CY Cergy Paris Université **Université Yahia Farès de Médéa**

THESE

Présentée par

Imane BENTEGRI

Pour obtenir le titre de docteur de CY Cergy Paris Université et de l'Université Yahia Farès de Médéa

Spécialité : Génie Civil

Option : matériaux innovants et environnement

L'effet des fibres organiques sur un béton fluide à base de granulats recyclés

Laboratoire de Mécanique et Matériaux de Génie Civil (L2MGC-EA4114)

Laboratoire de Matériau et environnement (LME)

Soutenue le 02 Juin 2021, devant le jury composé de :

M. Yahia AMMAR	Professeur à l'Université de Sherbrooke	Rapporteur
M. Ali-Nordine LEKLOU	Professeur à l'Université de Nantes	Rapporteur
M. Farid DEBIEB	Professeur à l'Université Yahia Farès de Médéa	Examinateur
Mme Évelyne TOUSSAINT	Professeur à l'Université Clermont Auvergne	Examinatrice
M. Benabed BENCHAA	Professeur à l'Université Amar Telidji- Laghouat	Examinateur
M. Othmane BOUKENDAKDJI	Professeur à l'Université Yahia Farès de Médéa	Directeur de thèse
M. El-Hadj KADRI	Professeur à CY Cergy Paris Université	Directeur de thèse
M. Tien Tung NGO	MCF (HDR) à CY Cergy Paris Université	Co-directeur de thèse
M. Hamza SOUALHI	MAB à l'Université Amar Telidji- Laghouat	Invité

2020/2021

À mes chers parents,

Aucun hommage ne pourrait être à la hauteur de l'amour que j'éprouve pour vous. Merci d'avoir toujours cru en moi et de m'avoir encouragée tout au long de mon parcours. Que Dieu vous bénisse et vous protège.

À mon cher mari AZIZ,

Pour son amour, sa confiance et son soutien inconditionnel. Merci d'être toujours à mes côtés.

À mes deux frères,

Prunelle de mes yeux que j'aime plus que tout dans ce monde.

À toute ma famille, mes collègues et mes amis, et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce projet voit la lumière.

Imane BENTEGRI

Remerciements

Ce travail est le fruit d'une collaboration entre le Laboratoire de Matériaux et Environnement (LME) de l'université Yahia Farès de Médéa et le Laboratoire de Mécanique et Matériaux du Génie Civil (L2MGC) de CY Cergy Paris Université.

Tout d'abord, je tiens à remercier sincèrement les membres du jury à savoir, Mme Évelyne TOUSSAINT d'avoir accepté de présider ma soutenance, M. Yahia AMMAR et M. Ali-Nordine LEKLOU pour leur lecture attentive et leurs remarques et recommandations en tant que rapporteurs de ce mémoire, M. Farid DEBIEB et M. Benabed BENCHAA pour leur travail d'examinateur et leurs conseils avisés.

J'exprime toute ma profonde gratitude à M. Othmane BOUKENDAKDJI et M. Elhadj KADRI, mes directeurs de thèse, pour m'avoir fait confiance et pour la grande sollicitude avec laquelle ils ont dirigé cette thèse. Je leur remercie également pour leur présence, leur patience et pour tous les conseils qu'ils m'ont toujours prodigués.

Je souhaite exprimer toute ma reconnaissance à M. Tien Tung NGO et M. Hamza SOUALHI, mes co-directeurs de thèse, pour avoir dirigé ce travail, pour leur encadrement agréable et enrichissant ainsi que leurs précieux conseils.

Je ne saurai oublier de remercier vivement l'équipe technique du L2MGC, M. CRISTOFOL, Mme COUSTURE, Mme CHAUMONT et M. WASSERMANN, pour leur aide et leur grande disponibilité.

Merci à tout le corps administratif de l'Université de Cergy-Pontoise et l'université de Yahia Farès de Médéa et aux divers responsables au sein de l'école doctorale (SI) pour leur aide tout au long de cette thèse.

Mes vifs remerciements vont aussi à tous mes collègues doctorants, post-doc et enseignants, pour tous les bons moments passés ensemble durant ces trois années de thèse.

Enfin et surtout, mes chaleureux remerciements vont particulièrement à mes parents, mes frères et mon cher mari pour leur patience et leur soutien tout au long de cette thèse.

RESUME

Ce travail de recherche concerne l'étude de l'influence des fibres organiques sur le comportement du béton à base de granulats naturels ou recyclés. La première partie s'attache à l'étude de l'effet des fibres sur la performance du béton de granulats naturels aux états frais et durci. Pour atteindre cet objectif, quatre formulations de béton témoin (sans fibres, sans adjuvant et à base de granulats naturels), ainsi que 9 bétons fibrés sans et avec adjuvant ont été développés. Les formulations du béton validées dans cette partie ont été caractérisées à l'état frais (ouvrabilité, rhéologie et tribologie) ainsi qu'à l'état durci, en termes de résistances mécaniques à la compression et à la traction, module d'élasticité, porosité et perméabilité. Les résultats ont montré que l'introduction des fibres organiques de 19mm de longueur à un dosage de 0,24 % en association avec l'adjuvant permet d'améliorer la résistance mécanique du béton tout en maintenant une bonne ouvrabilité.

La deuxième partie de ce travail porte sur l'étude des bétons fibrés fabriqués avec des granulats recyclés, en se fondant sur la formulation optimale obtenue dans la partie précédente. De plus, l'effet de la méthode de préparation des granulats recyclés sur les propriétés du béton frais et durci a été également évalué. En effet, deux méthodes de préparation des granulats recyclés ont été choisies, la méthode de saturation et la méthode de pré-humidification. Quant à leur valorisation dans le béton, trois taux de substitution massiques ont été étudiés, à savoir 30, 50 et 70 %. Pour toutes les formulations, les propriétés rhéologique et tribologique ainsi que les performances physiques et mécaniques ont été évaluées.

Les résultats obtenus dans cette partie montrent que la modalité de préparation des granulats recyclés influe significativement sur les propriétés du béton ; ainsi, les granulats saturés ne montrent pas d'effet sur les propriétés d'écoulement du béton mais ils diminuent sa résistance mécanique, contrairement aux granulats pré-humidifiés qui permettent de maintenir la résistance mécanique mais diminuent l'ouvrabilité et influent négativement sur la pompabilité du béton. En ce qui concerne la valorisation des granulats recyclés dans la formulation du béton fibré, il a été montré que leur introduction induit une diminution de la résistance mécanique aux jeunes âges. Par ailleurs, les performances mécaniques ont montré une grande sensibilité aux méthodes de préparation des granulats.

Mots clés : fibres organiques, granulats recyclés, rhéologie, tribologie, performances physiques, propriétés mécaniques.

Abstract

This work concerns the influence of organic fibers on concrete based on natural and recycled aggregates. The first part of this study focuses on the effect of fibers on concrete behavior in the fresh and hardened states. To achieve this objective, four concrete formulations (without fiber, without superplasticizer and based on natural aggregates), as well as 9 fiber-reinforced concretes without and with superplasticizer have been developed. The concrete formulations were characterized in the fresh state (workability, rheology and tribology) and the hardened state in terms of compressive strength, modulus of elasticity, porosity and permeability. The results showed that the introduction of organic fibers of 19mm at a dosage of 0.24% in combination with the admixture improves the mechanical strength of concrete and maintains a good workability.

The second part of this work deals with the study of fiber-reinforced concrete made with recycled aggregates. In addition, the effect of the recycled aggregate preparation method on the behavior of fresh and hardened concrete has been evaluated. In fact, two methods of preparing recycled aggregates were chosen : the saturation and the pre-humidification method. For recycled aggregates valorization, three substitution ratios (by weight) were selected : 30, 50 and 70%. For all materials, the properties in the fresh state, the physical and mechanical properties in the hardened state were studied.

The obtained results in this part show that the preparing method of the recycled aggregates influences significantly the properties of the concrete. In fact, the saturated aggregates do not show any effect on the workability, the rheology and the tribology of the concrete but reduces its mechanical resistance unlike the pre-saturated aggregates, which maintained a good mechanical strength but reduce workability and have a negative influence on the rheological and tribological behavior of concrete. In regards of the recycled aggregates influence, it has been shown that their introduction induces a reduction in mechanical resistance at early ages. Moreover, the mechanical performances were shown a great sensitivity to the modality of recycled aggregates preparation.

Keywords : organic fibers, recycled agregates, rheology, tribology, mechanical performance, physical properties.

ملخص

هذا البحث يسعى لتسليط الضوء على تأثير الألياف العضوية على الخرسانة المكونة من الركام الطبيعي والمعاد تدويره. يتناول الجزء الأول من هذا البحث دراسة تأثير الألياف على سلوك الخرسانة المكونة من الركام الطبيعي في الحالة المرنة والصلبة. لتحقيق هذا الهدف، تم تحظير أربع تركيبات معيارية للخرسانة (بدون ألياف, بدون الملدنات الممتازة ومكونة من الركام الطبيعي)، بالإضافة إلى 9 تركيبات خرسانية معززة بالألياف بدون ومع استعمال الملدنات. التركيبات الخرسانية التي تم تحضيرها في هذا الجزء، تم اختبارفعاليتها من حيث المرونة وتحرك الخليط (ريولوجيا) وكذلك في الحالة الصلبة من حيث المقاومة الميكانيكية للضغط والجر، معامل المرونة، المسامية والنفاذية. بينت الدراسة التجريبية أن إدخال ألياف عضوية بطول 19 مم بنسبة 0.24 % مع الخليط يحسن القوة الميكانيكية للخرسانة مع الحفاظ على مرونة جيدة.

الجزء الثاني من هذا العمل يتعلق بدراسة الخرسانة المسلحة بالألياف المصنوعة من الركام المعاد تدويره بناءً على الصيغة المثلى التي تم الحصول عليها في الجزء السابق. بالإضافة إلى ذلك، تم أيضًا تقييم تأثير طريقة تحضير الركام المعاد تدويره على سلوك الخرسانة المرنة والصلبة. في الواقع، تم اختيار طريقتين لتحضير الركام المعاد تدويره، طريقة التشبع بالماء وطريقة الترطيب المسبق. أما بالنسبة لتأثيرها في الخرسانة، فقد تمت دراسة ثلاث معدلات استبدال وزنية وهي 30, 50 و% 70 مع تقييم الخصائص في الحالة الرطبة وكذلك الأداء الفيزيائي والميكانيكي لجميع التركيبات.

بينت النتائج التي تم الحصول عليها في هذا الجزء أن طريقة تحضير الركام المعاد تدويره تؤثر بشكل كبير على خصائص الخرسانة، فالركام المشبع بالماء لا يظهر أي تأثير على المرونة، الانسيابية، وتريبولوجيا الخرسانة ولكنه يقلل من المقاومة الميكانيكية، على عكس الركام المرطب مسبقًا، الذي يحافظ على قوة ميكانيكية جيدة ولكنه يقلل من المرونة وله تأثير سلبي على السلوك الريولوجي والتريبولوجي للخرسانة. فيما يتعلق بتقييم الركام المعاد تدويره، فقد ثبت أن استعماله يؤدي إلى انخفاض المقاومة الميكانيكية على المدى القصير. اما على المدى الطويل، فتطور اداء هذه الأخيرة يتعلق بطريقة تحضير الركام.

الكلمات المفتاحية:

ألياف عضوية، ركام طبيعي، ركام معاد تدويره، ريولوجيا، تريبولوجيا، أداء ميكانيكي، خصائص فيزيائية.

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1. Différentes formes de fibres, droite , ondulée ou frisée [12]. 27

Figure 1.2. Passerelle des Anges fabriquée par un béton renforcé par des fibres d'acier [15].28

Figure 1.3. Stade Jean-Bouin réalisé avec un béton ultra-hautes performances, renforcé par des fibres d'aciers. 29

Figure 1.4. Fibres de verre [21]. 29

Figure 1.5. Centre culturel international de la jeunesse de Nanjing en Chine. 31

Figure 1.6. Différentes formes de fibre naturelle : (a) standard, (b) aggravée, (c) pâte [25]. . 32

Figure 1.7. Procédure de renforcement d'une poutre endommagée, poutre pré-endommagée (a), Injection de la résine (b), Poutre prête à être enveloppée (c), La poutre enveloppée par des bandes CFRP (d) [29]. 33

Figure 1.8. Fibres polypropylènes, (a) forme rectiligne, (b) forme torsadée. 35

Figure 1.9. Effet d'un mélange hybride de fibres sur la fissuration du béton, (a) phase 1, (b) phase 2 de chargement [41]. 36

Figure 1.10. Rôle des fibres lors de l'élargissement des fissures ; (a) ST-FRC, (b) PP-FRC et (c) FRC hybride [42]. 37

Figure 1.11. Résistance à la traction du béton renforcé par des fibres hybrides en polypropylène. 37

Figure 1.12. Schéma explicatif de l'orientation des fibres dans le cas d'un écoulement en surface libre (a) et en canal (b) [42]. 39

Figure 1.13. Deux méthodes proposées pour la mise en place d'UHPFRC[45]. 39

Figure 1.14. Méthodes de mise en place du béton, (a) mise en place d'un seul côté, (b) mise en place dans le centre, (c) méthode proposée par EN-14651[46], [47]. 40

Figure 1.15. Comparaison de courbes de rupture des mélanges VCC6-60 et SCC6-60, CMOD (a), la flèche (b) [46]. 40

Figure 1.16. Dispersion des fibres selon le modèle Dupont et Vandewalle (a), les résultats expérimentaux (b) et un modèle d'adaptation pour PFRC (c) [46]..... 41

Figure 1.17. Évolution de la densité en fonction de la nature et du dosage en fibres métalliques, fibres propylènes et fibres de verre [50]..... 42

Figure 1.18. Évolution de l'étalement en fonction du dosage en fibres [51]..... 43

Figure 1.19. Évolution de l'étalement (a), capacité de remplissage (b) et temps d'écoulement (c) en fonction du pourcentage de fibres [5]. 43

Figure 1.20. Schéma explicatif du processus de défloculation des grains de ciment par un cisaillement plus élevé [54]..... 45

Figure 1.21. Évolution de l'absorption d'eau et de la porosité d'un béton renforcé par des fibres hybrides [13]. 46

Figure 1.22. Évolution de l'épaisseur de pénétration d'eau dans le béton renforcé par des fibres polypropylènes [53]..... 46

Figure 1.23. Charge passée par les fibres avec les tests RCPT (à l'âge de 28 jours) [53]..... 47

Figure 1.24. Apparition de fissures dues au retrait plastique sur la surface d'une dalle en béton [64]. 48

Figure 1.25. Taux de contraction du retrait en fonction du dosage en fibres et du temps [59]. 49

Figure 1.26. Effet du dosage en fibres sur la surface (a) et sur la longueur de la fissuration (b) ainsi que l'évolution de la fissuration pour un échantillon (sans fibre (1), avec 0,1 % de fibre (2) et 0,2 % de fibre (3)) (c) [63]..... 50

Figure 1.27. L'effet des fibres polypropylènes sur la résistance du béton léger à la compression [3]. 51

Figure 1.28. L'effet des fibres PP naturelles et recyclées sur la résistance du béton à la compression [67]. 51

Figure 1.29. Évolution de la résistance à la compression d'un béton géopolymère fibré [6]. 52

Figure 1.30. L'effet des fibres de hautes performances sur la résistance du béton léger à la traction [3]. 54

Figure 1.31. Évolution de la résistance du béton autoplaçant à la traction en fonction du dosage volumique en fibres [5]. 54

Figure 1.32. Évolution de la résistance du béton fibré à la flexion en fonction du pourcentage de fibres [5]. 54

Figure 1.33. Exemple d'une fibre métallique TOREX [74]. 56

Figure 1.34. Différents types et formes de fibres utilisés [77]. 57

Figure 1.35. Fibre polypropylène de deux formes, mono-filament, multi-filament [43]. 58

Figure 1.36. Image obtenue par la technique des rayons X pour déterminer l'orientation et la dispersion des fibres dans un béton autoplaçant [82]. 60

Figure 1.37. Synthèse de l'examen électrique et visuel de la dispersion des fibres selon les deux méthodes de coulage [83]. 60

Figure 1.38. Orientation des fibres dans un Carpobole avec différents seuils de cisaillement (a) τ_0 = 25 Pa, (b) τ_0 = 70 Pa dans le cas d'un écoulement en canal [44]. 61

Figure 1.39. Orientation des fibres dans un Carpobole avec différents seuils de cisaillement (a) τ_0 = 25 Pa, (b) τ_0 = 70 Pa dans le cas d'un écoulement en surface libre [44]. 62

Figure 1.40. La capacité d'absorption d'eau des GR en fonction du mortier attaché [86]. 63

Figure 1.41. Évolution du coefficient LA en fonction de la quantité de vieux mortier attaché [86]. 64

Figure 1.42. Évolution de l'affaissement en fonction du taux de substitution des GR [92]. ... 66

Figure 1.43. Évolution, au cours du temps, de l'affaissement du béton à base de gravier recyclé [93] 66

