tous les bétons étudiés. Selon la figure 4.11, on observe une augmentation de la profondeur de pénétration d'eau avec l'augmentation de taux de substitution de GN par des GR. En comparaison avec le béton de référence (BAPL0R0), cette augmentation à 56 jours est de l'ordre de 2,2, 6,0, 8,65 et 31,63% pour les bétons avec 25, 50, 75 et 100% de granulats recyclés,

respectivement. Cela est du principalement à l'augmentation de la porosité du béton résultant de la présence d'ancien mortier attachée aux particules d'agrégats recyclés. Cependant, pour le même taux de substitution des granulats recyclés, la présence du laitier a engendré une amélioration remarquable de la résistance à la pénétration de l'eau. En outre, la résistance à la pénétration de l'eau dans les mélanges préparés à base de 15% de laitier sont supérieures à celle des mélanges à base de 30% laitier. À titre exemple, à 90 jours, BAPR0 avec 15 et 30% de laitier a montré une diminution de la profondeur de pénétration d'eau d'environ 42,40% et 19,80% par rapport à aux BAP sans laitier, respectivement. Ceci peut être expliqué par l'effet positif de laitier qui se traduit par l'amélioration de la structure des pores dans la zone de transition, et réduit de ce fait la perméabilité. Très récemment, Yahiaoui et al. [66] ont montré que la pénétration de l'eau a diminué avec l'augmentation de la teneur en laitier et une augmentation de la durée de cure avec un optimum de 25% de laitier.

Tableau 4.6 : Valeurs de la profondeur de pénétration d'eau sous pression des BAP

Profondeur de pénétration (mm)															
Taux de substitution des GN par GR	0			25			50			75			100		
	0	15	30	0	15	30	0	15	30	0	15	30	0	15	30
56 jours	50,9	44,1	47	52	45,2	49,3	53,9	47,5	51,3	55,3	49,1	52,9	67	53	56
90 jours	41,5	23,9	33,3	42,5	25,9	35,6	44,3	33,5	38,5	49,5	36,2	39	51,3	41,6	46

Cheng et al. [219] ont noté que une réduction de la perméabilité à l'eau du béton avec 50% de laitier. El-Amiri [220] a trouvé une amélioration de la perméabilité de l'ordre de 40%, pour un béton avec 30% de laitier, par rapport au béton sans laitier, après 6 mois de cure humide.

Gesoglu et al. [99], ont conclu que l'utilisation de laitier a diminué la profondeur de pénétration d'eau de 26 mm (BAP de référence) à 14 mm (BAP de 60% de laitier). Ceci est attribué à la modification de la taille des pores en raison de la réaction du laitier avec

l'hydroxyde de calcium et les alcalis libérés lors de l'hydratation de ciment. D'autre part, ils ont observé aussi il n'y avait aucune variation significative entre la profondeur de pénétration de l'eau des BAP en fonction de la teneur en laitier. La profondeur de pénétration d'eau de 15 mm, 13 mm et 14 mm a été surveillée avec l'utilisation de 20%, 40% et 60% de laitier, respectivement.

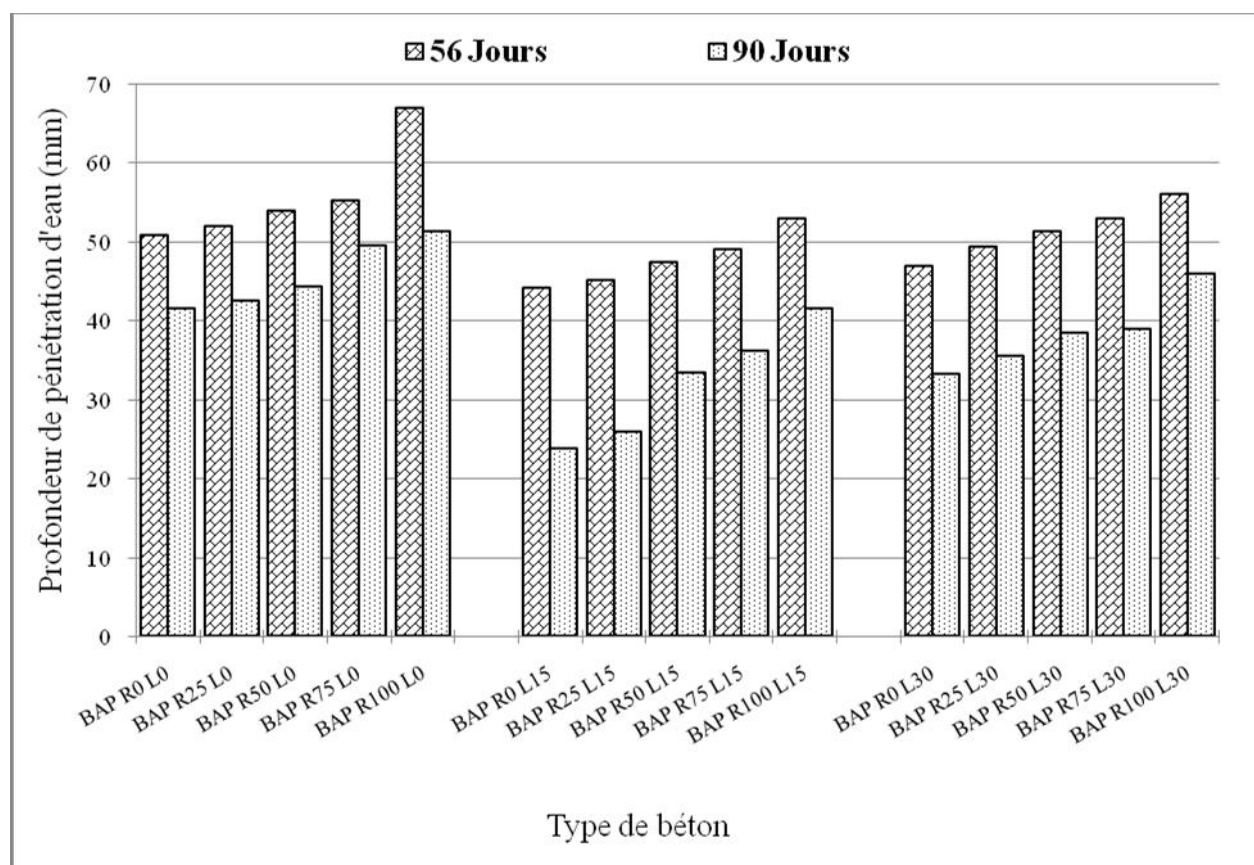


Figure 4.11 : La perméabilité à l'eau en fonction de la teneur en laitier et taux de substituant des GN par des GR.

La figure 4.12 représente les valeurs expérimentales de la profondeur de pénétration d'eau en fonction de la résistance à la compression à l'âge de 90 jours. Une corrélation linéaire est proposée entre les deux paramètres des BAP avec 0%, 15% et 30% de laitier et avec un coefficient de corrélation, R de 0,873, 0,872, 0,835 respectivement, montrant une diminution du coefficient de perméabilité avec l'augmentation de la résistance à la compression. Cette corrélation n'est pas élevée et qui pourrait être expliquée par le fait que la perméabilité à l'eau dépend non seulement de la résistance à la compression mais également de la tortuosité, de la dimensions et connectivité des pores.

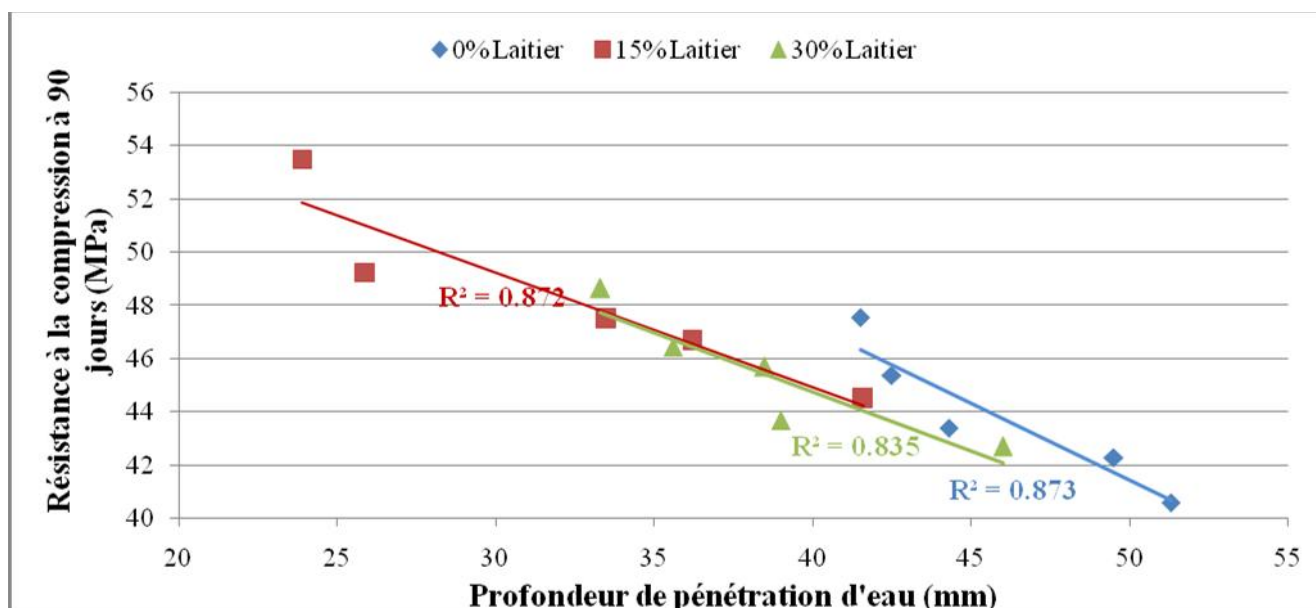


Figure 4.12 : Corrélation entre la résistance à la compression et la perméabilité à l'eau en fonction de la teneur en laitier et taux de substituant des GN par des GR.

4.4.3 Absorption capillaire

L'absorption d'eau à l'intérieur du béton sec dépend de deux paramètres majeurs à savoir la porosité du béton et la vitesse d'absorption par remontée capillaire (sorptivité). La mesure de la sorptivité est un moyen qui permet de caractériser la cinétique d'absorption des matériaux. L'absorption capillaire des grands pores a été calculée à 60 minutes. Les résultats expérimentaux de l'évolution de l'absorption d'eau par capillarité (I) et la sorptivité (S) en fonction de la teneur en laitier et le taux de substituant des GN par des GR sont présentés sur les figures 4.13 à 4.16.

Au regard de ces résultats, pour un taux de laitier constant, une augmentation de l'absorption d'eau avec l'augmentation de la teneur des granulats recyclés est observée. L'absorption capillaire la plus élevée est notée pour les mélanges de BAP contenu un pourcentage des GR plus élevé. Par exemple, la valeur d'absorption d'eau pour le BAPR100L0 est presque deux fois de la valeur d'absorption d'eau pour le BAP de référence. Cette augmentation peut être attribuée à la capacité élevée d'absorption d'eau des granulats recyclés. Tuyan et al. [158] ont montré que l'absorption d'eau était plus prononcée dans les mélanges de BAP ayant un taux de substitution des granulats recyclés de 60%.

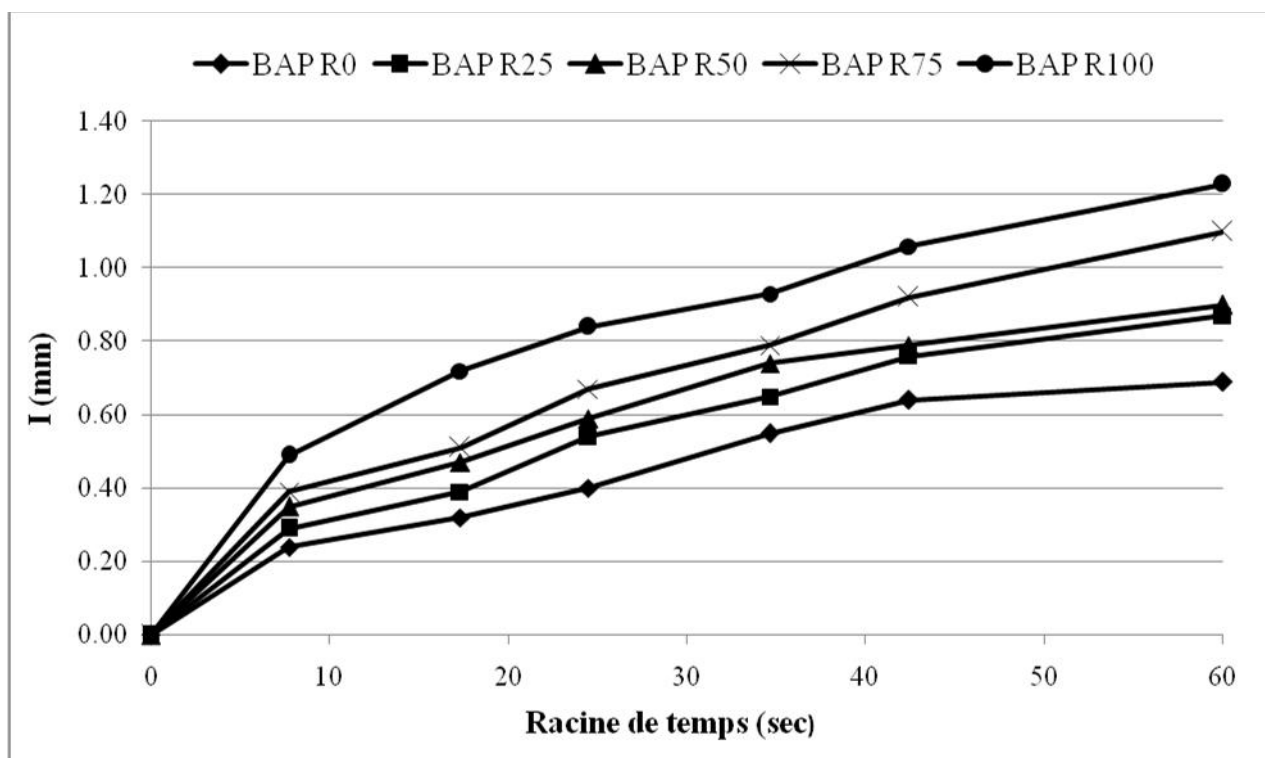


Figure 4.13 : Effet de taux de substituant des GN par des GR sur l'absorption capillaire par unité de surface des grands pores des BAP à base de 0% de laitier.

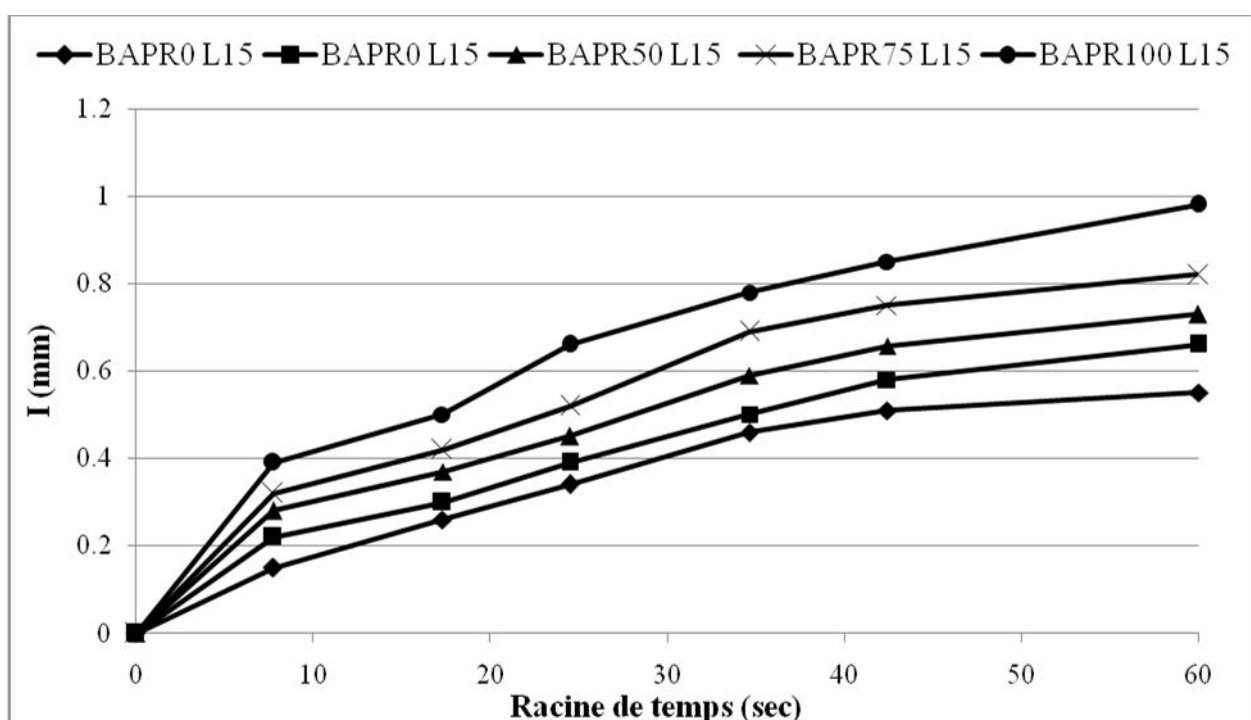


Figure 4.14 : Effet de taux de substituant des GN par des GR sur l'absorption capillaire par unité de surface des grands pores des BAP à base de 15% de laitier.

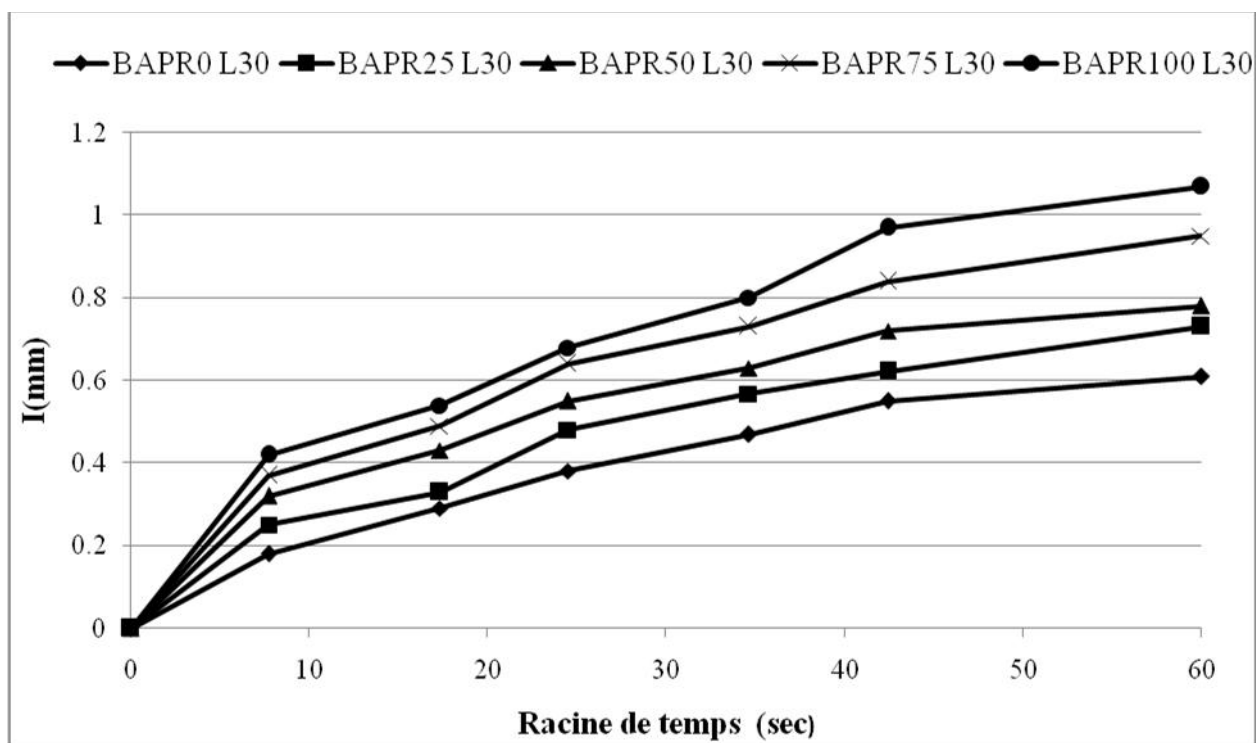


Figure 4.15 : Effet de taux de substituant des GN par des GR sur l'absorption capillaire par unité de surface des grands pores des BAP à base de 30% de laitier.

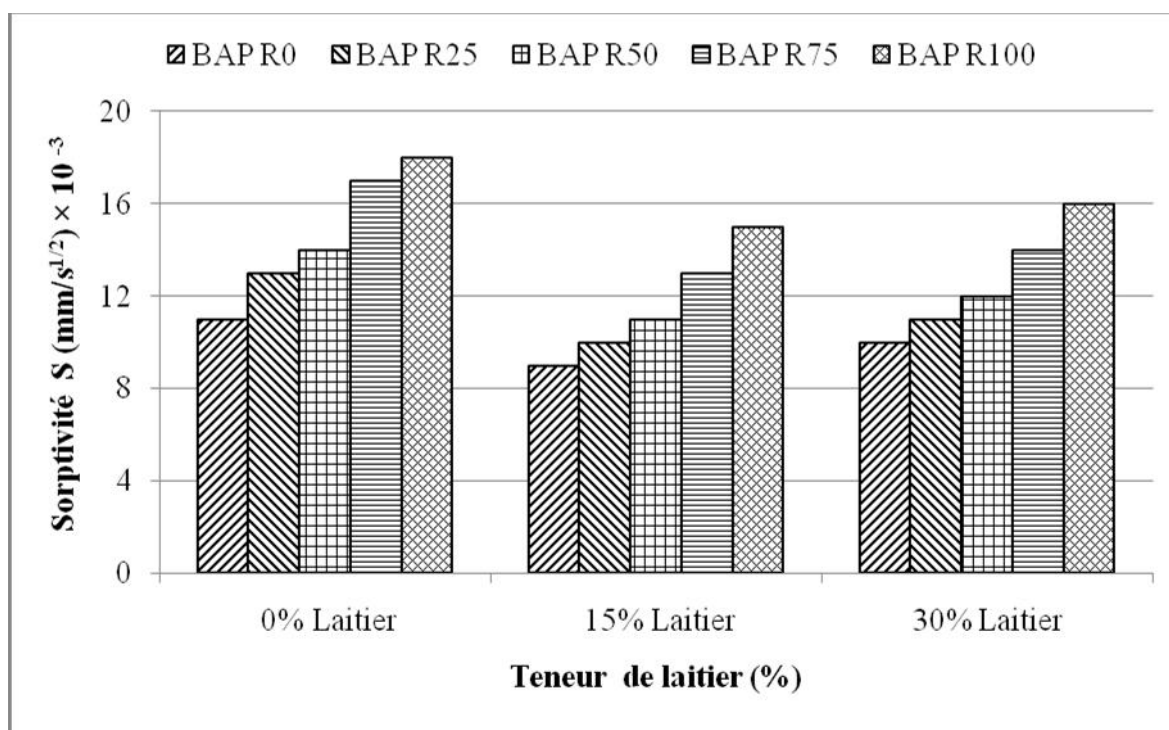


Figure 4.16 : Sorptivité des grands pores des BAP en fonction de la teneur en laitier et taux de substituant des GN par des GR.