Figure 1.44. Évolution de l'affaissement, du seuil de cisaillement et de la viscosité plastique en fonction du taux de GR [100]..... 67

Figure 1.45. Influence du taux de substitution des GR sur la porosité du béton [85]. 69

Figure 1.46. Évolution de la perméabilité en fonction du rapport E/C pour des mélanges de béton fabriqués avec plusieurs substitutions des GR à 28jours (a), 180 jours (b) et 365 jours (c) [104]. 70

Figure 1.47. Évolution de la résistance à la compression du béton fabriqué avec du sable recyclé (à droite) et des gravillons recyclés (à gauche) [107]. 70

Figure 1.48. Évolution du module d'élasticité en fonction du pourcentage de granulats recyclés [111]. 71

Figure 1.49. Évolution de la résistance à la compression à 7 j et 28 j pour un béton fibré naturel (NAC) et recyclé (RAC) [8] 73

Figure 1.50. Évolution de la résistance à la compression en fonction de la substitution des GR pour un béton non fibré (série A), avec 0,5 % de fibres (série B) et 1 % de fibres (Série C) [7]. 73

Figure 1.51. Évolution de la résistance à la traction (a) et à la flexion (b) des bétons naturels (NAC) et recyclés (RAC) [8]. 74

Figure 1.52. Image MEB du béton fibré fabriqué avec des granulats recyclés [8]. 74

Figure 2.1. Analyse chimique et microstructurale du ciment utilisé. 79

Figure 2.2. Image de l’analyse morphologique des grains de sable. 81

Figure 2.3. Spectre de l’analyse chimique du sable naturel. 82

Figure 2.4. Courbe granulométrique des granulats utilisés. 83

Figure 2.5. Analyse chimique d'un gravillon recyclé. 84

Figure 2.6. Les fibres en polypropylène utilisées (19, 30 et 54mm). 84

Figure 2.7. Image MEB des fibres utilisées (a) PPF de forme torsadée fibrillée, (b) PPF de forme rectiligne. 85

Figure 2.8. Schéma explicatif de la procédure de l'essai d'affaissement [113]. 87

Figure 2.9. Aéromètre de béton. 88

Figure 2.10. Rhéomètre utilisé [122]..... 89

Figure 2.11. Profil de vitesse de rotation [122]. 91

Figure 2.12. Schéma du cisaillement du béton dans le récipient. 91

Figure 2.13. Les éléments essentiels du tribomètre [124]. 93

Figure 2.14. Tribomètre utilisé (a), profil de vitesse de rotation (b) [123]. 93

Figure 2.15. Modèle de prévision de la pression de pompage par Kaplan [125]. 95

Figure 2.16. Mode opératoire de l'essai tribologique. 97

Figure 2.17. Dispositif pour l'essai de compression. 99

Figure 2.18. Emplacement de l'éprouvette dans la presse (a), Éprouvette après rupture (b). . 99

Figure 2.19. Emplacement de l'éprouvette dans le bâti (a), Eprouvette après rupture (b). ... 100

Figure 2.20. Appareillage pour l'essai du module d'élasticité (a), emplacement de l'éprouvette dans la couronne entre les deux plateaux de la presse (b). 101

Figure 2.21. Préparation des échantillons pour l'essai de porosité. 102

Figure 2.22. Dispositif expérimental de l'essai de porosité à l'eau(a), pesée hydrostatique (b). 103

Figure 2.23. Préparation des échantillons pour l'essai de perméabilité au gaz. 103

Figure 2.24. Dispositif de l'essai de perméabilité. 104

Figure 2.25. Perméabilité apparente en fonction de l'inverse de la pression moyenne [132]. 105

Figure 2.26. Préparation des échantillons pour les analyses microstructurales : (a) échantillons caractérisés sans imprégnation de résine, (b) échantillon imprégné de résine, (c) métallisation des échantillons. 106

Figure 2.27. Équipement de test de l'analyse microstructurale (a) et polisseuse utilisée (b). 107

Figure 2.28. Programme expérimental. 109

Figure 3.1. Protocole de malaxage du béton sans et avec fibres. 116

Figure 3.2. Évolution de l'affaissement des bétons en fonction du volume de pâte. 117

Figure 3.3. Évolution du seuil de cisaillement (a) et de la viscosité plastique (b) en fonction du volume de pâte. 119

Figure 3.4. Évolution du seuil d'interface (a) et de la constante visqueuse (b) en fonction du volume de pâte. 120

Figure 3.5. Mouvement du béton dans le tribomètre au moment de l'essai (a) et dans le tuyau lors au moment du pompage (b) 120

Figure 3.6. Évolution de l'affaissement des BF en fonction du dosage en FPP. 123

Figure 3.7. Évolution du seuil de cisaillement (a) et de la viscosité plastique (b) en fonction du dosage en fibres. 125

Figure 3.8. Évolution du seuil d'interface (a) et de la constante visqueuse (b) en fonction du dosage en fibre des BF. 126

Figure 3.9. Concentration des PPF de 54mm autour de la pale au moment de l'essai. 126

Figure 3.10. Les résultats de l'affaissement des bétons fibrés avec adjuvant. 128

Figure 3.11. Évolution du seuil de cisaillement(a) et de la viscosité plastique(b) de BFL19 avec et sans adj. 130

Figure 3.12. Évolution du seuil de cisaillement (a) et de la viscosité plastique (b) de BFL30 avec et sans adj. 131

Figure 3.13. Évolution du seuil de cisaillement (a) et de la viscosité plastique (b) de BFL54 avec et sans adj 131

Figure 3.14. Évolution du seuil d'interface(a) et de la constante visqueuse (b) de BFL19 avec et sans adj. 133

Figure 3.15. Évolution du seuil d'interface(a) et de la constante visqueuse (b) de BFL30 avec et sans adj. 133

Figure 3.16. Évolution du seuil d'interface(a) et de la constante visqueuse (b) de BFL54 avec et sans adj. 133

Figure 3.17. Diagramme de l'action de PCE sur le comportement d'absorption des particules de ciment et de dispersion de PPF dans une pâte cimentaire [54]. 134

Figure 3.18. Les résultats du seuil de cisaillement (a) et de la viscosité plastique (b) des BFL19/30$_{sp}$ à 0,12 % de fibres. 136

Figure 3.19. Les résultats du seuil d'interface (a) et de la constante visqueuse (b) des BFL19/30sp. 137

Figure 3.20. Résultats de la masse volumique apparente (a) et de la porosité des BF_{sp}. 139

Figure 3.21. Image MEB de la zone d'interface pâte/fibre. 140

Figure 3.22. Évolution de la perméabilité apparente des BFL19 avec 0,12 % (a) ; 0,24 % (b) et 0,36 % de FPP. 141

Figure 3.23. Évolution de la perméabilité intrinsèque à 90 j des BF_{sp}. 142

Figure 3.24. Image illustrative de l'écrasement d'une éprouvette fabriquée par un béton fibré. 144

Figure 3.25. Évolution de la résistance à la compression vis-à-vis du dosage en mono-fibres de différentes longueurs (a) ; évolution de la résistance à la compression vis-à-vis des proportions de PPF19/PPF30 pour un dosage en multifibres de 0,12 % (b). 145

Figure 3.26. Évolution de la résistance à la traction vis-à-vis du dosage en mono-fibres de différentes longueurs (a) ; évolution de la résistance à la traction vis-à-vis des proportions de PPF19/PPF30 pour un dosage en multifibres de 0,12 % (b). 146

Figure 3.27. Formation d'un fuseau de fibres dans le béton renforcé avec un dosage élevé en fibres. 147

Figure 3.28. Image d'une éprouvette de béton témoin (a) et fibré (b) –(c) après essai d'écrasement par fendage. 147

Figure 3.29. Évolution du module d'élasticité vis-à-vis du dosage en mono-fibres de différentes longueurs (a) et des proportions de PPF19/PPF30 pour un dosage en multifibres de 0,12 % (b). 149

Figure 3.30. Relation entre $fctm$ et fcm. 151

Figure 3.31. Relation entre$fctm$ et E_c. 154

Figure 4.1. Protocole de malaxage pour la méthode de saturation des GR. 160

Figure 4.2. Séquence de malaxage donnée par la méthode normale (i) et celle proposée par la méthode en deux étapes (ii) [151]. 160

Figure 4.3. Méthode de malaxage par la méthode de pré-saturation [108]. 161

Figure 4.4. Dispositif utilisé pour effectuer l'essai de vitesse d'absorption des GR. 163

Figure 4.5. Vitesse d'absorption des GR en fonction du temps. 163

Figure 4.6. Évolution de la masse volumique (a) et de la teneur en air occlus (b) en fonction du taux de gravillons recyclés pour les deux méthodes de préparation, M1 et M2. 165

Figure 4.7. Variation d'affaissement en fonction du taux de gravillons recyclés pour les deux méthodes. 166

Figure 4.8. Schéma explicatif de la différence de quantité d'eau dans les bétons fabriqués par les deux méthodes. 168

Figure 4.9. Évolution du seuil de cisaillement (a) et de la viscosité plastique (b) des bétons formulés avec M1 et M2 en fonction du taux de gravillons recyclés. 169

Figure 4.10. Évolution du seuil d'interface (a) et de la constante visqueuse (b) des bétons formulés avec M1 et M2 en fonction du taux de gravillons recyclés. 171

Figure 4.11. Résultats de la masse volumique apparente (a) et de la porosité des bétons recyclés. 172

Figure 4.12. Évolution de la perméabilité intrinsèque à 90 j des bétons recyclés. 173

Figure 4.13. Évolution de la résistance à la compression des bétons de la méthode de saturation (a) et de la méthode de pré-humidification (b) en fonction du temps. 174

Figure 4.14. Évolution de la résistance à la traction des bétons de granulats recyclés saturés (a) et pré-humidifiés (b) en fct du taux de substitution des GR. 175

Figure 4.15. Module d'élasticité statique des bétons de granulats recyclés saturés et pré-humidifiés en fonction du taux de substitution des GR. 176

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1. Composition chimique et minéralogique de CEM I 52,5 N. 80

Tableau 2.2. Granulats naturels et recyclés. 81

Tableau 2.3. Caractéristiques des gravillons utilisés. 82

Tableau 2.4. Caractéristiques des fibres utilisées. 85

Tableau 2.5. Caractéristiques du superplastifiant TEMPO12. 86

Tableau 2.6. Spécification des classes de consistance [119]. 87

Tableau 3.1. Formulations imbibées des bétons étudiés dans différentes séries. 115

Tableau 3.2. Formulation des bétons et leurs résultats rhéologiques. 117

Tableau 3.3. Résultats de la masse volumique et de la teneur en air des bétons testés. 118

Tableau 3.4. Formulation du béton de témoin « B3 ». 121

Tableau 3.5. Formulation des bétons fibrés (BF) et leurs résultats rhéologiques et tribologiques. 122

Tableau 3.6. Résultats de la masse volumique et de la teneur en air des BF testés. 124

Tableau 3.7. Formulation des bétons fibrés adjuvantés (BFLA) et leur résultat rhéologique et tribologique. 127

Tableau 3.8. Résultats de la masse volumique et de la teneur en air occlus des BF avec adjuvant. 129

Tableau 3.9. Les résultats d'affaissement, de masse volumique et d'air occlus des BFPP19/30. 135

Tableau 3.10. Modèles de prédiction de la résistance à la traction par fendage et résultats obtenus. 152

Tableau 3.11. Modèles de prédiction du module d'élasticité en fonction de la résistance à la compression et résultats obtenus. 153

Tableau 4.1. Formulations des bétons à base de granulats recyclés. 164

TABLE DES MATIERES

RESUME **1**

INTRODUCTION GENERALE **20**

1. CHAPITRE 1 Synthèse bibliographique **23**

1.1. Objectif 26

1.2. Généralité sur les bétons fibrés 26

1.3. Types de fibres 27

1.3.1. Fibres d'acier 27

1.3.2. Fibre de verre 29

1.3.3. Fibre naturelle 31

1.3.4. Fibres synthétiques 32

1.3.5. Fibres hybrides 35

1.4. Mise en place du béton fibré 38

1.5. Comportement du béton renforcé par des fibres polypropylènes 41

1.5.1. Propriétés à l'état frais 41

1.5.2. Propriétés à l'état durci 45

1.5.3. Effet de la géométrie et le dosage en fibres 55

1.5.4. Effet de la dispersion et de l'orientation de la fibre 59

1.6. Béton à base de granulats recyclés 62

1.7. Impacts du remplacement des granulats naturels par des granulats recyclés 65

1.7.1. Propriétés à l'état frais 65

1.7.2. Propriétés à l'état durci 68

1.8. Propriétés du béton fibré à base de granulats recyclés 72

1.9. Conclusions et objectifs 75

2. CHAPITRE 2 Matériaux et méthodologie expérimentale 77

2.1. Objectif 79

2.2. Caractéristiques des matériaux utilisés 79

2.2.1. Le ciment 79

2.2.2. Les granulats 80

2.2.3. Les fibres polypropylènes 84

2.2.4. L'adjuvant 85

2.2.5. L'eau de gâchage 86

2.3. Méthode de caractérisation du béton 86

2.3.1. Essais de caractérisation à l'état frais 86

2.3.2. Essais de caractérisation à l'état durci 98

2.4. Méthodologie expérimentale 107

3. CHAPITRE 3 Étude de l'influence des fibres polypropylènes sur un béton fluide à base de granulats naturels 110

3.1. Objectif 113

3.2. Programme expérimental 113

3.3. Procédure de formulation du béton 116

3.4. Résultats et discussion 116

3.4.1. Série 1 : Choix de la formulation du béton témoin 116

3.4.2. Série 2 : Étude de l'effet des fibres polypropylènes « FPP » sur les propriétés du béton frais 121

3.4.3. Série 3 : Étude de l'effet de superplastifiant sur les propriétés du béton frais 127

3.4.3.1. Effet de l'adjuvant sur l'ouvrabilité du béton 127

3.4.3.2. Effet de l'incorporation de l'adjuvant sur la masse volumique et sur l'air occlus du béton frais 128

3.4.3.3. Effet de l'adjuvant sur le comportement rhéologique 129

3.4.3.4. Effet de l'adjuvant sur le comportement tribologique 131

3.4.4. Série 4 : Étude de l'effet de la longueur mixte des fibres dans le même béton 134

3.4.4.1. Effet de la longueur mixte des FPP sur l'affaissement, la masse volumique et l'air occlus 135

3.4.4.2. Effet de la longueur mixte des FPP sur les propriétés rhéologiques 135

3.4.4.3. Effet de la longueur mixte des FPP sur les propriétés tribologiques 136

3.4.5. Étude de l'effet des fibres et de l'adjuvant sur les propriétés physiques/mécaniques du béton 138

3.4.5.1. Porosité et masse volumique apparente 138

3.4.5.2. Perméabilité 140

3.4.5.3. Résistance à la compression 142

3.4.5.4. Résistance à la traction par fendage 145

3.4.5.5. Module d'élasticité 148

3.4.5.6. Vérification de l'application des modèles prédictifs des propriétés mécaniques des bétons fibrés 149

3.5. Conclusion 154

4. **CHAPITRE 4 Étude de l'effet des granulats recyclés sur le comportement du béton aux états frais et durci 156**

4.1. Objectif 159

4.2. Étude des méthodes de formulation 159

4.2.1. Méthode de saturation des granulats recyclés 159

4.2.2. Méthode de mélange en deux étapes 160

4.2.3. Méthode de la pré-humidification et de la compensation d'eau 161

4.2.4. Méthodes utilisées dans nos travaux de recherche 161

4.3. Préparation des granulats recyclés pour les deux méthodes 161

4.4. Formulation des bétons à base des GR 163

4.5. Propriétés des bétons fibrés aux granulats recyclés à l'état frais 164

4.5.1. Effet de substitution des granulats recyclés sur la masse volumique et l'air occlus 164

4.5.2. Effet de substitution des granulats recyclés sur les propriétés rhéologiques ... 168

4.5.3. Effet de substitution des granulats recyclés sur les propriétés tribologiques ... 169

4.6. Propriétés physiques et mécaniques des bétons à base de granulats recyclés 171

4.6.1. Porosité et masse volumique apparente 171

4.6.2. Perméabilité 172

4.6.3. Résistance à la compression 173

4.6.4. Résistance à la traction par fendage 174

4.6.5. Module d'élasticité 175

4.7. Conclusion 176

5. Conclusion générale et perspectives 179

6. Références 183

INTRODUCTION GENERALE

Au cours des années, de nombreux progrès ont été apportés aux matériaux cimentaires utilisés dans le domaine de la construction. Ces progrès consistent essentiellement en la modification de la formulation de ces matériaux par l'ajout d'additifs ou le remplacement de leurs constituants principaux par des matériaux alternatifs. Le choix du type de modification dépend principalement des performances recherchées, tout en assurant l'obtention d'un béton économique et écologique. Dans ce contexte, le recyclage des déchets issus du secteur de la construction sous forme de granulats pour la fabrication de nouveaux bétons a été proposé afin de réduire l'impact environnemental de la production des granulats naturels et de limiter l'approvisionnement des ressources naturelles non renouvelables.

Des travaux de recherche antérieurs ont étudié la possibilité de remplacer les granulats naturels par des granulats recyclés, où il a été démontré qu'avec de faibles taux de remplacement (inférieurs à 30 %), le béton recyclé possède des performances comparables à celles du béton naturel. Néanmoins, l'incorporation des granulats recyclés à fort dosage induit une dégradation des propriétés mécaniques et physico-chimiques, telle que la diminution des résistances mécaniques, l'augmentation de la porosité et l'aggravation du phénomène de retrait. Cette dégradation nécessite souvent une augmentation du dosage en ciment afin d'assurer au béton recyclé de bonnes caractéristiques à l'état durci, ce qui alourdit le bilan carbone du béton fabriqué. Pour répondre à ce problème, le renforcement des bétons recyclés par des fibres polypropylènes, en maintenant constant le dosage en ciment, a été envisagé pour ce travail de thèse.

Dans le cas des bétons ordinaires, de nombreux travaux de recherche ont été menés sur leur performance mécanique avec l'introduction des fibres polypropylènes. En revanche, la majorité des résultats publiés sur les propriétés des bétons fibrés à l'état frais concernent uniquement l'évaluation de l'ouvrabilité à l'aide de l'essai d'affaissement au cône d'Abrams, en ignorant souvent leurs propriétés rhéologiques et tribologiques. Étant donné que les bétons de même affaissement peuvent avoir des propriétés rhéologiques et tribologiques différentes, il est primordial de caractériser ces propriétés vu qu'elles jouent un rôle clé dans le pompage et la mise en place des bétons. Par ailleurs, très peu d'études ont été consacrées à l'effet de la longueur, de la forme et du dosage en fibres sur les performances des bétons recyclés aux états frais et durci.

À ces verrous scientifiques s'ajoutent les problématiques des modalités adéquates de l'introduction des granulats recyclés et du mode de malaxage des bétons recyclés. En effet, plusieurs méthodes de préparation des granulats recyclés et de leur mise en place dans le béton ont été proposées dans la littérature afin de limiter leurs effets indésirables sur les performances du béton. Certaines recherches ont suggéré l'utilisation de granulats recyclés à l'état saturé pour maintenir une bonne ouvrabilité du béton, tandis que d'autres études ont montré que cette méthode affecte négativement les propriétés mécaniques du béton, notamment sa résistance mécanique. De ce fait, l'évaluation des différentes modalités proposées dans la littérature permettra de mieux comprendre le comportement des bétons recyclés et de bien maîtriser l'ajout des granulats recyclés dans le béton.

Les travaux de recherche effectués dans le cadre de cette thèse ont comme objectif principal l'étude de l'influence des fibres polypropylènes sur les performances des bétons recyclés aux états frais et durci. À travers cette thèse, nous visons également à étudier l'influence de la méthode d'incorporation des granulats recyclés sur les propriétés du béton. Afin de répondre à ces objectifs, un plan expérimental a été élaboré dont les détails et les résultats obtenus sont présentés dans ce manuscrit en quatre chapitres.

Le premier chapitre est une synthèse bibliographique des études antérieures menées sur les caractéristiques et l'application des bétons fibrés dans le domaine de construction. Dans un premier temps, les différents types de fibres utilisés dans la littérature sont exposés, avec le détail de leurs avantages et de leurs inconvénients. Ensuite est présentée l'influence du dosage, de la forme et de la longueur des fibres sur les propriétés du béton frais et durci. Enfin, une partie est dédiée à l'étude de l'incorporation des granulats recyclés dans le béton avec et sans fibres.

Le deuxième chapitre est consacré à la présentation du programme expérimental suivi durant ce travail. Les matériaux et les méthodes de caractérisation utilisés sont également présentés ainsi que les principes de formulation et les techniques d'analyse.

Le troisième chapitre comporte quatre phases principales faisant l'objet de la première partie expérimentale du présent travail qui concerne l'étude de l'effet des fibres polypropylènes sur les propriétés du béton aux états frais et durci. En premier lieu, l'optimisation du béton témoin (naturel et sans fibre) est effectuée afin de fixer une formulation optimale vis-à-vis des

propriétés rhéologiques et tribologiques. Cette dernière est ensuite étudiée à l'état frais dans une deuxième série de formulations en introduisant différents dosages, longueurs et formes de fibre. L'effet d'adjuvant est mis en évidence dans la troisième série en l'incorporant dans les formulations précédentes. Finalement, la quatrième série présente les propriétés de ces formulations à l'état durci.

Le dernier chapitre de ce manuscrit expose d'abord les principales méthodes de préparation des granulats recyclés et leur utilisation dans le béton ; ensuite est effectuée une comparaison des propriétés aux états frais et durci des bétons fabriqués par deux méthodes différentes. Les bétons réalisés dans cette campagne expérimentale ont été testés à l'état frais vis-à-vis de l'affaissement, la rhéologie et la tribologie, ainsi qu'à l'état durci, en déterminant leurs propriétés physiques et mécaniques telles que la porosité, la perméabilité, la résistance mécanique et le module d'élasticité.

Le manuscrit est clôturé par une conclusion générale synthétisant les résultats principaux obtenus dans le présent travail et des perspectives envisagées pour les travaux futurs.

CHAPITRE 1

Synthèse bibliographique

1. CHAPITRE 1 Synthèse bibliographique 23

1.1. Objectif 26

1.2. Généralité sur les bétons fibrés 26

1.3. Types de fibres 27

1.3.1. Fibres d'acier 27

1.3.2. Fibre de verre 29

1.3.3. Fibre naturelle 31

1.3.4. Fibres synthétiques 32

1.3.5. Fibres hybrides 35

1.4. Mise en place du béton fibré 38

1.5. Comportement du béton renforcé par des fibres polypropylènes 41

1.5.1. Propriétés à l'état frais 41

1.5.2. Propriétés à l'état durci 45

1.5.3. Effet de la géométrie et le dosage en fibres 55

1.5.4. Effet de la dispersion et de l'orientation de la fibre 59

1.6. Béton à base de granulats recyclés 62

1.7. Impacts du remplacement des granulats naturels par des granulats recyclés 65

1.7.1. Propriétés à l'état frais 65

1.7.2. Propriétés à l'état durci 68

1.8. Propriétés du béton fibré à base de granulats recyclés 72

1.9. Conclusions et objectifs 75

1.1. Objectif

Cette synthèse bibliographique consiste à présenter un état de l'art sur les bétons fibrés. La première partie est consacrée à la définition des bétons fibrés et de leurs différents types, à leurs caractéristiques ainsi qu'à leurs domaines d'application ainsi qu'à une mise en évidence de leurs avantages et de leurs inconvénients. La deuxième partie consiste à présenter les différents résultats de la littérature concernant les propriétés du béton fibré aux états frais et durci. Une synthèse des travaux réalisés sur l'effet d'incorporation de granulats recyclés sur les propriétés rhéologique et mécanique des bétons fait l'objet de la troisième partie qui contient également le détail de leurs caractéristiques mécaniques, physiques et chimiques. Finalement, un bilan global des conclusions tirées de cette étude est présenté avec une discussion concernant les différents axes sur lesquels nous devrons nous concentrer durant cette thèse.

1.2. Généralité sur les bétons fibrés

Le béton fibré est défini par *l'ACI 116R* comme étant un béton contenant des fibres dispersées à orientation aléatoire. Ce type de béton a été développé pour la première fois en 1960 par *Romualdi, Batson et Mandel* qui ont attiré l'attention des chercheurs du monde entier en publiant leur premier article sur le béton de fibre [1]. Depuis la publication de cet article, plusieurs études ont été consacrées au développement et à la caractérisation des bétons fibrés.

Les fibres qui peuvent être associées au béton sont de différentes natures ; il peut s'agir de fibres métalliques, organiques, de cellulose, etc. Parmi ces différents types, les fibres métalliques sont les plus couramment utilisées pour le renforcement des bétons. Quant aux autres types de fibres, telles que les fibres carbone, celles de verre et les fibres polypropylène, elles sont généralement utilisées pour les applications de réparation, d'isolation et d'amélioration des performances physiques des bétons [2]. Les bétons fibrés présentent différentes performances aux états frais et durci, tout dépend des paramètres de formulation ainsi que du type, de la géométrie, de la longueur et de la concentration des fibres. Le dosage de ces dernières dans un béton fibré est généralement compris entre 1 et 3 % du volume de béton [2].

Plusieurs types de bétons fibrés ont été étudiés dans la littérature, tels que les bétons légers, les bétons autoplaçants (BAP), les bétons ultraperformants (BHP), les bétons géopolymères et les bétons à base de granulats recyclés [3][4]. [5]. [6][7], [8].

1.3. Types de fibres

Le choix de la nature des fibres utilisées dans un béton dépend essentiellement des performances recherchées. Nous distinguons principalement cinq types de fibres :

1.3.1. Fibres d'acier

Les fibres métalliques sont les plus couramment utilisées pour les bétons structuraux et non structuraux. En effet, il a été rapporté que l'ajout de fibres d'acier dans le béton avec une concentration volumique de 1 à 1,5 % permet ~~à~~ d'améliorer sa résistance en compression, en traction et en flexion, respectivement de 10 à 25 %, jusqu'à 100 % et de 150 à 200 % [9].

Lorsqu'elles sont utilisées en quantité suffisante, les fibres permettent une répartition homogène des contraintes dans le béton et empêchent la rupture diagonale de traction dans les poutres en béton armé [10] [11].

Le choix de la forme géométrique des fibres métalliques est un facteur clé qui dépend des besoins techniques. En effet, les fibres les plus résistantes à l'arrachement possèdent une forme frisée ou ondulée (Figure 1.1) où l'ancrage est amélioré grâce à l'élargissement des extrémités. En comparaison avec les fibres de forme droite, les fibres frisées ou ondulées sont plus efficaces pour optimiser la ductilité et la résistance mécanique des bétons. Par conséquent, pour atteindre une même ductilité, le dosage nécessaire en fibres ondulées ou frisées est plus faible que celui en fibres droites [11].



Figure 1.1. Différentes formes de fibres, droite , ondulée ou frisée [12].

Grâce à l'amélioration considérable des performances mécaniques apportée par l'introduction de fibres d'acier dans le béton, il a été proposé de remplacer les barres d'acier des bétons armés par des fibres métalliques [13].

Les bétons renforcés par des fibres d'acier ont été utilisés dans différents projets allant des petits éléments, tels que les tuyaux d'égout, jusqu'aux structures de grande échelle, telles que les grands bâtiments industriels et les ouvrages d'art [14]. Parmi ces structures, nous pouvons citer:

- **La passerelle des Anges**



Figure 1.2. Passerelle des Anges fabriquée par un béton renforcé par des fibres d'acier [15].

La passerelle piétonne du pont du Diable, nommée passerelle des Anges (Figure 1.2), située à la sortie des gorges de l'Hérault, grand site classé au patrimoine de l'UNESCO en France, est un chef-d'œuvre architectural construit en béton ultraperformant renforcé par des fibres d'aciers [15].

- **Le stade Jean-Bouin**

Le stade Jean-Bouin (Figure 1.3), implanté dans le 16^{e} arrondissement parisien en France, a été construit par l'architecte *Rudy Ricciotti.* Ce stade est habillé d'une enveloppe alvéolaire à double courbure en résille de béton ultra-hautes performances, renforcé par des fibres métalliques. Cette enveloppe est supportée par une imposante charpente métallique constituée de 3 545 panneaux de forme triangulaire.



Figure 1.3. Stade Jean-Bouin réalisé avec un béton ultra-hautes performances, renforcé par des fibres d'aciers.

Malgré les nombreux avantages des fibres d'acier, ces dernières présentent cependant certains inconvénients. En effet, l'introduction de fibres métalliques dans le béton conduit à une perte importante d'ouvrabilité [16] [17] et à une augmentation du poids propre de l'élément réalisé à cause de leur densité très élevée [18]. De plus, les bétons renforcés par les fibres d'acier nécessitent plus de temps de malaxage et de mise en place que les bétons ordinaires [19].

1.3.2. Fibre de verre

L'utilisation de fibres de verre (Figure 1.4) dans le béton a montré une amélioration des caractéristiques mécaniques des bétons comme la limitation du taux de fissuration et l'augmentation de la résistance en traction et en flexion. Cependant, les fibres en verre destinées à la fabrication des bétons doivent contenir un minimum de 16 % de zircone afin d'assurer une résistance aux alcalis [20].



Figure 1.4. Fibres de verre [21].

En termes de formulation, les bétons renforcés par des fibres de verre présentent des caractéristiques différentes de celles des bétons renforcés par les autres types de fibres. D'une part, la concentration des fibres dans les bétons renforcés par des fibres de verre est plus élevée en comparaison avec les autres types de béton fibré. En général, les fibres de verre sont introduites à un dosage relativement élevé contrairement aux autres types de bétons fibrés. D'autre part, la formulation du béton de fibre de verre diffère de celle des autres bétons fibrés par son dosage en ciment très élevé et par l'absence de gravillons de grand diamètre [20].

Quant à l'influence des fibres de verre dans le béton, il a été rapporté par *Sheril* que l'introduction de 0,05 %, 0,1 %, 0,15 % et 0,2 % de fibre de verre dans un béton autoplaçant conduit à une augmentation de résistance à la compression, respectivement, de 8,2 %, 9,2 %, 7,02 % et 3,5 % par rapport au BAP sans fibre, ainsi qu'une amélioration de la résistance à la traction par fendage, respectivement, de 5,1 %, 7,1 %, 5 % et 2,3 % respectivement [22]. *Vidhya et al.* ont également montré que l'utilisation de fibres de verre dans un BAP à base de 12 % de fumé de silice et de 0,5 % de fibre de verre augmente la résistance en compression et en traction par fendage, respectivement, de 2,15 % et de 16 % par rapport au BAP sans fibre [23]. D'ailleurs, plusieurs projets ont été réalisés par des bétons renforcés par des fibres de verre dans différents domaines de construction tels que la rénovation de bâtiments, des travaux d'eau et de drainage, le revêtement de ponts et de tunnels, mais aussi pour des usages acoustiques. Parmi ces projets, nous distinguons :

- **Le Centre culturel international de la jeunesse de Nanjing en Chine**

  Le Centre culturel international de la jeunesse de Nanjing (Figure 1.5) est un projet polyvalent qui a été construit en 2015 à Nankin, en Chine, par l'architecte *Zaha HADID*. L'immeuble est un ensemble de deux gratte-ciels de 314 et 255 mètres, comprenant des salles de conférences, des bureaux et des hôtels. La façade du centre des salles de conférences et des tours est constituée de panneaux de murs rideaux en verre construits avec un béton renforcé par des fibres de verre et des panneaux d'aluminium perforés. Jusqu'à 12 700 formes différentes de panneaux ont été utilisées dans la réalisation de la façade [24].



Figure 1.5. Centre culturel international de la jeunesse de Nanjing en Chine.

Bien que les fibres de verre améliorent les propriétés mécaniques des bétons, leur utilisation limitée est due essentiellement à leur coût relativement élevé et à leur forte sensibilité à l'endommagement lors du malaxage du béton. En effet, le mouvement des agrégats dans le béton induit une perte de résistance des fibres de verre sous l'abrasion et les forces d'impact générées au moment du malaxage.

1.3.3. Fibre naturelle

Durant ces dernières années, les problèmes liés à l'environnement ont motivé les chercheurs dans le domaine de la construction pour trouver des matériaux de construction écologiques. Dans ce contexte, et grâce à leurs caractéristiques physiques et mécaniques ainsi qu'à leurs avantages environnementaux, les fibres issues des sources végétales ont été proposées pour remplacer partiellement, voire entièrement, les fibres synthétiques. Les fibres naturelles (Figure 1.6) sont destinées à être utilisées dans des matériaux cimentaires pour des applications non structurelles telles que la production des éléments minces, les cloisons, les plafonds et les toitures en tuiles [25]. Il a été rapporté que les fibres naturelles, notamment les fibres de cellulose, permettent, d'une part, une amélioration de l'isolation du matériau cimentaire auquel elles sont associées [26]. D'autre part, il a été démontré que les fibres comblent les fissurations de la matrice et transfèrent la charge dans le béton d'une manière plus homogène, ce qui limite la propagation des fissures [27].



Figure 1.6. Différentes formes de fibre naturelle : (a) standard, (b) aggravée, (c) pâte [25].

1.3.4. Fibres synthétiques

Les fibres synthétiques sont des fibres à base de polymères, développées dans l'industrie de la pétrochimie et des textiles. En général, les fibres synthétiques sont introduites dans le béton pour limiter le retrait et la fissuration, mais elles sont également utilisées pour améliorer la ductilité. Une grande variété de fibres synthétiques existe sur le marché. Parmi les fibres synthétiques les plus couramment employées dans la formulation des bétons, nous citons :

- Fibres de carbone

Les fibres de carbone ont été souvent utilisées dans les travaux de réparation comme moyen efficace de renforcement grâce à leur résistance en traction et à leurs modules d'élasticité élevés, grâce aussi à leur faible densité et à leur résistance aux hautes et basses températures [28]. *Karzad et al.* ont utilisé les fibres de carbone pour réparer des poutres en béton armé en utilisant des polymères renforcés par des fibres de carbone (EB-FRP). Les résultats ont montré que l'application de bandes EB-FRP a augmenté la résistance au cisaillement de manière significative par rapport à la résistance initiale de la poutre (Figure 1.7). De plus, il a été conclu que l'application des bandes EB_FRP utilisées dans cette étude est une

méthode de réparation efficace qui peut être utilisée pour réparer et renforcer les poutres endommagées [29].