En comparant la figure 13 aux figures 14 et 15, on observe que la présence du laitier a engendré une diminution de l'absorption d'eau. Les BAP préparés avec un teneur de laitier de 15% présentent une absorption moins que celle des autres BAP. En comparaison avec le béton référence (BAPR100L0), une réduction de l'absorption d'eau est de l'ordre de 20,23% et 13% est enregistrée pour les mélanges de BAPR100L15 et BAPR100L30, respectivement. Cette amélioration peut s'expliquer par la structure des pores plus raffinée du BAP à base de laitier. Ces résultats sont confirmés par d'autres recherches montrant une diminution de l'absorption d'eau par capillarité pour les bétons au laitier, non seulement pour une faible teneur en laitier, mais surtout pour des taux de laitier supérieurs à 50% [55, 74, 221]. Alexander et al. [222] ont trouvé que l'incorporation de 50% de laitier dans un béton avec un rapport E/L de 0,49, diminue le coefficient d'absorption de 9%. Cette diminution reflète une structure de pores plus raffinée et une diminution de la porosité capillaire, due à la formation de CSH secondaire issu de l'hydratation du laitier [92].

Les mêmes conclusions ont été faites par Yahiaoui et al. [66] l'addition de laitier entraîne une légère diminution de l'absorption capillaire pour les deux mélanges de BAP contenant 15% et 25% de laitier. Cependant, l'absorption d'eau capillaire des échantillons sans cure dans l'eau présente un coefficient d'absorption plus élevé, tandis que le coefficient le plus faible a été observé pour les échantillons de béton avec cure pendant 28 jours.

Les résultats présentés à la figure 4.17 représentent les valeurs expérimentales de la sorptivité en fonction de la résistance à la compression des BAP au laitier et différents taux des granulats recyclés. Une courbe de régression linéaire semble représenter les données expérimentales des bétons avec 0%, 15% et 30% de laitier avec un coefficient de corrélation, R de 0,945, 0,836, 0,940, respectivement, montrant une augmentation du coefficient d'absorption avec la diminution de la résistance à la compression.

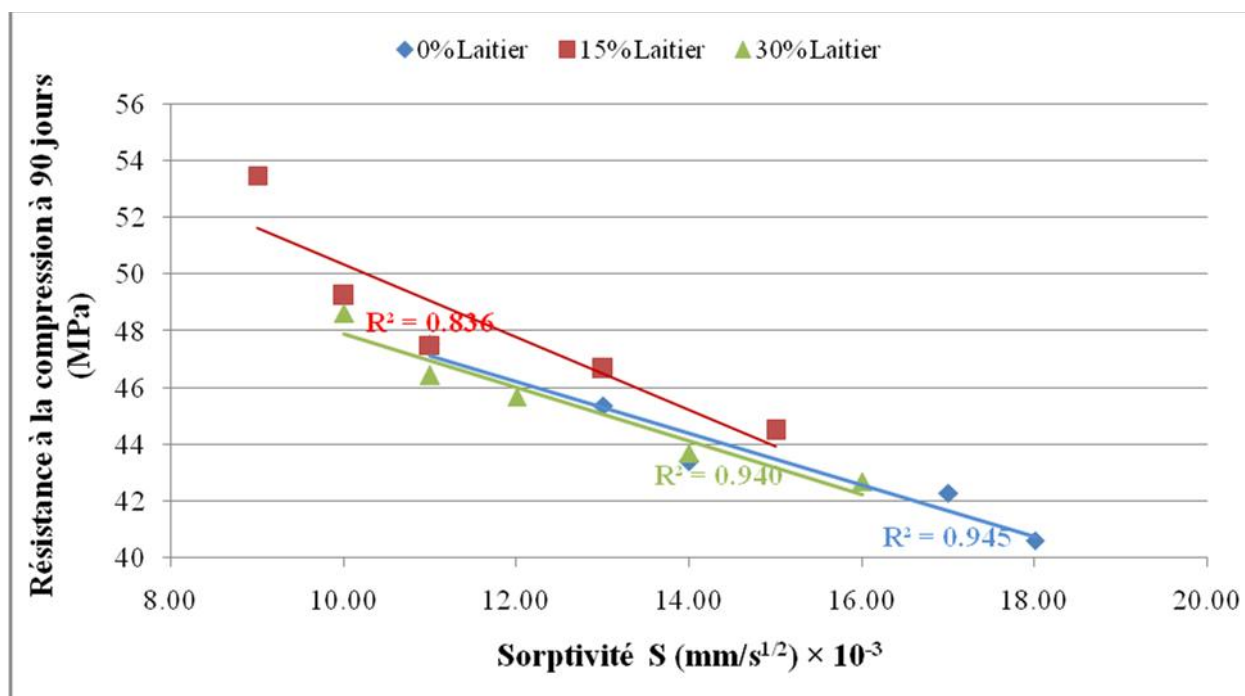


Figure 4.17 : Corrélation entre la résistance à la compression et la sorptivité en fonction de la teneur en laitier et taux de substituant des GN par des GR.

4.5 Conclusion

Les résultats de l'étude expérimentale ont montré que la méthode Okamura peut être modifiée pour formuler un BAP à base de GR et laitier. Indépendamment de la teneur en laitier, la substitution des gros et fins granulats recyclés jusqu'à 50% améliore l'ouvrabilité et par conséquent diminue la viscosité plastique et le seuil de cisaillement des BAP, tandis que l'incorporation de 50 à 100% des GR le comportement des BAP est inversé. La substitution partielle du ciment par laitier jusqu'à 30% peut donner un bon BAP à base des granulats naturels ou recyclés sans ressuage ni ségrégation, avec un optimum de 15%. Point de vue de propriétés mécanique, l'augmentation du taux de substitution de GN par des GR conduit à une diminution de la résistance à la compression. Cependant, on a observé un bon développement de la résistance pour les BAP avec laitier. Toutefois, le taux optimal semble être de 15% est observé. Pour la durabilité du BAP a été étudiée à travers des propriétés de transport à savoir : l'absorption d'eau par capillarité et la perméabilité à l'eau. Ces paramètres augmentent avec l'augmentation du taux de GR dans le béton, particulièrement à 56 jours. Par contre, la présence du laitier améliore les propriétés de transport notamment, pour un taux de 15% de substitution.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Le travail réalisé dans cette partie vise à contribuer à mieux connaître l'effet de substitution du ciment par le laitier et ainsi le taux de substitution des granulats naturels par des granulats recyclés sur le comportement du béton autoplaçant à l'état frais et durci.

Les principales conclusions que nous avons pu tirer peuvent être résumées comme suit :

- En utilisant le superplastifiant à base de polycarboxylates qui fonctionnent par répulsion stérique, le pourcentage optimal Sp/L à utiliser dans les mélanges du béton autoplaçant est de 1,5% de poids de ciment ;
- La densité du BAP diminue graduellement avec l'augmentation de la quantité de GR et de laitier. Cette diminution a été attribuée à la plus faible valeur de la densité de laitier par rapport au ciment et également à la baisse de densité de pâte de ciment d'ancien mortier attachée aux particules d'agrégats recyclées et également par la présence des pores dans les GR ;
- Le laitier est un ajout minéral très intéressant du point de vue de certaines propriétés du BAP à l'état frais, sa présence améliore l'ouvrabilité du BAP, quelque soit le taux de substituant des GN par des GR. Cette amélioration est peut être due à la réaction d'hydratation retardée du laitier, le fait qu'elle ne contribue pas aux réactions d'hydratation au jeune âge, ce qui engendre un excès d'eau dans le mélange du béton, d'où une ouvrabilité améliorée ;
- Du point de vue ouvrabilité, une teneur en laitier à 30% peut donner un bon béton autoplaçant à base des granulats naturels ou recyclés sans ressuage ni ségrégation, avec un optimum de 15% ;
- Le seuil de cisaillement et la viscosité plastique des BAP à base de laitier sont proportionnellement avec le temps d'écoulement T_{50} et T_{V-F} et inversement proportionnels à l'étalement des BAP ;
- Indépendamment de la teneur en laitier, la substitution des gros et fins granulats recyclés jusqu'à 50% améliore l'ouvrabilité et par conséquent diminue la viscosité plastique et le seuil de cisaillement des BAP. Tandis que l'incorporation de 50 à 100%

des GR, le comportement des BAP est inversé. Cela peut être attribué à la texture rugueuse de la surface, l'angularité et à la présence de résidus du mortier dans les bétons recyclés ;

- La substitution totale ou partielle des GN par des GR donne un BAP dont les propriétés à l'état frais acceptable en terme de capacité de remplissage, de passage et la résistance à la ségrégation, avec un optimum de 25 et 50% de taux de substitution ;
- Le BAP avec 100% de GR et 30% du laitier représentent une ouvrabilité acceptable, mais il est moins stable vis-à-vis du ressuage et également vis-à-vis de la capacité de passage au niveau des armatures. Cela est dû à la faible valeur du seuil de cisaillement et la viscosité plastique de ce mélange ;
- La résistance mécanique à la compression diminue en présence du laitier, toutefois, elles ne sont pas significatives d'autant plus qu'elle sera rattrapée à long terme, au delà de 56 jours quelque soit le taux de substitution de GN par des GR ;
- L'augmentation du taux de substitution de GN par des GR conduit à une diminution de la résistance à la compression. Cependant, on a observé un bon développement de la résistance pour les BAP avec laitier. Toutefois, le taux optimal semble être de 15% ;
- La durabilité du béton a été étudiée à travers des propriétés de transport à savoir : l'absorption d'eau par capillarité et la perméabilité à l'eau. Ces paramètres augmentent avec l'augmentation du taux de GR dans le béton, particulièrement à 56 jours. Néanmoins, à 90 jours, cet effet est moins visible ;
- L'absorption d'eau pour le BAP à base 100% de granulats recyclés et sans laitier est presque deux fois la valeur d'absorption d'eau pour le BAP de référence. Cette augmentation peut être attribuée à la capacité élevée d'absorption d'eau des GR ;
- L'absorption capillaire et la perméabilité à l'eau pour les BAP à base des GR sont améliorées par la présence du laitier, notamment, pour un taux de 15% de substitution. Toutefois, une faible évolution de ces paramètres est observée avec le temps ;
- En résumé, la comparaison entre les résultats de cette étude expérimentale, nous permis de conclure qu'un béton autoplaçant peut être produit en utilisant les gros et fins

granulats recyclés jusqu'à 50% avec 15 et 30% de laitier comme substitution des granulats naturels et ciment, respectivement.

Les travaux dans le cadre de cette thèse ont été limités à l'étude de l'effet du laitier et les GR sur les propriétés rhéologiques, mécaniques et durabilité du BAP et d'autres aspects restent à élucider. Par conséquent, nous recommandons, pour de futurs travaux, ce qui suit :

- L'effet des ajouts combinés (laitier, pouzzolane, cendre volante) sur les propriétés des BAP à base des GR à l'état frais et durci ;
- Mettre en évidence des relations entre les propriétés rhéologiques des BAP et le pourcentage de remplacement pour le sable recyclé ou gravier recyclé ;
- Elargir l'étude du BAP à l'état durci à la détermination d'autres caractéristiques telles que, le module d'élasticité, le retrait et le fluage ;
- Réaliser des essais de durabilité (perméabilité aux gaz, eau et aux ions chlore) à long terme et le comportement du BAP en milieu agressive (eau de mer).
 - Etudier d'autres aspects à caractère structural tels que :
 - ✓ Caractérisation de la propagation des fissures des BAP,
 - ✓ Essais d'arrachement pour caractériser d'adhérence entre le BAP et l'acier.

Références bibliographiques

- [1] 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.
- [2] Okamura H., Ouchi M., 2003, 'Self compacting concrete', Journal of advanced Concrete Technology, vol. 1(1), pp. 5-15.
- [3] EFNARC, 2005, 'The European guidelines for Self -Compacting Concrete ', 'The European Federation of Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems'. WWW.efnarc.org.
- [4] Soneb M., Bartos P.J.M., 2002, 'Filling ability and plastic settlement of self – compacting concrete' Materials and Structures, vol. 3, pp. 462 – 469.
- [5] Bethmont S., 2005, 'Mécanisme de ségrégation dans les bétons autoplaçants. Etude expérimentale des interactions granulaire', Thèse de Doctorat de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Décembre 2005, 166 pages.
- [6] Chouinard B., 1999, 'Étude des relations entre la rhéologie du béton et sa pompabilité', Mémoire pour l'obtention du grade de maitre de science (MSC)', Département de Génie Civil, Université Laval.
- [7] Verrette J.L., 1989, 'Hydraulique des conduites', notes de cours, Département de Génie Civil, Université Laval.
- [8] De Larrard F., 1999, 'Structures granulaires et formulation des bétons', Etudes et Recherches des laboratoires des ponts et chaussées.
- [9] Chapdelaine F., 1998, 'Etude sur la mesure de la rhéologie du béton frais' Mémoire pour l'obtention du grade de maitre de science (MSC), Université Laval.
- [10] Tattersall G.H., Banfill P.F.G., 1983, 'The Rheology of Fresh Concrete', Pitman, London.
- [11] Wallevik O.H., Geiker M.R., 2007, 'Course on the Rheology of Cement Based Particle Suspensions', Lecture notes, DTU, Copenhagen.
- [12] Feys D., Verhoeven R., De Schutter G., 2007, 'Evaluation of time independent rheological models applicable to fresh self-compacting concrete', Applied Rheology. vol. 17, pp. 1–10.

- [13] De Larrard., 1998, 'Fresh Concrete: A Hershel- Bulkley Material', *Materials and Structures*, vol. 31, pp. 494- 498.
- [14] Feys D., Verhoeven R., De Schutter G., 2009, 'Why is fresh self-compacting concrete shear thickening?', *Cement and Concrete Research*. vol. 39, pp. 510–523.
- [15] Feys D., Verhoeven R., De Schutter G., 2008, 'Fresh self-compacting concrete, a shear thickening material', *Cement and Concrete Research*. vol. 38, pp. 920–929.
- [16] Sedran T., 1999, 'Rhéologie et Rhéomètre des bétons. Application aux BAP', Thèse de Doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.
- [17] Jean Y.P., 2005, 'Effet de la température, des superplastifiants et des ajouts sur les variations rhéologiques des micromortiers et bétons auto-compactants', Thèse de Doctorat, Faculté de Génie Civil, Université de Sherbrooke, Canada.
- [18] Beaupré D., and Mindess S., 1998, ' Rheology of Fresh Concrete : Principles, Measurement, and Applications ', *Material Science of Concrete V* edited by JSKALNY, S.MINDESS, pp. 149-190.
- [19] Khayat K., 2000, 'Optimization and Performance of Air-Entrained, Self-consolidating Concrete', *ACI Materials Journal*, vol. 97, pp. 526-535.
- [20] Mechaymech A., 2005, 'Optimisation et performance de bétons autoplaçants économiques à base de différentes combinaisons d'adjuvants et de liants composés', Mémoire pour l'obtention du grade de maître de science, Département de Génie Civil, Université de Sherbrooke, Canada.
- [21] Hu C., De larrard F., Gjorv O.E., 1995, 'Rheological testing and modeling of fresh high-performance concrete', *Materials and structures*, vol. 28, pp. 1-7.
- [22] Turcry P., 2004, 'Retrait et Fissuration des Bétons Autoplaçants Influence de la Formulation', Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Nantes.
- [23] Petersson O., et Billberg P., Van B. K., 1999, 'A model for self-compacting concrete', *Proceedings of International RILEM Conference on production and workability of concrete*, RILEM.

- [24] Okamura H., Ozawa K., 1995, 'Self-Compacting high Performance Concrete in Japan', Second CANMET/ACI International Symposium on Advances In Concrete Technology, Las Vegas, ACI, vol. 159, pp. 31- 44.
- [25] Girish S., Ranganath R.V., Vengala J., 2010, 'Influence of powder and past on flow properties of self compacting concrete', Construction and Building Materials, vol. 24, pp. 2481-2488.
- [26] Association Française de Génie Civil (AFGC), 2002, 'Bétons Autoplaçants- Recommandations provisoires', Annales du bâtiment et des travaux publics.
- [27] Fares H., 2006, 'Propriétés mécaniques et physico-chimiques des bétons autoplaçants exposés à une température élevée', Thèse de Doctorat de l'Université de Cergy Pontoise, pp.206.
- [28] Shindoh T., Matsuoka Y., 2003, 'Development of combination type self compacting concrete and evaluation test method', Journal of advanced concrete technology, vol. 1, pp. 26-36.
- [29] Boukendakdji O., Kenai S., Kadri E.H., Rouis F., 2009, 'Effect of slag on the rheology of fresh self-compacted concrete', Construction and Building Materials, vol. 23, pp. 2593-2598.
- [30] Schwartzentruber L., Le Roy R., Cordin J., 2006, 'Rheological behaviour of fresh cement pastes formulated from a self compacting concrete', Cement and Concrete Research, vol. 36, pp. 1203-1213.
- [31] Bensebti S., 2008, 'Formulation et Propriétés des Bétons Autoplaçants à Base de Matériaux Locaux', Thèse de Doctorat, Université Mentouri, Constantine. Algérie.
- [32] Khelifa M.R., 2009, 'Effet de l'attaque sulfatée externe sur la durabilité des BAP', Thèse de Doctorat, Université de Constantine, Algérie, pp.178.
- [33] Domone P.L., 2006, 'Self-compacting concrete : An analysis of 11 years of case studies', Cement and Concrete Composites, vol. 28, pp. 197–208.
- [34] Dreux G., Festa J., 'Nouveau guide du béton', Huitième édition, Eyrolles, Paris, 409 pages, 1998.

- [35] Sharp J.H., Hill J., Milestone N.B., Miller E.W., 2003, 'Cementitious systems for encapsulation of intermediate level waste', Proceedings of ICEM '03: The 9th International Conference on Radioactive Waste Management and Environmental Remediation, September 21 – 25, Examination School, Oxford, England, pp. 1-10.
- [36] Borsoi A., Collepardi M., Collepardi S., Troli R., and Zanardi L., 2007, 'Low-Heat, High-Strength, Durable Self-Consolidating Concretes', 9th CANMET/ACI International Conference on recent Advances in Concrete Technology, Warsaw, Poland, pp. 399-409.
- [37] Menai K., 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.
- [38] Megat Johari M.A., Brooks J.J., Kabir S., Rivard P., 2011, 'Influence of supplementary cementitious materials on engineering properties of high strength concrete', Construction and Building Materials, vol. 25, pp. 2639–2648.
- [39] Ramanathan P., Baskar I., Muthupriya P., Venkatasubramani R., 2013, 'Performance of Self Compacting Concrete Containing Different Mineral Admixtures'. KSCE Journal of Civil Engineering, vol. 17 (2), pp. 465-472.
- [40] Lange F., Mörte H., Rudert V., 1997, 'Dense packing of cement pastes and resulting consequences on mortar properties', Cement and Concrete Research, vol. 27 (10), pp. 1481-1488.
- [41] Gallias J.L., Kara-Ali R., Bigas J. P., 2000, 'The effect of fine mineral admixtures on water requirement of cement pastes'. Cement and Concrete Research, vol. 30, (10), pp. 1543-1549.
- [42] Boukendakdji O., Kadri E.H., Kenai S., 2012, 'Effects of granulated blast furnace slag and superplasticizer type on the fresh properties and compressive strength of self-compacting concrete', Cement & Concrete Composites, vol. 34, pp.583–590.

- [43] Kouider djelloul O., 2012, 'Effet du laitier sur le comportement rhéologique du béton autoplaçant', Mémoire de magister, Département de Génie Civil, Université de Saad Dahleb, Algérie.
- [44] Behim M., Ali Boucette T., 2009, 'Effet des additions micronisées sur l'écoulement des Bétons autoplaçants (laitier de haut fourneau, filler calcaire et poudre de verre)', SBEIDCO – 1st International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries, ENSET Oran (Algeria), pp. 423- 430.
- [45] Debbih A., 2012, 'Performances d'un béton autoplaçant à base de granulats recyclés, laitier et la pouzzolane naturelle', Mémoire de magister, Département de Génie Civil, Université de Saad Dahleb, Algérie.
- [46] Wang H.Y., Lin C.C., 2013, 'A study of fresh and engineering properties of self compacting high slag concrete (SCHSC)', *Construction and Building Materials*, vol. 42, pp. 132–136.
- [47] Zhao H., Sun W., Wu X., Gao B., 2015, 'The properties of the self-compacting concrete with fly ash and ground granulated blast furnace slag mineral admixtures', *Journal of Cleaner Production*, vol. 95, pp. 66-74.
- [48] Islam A.L., Sudip T., 2008, 'Rheological behavior of high performance concrete with mineral admixtures and their blending', *Construction and Building Materials*, vol. 22 (12), pp. 2345- 2354.
- [49] Kim H.J., Beacraft M., Shah S.P., 2010, 'Effect of mineral admixtures on formwork pressure of self-consolidating concrete', *Cement and Concrete Composites*, vol. 32 (9), pp. 665-671.
- [50] Erhan G., Mehmet G., Erdogan O., 2010, 'Strength and drying shrinkage properties of self- compacting concrete incorporating multi-system blended mineral admixtures', *Construction and Building Materials*, vol. 24 (10), pp. 1878-1887.
- [51] Park C.K., Noh M.H., Park T.H., 2005, 'Rheological properties of cementitious materials containing mineral admixtures', *Cement and Concrete Research*, vol. 35, pp. 842–849.

- [52] Adjoudj M., Ezziane K., Kadri E.L., Ngo T.T., Kaci A., 2014, 'Evaluation of rheological parameters of mortar containing various amounts of mineral addition with polycarboxylate superplasticizer', *Construction and Building Materials*, vol. 70, pp. 549–559.
- [53] Sethy K.P., Pasla D., Sahoo U.K., 2016, 'Utilization of high volume of industrial slag in self compacting concrete', *Journal of Cleaner Production*, vol. 112, pp. 581-588.
- [54] Nécira B., Guettala A., Guettala S., 2015, 'Effect of the viscosity modifying agent and the different mineral additions on rheology and Compressive strength of self-compacting Concrete', *Asian journal of civil engineering*, vol. 16(1), pp. 111-126.
- [55] Ahari R.S., Erdem T.K., Ramyar K., 2015, 'Effect of various supplementary cementitious materials on rheological properties of self-consolidating concrete', *Construction and Building Materials*, vol. 75, pp. 89–98.
- [56] Vejmelkova E., Keppert M., Grzeszczyk S., Skalinski B., Cerny R., 2011, 'Properties of self compacting concrete mixtures containing metakaolin and blast furnace slag', *Construction and Building Materials*, vol. 25, pp. 1325–1331.
- [57] Guneyisi E., Gesoglu M., 2011, 'Properties of self-compacting portland pozzolana and limestone blended cement concretes containing different replacement levels of slag', *Materials and Structures*, vol. 44, pp. 1399–1410.
- [58] Boudchicha A., 2007, 'Utilisation des additions minérales et des adjuvants fluidifiants pour l'amélioration des propriétés rhéologiques et mécaniques des bétons'. Thèse de Doctorat d'état en Génie Civil. Université Mentouri Constantine, 249 p.
- [59] Menadi B., Kenai S., Kouider Djelloul O., 2012, 'Properties of Fresh Self-Compacting Concrete Containing Slag'. 10th International Congress on Advances in Civil Engineering, Middle East Technical University, Ankara, Turkey. 17-19 October.
- [60] François Cussigh., 2007, 'Bétons autoplaçants (BAP)', Doc. C2217 technique d'ingénieur.