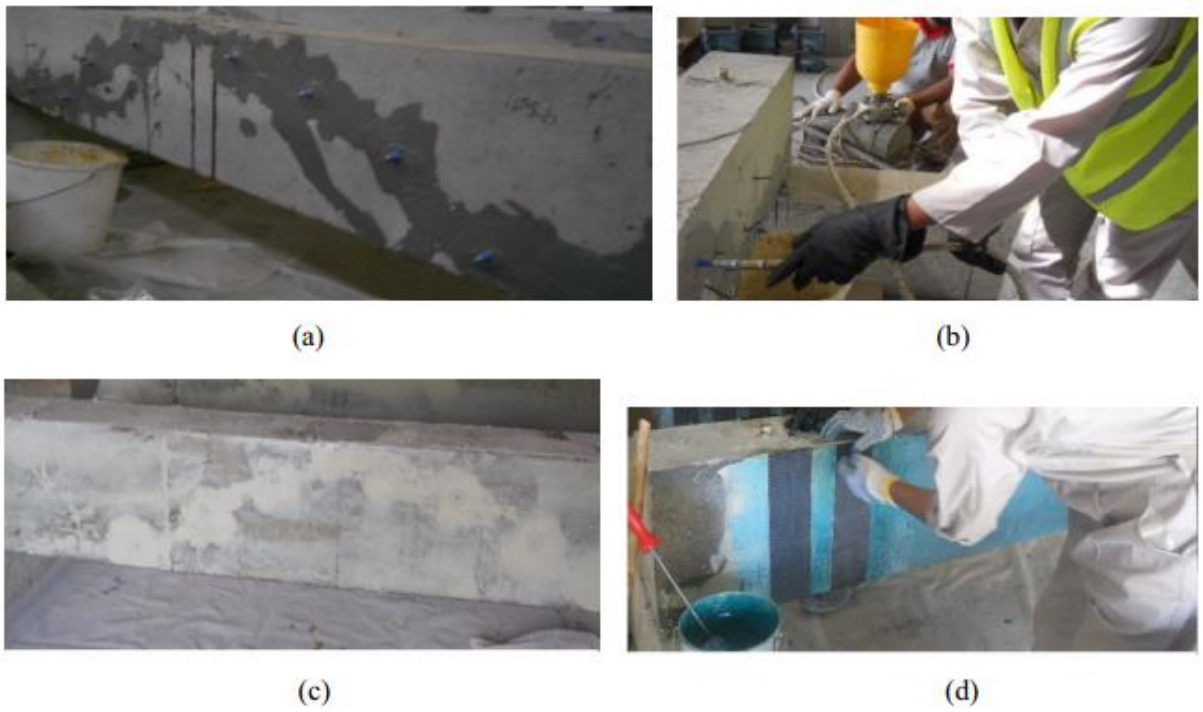


Figure 1.7. Procédure de renforcement d'une poutre endommagée, poutre pré-endommagée (a), Injection de la résine (b), Poutre prête à être enveloppée (c), La poutre enveloppée par des bandes CFRP (d) [29].

Cependant, le coût de fabrication de ce type de fibres est assez élevé en raison de leur processus de fabrication qui reste encore compliqué, et de leur mauvaise dispersion dans le béton quand elles sont introduites dans la formulation du béton, ce qui conduit à la perte de leur efficacité [28].

- Fibres de nylon

Ces fibres sont caractérisées par la présence de la fonction amide dans leur structure chimique. Elles font partie des polymères et présentent une bonne résistance en traction, une bonne élasticité et la stabilité thermique du béton lorsqu'il est soumis à une température élevée [20]. *Song et al.* ont étudié l'effet des fibres de nylon sur la résistance du béton à une teneur en fibres de 0,6 kg/m^3 et une longueur de 19mm. Il a été conclu que la résistance à la compression, la résistance à la traction ainsi que le module de rupture des bétons renforcés

par les fibres de nylon ont respectivement augmenté de 12,4 %, 17 % et 6 % par rapport à ceux du béton ordinaire [30].

- Fibres d'alcool polyvinylique (PVA)

Les fibres d'alcool polyvinylique (PVA) sont fabriquées à partir de la résine PVA où un processus d'étirement en plusieurs étapes permet d'avoir des fibres d'une grande rigidité et insolubilité dans l'eau. Quand elles sont utilisées dans le béton, ces fibres ont montré une bonne dispersion dans le mélange cimentaire [20].

Ces fibres organiques synthétiques présentent de nombreux avantages par rapport aux autres fibres, notamment leur ductilité élevée, leur bonne résistance à la corrosion et en milieu alcalin, leur forte adhérence avec la matrice cimentaire et leur faible coût [31]. *Hamoush et al.* ont étudié le comportement mécanique des bétons renforcés avec des fibres PVA à travers l'analyse des courbes contrainte-déformation en traction et en compression. Ils ont montré que les fibres PVA contribuent à limiter la propagation des microfissures dans le béton [32]. Par ailleurs, *Noushini et al.* ont mené une étude sur des poutres de 1900 × 150 × 200mm confectionnées avec un béton à base de fibres PVA. Ce dernier a montré une résistance à la compression de 67 MPa et il a été conclu que l'inclusion de fibres PVA améliore la ductilité et le rapport d'amortissement des éléments [33].

Bien que les fibres PVA présentent plusieurs avantages, elles ont un coefficient d'expansion thermique négatif. En effet, les fibres PVA subissent un rétrécissement de l'ordre de 4 % en longueur sous 200°C de température [20].

- Fibres en polypropylène

Les fibres polypropylènes (synthétique) sont des polymères thermoplastiques semi-cristallins de grande consommation (Figure 1.8). La production et le développement de ces fibres ont connu un progrès énorme dans plusieurs domaines, y compris le domaine de la construction [34]. Il existe deux types de fibres polypropylènes disponibles pour le renforcement du béton : les fibres de forme mono-filament et les fibres torsadées [20].



(a) (b)

Figure 1.8. Fibres polypropylènes, (a) forme rectiligne, (b) forme torsadée.

Il convient de noter que les fibres polypropylènes présentent de nombreux avantages par rapport aux autres fibres synthétiques commercialisées, en raison de leur légèreté, leur rentabilité, leur faible conductivité thermique et leur résistance aux attaques des acides et des alcalis. De plus, les fibres polypropylènes ont une nature hydrophobe et donc n'affectent pas le taux d'absorption du béton. En outre, il a été rapporté que l'effet des fibres polypropylènes sur la teneur en air et la densité des bétons frais n'est pas significatif. C'est le résultat de la nature hydrophobe des fibres polypropylènes, de leur faible densité ainsi que de leur faible pourcentage d'incorporation dans le béton [35]. Ces constats confirment les résultats obtenus par *Akça et al.* qui ont montré que l'ajout de 1,5 % de fibres polypropylènes (en volume) dans le béton induit une légère augmentation de l'air occlus dans le béton frais [7]. Parallèlement, *Hassanpour et al.* ont utilisé des fibres polypropylènes dans un béton de granulats légers. Les résultats obtenus ont confirmé que les fibres polypropylènes n'affectent pas la densité du béton frais [36].

1.3.5. Fibres hybrides

Comme mentionné précédemment, chaque type de fibre présente des caractéristiques particulières et améliore différemment les performances des matériaux cimentaires.

Certaines fibres sont caractérisées par un module d'élasticité important et une résistance mécanique élevée, c'est le cas des fibres de carbone, d'alcool polyvinylique, d'acier, d'amiante et des fibres de verre. Ces dernières peuvent efficacement améliorer les résistances mécaniques du béton ; cependant, leur comportement fragile ne permet pas d'améliorer sa ductilité [37].

D’autres fibres à faible résistance, comme les fibres polypropylènes et les fibres en nylon, améliorent plus efficacement la ductilité du béton et limitent la propagation des fissures [38], [39]. Par conséquent, afin d’obtenir un béton fibré d’une bonne résistance mécanique et d’une meilleure ductilité, la combinaison de fibres de différentes propriétés chimiques/mécaniques a été proposée [40].

La méthode d'hybridation consiste à mélanger deux, voire plusieurs types de fibres de différentes natures, morphologies et caractéristiques [40]. À titre d’exemple, le mélange de plusieurs longueurs (courte et longue) permet de limiter largement la fissuration dans le matériau cimentaire où les fibres courtes sont plus efficaces pour les microfissurations tandis que les fibres longues permettent de contrôler les macro-fissurations (Figure 1.9) ce qui donne un béton de bonne ductilité [41].

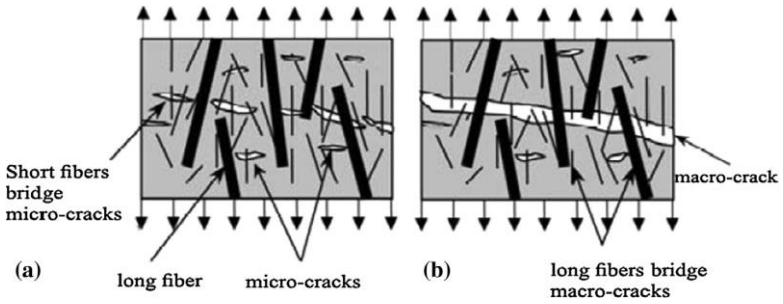


Figure 1.9. Effet d’un mélange hybride de fibres sur la fissuration du béton, (a) phase 1, (b) phase 2 de chargement [41].

Quant à l’emploi des fibres de différentes caractéristiques, le mélange de deux fibres de différents modules d’élasticité a été proposé pour l’amélioration de la ductilité et de la rigidité des bétons (Figure 1.10). D’une part, les fibres les plus rigides représentent la première contrainte contre la fissuration et améliorent la résistance ultime. D’autre part, les fibres relativement flexibles améliorent la dureté et la capacité de déformation dans la zone de post-fissuration [40].

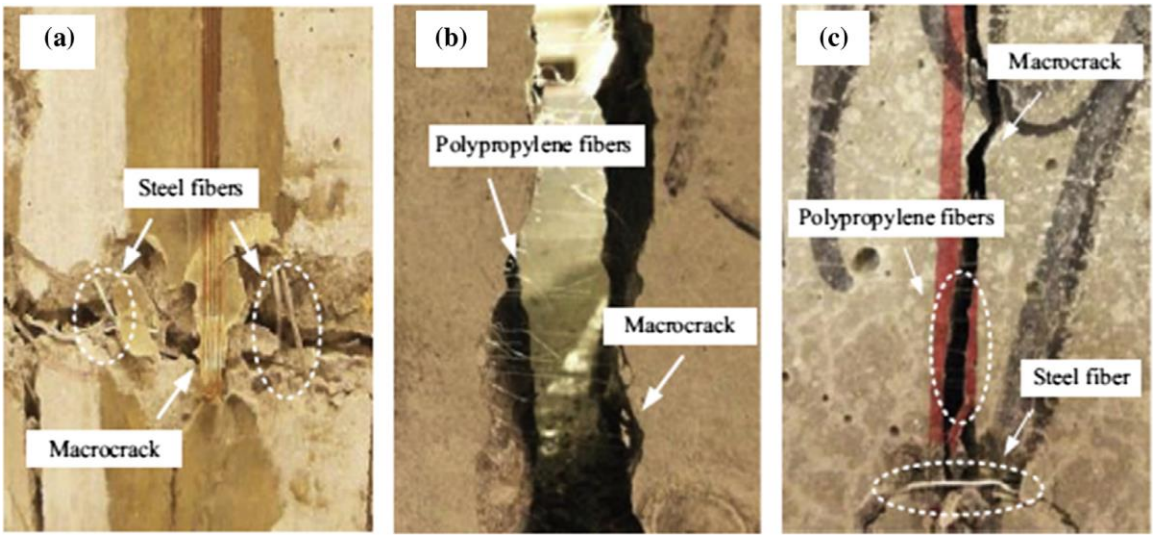


Figure 1.10. Rôle des fibres lors de l'élargissement des fissures ; (a) ST-FRC, (b) PP-FRC et (c) FRC hybride *[42]*.

En ce qui concerne l'hybridation des fibres de différentes morphologies, *Hsie et al.* ont étudié l'effet de la forme des fibres hybrides en polypropylène (PP) sur les propriétés mécaniques du béton. Deux formes de fibres PP ont été étudiées, des fibres macrofilament (df = 1mm) et des fibres microfilament (df = 15 µm) en différents pourcentages dans un béton. Les résultats montrent que le mélange hybride a amélioré l'indice de ductilité du béton (Figure 1.11). La résistance à la compression, à la traction et à la flexion des bétons renforcés par des fibres hybrides ont été améliorées respectivement de 14,60 à 17,31 %, 8,88 à 13,35 % et 8,99 à 24, 60 % par rapport au béton renforcé par un seul type de fibre [43].

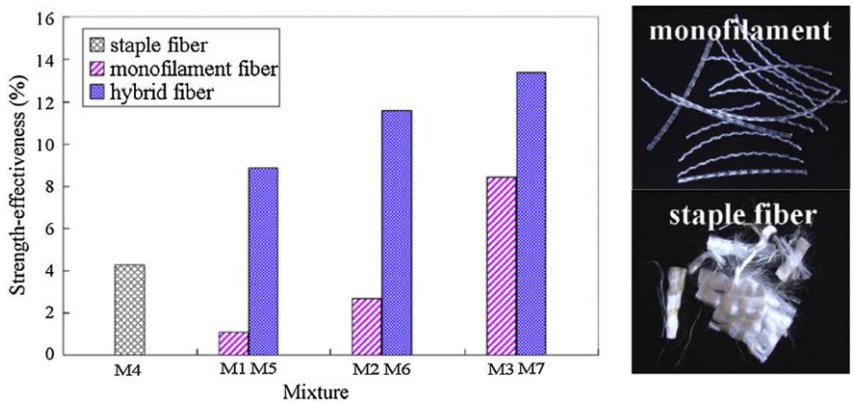


Figure 1.11. Résistance à la traction du béton renforcé par des fibres hybrides en polypropylène.

À la lumière des informations tirées de la littérature et pour des raisons écologiques et économiques, dans notre étude, nous nous intéressons à l'utilisation des fibres polypropylènes dans le béton.

1.4. Mise en place du béton fibré

Les propriétés mécaniques, notamment le comportement post-fissuration, des bétons renforcés par des fibres dépendent de la position finale des fibres ainsi que du nombre de fibres réagissant sur l'angle et sur la surface fissurée. L'orientation et la position des fibres dans le béton sont fortement influencées par les conditions de mise en place, comme la méthode de remplissage et de serrage du béton ainsi que la forme et les dimensions des éléments de coffrage. Selon *Boulekbache et al.* [44], les fibres sont mises en rotation par différentes vitesses d'écoulement du béton. Durant le coulage, le béton frais exerce des forces et des mouvements sur les fibres, comme le montre la Figure 1.12. Ces forces sont alignées perpendiculairement à la direction d'écoulement (écoulement radial sur la Figure 1.12 (a)) et parallèlement à l'écoulement (écoulement de cisaillement sur la Figure 1.12 (b)). À cet égard, *Yang et al.* se sont intéressés aux techniques de coulage du béton fibré pour la confection de poutres en béton ultra-haute performance renforcé par des fibres d'acier. Durant ce travail, l'effet de deux méthodes de coulage différentes sur les performances mécaniques des poutres en béton fibré a été évalué. La première méthode consiste à faire couler le béton dans un moule de coffrage en adoptant un coulage d'une extrémité vers l'autre, tandis que la deuxième méthode consiste à effectuer un remplissage du centre du moule vers les deux extrémités (Figure 1.13). Les résultats issus de ce travail ont montré que la première méthode est plus efficace en termes de performance structurelle. Cela est dû au fait que la fluidité du béton fibré dans la premier cas de remplissage oriente les fibres dans le sens longitudinal à travers toute la longueur de la poutre, ce qui améliore davantage la performance des poutres soumises à la flexion [45].

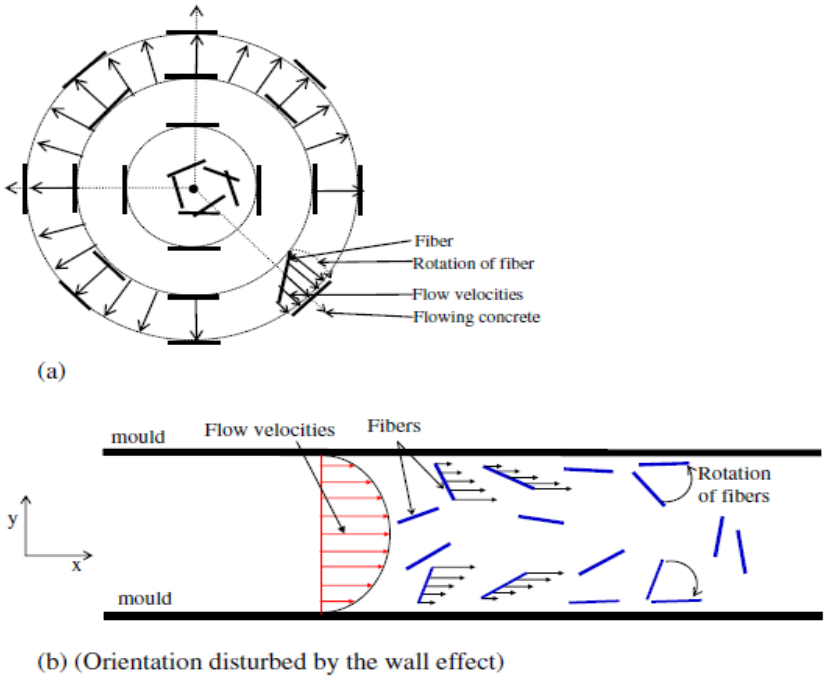


Figure 1.12. Schéma explicatif de l'orientation des fibres dans le cas d'un écoulement en surface libre (a) et en canal (b) [42]

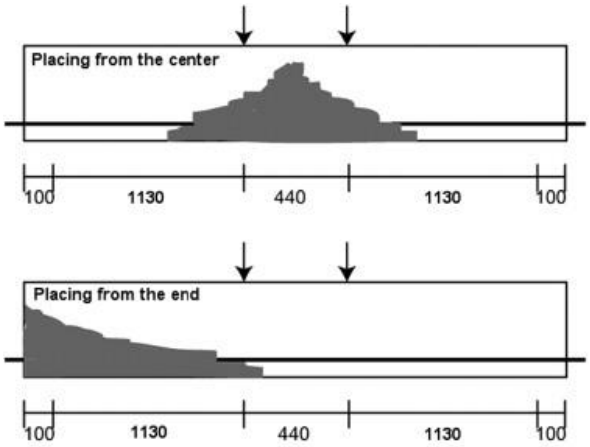


Figure 1.13. Deux méthodes proposées pour la mise en place d'UHPFRC[45].

Cette comparaison des méthodes de coulage a fait également l'objet d'une étude par *Alberti et al.* [46] afin d'étudier l'effet de la mise en place de béton autoplaçant renforcé par des fibres polyoléfines en deux longueurs, 48 et 60mm, et avec un dosage de 6 kg/m^3. La Figure 1.14. montre les deux méthodes de remplissage de béton mentionnées précédemment, en plus de la

méthode proposée par EN-14651[47] selon laquelle le béton se met d'abord au milieu du moule et ensuite dans les deux extrémités.

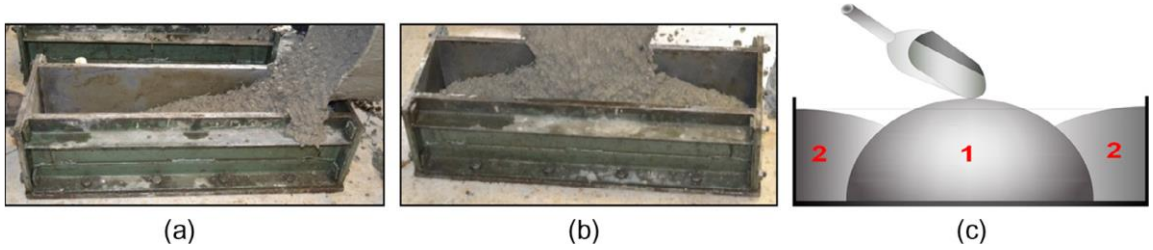


Figure 1.14. Méthodes de mise en place du béton, (a) mise en place d'un seul côté, (b) mise en place dans le centre, (c) méthode proposée par EN-14651[46], [47].

L'ouverture de fissuration et la flèche des poutres fabriquées par des bétons mis en place selon les méthodes (a) et (c) ont été analysés et les résultats obtenus sont présentés sur la Figure 1.15.

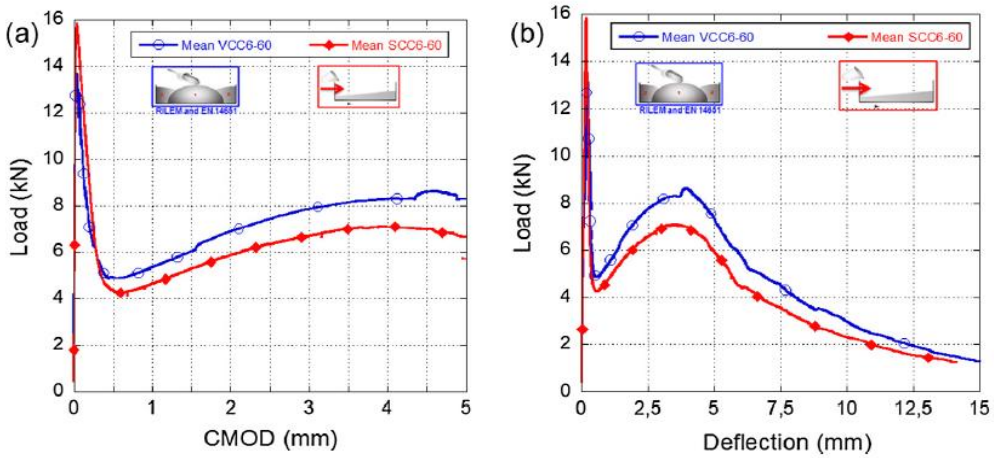


Figure 1.15. Comparaison de courbes de rupture des mélanges VCC6-60 et SCC6-60, CMOD (a), la flèche (b) [46].

À l'issue de ces résultats, il a été constaté que la méthode proposée par la norme EN-14651 permet d'avoir de meilleures caractéristiques mécaniques en comparaison avec la première méthode (a) [46]. De plus, la distribution et l'orientation des fibres ont été analysées et comparées au modèle du *Dupont et Vandewalle* [48] qui a été proposé pour l'étude des fibres métalliques dans le béton. Les résultats expérimentaux ainsi que ceux prédits par le modèle sont présentés sur la Figure 1.16. Cette dernière présente aussi le modèle d'adaptation proposé pour les bétons renforcés par des fibres polyoléfines. Cette analyse a révélé que le modèle *Dupont et Vandewalle* ne décrit pas réellement la distribution des fibres non rigides dans le béton et que

la méthode de mise en place sur un seul côté donne une distribution de fibres plus uniforme [46].

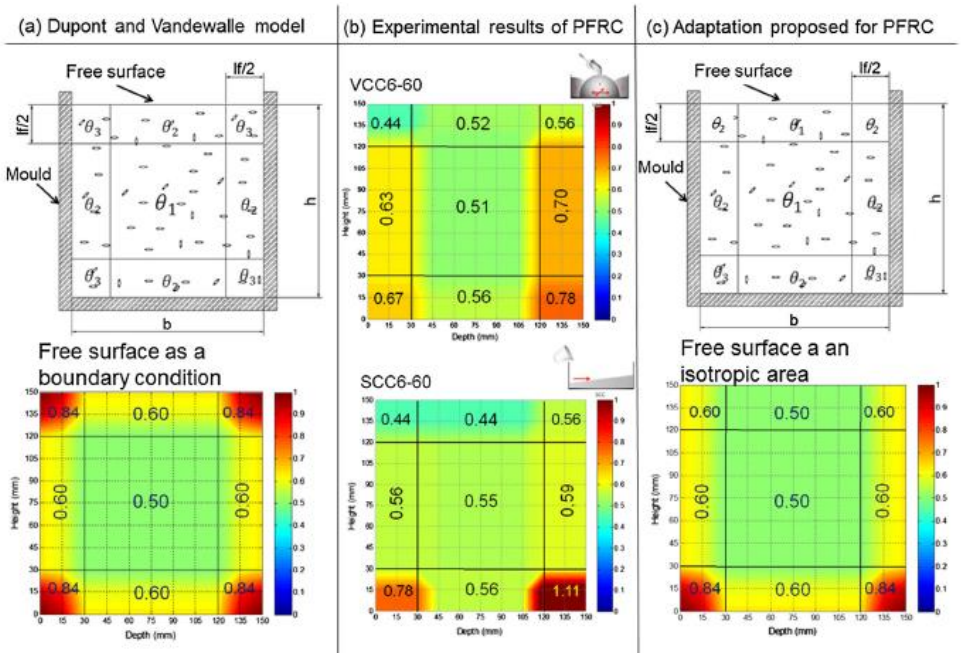


Figure 1.16. Dispersion des fibres selon le modèle Dupont et Vandewalle (a), les résultats expérimentaux (b) et un modèle d'adaptation pour PFRC (c) [46].

1.5. Comportement du béton renforcé par des fibres polypropylènes

1.5.1. Propriétés à l'état frais

L'introduction de fibres dans le béton affecte ses performances aux états frais et durci selon le dosage, la longueur et la forme des fibres utilisées. *Chen et Liu* ont évalué l'effet du type de fibres sur l'ouvrabilité des bétons fibrés. Trois types de fibres ont été considérés pour la comparaison, fibres d'acier, fibres polypropylènes et fibres de carbone. Le plus faible effet sur l'affaissement de béton revient aux fibres polypropylènes tandis que l'effet le plus important a été enregistré pour les fibres d'acier [49]. De plus, il a été montré que l'ajout de fibres polypropylènes (PPF) n'affecte pas fortement la teneur en air ni la densité fraîche de béton en raison de la faible densité des fibres polypropylènes, contrairement aux autres types de fibres tels que les fibres d'acier.

Dans une autre étude, *Simões et al.* ont également rapporté que la densité du mortier frais renforcé par les fibres métalliques passe de 2,57 à 2,65 en augmentant le dosage en fibres, tandis

que la densité des mélanges renforcés par des fibres polypropylènes diminue de 2,54 à 2,49 avec l'augmentation de la teneur en fibres polypropylènes (Figure 1.17) [50]. Ces constats confirment les résultats d'*Hassanpour et al.* [36] qui ont étudié les bétons de granulats légers renforcés par des fibres polypropylènes et ont conclu que ces dernières n'ont pas d'effet significatif sur la densité du béton frais. Quant à l'effet des fibres polypropylènes sur le pourcentage d'air occlus dans le béton, *Akça et al.* [7] ont constaté que l'ajout de 1,5 % de PPF (en volume) dans le béton conduit à une faible augmentation de l'air occlus qui est passé de 1 %, pour le béton sans fibres, à 1,3 % pour le béton fibré.

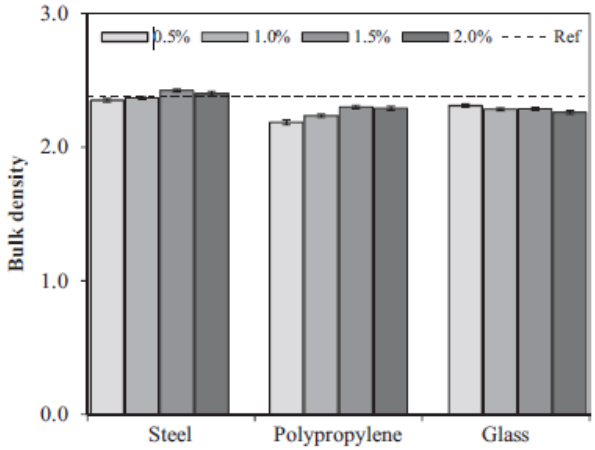


Figure 1.17. Évolution de la densité en fonction de la nature et du dosage en fibres métalliques, fibres propylènes et fibres de verre [50].

Bien que l'introduction de fibres polypropylène à faible dosage n'affecte pas grandement les propriétés des bétons à l'état frais, cette faible influence reste considérable, notamment quand les fibres sont introduites en forte concentration. À ce sujet, certaines recherches antérieures ont montré que l'introduction de fibres polypropylènes avec des concentrations importantes induit une perte des propriétés du béton frais. La Figure 1.18 montre les résultats d'étalement des bétons frais fabriqués avec différentes combinaisons de types et de longueurs de fibres d'alcool polyvinylique, de cellulose, de nylon et de polypropylène. Comme le montre la Figure 1.18(a), le béton témoin sans fibres indique une valeur d'étalement de 735mm. En revanche, l'introduction d'un pourcentage élevé de fibre a induit une baisse importante d'ouvrabilité. Cette diminution est clairement remarquable pour le béton contenant des fibres polypropylène (PP) de 19mm, tandis que les autres mélanges avec des fibres de longueur plus courte ont montré des étalements relativement meilleurs. Afin de surmonter la perte d'ouvrabilité, il a été proposé

de mélanger les fibres polypropylènes avec des fibres en nylon, ce qui a permis d'améliorer l'ouvrabilité [51].

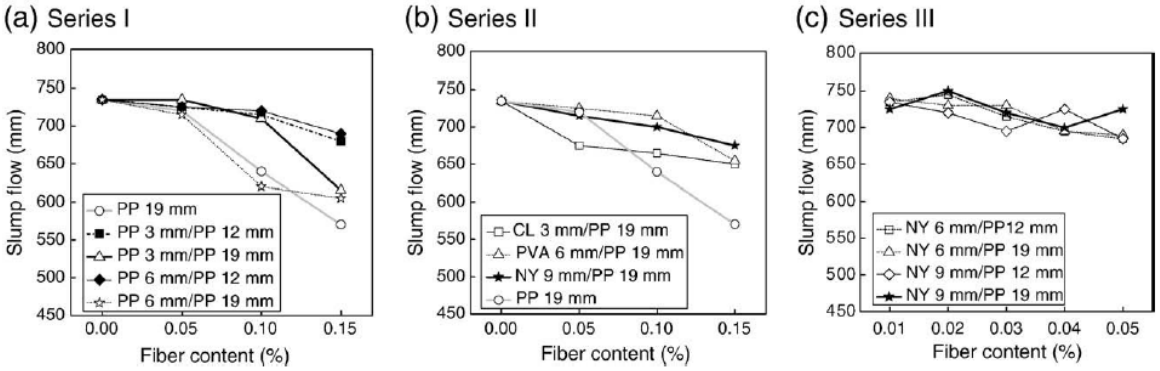
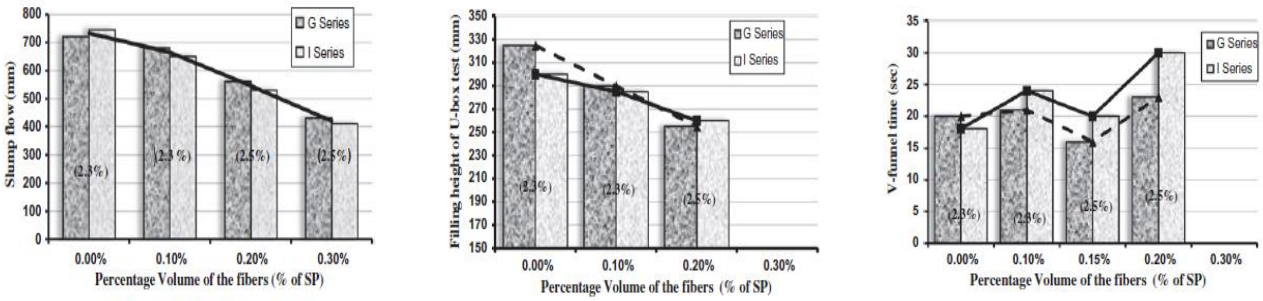


Figure 1.18. Évolution de l'étalement en fonction du dosage en fibres [51].

À travers les différentes investigations publiées sur les bétons fibrés, il apparaît que le pourcentage en fibres est l'un des facteurs importants qui affecte le plus la rhéologie des bétons renforcés par des fibres polypropylènes. *Mazaheripour et al.* [5] ont rapporté que l'augmentation du pourcentage de fibres polypropylènes de 0,1 jusqu'à 0,3 % dans un béton léger autoplaçant a engendré une chute significative d'étalement (Figure 1.19(a)) et de la capacité de remplissage de U-BOX (Figure 1.19(b)). Au-delà de 0,15 % de fibres, le temps d'écoulement en V-funnel a également augmenté (Figure 1.19(c)). De plus, à un dosage de 0,3 %, un blocage de béton a été observé pour l'essai de U-BOX.



(a) **(b)** **(c)**

Figure 1.19. Évolution de l'étalement (a), capacité de remplissage (b) et temps d'écoulement (c) en fonction du pourcentage de fibres [5].