- [61] Klug Y., Holschemacher K., 2003, 'Comparison of the hardened properties of Self Compacting and Normal Vibrated Concrete', 3rd International Symposium on Self Compacting Concrete, Reykjavik, Iceland, pp. 596-605.
- [62] Domone P.L., 2007, 'A review of the hardened mechanical properties of self-compacting concrete', *Cement and Concrete Composites*, vol. 29, pp. 1–12.
- [63] Oner A., Akyuz S., 2007, 'An experimental study on optimum usage of GGBS for the compressive strength of concrete', *Cement and Concrete Composites*, vol. 29, pp. 505–514.
- [64] Mucteba U., Mansur S., 2011, 'Performance of self-compacting concrete containing different mineral admixtures', *Construction and Building Materials*, vol. 25(11), pp. 4112-4120.
- [65] Beycioglu A., Aruntas Y.H., 2014, 'Workability and mechanical properties of self compacting concretes containing LLFA, GBFS and MC', *Construction and Building Materials*, vol. 73 (30), pp. 626-635.
- [66] Yahiaoui W., Kenai S., Menadi B., Kadri E.H., 2017, 'Durability of self compacted concrete containing slag in hot climate', *Advances in Concrete Construction*, vol. 5(3), pp. 271-288.
- [67] Dinakar P., Sethy K.P., Sahoo U.C., 2013, 'Design of self-compacting concrete with ground granulated blast furnace slag', *Materials and structures*, vol. 43, pp. 161–169.
- [68] Menendez G., Irassar F.E., Bonavetti V.L., 2003, 'Strength development of ternary blended cement with limesotone filler and blast furnace slag', *Cement and Concrete Research*, vol. 25, pp. 61-67.
- [69] Ali-Boucetta T., 2014, 'Contribution du laitier granulé et de la poudre de verre sur les propriétés d'écoulement et de durabilité des bétons autoplaçants et de hautes performances'. Thèse de doctorat 3ème cycle. Université Badji Mokhtar-Annaba, 210 p.
- [70] Yahia A., Tanimura M., Shimoyama Y., 2005, 'Rheological properties of highly flowable mortar containing limestone filler-effect of powder content and W/C ratio', *Cement and Concrete Research*, vol. 35 (3), pp. 532-539.

- [71] Felekoglu B., Yardimci M., Baradan B., 2003, 'A comparative study on the use of mineral and chemical types of viscosity enhancers in self-compacting concrete'. Proceeding of 3rd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (Pro 33), Reykjavik, Iceland, pp. 446-456.
- [72] Pineaud A., 2007, 'Contribution à l'étude des caractéristiques mécaniques des bétons autoplaçants et application à l'industrie de la préfabrication'. Thèse de doctorat, Université de Cergy-Pontoise, 271 p.
- [73] Felekoglu B., Turkel S., Baradan B., 2007, 'Effect of water/cement ratio on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete', *Building and Environment*, vol. 42, pp. 1795–1802.
- [74] Guneyisi E., Gesoglu M., 2008, 'A study on durability properties of high-performance concretes incorporating high replacement levels of slag', *Materials and Structures*, vol. 41, pp. 479-493.
- [75] 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.
- [76] Sivasundaram V., Malhotra V.M., 1992, 'Properties of concrete incorporating low quantity of cement and high volumes of ground granulated slag', *ACI Materials Journal*, vol. 89, pp. 554–563.
- [77] Khatib J.M., Hibbert J.J., 2005, 'Selected engineering properties of concrete incorporating slag and metakaolin', *Construction and Building Materials*, vol. 19 (6), pp. 460–472.
- [78] Assié S., 2004, 'Durabilité Des Bétons Autoplaçants', Thèse de Doctorat, l'Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse.
- [79] Craeye B., Itterbeeck P.V., Desnerck P., Boel V., De Schutter G., 2014. 'Modulus of elasticity and tensile strength of self-compacting concrete: Survey of experimental data and structural design codes', *Cement and Concrete Composites*, vol. 54. pp. 53–61.
- [80] Kuder K., Lehman D., Berman J., Hannesson G., Shogren R., 2012, 'Mechanical properties of self-consolidating concrete blended with high volumes of fly ash and slag', *Construction and Building Materials*, vol. 34, pp. 285–295.

- [81] Topçu I.B., Bilir T., Boga A.R., 2010, 'Estimation of the modulus of elasticity of slag concrete by using composite material models', *Construction and Building Materials*, vol. 24, pp. 741–748.
- [82] Piatak N.M., Parsons M.B., Seal R.R., 2015, 'Characteristics and environmental aspects of slag: a review', *Applied Geochemistry*, vol. 57, pp. 236–266.
- [83] Alrifai A., Aggoun S., Cabrillac R., 2008, 'Influence des Paramètres de Formulation sur le Retrait Endogène des Pâtes et des Mortiers Issus de BAP', XXVI^e Rencontres Universitaires de Génie Civil., Nancy, pp. 1-8.
- [84] Lura P., Breugel K.V., Maruyama I., 2001, 'Effect of curing temperature and type of cement on early-age shrinkage of high-performance concrete', *Cement and Concrete Research*, vol. 31, pp. 1867-1872.
- [85] Bouasker M., 2007, 'Etude numérique et expérimentale du retrait endogène au très jeune âge des pâtes de ciment avec et sans inclusions', Thèse de Doctorat de l'université de Nantes, 202 pages.
- [86] Lee K.M., Lee S.H., Kim G.Y., 2006, 'Autogenous shrinkage of concrete containing granulated blast-furnace slag', *Cement and Concrete Research*, vol. 36, pp. 1279 – 1285.
- [87] El-Chabib H., Syed A., 2013, 'Properties of self-consolidating concrete made with high volumes of supplementary cementitious materials', *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 25, pp. 1579- 1586.
- [88] Chen W.H., Brouwers J.H., 2012. 'Hydration of mineral shrinkage-compensating admixture for concrete: an experimental and numerical study', *Construction and Building Materials*, vol. 26 (1), pp. 670-676.
- [89] Guneyisi E., Gesoglu M., Ozbay E., 2010, 'Strength and drying shrinkage properties of self-compacting concretes incorporating multi-system blended mineral admixtures', *Construction and Building Materials*, vol. 24, pp. 1878-1887.
- [90] Neville A. M., 2000, 'Propriétés des Bétons', Édition Eyrolles, Paris, 806 p.

- [91] RILEM Technical Committee, 2008, 'Final report of RILEM TC 205-DSC: durability of selfcompacting concrete', *Materials and Structures*, vol. 41, pp. 225–248.
- [92] Jiang S.P., Grandet J., 1989, 'Evolution comparée des porosités des mortiers de ciment au laitier et des mortiers de ciment portland', *Cement and Concrete Research*, vol. 19, pp. 487-495.
- [93] Bouikni A., Swamy R.N., Bali A., 2009, 'Durability properties of concrete containing 50% and 65% slag', *Construction and Building Materials*, vol. 23, pp. 2836-2845.
- [94] Ameer E., 2009, 'Vers une prédiction de la perméabilité au gaz à partir de la composition des matériaux cimentaires', Thèse de Doctorat, Université de La Rochelle.
- [95] Kanellopoulos A., Petrou MF., Ioannou I., 2012, 'Durability performance of self compacting concrete', *Construction and Building Materials*, vol. 37, pp. 320–325.
- [96] Boel V., Audenaert K., De Schutter G., Heirman G., Vandewalle L., Desmet B., Vantomme J., 2007, 'Transport properties of self compacting concrete with limestone filler or fly ash', *Materials and Structures*, vol. 40(5), pp. 507–516.
- [97] Hadj sadok A., 2010, 'Comportement des mortiers et bétons à base de ciments au laitier d'El hadjar dans des milieux agressifs', Thèse de Doctorat, Département de Génie Civil, Université de Saad Dahleb, Algérie.
- [98] Shi HS., Xu BW., Zhou XC., 2009, 'Influence of mineral admixtures on compressive strength, gas permeability and carbonation of high performance concrete', *Construction and Building Materials*, vol. 23, pp. 1980-1985.
- [99] Gesoglu M., Güneyisi E., Özbay E., 2009, 'Properties of self-compacting concretes made with binary, ternary, and quaternary cementitious blends of fly ash, blast furnace slag, and silica fume', *Construction and Building Materials*, vol. 23, pp. 1847–1854.

- [100] ASTM C 1202-94, 1995, 'Standard method for electrical indication of concretes ability to resist chloride-ion penetration', Annual book of ASTM Standards.
- [101] Nguyen T.S., 2006, 'Influence de la nature du liant et de la température sur le transport des chlorures dans les matériaux cimentaires', Thèse de Doctorat, Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions (LMCD) ; INSA-UPS Génie Civil.
- [102] Tetsuya I., Shigeyoshi M., Tsuyoshi M., 2008, 'Chloride binding capacity of mortar made with various portland cement and mineral admixtures'. *Journal of Advanced Concrete Technology*, vol. 6 (2), pp. 287-301.
- [103] Moon Y.H., Kim S.H., Choi S.D., 2006, 'Relationship between average pore diameter and chloride diffusivity in various concretes', *Construction and Building Materials*, vol. 20, pp. 725-732.
- [104] Divsholi B.S., Lim T.Y.D., Teng S., 2014, 'Durability properties and microstructure of ground granulated blast furnace slag cement concrete', *International Journal of Concrete Structures and Materials*, vol. 8, pp. 157–164.
- [105] Duan P., Shui Z., Chen W., Shen C., 2013, 'Enhancing microstructure and durability of concrete from ground granulated blast furnace slag and metakaolin as cement replacement materials', *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 2, pp. 52–59.
- [106] Adam A.A., Molyneaux T.C.K, Patnaikuni I., Law D.W., 2010, 'Strength, sorptivity and carbonation of geopolymer concrete', *Challenges, Opportunities and Solutions in Structural Engineering and Construction*, pp. 563–568.
- [107] Sideris K.K., Nikolas S.A., 2013, 'Durability of normal strength self compacting concretes and their impact on service life of reinforced concrete structures', *Construction and Building Materials*, vol. 41, pp. 491–497.
- [108] Ye G., Liu X., De Schutter G., Pope A.M., Taerwe L., 2007, 'Influence of limestone powder used as filler in SCC on hydration and microstructure of cement pastes', *Cement and Concrete Composites*, vol. 29 (1), pp. 94–102.

- [109] Valcuende M., Parra C., 2010, 'Natural carbonation of self-compacting concretes', *Construction and Building Materials*, vol. 24 (5), pp. 848-853.
- [110] Mohammeda M.K., Dawson A.R., Howard N.T., 2014, 'Carbonation of filler typed self compacting concrete and its impact on the microstructure by utilization of 100% CO₂ accelerating techniques', *Construction and Building Materials*, vol. 50, pp. 508-516.
- [111] Chakib K., 2007-2008, 'Bilan des activités minières', Ministère de l'énergie et des mines, direction générale des mines, Volume II.
- [112] Ulsen C., Kahn H., Hawlitschek G., Masini E.A., Angulo S.C., John V.M., 2013, 'Production of recycled sand from construction and demolition waste', *Construction and Building Materials*, vol. 40, pp. 1168-1173.
- [113] Juan M.S., Gutiérrez P.A., 2009, 'Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate', *Construction and Building Materials*, vol. 23, pp. 872-877.
- [114] Padmini A.K., Ramamurthy K., Mathews M.S., 2009, 'Influence of parent concrete on the properties of recycled aggregate concrete', *Construction and Building Materials*, vol. 23, pp. 829-836.
- [115] Etxeberria M., Vázquez E., Marí A., Barra M., 2007, 'Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete', *Cement and Concrete Research*, vol. 37, pp. 735-742.
- [116] Gonzalez-Fonteboa B., Martinez-Abella F., 2008, 'Concretes with aggregates from demolition waste and silica fume', *Materials and mechanical properties, Building Environment*, vol. 43, pp. 429-437.
- [117] Manuel G., Agrela F.B., Barbudo A., Ayuso J., Antonio Ramírez., 2014, 'Mechanical and durability properties of concretes manufactured with biomass bottom ash and recycled coarse aggregates', *Construction and Building Materials*, vol. 72, pp. 231-238.
- [118] Richardson A., Coventry K., Bacon J., 2011, 'Freeze/thaw durability of concrete with recycled demolition aggregate compared to virgin aggregate concrete', *Journal of Cleaner Production*, vol. 19, pp. 272-277.

- [119] Tu T.Y., Chen Y.Y., Hwang C.L., 2006, 'Properties of HPC with recycled aggregates', *Cement and Concrete Research*, vol. 36, pp. 943–950.
- [120] Debieb F., 2007, 'Performance et durabilité du béton à base de granulats recyclés contaminés par les chlorures et les sulfates', Thèse de Doctorat de l'USTHB, 163 pages.
- [121] Evangelista L., de Brito J., 2010, 'Durability performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates', *Cement and Concrete Composites*, vol. 32, pp. 9–14.
- [122] Kou S.C., Poon C.S., 2010, 'Properties of concrete prepared with PVA-impregnated recycled concrete aggregates', *Cement and Concrete Composites*, vol. 32, pp. 649–654.
- [123] Kou S.C., Poon C.S., 2009, 'Properties of self compacting concrete prepared with coarse and fine recycled concrete aggregates', *Cement and Concrete Composites*, vol. 31, pp. 622-627.
- [124] Grdic Z.J., Toplicic-Curcic G.A., Despotovic IM., Ristic N.S., 2010, 'Properties of self compacting concrete prepared with coarse recycled concrete aggregate', *Construction and Building Materials*, vol. 24, pp. 1129–1133.
- [125] Manzi S., Mazzotti C., Bignozzi M.C., 2013, 'Short and long-term behavior of structural concrete with recycled concrete aggregate', *Cement and Concrete Composites*, vol. 37, pp. 312–320.
- [126] Tam V.W.Y., 2005, 'New approach in measuring water absorption of recycled aggregates', *Construction and Building Materials*, vol. 35, pp. 1195-1203.
- [127] Khoshkenari G.A., Shafigh P., Moghimi M., Mahmoud B.H., 2014, 'The role of 0–2 mm fine recycled concrete aggregate on the compressive and splitting tensile strengths of recycled concrete aggregate concrete', *Materials and Design*, vol. 64, pp. 345-354.
- [128] Hansen T.C., 1992, 'Recycling of Demolished concrete and Masonry' - Report of Technical Committee 37-DRC (Demolition and Reuse of concrete), Ed. Hansen T. C., Rilem Report 6, pp. 336.

- [129] Butler L., J.S. West., S.L. Tighe., 2011, 'The effect of recycled concrete aggregate properties on the bond strength between RCA concrete and steel reinforcement', *Cement and Concrete Research*, vol. 41, pp. 1037-1049.
- [130] Chakradhara R.M., Bhattacharyya S.K., Barai S.V., 2011, 'Influence of field recycled coarse aggregate on properties of concrete', *Materials and Structures*, vol. 44(1), pp. 205-220.
- [131] Safiuddin M., Alengaram U.J., Rahman M.M., Salam M.A, Jumaat M.Z., 2013, 'Use of recycled concrete aggregate in concrete: a review', *Journal of Civil Engineering and Management*, vol. 19(6), pp. 1–15.
- [132] Gasti T., 2010, 'Caractérisations et formulation d'un béton compacté au rouleau à partir de granulats recyclés', *Mémoire de Magister de l'Université Yahia Fares – Médéa*, 112 pages.
- [133] Katz A., 2003, 'Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete', *Cement and Concrete Research*, vol. 33, pp. 703-711.
- [134] Tam V.W.Y., Wang K., Tam C.M., 2008, 'Assessing relationships among properties of demolished concrete, recycled aggregate and recycled aggregate concrete using regression analysis', *Journal of Hazardous Materials*, vol. 152 (2), pp. 703-714.
- [135] Poon C.S., Shui Z.H., Lam L., Fok H., Kou S.C., 2004, 'Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of concrete', *Cement and Concrete Research*, vol. 34(1), pp. 31-36.
- [136] Geng J., Sun J., 2013, 'Characteristics of the carbonation resistance of recycled fine aggregate concrete', *Construction and Building Materials*, vol. 49, pp. 814–820.
- [137] Silva R.V., de Brito J., Dhir R.K., 2014, 'Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production', *Construction and Building Materials*, vol. 65, pp. 201–217.

- [138] Bianchini G., Marrocchino E., Tassinari R., Vaccaro C., 2005, 'Recycling of construction and demolition waste materials: a chemical–mineralogical appraisal', *Waste Management*, vol. 25(2), pp. 149-159.
- [139] Jiménez J.R., Agrela F., Ayuso J., López M., 2011, 'A comparative study of recycled aggregates from concrete and mixed debris as material for unbound road sub-base', *Materiales de Construction*, vol. 61, pp. 289 – 302.
- [140] Pereira P., Evangelista L., de Brito D., 2012, 'The effect of superplasticisers on the workability and compressive strength of concrete made with fine recycled concrete aggregates', *Construction and Building Materials*, vol. 28, pp. 722–731.
- [141] Aurélie G., 2011, 'Valorisation des granulats recyclés de béton : étude des caractéristiques physiques et mécaniques des bétons de granulats recyclés de béton', *Mémoire Projet de fin d'étude*, Institut National des Sciences Appliquées de Strasbourg : INSA Strasbourg.
- [142] Rodrigues F., Carvalho M.T., Evangelista L., de Brito J., 2013, 'Physical–chemical and mineralogical characterization of fine aggregates from construction and demolition waste recycling plants', *Journal of Cleaner Production*, vol. 52, pp. 438–445.
- [143] Kenai S., Debieb F., 2011, 'Characterization of the durability of recycled concretes using coarse and fine crushed bricks and concrete aggregates', *Materials and structures*, vol. 44, pp. 815-824.
- [144] Lovato P.S., Possan E., Dal Molin D.C.C., Masuero A.B., Ribeiro J.L.D., 2012, 'Modelling of mechanical properties and durability of recycled aggregate concretes', *Construction and Building Materials*, vol. 26, pp. 437–47.
- [145] Mefteh H., Kebaïli O., Oucief H., Berredjem L., Arabi N., 2013, 'Influence of moisture conditioning of recycled aggregates on the properties of fresh and hardened concrete', *Journal of Cleaner Production*, vol. 54, pp. 282-288.
- [146] Cartuxo F., de Brito J., Evangelista L., Jiménez J.R., Ledesma E.F., 2015, 'Rheological behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates – Influence of the superplasticizer', *Construction and Building Materials*, vol. 89, pp. 36-47.

- [147] Benhouana M., Nezergui B., Boudraa S., 2009, 'Valorisation des granulats recyclés dans la formulation d'un béton autoplacant', SBEIDCO – 1st International Conference of Sustainable Built Environment Infrastructure in Developing Countries ENSET Oran (Algeria), pp. 295-301.
- [148] Kou S.C., Poon C.S., 2009, 'Properties of concrete prepared with crushed fine stone, furnace bottom ash and fine recycled aggregate as fine aggregates', *Construction and Building Materials*, vol. 23, pp. 2877–86.
- [149] Khatib J.M., 2005, 'Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate', *Cement and Concrete Research*, vol. 35, pp. 763-769.
- [150] Safiuddin M.D., Salam M.A., Jumaat M.Z., 2011, 'Effects of recycled concrete aggregate on the fresh properties of self-consolidating concrete', *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, Vol. XI. No 04.
- [151] Kenai S., Debbih A., Menadi B., Kadri E.L., 2014, 'Effect of coarse and fine recycled aggregates and natural pozzolana on fresh properties of self-compacting concrete'. The 2014 World Congress on Advances in Civil, Environmental, and Materials Research (ACEM14), Busan, Korea, August 24-28.
- [152] López C.D., Fonteboa G.B., Brito D.J., Abella M.F., Taboada G.I., Silva P., 2015, 'Study of the rheology of self-compacting concrete with fine recycled concrete aggregates', *Construction and Building Materials*, vol. 96, pp. 491–501.
- [153] Güneysi E., Gesoglu M., Algin Z., Yazici H., 2016, 'Rheological and fresh properties of self-compacting concretes containing coarse and fine recycled concrete aggregates', *Construction and Building Materials*, vol. 113, pp. 622-630.
- [154] Omrane M., Kenai S., Kadri E.H., Ait mokhtar A., 2017, 'Performance and durability of self compacting concrete using recycled concrete aggregates and natural pozzolan', *Journal of Cleaner Production*, vol. 165, pp. 415-430.
- [155] Adem A.A.M., Ezziane K., Bougara A., Adjoudj M., 2016, 'Rheological and mechanical behavior of concrete made with pre-saturated and dried recycled concrete aggregates', *Construction and Building Materials*, vol. 123, pp. 300–308.

- [156] Zhao Z., Remond S., Damidot D., Xu W., 2015, 'Influence of fine recycled concrete aggregates on the properties of mortars', *Construction and Building Materials*, vol. 81, pp. 179-186.
- [157] Hu J., Wang Z., Kim Y., 2013, 'Feasibility study of using fine recycled concrete aggregate in producing self-consolidation concrete'. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, vol. 2(1), pp. 20-34.
- [158] Tuyan M., Mardani-Aghabaglou A., Ramyar K., 2014, 'Freeze–thaw resistance, mechanical and transport properties of self-consolidating concrete incorporating coarse recycled concrete aggregate', *Materials and Design*, vol. 53, pp. 983–991.
- [159] Kou S.C., Poon C.S., 2015, 'Effect of the quality of parent concrete on the properties of high performance recycled aggregate concrete', *Construction and Building Materials*, vol. 77, pp. 501-508.
- [160] Koenders E.A.B., Pepe M., Martinelli E., 2014, 'Compressive strength and hydration processes of concrete with recycled aggregates', *Cement and Concrete Research*, vol. 56, pp. 203-212.
- [161] Kwan W.H., Ramli M., Kam K.J., Sulieman M.Z., 2012, 'Influence of the amount of recycled coarse aggregate in concrete design and durability properties', *Construction and Building Materials*, vol. 26(1), pp. 565-573.
- [162] Tahar Z., Kadri E.L., Ngo T.T., Bouvet A., Kaci A., 2016, 'Influence of recycled sand and gravel on the rheological and mechanical characteristic of concrete', *Journal of Adhesion Science and Technology*, vol. 30(4), pp. 392-411.
- [163] Sumanth C., Ratna K., Rathish P., 2013, 'Mechanical and durability properties of self compacting concrete with recycled concrete aggregates', *International Journal of Scientific and Engineering Research*, vol. 4 (5), pp. 260–264.
- [164] Safiuddin D., Alengaram J., Salam D., Jumaat Z., Jaafar F., Saad B., 2011, 'Properties of high-workability concrete with recycled concrete aggregate', *Materials Research*, vol. 14 (2), pp. 248–255.

- [165] Pereira-de-Oliveira L.A., Nepomuceno M.C.S., Castro-Gomes J.P., Vila M.F.C., 2014, 'Permeability properties of self-compacting concrete with coarse recycled aggregates', *Construction and Building Materials*, vol. 51, pp. 113-120.
- [166] Gesoglu M., Güneyisi E., Öznur H., Taha I., Taner-Yasemin M., 2015, 'Failure characteristics of self-compacting concretes made with recycled Aggregates', *Construction and Building Materials*, vol. 98, pp. 334–344.
- [167] Singh N., Singh S.P., 2016, 'Carbonation and electrical resistance of self compacting concrete made with recycled concrete aggregates and metakaolin', *Construction and Building Materials*, 2016; vol. 121, pp. 900–909.
- [168] Corinaldesi V., Moriconi G., 2009, 'Influence of mineral additions on the performance of 100 % recycled aggregate concrete', *Construction and Building Materials*, vol. 23(8), pp. 2869-2876.
- [169] Kanish Kapoor M.E., Singh S.P., Singh B., 2016, 'Durability of self-compacting concrete made with Recycled Concrete Aggregates and mineral admixtures', *Construction and Building Materials*, vol. 128, pp. 67–76.
- [170] Güneyisi E., Gesoglu M., Algin Z., Yazici H., 2014, 'Effect of surface treatment methods on the properties of self-compacting concrete with recycled aggregates', *Construction and Building Materials*, vol.64, pp. 172–183.
- [171] Abbas A., Fathifazl G., Burkan-Isgor O., Razaqpur A.G., Fournier B., Foo S., 2008, 'Proposed method for determining the residual mortar content of recycled concrete aggregates', *Journal of ASTM International*, vol. 5(1), pp. 1-12.
- [172] Choi C.W, Yun D.H, 2012, 'Compressive behavior of reinforced concrete columns with recycled aggregate under uniaxial loading', *Engineering Structures*, vol. 241, pp. 285-293.
- [173] Sato R., Maruyama I., Sogabe T., 2007, 'Flexural behavior of reinforced recycled concrete beams', *Journal of Advanced Concrete Technology*, vol. 5, pp. 43–61.
- [174] Gomez-Soberon J.M.V., 2002, 'Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate: an experimental study', *Cement and Concrete Research*, vol. 32, pp. 1301–1311.