Comme cela a été mentionné précédemment, la technique de l'utilisation de fibres hybrides permet de surmonter certains verrous techniques liés aux propriétés fondamentales des bétons,

y compris les propriétés à l'état frais. *Li et al.* ont étudié l'effet combiné de l'épaisseur du film d'eau et de la longueur des fibres polypropylènes sur les propriétés des mortiers à l'état frais. Les résultats obtenus indiquent que les mortiers contenant des fibres polypropylènes longues montrent généralement un débit d'écoulement faible. Cela est expliqué par le fait que les fibres polypropylènes longues ont tendance à se mêler aux grains de ciment et à former de petits filets qui enveloppent les particules fines des granulats, ce qui, par conséquent, l'affaissement et l'écoulement du mortier est réduit [52]. Une autre explication a été rapportée par *Ramezanianpour et al.* qui ont expliqué que la perte d'ouvrabilité induite par l'introduction des fibres est due en partie à la quantité d'air emprisonné dans les pores formés entre les différents constituants à l'intérieur du béton, ce qui empêche son écoulement fluide [53]. Il est à noter que la perte d'ouvrabilité à cause de l'augmentation du dosage en fibres a été également rapportée pour des pâtes cimentaires. *Zhang et al.* ont mené une étude concernant l'effet des fibres polypropylènes sur les propriétés des pâtes cimentaires à l'état frais. Les résultats obtenus en testant trois fibres de longueurs différentes (3, 6 et 12mm) ont montré que, pour chaque longueur, la fluidité de la pâte diminue progressivement en augmentant le dosage en fibres de 0 à 0,5 % [54].

En ce qui concerne les paramètres rhéologiques des pâtes fibrées, il a été montré que la viscosité apparente croît avec l'augmentation de la longueur et du dosage des fibres polypropylènes. En effet, l'augmentation de la longueur et du dosage en fibres influe négativement sur l'homogénéité du mélange en favorisant le phénomène de floculation et rend la distraction des liaisons au sein des flocs formés plus difficile (Figure 1.20). Cela engendre automatiquement une augmentation du seuil de cisaillement et de la viscosité apparente [54]. Pour pallier ce problème de floculation, l'utilisation d'un superplastifiant de type polycarboxylate (PCE) a été recommandée [55]. Cette proposition est basée sur les résultats des études antérieures qui prouvent que l'ajout de superplastifiant permet d'augmenter l'affaissement des bétons ordinaires, ce qui influe directement sur ces paramètres rhéologiques (seuil de cisaillement et viscosité diminuent) [56]. Ce type d'adjuvant est absorbé à la surface des particules de ciment, éliminant ainsi les floculations des particules, ce qui améliore la fluidité de la pâte [57]. Effectivement, *Zhang et al.* ont prouvé que l'introduction de 0,15 % de PCE dans une pâte de ciment renforcé par des fibres polypropylènes permet d'améliorer sa fluidité (affaissement plus élevé) en baissant leurs paramètres rhéologiques (viscosité et seuil de cisaillement) [54] . Par ailleurs, d'autres chercheurs ont proposé l'augmentation du volume de la pâte dans la

formulation des bétons fibrés ou bien l'introduction de poudres pouzzolaniques pour l'amélioration des performances rhéologiques [58].

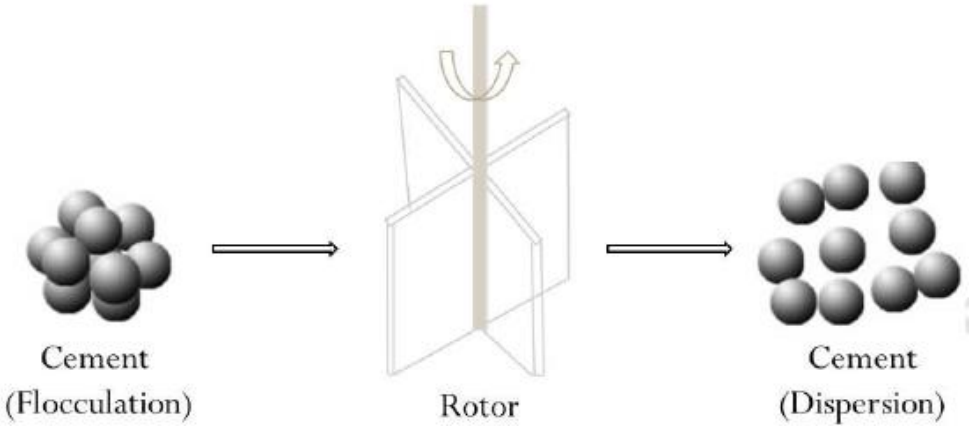


Figure 1.20. Schéma explicatif du processus de défloculation des grains de ciment par un cisaillement plus élevé [54].

1.5.2. Propriétés à l'état durci

1.5.2.1. Caractéristiques physico-chimiques

a. Absorption d'eau, porosité et perméabilité

En général, le renforcement du béton par des fibres influe sur sa capacité d'absorption d'eau selon la nature des fibres utilisées. En effet, il est connu que les fibres polypropylènes ont un effet positif sur l'absorption d'eau et leur introduction dans le béton permet de réduire le taux d'absorption d'eau plus efficacement qu'avec les fibres d'acier. *Rashid* a rapporté qu'à 0,4 % et 0,6 % de teneur en fibres polypropylènes, l'absorption d'eau diminue respectivement de 3 % et 8 % par rapport au béton témoin. Ce résultat est en cohérence avec les résultats de *Sun et al.* qui ont également rapporté que la pénétration d'eau dans le béton diminue avec l'augmentation du dosage en fibres [59]. Parallèlement, *Ramezanianpour et al.* ont étudié l'épaisseur de pénétration de l'eau dans le béton et ont révélé qu'à une teneur en fibres de 0,7 kg/m^3, une épaisseur de 7,7mm est obtenue, ce qui est 30 % plus faible que l'épaisseur enregistrée pour le béton témoin. Cette diminution est expliquée par le fait que les fibres polypropylènes contribuent à combler les pores dans le béton et à limiter la fissuration grâce à leur flexibilité et à leur faible diamètre, contrairement aux fibres d'acier [13], [53]. Effectivement, l'introduction

de ces dernières à une teneur de 0,65 % et 0,85 % a augmenté l'absorption respectivement de 2 % et 5 % par rapport au béton témoin (Figure 1.21).

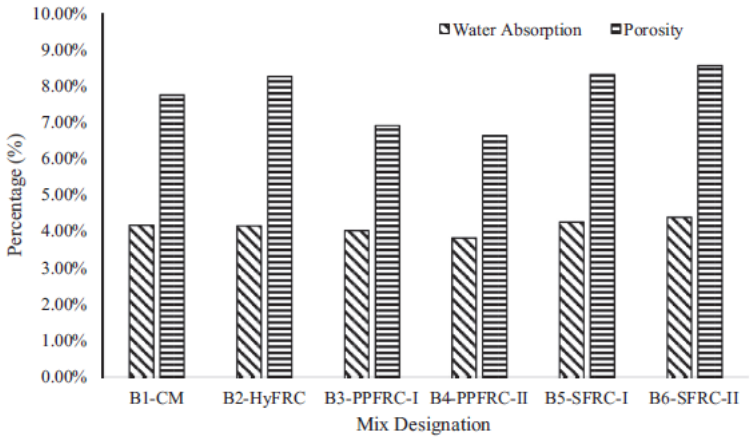


Figure 1.21. Évolution de l'absorption d'eau et de la porosité d'un béton renforcé par des fibres hybrides [13].

Bien que l'augmentation des fibres polypropylènes conduise souvent à une amélioration en termes de durabilité, certaines études ont rapporté qu'une teneur très élevée en fibres peut conduire à une augmentation de la porosité. *Karahan et Atis* ont montré que l'augmentation du dosage en fibres engendre une augmentation de la porosité de 6 %, 18 % et 28 % pour des dosages en fibres polypropylènes respectivement de 0,05 %, 0,10 % et 0,20 % [60]. Cette augmentation affecte la capacité d'absorption et de pénétration d'eau (Figure 1.22)[53].

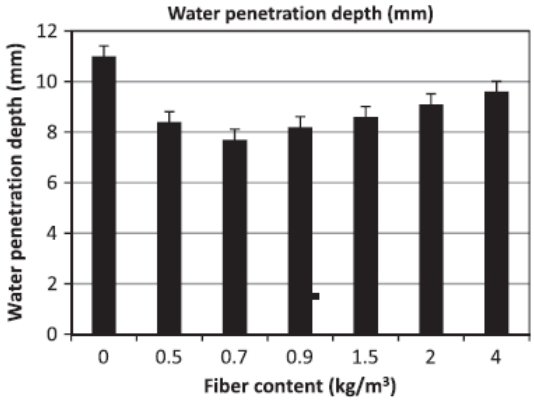


Figure 1.22. Évolution de l'épaisseur de pénétration d'eau dans le béton renforcé par des fibres polypropylènes [53].

En ce qui concerne la perméabilité, les bétons à base de fibres polypropylènes présentent souvent une perméabilité inférieure à celle des bétons sans fibres. *Ramezanianpour et al.* ont

étudié la perméabilité des bétons fibrés et ont montré que l'introduction de fibres polypropylènes jusqu'à 2 kg/m^3 permet de limiter la perméabilité au gaz par rapport au béton témoin sans fibres. Cela a été expliqué par le fait que les fibres limitent les fissures dans le béton et permettent, par conséquent, de réduire la perméabilité [61].

b. **Pénétration des ions chlorure (PC)**

En effet, l'utilisation de fibres dans le béton permet de diminuer non seulement la porosité mais également la conductivité interne des pores, ce qui a comme résultat une diminution de la pénétration des ions chlorure. Cependant, l'augmentation du dosage en fibres peut conduire à l'augmentation de la porosité à cause des vides formés aux interfaces pâte/fibre, notamment lorsque la vibration adaptée pour le serrage du béton n'est pas suffisante. Cela conduit systématiquement à l'augmentation de la diffusion des ions chlorure comme pour le cas présenté dans la Figure 1.23 [53]. Ce constat montre encore une fois l'importance du choix de la forme et du dosage des fibres utilisées.

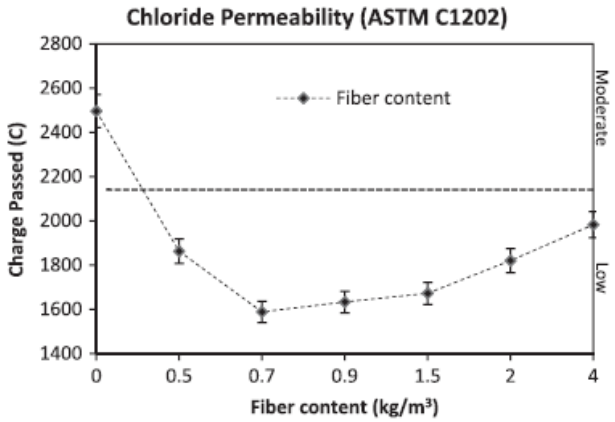


Figure 1.23. Charge passée par les fibres avec les tests RCPT (à l'âge de 28 jours) [53].

c. **Comportement du béton fibré vis-à-vis du retrait**

Le retrait du béton est une contraction volumique indépendante de tout chargement extérieur, causée par des phénomènes physico-chimiques. Il représente une propriété importante qui joue un rôle crucial sur les performances des structures à long terme [62]. Ce phénomène se présente en quatre types : le retrait endogène, le retrait de séchage, le retrait thermique et le retrait plastique.

Parmi ces types, le retrait plastique représente une préoccupation majeure pour les éléments de grandes surfaces qui sont soumis à un séchage à jeune âge. Ce type de retrait est dû à une évaporation d'eau causée par un séchage rapide du béton en phase plastique et peut provoquer des macro et des microfissurations dans le béton sous forme de maillage (Figure 1.24) [63].



Figure 1.24. Apparition de fissures dues au retrait plastique sur la surface d'une dalle en béton [64].

L'apparition de ces fissurations conduit systématiquement à une dégradation des performances du béton à long terme. Pour cela, des chercheurs ont proposé des techniques permettant de surmonter ce problème. Parmi les techniques les plus répandues, la méthode de prolongation du temps de cure a été recommandée afin d'empêcher la perte d'eau de la surface du béton. Cependant, dans certains cas, cette solution n'est pas suffisante et des mesures supplémentaires doivent être adoptées, telles que le contrôle de la température de conservation, la protection de la surface contre le vent et la limitation de l'utilisation d'adjuvants [63].

D'autres chercheurs ont proposé une autre méthode plus efficace et très pratique qui consiste à renforcer le béton par des fibres polypropylènes. Effectivement, cette méthode a été étudiée et les résultats obtenus ont confirmé l'efficacité de cette technique contre le phénomène de retrait. En effet, parmi les différents types de fibres utilisées, il a été rapporté que les fibres polypropylènes sont les plus adaptées pour le contrôle des macro et microfissurations causées par le phénomène du retrait plastique [65]. Dans ce contexte, des recherches ont été consacrées à l'étude de l'effet du dosage, de la longueur et de la forme des fibres polypropylènes sur le retrait.

En ce qui concerne l'effet de dosage, *Sun et Xu* ont introduit les fibres polypropylènes en plusieurs dosages « 0,45, 0,9 et 1,35 kg/m^3 » dans trois mélanges de béton nommés respectivement F1, F2 et F3. Les résultats issus de cette étude ont révélé que les mélanges F1, F2 et F3 possèdent, par rapport au béton témoin, un retrait plus faible (C1) respectivement de 43 %, 52 % et 68 % (Figure 1.25) [59].

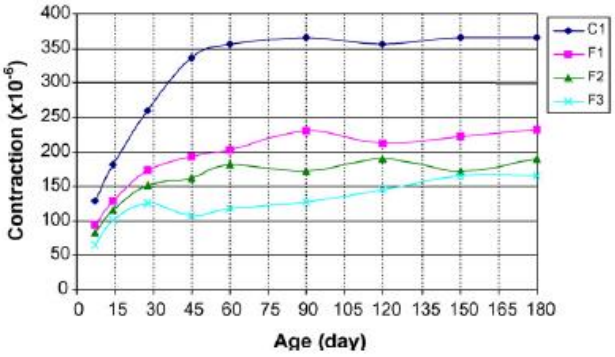
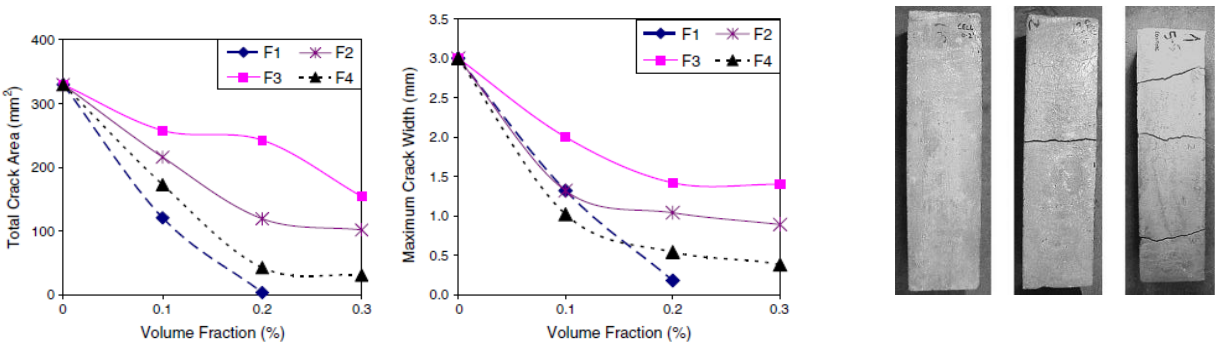


Figure 1.25. Taux de contraction du retrait en fonction du dosage en fibres et du temps [59].

À propos de l'effet de la longueur et de la forme des fibres polypropylènes sur le retrait du béton, *Banthia et Gupta* ont introduit quatre fibres de 12,5 et 6,3mm de longueur et de formes différentes (mono-filament et multi-filament) à une teneur de 0,1 %, 0,2 % et 0,3 %. Les résultats de cette étude ont montré que, pour toutes les longueurs de fibre, le retrait diminue lorsque le dosage augmente, ce qui est cohérent avec les résultats de *Sun et Xu* (Figure 1.26). De plus, il a été rapporté que les fibres fines et courtes sont plus efficaces pour la limitation de la propagation des microfissurations causées par le retrait plastique en comparaison avec les fibres grossières et longues. De ce fait, il a été conclu que les fibres de forme multi-filament sont les plus adaptées pour contrôler le phénomène de retrait plastique dans les bétons [63]. Ces résultats sont en concordance avec les travaux menés par *Karahan et atis* et *Malhotra et al.* [60],[66].



(a) (b) (c)

Figure 1.26. Effet du dosage en fibres sur la surface (a) et sur la longueur de la fissuration (b) ainsi que l'évolution de la fissuration pour un échantillon (sans fibre (1), avec 0,1 % de fibre (2) et 0,2 % de fibre (3)) (c) [63].

1.5.2.2. Caractéristiques mécaniques

a. Résistance à la compression

Dans le domaine du génie civil, la résistance d'un béton à la compression est l'une de ses propriétés fondamentales. Pour cela, la majorité des recherches publiées sur les bétons fibrés ont pris cet élément en considération. Bien que certaines études aient rapporté que la résistance du béton augmente légèrement si l'on introduit les fibres polypropylènes à un dosage approprié, les bétons fibrés possèdent, en général, des résistances à la compression comparables à celles des bétons sans fibres. Il est à noter que le dosage optimal en fibres diffère d'un béton fibré à un autre, tout dépend de la forme et de la longueur des fibres utilisées. À cet égard, l'étude de *Li et al.* a révélé que l'introduction de 9 kg/m^3 de fibres polypropylènes de hautes performances dans un béton léger permet d'augmenter légèrement sa résistance à la compression, comme illustré sur la Figure 1.27 [3]. Cette augmentation a été expliquée par le fait que les fibres limitent le développement des fissurations dans le béton en formant un pont entre les deux extrémités de la fissure [3]. Au-delà de 9 kg/m^3, une chute de résistance a été enregistrée, indiquant le dosage optimal vis-à-vis de la résistance à la compression.