- [175] Silva R.V., de Brito J., Dhir R.K., 2015, 'Prediction of the shrinkage behavior of recycled aggregate concrete: a review', *Construction and Building Materials*, vol. 77, pp. 327–339.
- [176] Thomas C., Setién J., Polanco J.A., Alaejos P., Sánchez de Juan M., 2013, 'Durability of recycled aggregate concrete', *Construction and Building Materials*, vol. 40, pp. 1054-1065.
- [177] Kou S., Poon C., Etxeberria M., 2011, 'Influence of recycled aggregates on long term mechanical properties and pore size distribution of concrete', *Cement and Concrete Composites*, vol. 33(2), pp. 286-291.
- [178] Andal J., Shehata M., Zacarias P., 2016, 'Properties of concrete containing recycled concrete aggregate of preserved quality', *Construction and Building Materials*, vol. 125, pp. 842-855.
- [179] Tam, V.W.Y., Tam C.M., 2007, 'Assessment of durability of recycled aggregate concrete produced by two-stage mixing approach', *Journal of Materials Science*, vol. 42(10), pp. 3592-3602.
- [180] Abbas A., Fathifazl G., Isgor O.B., Razaqpur A.G., Fournier B., Foo S., 2009, 'Durability of recycled aggregate concrete designed with equivalent mortar volume method', *Cement and Concrete Composites*, vol. 31(8), pp. 555-563.
- [181] Sim J., Park C., 2011, 'Compressive strength and resistance to chloride ion penetration and carbonation of recycled aggregate concrete with varying amount of fly ash and fine recycled aggregate', *Waste Manage*, vol. 31(11), pp. 2352–2360.
- [182] NF P 15-471, 1990, 'Méthode d'essais des ciments, détermination des résistances mécaniques', Paris.
- [183] 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.
- [184] Chai H., 1998, 'Design and testing of SCC' Ph.D thesis, University College of London (UCL), 259 pages.

- [185] EN 12350-8, 2014, Essai pour béton frais - Partie 8 : Béton auto-plaçant - Essai d'étalement au cône d'Abrams.
- [186] EN 12350-9, 2014, Essai pour béton frais - Partie 9 : Béton auto-plaçant - Essai d'écoulement à l'entonnoir en V.
- [187] EN 12350-10, 2014, Essai pour béton frais - Partie 10 : Béton auto-plaçant - Essai à la boîte en L.
- [188] EN 12350-11, 2014, Essai pour béton frais - Partie 11 : Béton auto-plaçant - Essai de stabilité au tamis.
- [189] Hamza S., Kadri EH., Ngo TT., Bouvet A., Cussigh F., Kenai S., 2014, 'A new vane rheometer for fresh mortar: development and validation', Applied Rheology, vol. 24(2), pp. 22594.
- [190] Norme française NF EN 12350-6, 1999, 'Essai pour béton frais'- partie 6 : Masse volumique. AFNOR, paris, Indice de classement : P18-440.
- [191] Norme française, P 18-406, 1981, 'Béton-essai de compression. AFNOR, Paris.
- [192] ASTM C1585 – 11, 2012, 'Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic- Cement Concretes'.
- [193] DIN 1048, 2000, 'Testing method for concrete: determination of the depth of penetration of water under pressure'.
- [194] Topçu I.B., Sengel S., 2004, 'Properties of concretes produced with waste concrete aggregate', Cement and Concrete Research, vol. 34, pp. 1307-1312.
- [195] Yong P.C., Teo D.C.L., 2009, 'Utilization of recycled aggregate as coarse aggregate in concrete', UNIMAS E-Journal of civil engineering, vol. 1, pp. 1-6.
- [196] Grzeszczyk S., Janowska-Renkas E., 2012, 'The influence of small particle on the fluidity of blast furnace slag cement paste containing superplasticizers', Construction and building materials, vol. 26(1), pp.411–416.
- [197] Shafigh P., Jumaat MZ., Mahmud H., Alengaram UJ., 2013, 'Oil palm shell lightweight concrete containing high volume ground granulated blast furnace slag', Construction and building materials, vol. 40, pp. 231–239.
- [198] Uysal M., Sumer M., 2011, 'Performance of self-compacting concrete containing different mineral admixtures', Construction and Building Materials, vol. 25 (11), pp. 4112-4120.

- [199] Fiol F., Thomas C., Muñoz C., Ortega-López V., Manso J.M., 2018, 'The influence of recycled aggregates from precast elements on the mechanical properties of structural self-compacting concrete', *Construction and Building Materials*, vol. 182, pp. 309–323.
- [200] Iris G.T., Belén G.F., Fernando M.A., Diego C.L., 2017, 'Self-compacting recycled concrete: Relationships between empirical and rheological parameters and proposal of a workability box', *Construction and Building Materials*, vol. 143, pp. 537–546.
- [201] Gesoglu M., Özbay E., 2007, 'Effects of mineral admixtures on fresh and hardened properties of self-compacting concretes: binary, ternary and quaternary systems', *Materials and Structures*, vol. 40, pp. 923–937.
- [202] Shi Y.X., Matsui I., Guo Y.J., 2004, 'A study on the effect of fine mineral powders with distinct vitreous contents on the fluidity and rheological properties of concrete', *Cement and Concrete Research*, vol. 34, pp. 1381–1387.
- [203] Sethy K., Pasla D., Sahoo U.C., 2015, 'Effect of Slag on the Rheological and Strength Properties of Self-Compacting Concrete', *Key Engineering Materials*, vols. 629 - 630 , pp. 399-404. Trans Tech Publications, Switzerland.
- [204] Aïssoun B., Khayat K., Gallias J.L., 2016, 'Variations of sorptivity with rheological properties of concrete cover in self-consolidating concrete', *Construction and building materials*, vol. 113, pp. 113-120.
- [205] Wallevik J.E., 2006, 'Relationship between the Bingham parameters and slump', *Cement and Concrete Research*, vol. 36, pp. 1214–1221.
- [206] Reinhardt H.W., Wüstholtz T., 2006, 'About the influence of the content and composition of the aggregates on the rheological behaviour of self-compacting concrete', *Materials and Structures*, vol. 39, pp. 683–693.
- [207] Iris G.T., Belén G.F., Fernando M.A., Diego C.L., 2017, 'Self-compacting recycled concrete: Relationships between empirical and rheological parameters and proposal of a workability box', *Construction and Building Materials*, vol. 143, pp. 537–546.

- [208] Iris G.T., Belén G.F., Fernando M.A., Sindy S.P., 2017, 'Analysis of rheological behaviour of self-compacting concrete made with recycled aggregates', *Construction and Building Materials*, vol. 157, pp. 18-25.
- [209] Singh R.N., Singh B., 2018, 'Rheological behaviour of different grades of self-compacting concrete containing recycled aggregates', *Construction and Building Materials*, vol.161, pp, 354–364.
- [210] Señas L., Priano C., Marfil S., 2016, 'Influence of recycled aggregates on properties of self-consolidating concretes', *Construction and building materials*, vol. 113, pp. 498-505.
- [211] Bougara A., Lynsdale C., Ezziane K., 2007, 'Activation of Algerian slag in mortars', *Construction and Building Materials*, vol. 23, pp. 542–547.
- [212] Gengying L., Xiaohua Z., 2003, 'Properties of concrete incorporating fly ash and ground granulated blast-furnace slag', *Cement and Concrete Composites*, vol. 25, pp. 293-299.
- [213] Li Z., Ding Z., 2003, 'Property improvement of Portland cement by incorporating with metakaolin and slag', *Cement and Concrete Research*, vol. 33, pp. 579-584.
- [214] Chidiac S.E., Panesar D.K., 2008, 'Evolution of mechanical properties of concrete containing ground granulated blast furnace slag and effects on the scaling resistance test at 28days ', *Cement & Concrete Composites*, vol. 30, pp. 63–71.
- [215] O'Rourke B., McNally C., Richardson M.G., 2009, 'Development of calcium sulfate–ggbs–Portland cement binders', *Construction and Building Materials*, vol. 23, pp. 340–346.
- [216] Vivek S.S., Dhinakaran G., 2017, 'Fresh and hardened properties of binary blend high strength self-compacting concrete', *Engineering Science and Technology, an International Journal*, vol. 20, pp. 1173–1179.
- [217] Dadsetan S., Bai J., 2017, 'Mechanical and microstructural properties of self compacting concrete blended with metakaolin, ground granulated blast-furnace slag and fly ash', *Construction and Building Materials*, vol. 146, pp. 658–667.

- [218] Kou S.C., Poon C.S., Agrela F., 2011, 'Comparisons of natural and recycled aggregate concretes prepared with the addition of different mineral admixtures', *Cement and Concrete Composites*, vol. 33, pp.788–795.
- [219] Cheng A., Huang R., Wu J.K., Chen C.H., 2005, 'Influence of GGBS on durability and corrosion behaviour of reinforced concrete', *Materials Chemistry and Physics*, vol. 93, pp. 404-411.
- [220] El Amiri A., 1998, 'Durability of concrete in hot Climate', PhD thesis, Leeds University, England.
- [221] Vejmelkova E., Pavlikova M., Keršner Z., Rovnanikova P., Ondracek M., Sedlmajer M., 2009, 'High performance concrete containing lower slag amount: a complex view of mechanical and durability properties', *Construction and Building Materials*, vol. 23(6), pp. 2237–2245.
- [222] Alexander MG., Magee BJ., 1999, 'Durability performance of concrete containing condensed silica fume', *Cement and Concrete Research*, vol. 29, pp. 917-922.

Annexe A

Exemple de calcul de la composition du mortier

A.1 Les Données

Pour un volume du mortier de $V=1.3$ l (par exemple)

Les masses volumiques absolues des constituants :

- Ciment : $\dots_C=3040$ kg/m³
- Sable : $\dots_S=2530$ kg/m³
- Superplastifiant : $\dots_{Sp}=1070$ kg/m³
- Eau : $\dots_E=1000$ kg/m³

Coefficient d'absorption du sable $A_b= 1,7\%$

On fixe le rapport Sable/Mortier $S/M = 0,50$

On fixe le rapport (par poids) $E/C = 0,38$ ou

Le superplastifiant (MEDAFOW 30) est de 30% extrait (contient 70% d'eau), le dosage en superplastifiant sera de : %Sp =1,5% du poids de ciment (ou poudres).

A.2 Calcul d'humidité du sable

On pèse un échantillon de sable par exemple de masse $M_1=300$ g (par exemple), on le met dans l'étuve à 105°C pendant 8 minutes puis on le pèse une deuxième fois on obtient une masse $M_2 = 295$ g et on calcul l'humidité du sable μ_s

$$\sim_s = \frac{M_1 - M_2}{M_2} \times 100$$

Donc le sable contient une certaine quantité d'eau qu'on doit retrancher de son coefficient d'absorption on l'appelle correction :

$$\text{Correction} = \sim_s - A_b$$

A.3 Calcul des quantités de chaque constituant

A.3.1 Le ciment

Le pourcentage en volume du ciment C% :

$$\% C_{vol} = \frac{(1 - S/M)}{(1 + E/C_{par\ volume})} * 100$$

La quantité de ciment C en kg :

$$C(kg) = \frac{V \times E / C_{par\ volume}}{100} \times \dots_c$$

A.3.2 Le Sable

La quantité du sable en kg est S :

$$S(kg) = (1 + \frac{Correction}{100}) \times (\frac{V \times S / M \times \dots_S}{100})$$

A.3.3 Le superplastifiant

La quantité du superplastifiant est Sp :

$$Sp(kg) = \frac{\% Sp \times C}{100}$$

B.3.4. L'eau

L'eau ajoutée au mortier (E) est divisée en deux parties une première partie E₁, qui est de 70% de la quantité d'eau globale, qu'on ajoute lors du malaxage durant la première minute et la deuxième quantité E₂ (30% de la quantité d'eau globale) est mélangée avec l'adjuvant est ajouté au mélange du mortier dans la deuxième minute du malaxage qui suit la première.

Le pourcentage d'eau en volume : %E_{vol}

$$\% E_{vol} = \frac{(1 - S/M) \times 100 \times E / C_{par\ volume}}{(1 + E / C_{par\ volume})}$$

La quantité d'eau globale E en litre :

$$E = \left(\frac{V \times \% E_{vol}}{100} \times \frac{\dots_E}{1000} \right) - \left(\frac{Sp \times 70}{100} \right) - \left(\frac{V \times S / M \times \dots_S}{1000} \times \frac{correction}{100} \right)$$

Eau1 $E_1 = E \times 0.70$

Eau2 $E_2 = E \times 0.30$

Tableau A : Feuille Excel donnant composition du mortier

Essais sur Mortier				entrer data dans cellules en rouge			
				valeurs calculées dans cellules en noir			
Référence du mélange	Essai 3	CEM II/A 42,5					
volume de mortier (litres)	1.3						
sable/mortier vol	0.5						
E/P par vol.	1.197	poudre	22.76	Eau volume (%)	27.24		
composition Poudre(vol %)		type					
ciment portland	100						
Laitier	0						
superplast - MEDAFLOW30	1.5	% (Sp/P)					
humidité sable							
		humidité (%)	absorption	correction (%)			
pois humide (gms)	200	0.0	1.2	-1.2			
pois sec (gms)	200						
Materiaux/Type	vol	densité	contenance d'eau		poid mélange		
	litres	kg/m ³	kg	%	kg	kg	
ciment	0.296	3150				0.932	
Laitier	0.000	2950				0.000	
Eau	0.354	1000	0.354			0.365	W1 0.292
			total				W2 0.073
superplast - MEDAFLOW30		1100	0.014	70	0.010	0.014	
			ssd				
Sable	0.650	2645	1.719	-1.2	-0.021	1.699	
Total	1.300					3.010	
		w/p bt	0.3800				

Annexe B

Exemple de calcul de la composition du béton

Les mêmes démarches de la composition du mortier (Annexe A) sont suivies pour la composition du béton autoplaçant

B.1 Les Données

Pour un volume de béton de $V=20$ litres (par exemple)

- Les masses volumiques :
 - ❖ Masse volumique apparente du gravier naturel : $\rho_{GN} = 1470 \text{ kg/m}^3$
 - ❖ Masse volumique apparente du gravier recyclé : $\rho_{GR} = 1163 \text{ kg/m}^3$
 - ❖ Masse volumique absolue du gravier naturel : $\rho_{AGN} = 2715 \text{ kg/m}^3$
 - ❖ Masse volumique absolue du gravier recyclé : $\rho_{AGR} = 2393 \text{ kg/m}^3$
 - ❖ Masse volumique absolue du sable naturel : $\rho_{SN} = 2530 \text{ kg/m}^3$
 - ❖ Masse volumique absolue du sable recyclé : $\rho_{SR} = 2266 \text{ kg/m}^3$
 - ❖ Masse volumique absolue du ciment : $\rho_C = 3040 \text{ kg/m}^3$
- Les coefficients d'absorption :
 - ❖ Coefficient d'absorption du sable naturel : $Ab_{SN} = 1,7\%$
 - ❖ Coefficient d'absorption du sable recyclé : $Ab_{SR} = 8,87\%$
 - ❖ Coefficient d'absorption du gravier naturel : $Ab_{GN} = 0,5\%$
 - ❖ Coefficient d'absorption du gravier recyclé : $Ab_{GR} = 5,3\%$
- Le rapport Sable/Mortier : $S/M = 0.50$
- Le pourcentage du gravier est de 50% de sa densité apparente donc son dosage sera de :

$$G(\text{kg/m}^3) = \frac{\rho_G \times 50}{100}$$

- Le volume d'air dans le béton en pourcentage : $A=1\%$ du volume du béton

- Le rapport Eau/Ciment est $E/C_{poids} = E/C_{volum} / \dots_A = 0.38$ par unité de poids de ciment.
- Le pourcentage de superplastifiant (MEDAFLOW30) : $\%Sp = 1,5\%$ du poids de ciment, le MEDAFLOW30 est de 30% d'extrait (donc il contient 70% d'eau).

B.2 Calcul d'humidité

Comme on doit calculer l'humidité du sable pour la composition du mortier, dans la composition du béton on doit calculer l'humidité du sable et du gravier aussi pour apporter les corrections nécessaires à la formulation.

On prend un échantillon de sable de masse M_1 et un échantillon de gravier de masse M'_1 et on les met dans l'étuve réglée à 105°C pour une durée de 6 minutes pour le gravier et une durée de 8 minutes pour le sable, puis on pèse M_2 et M'_2 les masses respectives du gravier et du sable.

L'humidité du sable :
$$\sim_s = \frac{M_1 - M_2}{M_2} \times 100$$

L'humidité du gravier :
$$\sim_G = \frac{M'_1 - M'_2}{M'_2} \times 100$$

B.3 Calcul des différents composants

B.3.1 Gravier

La quantité G en kg du gravier nécessaire pour un volume de béton V :

$$G(\text{kg}) = \frac{G(\text{kg} / \text{m}^3) \times V}{1000} \left(1 + \frac{\sim_G - A_{bG}}{100} \right)$$

B.3.2 Sable

Pour calculer la quantité du sable dans le béton on calcule avant tout le pourcentage du gravier dans le béton (%G), le pourcentage du mortier par rapport au béton (%M) puis le pourcentage du sable dans le béton (%S) pour arriver à la quantité du sable dans un volume V de béton (S) :

Le pourcentage du gravier G dans le béton :

$$\%G = \frac{G(\text{kg} / \text{m}^3)}{\dots_{AG}} \times 10$$

Le pourcentage du volume de mortier M par rapport au volume de béton :

$$\% M = 100 - \% G - \% A$$

Le pourcentage du sable S dans le béton :

$$\% S = \frac{\% M \times S / M}{100}$$

Quantité du sable S en (kg) pour un volume V de béton :

$$S(kg) = \frac{\% S \times \dots_{AS} \times V}{1000} \left(1 + \frac{\sim_s - A_{bS}}{100} \right)$$

D'où on peut obtenir le rapport G/S de notre composition.

B.3.3 Ciment

Pourcentage de volume pâte dans le béton (%P) :

$$\% P = \% M - \% S$$

Pourcentage de ciment dans le béton (%C) :

$$\% C = \frac{1}{1 + E / C_{volume}} \times \% P$$

La quantité de ciment C en (kg) pour un volume V de béton :

$$C(kg) = \% C \times \dots_C \times 10 \times \frac{V}{1000}$$

B.3.4 Superplastifiant

Le dosage en superplastifiant par mètre cube de béton Sp (kg/m³)

$$Sp(kg / m^3) = \frac{\% Sp}{100} \times \% C \times \dots_C \times 10$$

La quantité de superplastifiant Sp en (kg) pour un volume V de béton :

$$Sp(kg) = Sp(kg / m^3) \times V$$

B.3.5 Eau

L'eau ajoutée au béton (E) est divisée en deux parties : la première partie (E_1) est de 70% de (E) elle est ajoutée durant la première minute de malaxage et la deuxième partie (E_2), elle de 30% de (E) est ajoutée au superplastifiant est l'ensemble est ajouté au mélange du béton durant la deuxième minute de malaxage.

Le pourcentage d'eau dans le béton (%E) :

$$\% E = \frac{E / C_{\text{volume}}}{1 + E / C_{\text{volume}}} \times \% P$$

Calcul de l'eau contenue dans le sable, dans le gravier et dans le superplastifiant, cette eau (e) doit être extraite :

L'eau contenue dans le sable : e_1

$$e_1 (kg) = \frac{\% S \times \dots \times A_S \times V}{1000} \left(\frac{\gamma_S - A_{bS}}{100} \right)$$

L'eau contenue dans le gravier : e_2

$$e_2 (kg) = \frac{G (kg / m^3) \times V}{1000} \left(\frac{\gamma_G - A_{bG}}{100} \right)$$

L'eau contenue dans le superplastifiant : e_3

$$e_3 = \frac{Sp (kg) \times 80}{100}$$

L'eau à extraire e : $e = e_1 + e_2 + e_3$

D'où la quantité d'eau globale E en (kg) pour un volume V de béton :

$$E (kg) = \frac{\% E \times 10 \times V}{1000} - e$$

Avec :

Eau1 $E_1 (kg) = 0.70 \times E$

Eau2 $E_2 (kg) = 0.30 \times E$

Tableau B : Feuille Excel donnant composition du BAP

Composition du Mélange de BAP				entrée des data cellules en rouge						
				valeurs calculées cellules en noir						
référence:								mesures d'humidité		
Densités relatives	Gravier	2.7		Absorptions (%)		Pds Hum	Pds sec	% Humid		
	Sable	2.53		Gravier	0.5	8/15	261.2	255.1		
	Ciment	3.04				3/8	205.84	200.03		
	Fines	2.81		Sable	1.7	Sable	198.9	187.13		
gravier										
Densité		1470	kg/m ³		% gravier	27.2	vol % de béton			
percent		50			Gravier	735	kg/m3			
8/15:3/8		2.00			8/15	490	kg/m3			
					3/8	245	kg/m3			
air		1	vol % de béton							
Sable										
volume mortier		71.9	vol % de béton			% Sable	36.0	vol % de béton		
Sable		50	vol % de mortier			Sable	910	kg/m3		
pate										
volume		36.0	vol % de béton			% Eau	19.3	vol % de béton		
E/P volume		1.155			Eau	193	kg/m3			
Poudre		16.7	vol % de béton							
Ciment		100	vol % de poudre			Ciment	16.7	vol % de béton		
Fines		0	vol % de poudre			Ciment	507	kg/m3		
Densité relative		3.04								
						% Fines	0.0	vol % de béton		
E/P Poids		0.380				Fines	0	kg/m3		
superplastifiant: MEDAFLOW 30										
dosage		1.5	% liquid de poudre			superplas	7.61	kg/m3		
Mélange vol (litres)		10	litres							
Densité Béton		2352	kg/m3			Poids Mél	23.50	kg		
Poids Mélange										
		prop.mé	Pds mé	absorptio	humidité	extra eau	Poids			
		kg/m3	kg	%	%	kg	kg			
Gravier	8/15	490	4.90	0.5	2.39	0.09	4.99			
Gravier	3/8	245	2.45	0.5	2.90	0.06	2.51			
Sable		910	9.10	1.7	6.29	0.42	9.51			
Ciment	CPA (A	507	5.07				5.07			
Fines	Laitier	0	0.00				0.00			
Eau		193	1.93							
Superpla	MEDAF	7.61	0.08		80	0.06	0.076			
composition eau							1.30	eau 1	0.908	
								eau 2	0.389	
total		2352	23.5			0.63	23.46			