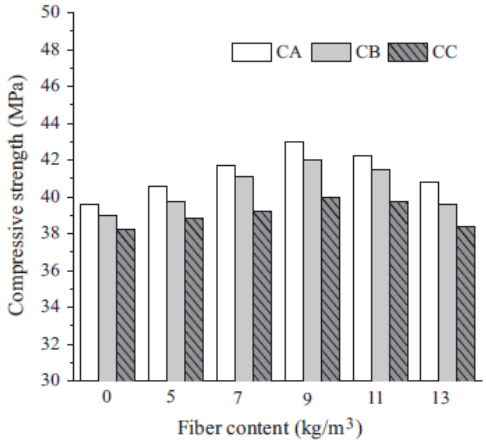


Figure 1.27. L'effet des fibres polypropylènes sur la résistance du béton léger à la compression [3].

À de faibles dosages en fibres dans le béton, l'amélioration de la résistance de ce dernier à la compression reste très faible, voire nulle. Ce constat concerne plusieurs types de fibres polypropylènes, comme cela a été montré par *Yin et al.* [67] (Figure 1.28). En effet, ces derniers ont introduit 4 kg/m^3 de fibres dans un béton et des résistances à la compression comparables à celles du béton sans fibre ont été obtenues.

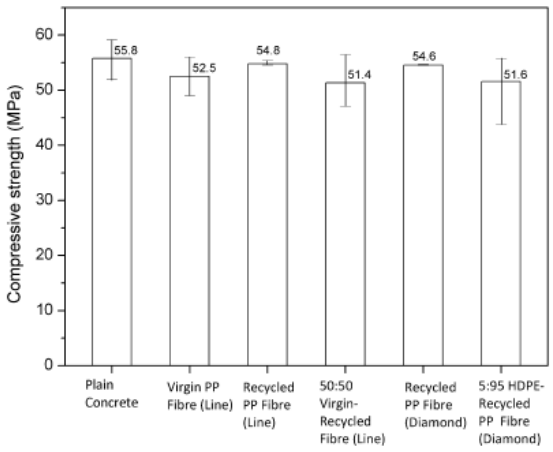


Figure 1.28. L'effet des fibres PP naturelles et recyclées sur la résistance du béton à la compression [67].

Le dosage optimal des fibres dans un béton est fortement lié à la distribution des fibres utilisées dans le mélange. Pour cela, une bonne distribution des fibres est nécessaire afin d'assurer un béton fibré avec de bonnes performances mécaniques. *Noushini et al.* ont introduit cinq types de fibres synthétiques dans un béton géopolymère avec un dosage de 0,5 % et ils ont observé une moyenne de 1 % à 7 % de réduction de la résistance à la compression du béton renforcé par les fibres polypropylènes par rapport au béton témoin (Figure 1.29)[6]. Cela a été effectivement

expliqué par la mauvaise distribution des fibres dans la matrice cimentaire, ce qui a provoqué plus de porosité dans le béton en affectant négativement la résistance mécanique [67]. Ce constat a été également rapporté pour des bétons à base de ciment Portland où, afin d'assurer une bonne distribution de fibres, l'optimisation de la formulation a été fortement recommandée [7], [68], [69].

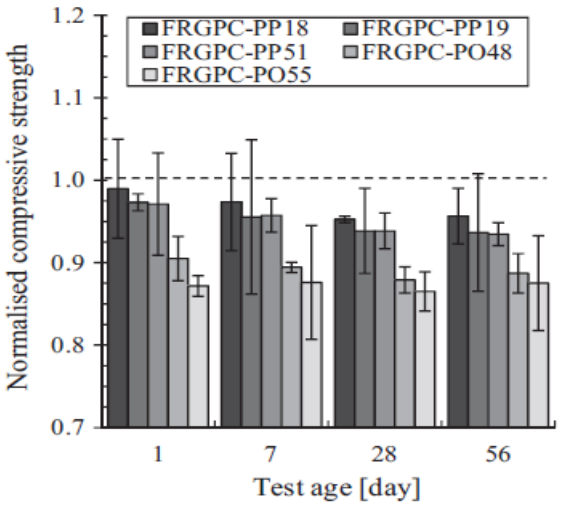


Figure 1.29. Évolution de la résistance à la compression d'un béton géopolymère fibré [6].

b. Résistance à la traction et à la flexion

La résistance du béton à la traction est une propriété importante qui affecte le comportement mécanique des structures en béton et leur durabilité. Les bétons renforcés par des fibres polypropylènes sont caractérisés par un comportement à la traction différent de celui des bétons sans fibres. Les bétons fibrés possèdent une ductilité plus importante que les bétons sans fibres. De plus, la résistance des bétons à la traction peut être considérablement améliorée par l'introduction de fibres. Dans ce contexte, il a été montré que l'ajout, dans un béton léger, de fibres polypropylènes de hautes performances à un dosage maximal de 9 kg/m^3 permet d'améliorer sa résistance à la traction de 40,73 % par rapport à celle du béton témoin sans fibres (Figure 1.30)[3]. Parallèlement, *Hassanpour et al.* ont rapporté que l'ajout de fibres polypropylènes dans un béton léger, avec un taux de 0,285 %, 0,56 % et 1 % en volume, augmente la résistance du béton à la traction respectivement de 59 %, 94 % et 71 % [36]. La même tendance a été également observée pour des bétons autoplaçants au sujet desquels

Mazaheripour et al. ont démontré que l'inclusion des PPF peut augmenter la résistance à la traction jusqu'à 14 % en utilisant un dosage approprié (Figure 1.31) [5].

L'amélioration de la résistance à la traction dans un béton fibré est attribuée à la capacité des fibres à former des ponts rigides entre les microfissures, ce qui limite le développement de la fissuration. En revanche, l'efficacité des fibres dans un béton dépend principalement de leur orientation dans la matrice cimentaire. En effet, plus les fibres sont orientées perpendiculairement à la force appliquée, plus importante sera l'amélioration de la résistance mécanique. Dans le cas où l'orientation des fibres est parallèle à la direction de la force exercée, une augmentation de la zone interfaciale (fibre/pâte) aura lieu, ce qui favorise la propagation et l'ouverture des fissures dans le béton et, par conséquent, induit une dégradation de la résistance à la traction [3]. Afin de mieux gérer l'orientation des fibres dans le béton, certaines techniques de coulage ont été proposées, comme cela a été montré précédemment dans la partie dédiée à la mise en place des bétons fibrés. En revanche, une bonne maîtrise de l'orientation des fibres reste très compliquée vu la complexité des phénomènes qui influencent leur mouvement dans le béton frais. Pour cela, la dispersion et l'orientation des fibres seront discutées plus en détail dans les paragraphes qui suivent.

En ce qui concerne l'effet d'incorporation des fibres sur la résistance du béton à la flexion, il est couramment reconnu que la résistance en flexion d'un béton est conditionnée par la fissuration de la zone tendue. À l'instar de la résistance à la traction, la résistance à la flexion augmente de 20 à 57 % lorsque l'on introduit respectivement 0.2 à 0.4 % de fibres polypropylènes [70]. En revanche, pour une teneur en fibres plus faible, comme 0,1 %, 0,2 % et 0,3 %, la résistance des bétons à la flexion augmente légèrement, respectivement de 4,9 %, 8,6 % et 10,7 % (Figure 1.32)[5]. En effet, les fibres polypropylènes renforcent le béton en limitant l'ouverture des fissures et en stabilisant également la matrice cimentaire après la rupture [71].

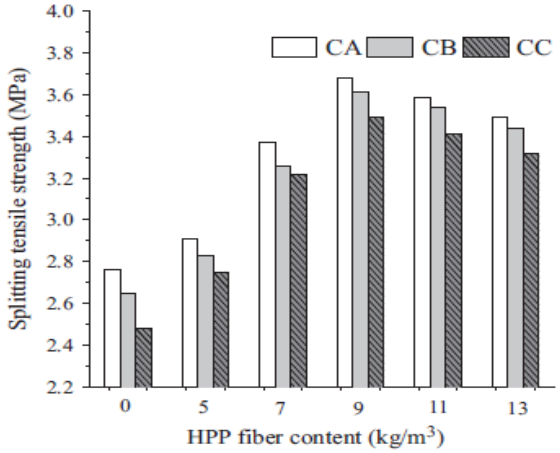


Figure 1.30. L'effet des fibres de hautes performances sur la résistance du béton léger à la traction [3].

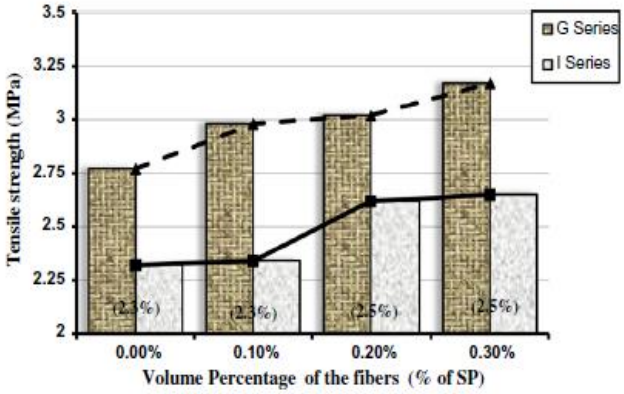


Figure 1.31. Évolution de la résistance du béton autoplaçant à la traction en fonction du dosage volumique en fibres [5].

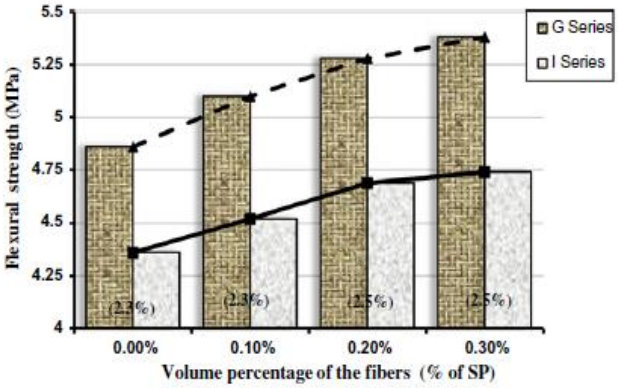


Figure 1.32. Évolution de la résistance du béton fibré à la flexion en fonction du pourcentage de fibres [5].

c. Module d'élasticité

Les fibres utilisées dans les bétons, y compris les fibres polypropylènes, possèdent un module d'élasticité largement différent de celui du béton. Par conséquent, leur introduction dans la formulation d'un béton affecte son module d'élasticité. Le module d'élasticité, appelé généralement module d'Young, est un paramètre clé vis-à-vis de la résistance des structures en béton au chargement dynamique. Il joue également un rôle prépondérant dans le comportement différé des bétons (retrait et fluage). Les comparaisons qui ont été faites entre le béton fibré et celui sans fibres ont révélé que ces derniers sont caractérisés par un module d'élasticité inférieur à celui des bétons fibrés. Cela est dû à la rigidité élevée des fibres en comparaison de celle des bétons. Cependant, l'amélioration de la rigidité engendrée par les fibres est limitée et elle dépend du type de béton et des paramètres de formulation, notamment le dosage en fibres. À titre d'exemple, une étude antérieure a montré que l'utilisation de fibres dans le béton léger n'est pas une solution efficace pour améliorer le module d'élasticité ; dans ce cas, l'augmentation du dosage en fibres n'a pas d'effet significatif sur le module [36]. Par ailleurs, avec l'introduction de fibres polypropylènes en dosage élevé, une diminution du module d'élasticité de 12 % a été enregistrée [5], [72]. Cette diminution est due à la mauvaise dispersion des fibres dans le béton, ce qui implique un déséquilibre de répartition des contraintes au moment du chargement mécanique. Ce constat a été confirmé à travers les travaux de *Karahan et Atis* qui ont montré que le dosage en fibres est un facteur clé quant à la rigidité des bétons fibrés [60].

1.5.3. Effet de la géométrie et le dosage en fibres

Compte tenu de ce qui précède, il apparaît clairement que l'effet des fibres sur les performances des bétons aux états frais et durci dépend de nombreux paramètres, notamment de la géométrie et du dosage en fibres. À cet égard, l'industrie des fibres s'est adaptée et des recherches ont été consacrées au développement et à l'optimisation de la forme des fibres de différentes natures, tout en évaluant leur effet sur les propriétés du béton. Dans ce contexte, des fibres d'acier de forme torsadée (Figure 1.33), nommées Torex, ont été développées dans les années 1991 par *Naaman,* en se basant sur l'efficacité de la fibre en matière d'adhérence et de performance mécanique. Les fibres étudiées possèdent une géométrie polygonale transversale et sont fabriquées à partir d'un câble en acier de haute résistance [73]. L'efficacité des fibres a été évaluée en calculant le rapport d'efficacité intrinsèque des fibres (FIER) qui est égal au rapport

entre la surface latérale de liaison de la fibre et sa section transversale. En effet, la résistance de la fibre à la post-fissuration augmente proportionnellement avec le rapport FIER. L'étude de *Naaman* a montré que les fibres triangulaires torsadées et celles de forme carrée torsadées augmentent la valeur de FIER respectivement de 28 et 12 % par rapport à des fibres de forme circulaire, ce qui permet d'obtenir, non seulement une bonne adhérence entre les fibres et la matrice cimentaire, mais également une meilleure performance mécanique [74]. Le module d'élasticité et la ductilité des bétons augmentent également par l'ajout des fibres d'acier torsadées [75].

La forme des extrémités des fibres est aussi d'une grande importance ; à ce sujet, il a été rapporté que le béton renforcé par des fibres dont les extrémités sont tordues possède une résistance à la compression trois fois plus importante qu'un béton à base de fibres dont les extrémités sont courtes et linéaires. Pour cette raison, l'utilisation de fibres torsadées avec des extrémités tordues est souvent adoptée [75], [76].

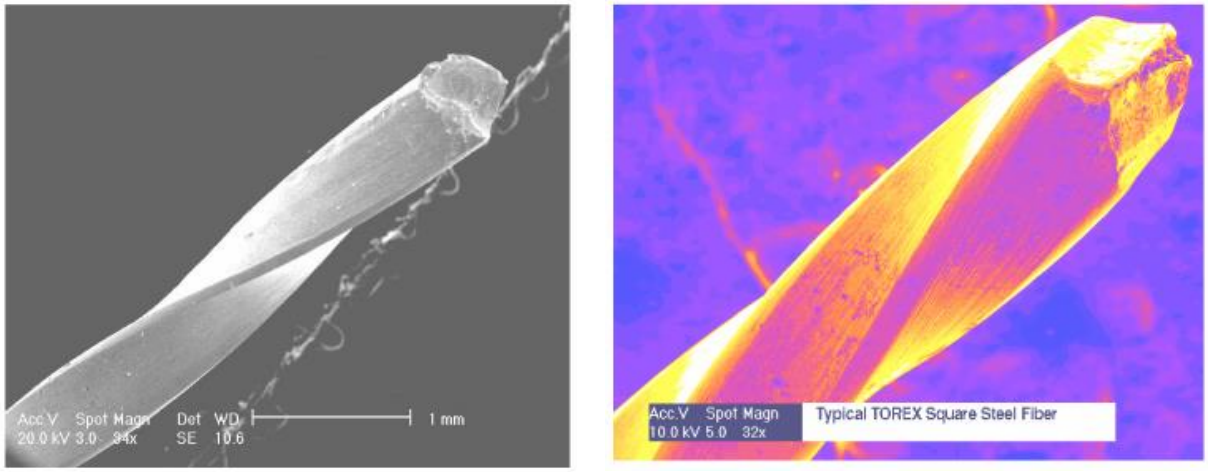


Figure 1.33. Exemple d'une fibre métallique TOREX [74].

Dans le même contexte, une étude récente a mis en évidence l'influence de sept géométries différentes de fibres synthétiques et métalliques (Figure 1.34) sur les propriétés dynamiques du béton. Les résultats issus de cette recherche ont démontré que les bétons renforcés par les fibres en forme spirale II (Figure 1.34 (g)) présentent la meilleure résistance aux charges de compression et aux chocs mécaniques [77].

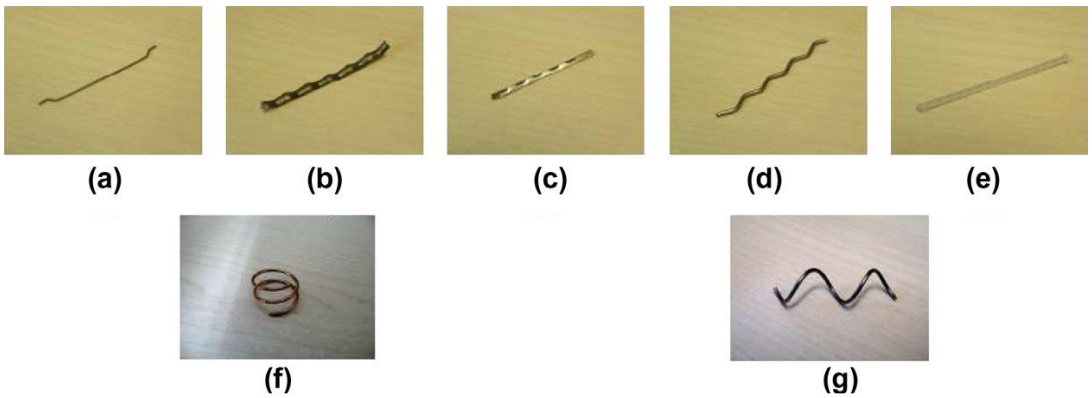


Figure 1.34. Différents types et formes de fibres utilisés [77].

Par ailleurs, d'autres études ont été consacrées à l'effet de la longueur des fibres sur les propriétés des bétons en utilisant des fibres métalliques longues de forme linéaire pour le renforcement d'un béton ultraperformant (UHPFRC), destiné à la construction de panneaux [78], [79]. Ces derniers ont montré une augmentation de la résistance à la flexion d'environ 26 % et une amélioration de 121 % de l'énergie de rupture en comparaison avec des panneaux fabriqués avec des fibres courtes [79]. Cette amélioration est expliquée par le fait qu'une longueur élevée des fibres permet d'augmenter la surface de liaison avec la matrice cimentaire. Cela conduit à une amélioration de l'adhérence entre les fibres et la pâte cimentaire et aboutit à un renforcement de la résistance d'arrachement des fibres [80].

Afin d'assurer une bonne résistance aux chargements statiques et dynamiques des bétons fibrés, la combinaison de plusieurs natures de fibres a été proposée dans la littérature. *Songa et al.* ont introduit 0,1 % de fibres polypropylènes dans un béton renforcé par des fibres métalliques et ont rapporté que cette combinaison permet non seulement d'améliorer la résistance à la compression, mais aussi d'améliorer la résistance du béton aux chocs en raison de la grande capacité de déformation des fibres polypropylènes [81].

La combinaison de deux fibres polypropylène de forme différente a été également recommandée afin de répondre à certains besoins techniques. *Hsie et al.* ont étudié la combinaison de deux formes (mono-filament rectiligne et multi-filament torsadée (Figure 1.35)) de fibres de même nature (polypropylène). Dans leur étude, les fibres rectilignes ont été ajoutées à 3,6 et à 9 kg/m^3 tandis que le dosage en fibres torsadées a été maintenu à 0,6 kg/m^3. Cette composition a permis d'améliorer les propriétés mécaniques du béton testé notamment sa résistance à la compression, à la traction et en flexion. En effet, les deux fibres travaillent

complémentairement. Les fibres multi-filament limitent le développement des fissurations primaires grâce à leur finesse et à leur facilité de dispersion dans le béton. Quant aux fibres mono-filaments, elles réagissent de la même façon que des fibres métalliques en raison de leur rigidité élevée [43]. Par conséquent, en termes des propriétés mécaniques et physiques, l'introduction d'un mélange de fibres de caractéristiques différentes est plus efficace que l'utilisation d'un seul type et cela semble être une bonne solution pour répondre à plusieurs besoins techniques en même temps.

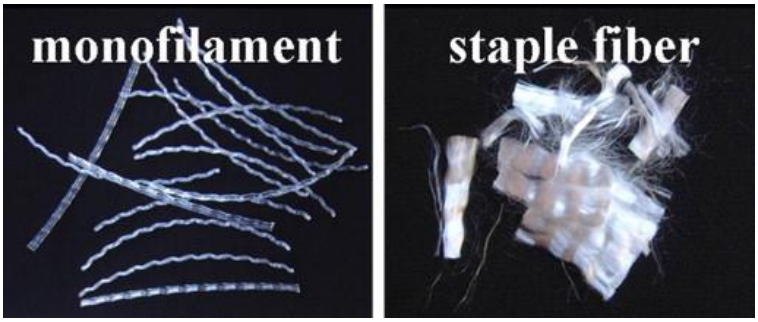


Figure 1.35. Fibre polypropylène de deux formes, mono-filament, multi-filament [43].

En ce qui concerne l'effet du dosage en fibres, les travaux réalisés par *Kakooei et al.* ont montré qu'un dosage de 1,5 kg/m^3 en fibres polypropylènes améliore la résistance du béton à la compression et permet d'assurer une bonne performance en matière de durabilité en réduisant la perméabilité, le retrait et l'expansion du béton [61]. Cependant, le dosage optimal des fibres dans le béton est fortement lié à trois critères principaux : les paramètres de formulation, la nature et la géométrie des fibres employées, le type de béton. C'est pour cette raison que les dosages proposés dans la littérature comme étant des dosages optimaux sont parfois très différents, ainsi que nous pouvons le constater au cours de cette synthèse bibliographique. En général, une étude de convenance doit être réalisée en caractérisant plusieurs mélanges de pourcentages en fibres différents afin de valider le dosage en fibres approprié. De plus, dans certains cas, l'amélioration d'une propriété du béton n'engendre pas forcément une amélioration des autres propriétés, notamment quand le dosage des fibres est élevé. À titre d'exemple, *Li et al.* ont recommandé une teneur en fibres de 9 kg/m^3 pour un renforcement d'un béton léger. Les résultats issus de ce travail ont montré une amélioration de la résistance à la traction et en flexion. Cependant, une chute de résistance à la compression a été constatée en raison de la mauvaise dispersion des fibres causée par la teneur élevée de ces dernières dans le béton [3].

Vu la variété de la géométrie des fibres employées dans le cadre de la présente thèse, et tenant compte de l'influence de la géométrie des fibres sur leur dosage optimal, plusieurs pourcentages en fibres ont été testés en se basant sur les fourchettes de dosages recommandés par le fabricant (Sika).

1.5.4. Effet de la dispersion et de l'orientation de la fibre

Les études antérieures effectuées dans la littérature sur les bétons fibrés présument que les fibres sont réparties d'une manière homogène à travers tout le volume du béton. Toutefois, les fibres sont influencées par la présence des granulats et le mouvement du béton frais au moment du malaxage et de la mise en place, et donc, la position finale des fibres ainsi que leur orientation dans le béton sont quasi aléatoires. Cela peut causer deux problèmes majeurs : obtenir un béton fibré dont les fibres sont mal dispersées et/ou mal orientées. Quand les fibres sont mal dispersées dans le béton, cela conduit à une perte de performances physiques et mécaniques de ce dernier et le béton fibré obtenu sera caractérisé par des zones plus fragiles que d'autres, ce qui affecte également la durabilité du béton en question. Pour pallier ce problème, la technique de surdosage en fibres est parfois adoptée afin d'assurer le bon remplissage des fibres dans le béton. Cependant, cette technique manque d'efficacité et elle ne permet pas de surmonter le problème de l'orientation. En effet, dans le cas où les fibres dans un béton sont mal orientées, autrement dit, si elles sont parallèles à la direction du chargement, le béton perd en résistance et l'ajout des fibres sera inutile. Pour cela, des techniques permettant la maîtrise de la dispersion et de l'orientation des fibres dans le béton ont fait l'objet de plusieurs recherches, étant donné que cette maîtrise permet de réduire le dosage en fibres utilisées en évitant la technique du surdosage et d'améliorer les performances des bétons aux état frais et durci [48]. Pour ce faire, des méthodes plus efficaces que celle du surdosage ont été proposées dans la littérature. À titre exemple, *Ferrara et Meda* ont utilisé la technique des rayons X couplée à l'analyse d'images afin de déterminer la position finale des fibres métalliques dans un échantillon de béton autoplaçant durci ; l'image obtenue par cette technique est présentée sur la Figure 1.36 [82]. En testant plusieurs modalités de coulage de béton, et en détectant la dispersion des fibres et leur orientation obtenues avec chaque modalité testée, une modalité appropriée peut être adoptée.

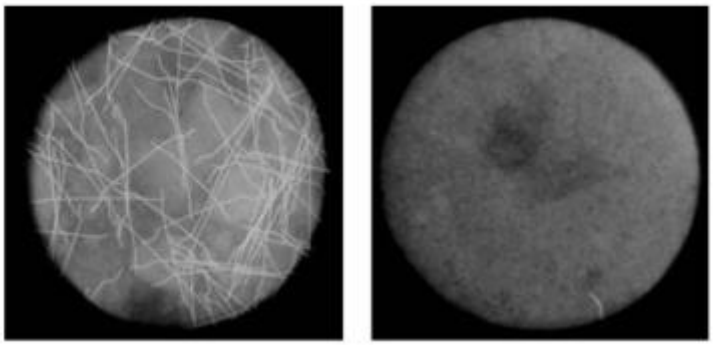


Figure 1.36. Image obtenue par la technique des rayons X pour déterminer l'orientation et la dispersion des fibres dans un béton autoplaçant [82].

Une autre technique non destructive dont le principe est similaire à celle de *Ferrara et Meda* a été proposée par *Lataste et al*. Cette technique consiste à réaliser des mesures de la résistivité électrique permettant d'identifier l'emplacement des fibres d'acier pour des échantillons en béton fibré confectionnés par différents modes de coulage. Ce processus d'analyse a été testé sur deux dalles qui ont été coulées avec deux modalités différentes. Les résultats issus de cette analyse sont illustrés dans la Figure 1.37; ils ont confirmé la capacité de la méthode de résistivité électrique à fournir des données de bonne précision sur l'orientation des fibres d'acier dans le béton [83].

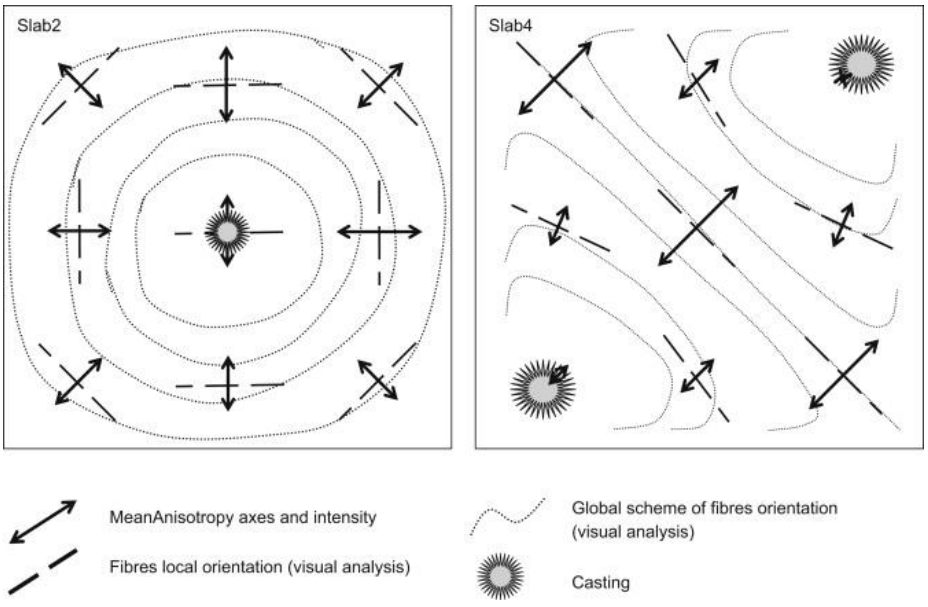


Figure 1.37. Synthèse de l'examen électrique et visuel de la dispersion des fibres selon les deux méthodes de coulage [83].

Dans le même contexte, *Boulekbache et al.* ont adopté une technique de caractérisation de l'orientation et de la dispersion des fibres à l'aide d'un fluide translucide (Carbopol 940). Leur méthode est basée sur le seuil de cisaillement qui est l'un des paramètres contrôlant la rhéologie des fluides Binghamien, y compris les bétons. Pour ce faire, deux types de ce fluide ont été utilisés avec des seuils de cisaillement différents (25 et 70Pa) [44]. Les observations préliminaires ont montré que l'orientation des fibres dans le fluide à un seuil de cisaillement égal à 25Pa est principalement perpendiculaire à la direction de l'écoulement dans le cas d'un remplissage centré (Figure 1.38 (a)). En revanche, dans le cas d'un écoulement en canal (remplissage à partir d'un côté du moule), l'orientation des fibres est perturbée par l'effet de confinement des parois latérales (Figure 1.39 (a)). Les résultats obtenus dans le cadre de cette étude ont montré également que l'orientation des fibres dans le fluide de 70Pa de seuil de cisaillement est aléatoire. De plus, une concentration des fibres dans le milieu (un effet balling-up) a été observée (Figure 1.38 Figure 1.39 (b)) [44].

Cette étude a permis de lever le voile sur l'effet du seuil de cisaillement du béton sur la dispersion et l'orientation des fibres, et de souligner l'importance de la caractérisation rhéologique des bétons fibrés.

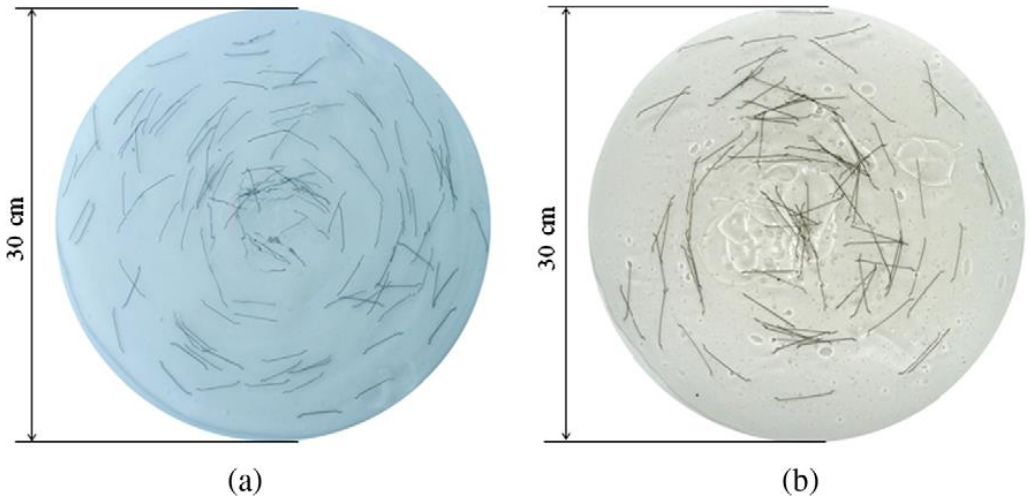


Figure 1.38. Orientation des fibres dans un Carpobole avec différents seuils de cisaillement (a) τ_0 = 25 Pa, (b) τ_0 = 70 Pa dans le cas d'un écoulement en canal [44].

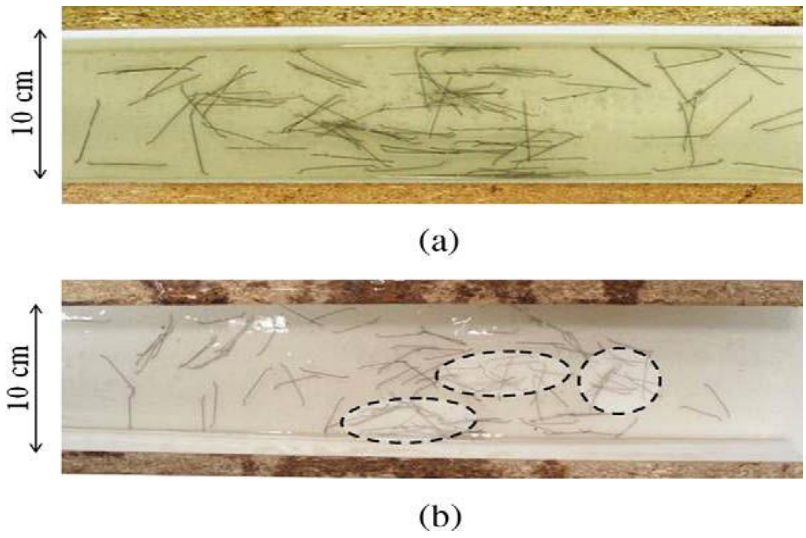


Figure 1.39. Orientation des fibres dans un Carpobole avec différents seuils de cisaillement (a) τ_0 = 25 Pa, (b) τ_0 = 70 Pa dans le cas d'un écoulement en surface libre [44].

À la lumière de ce qui précède, il a été montré que l'utilisation des fibres polypropylènes dans le béton permet d'améliorer certaines performances mécaniques de ce dernier, notamment sa ductilité et son comportement vis-à-vis de la propagation des micro et macro-fissurations. À cet effet, et en tenant compte de la disponibilité des fibres polypropylènes et de leur coût, relativement faible par rapport aux autres types de fibres, leur utilisation comme moyen de renforcement du béton est fortement recommandée. Toutefois, ces dernières décennies, l'aspect environnemental des bétons en général, et des bétons fibrés en particulier, est devenu un enjeu majeur dans le secteur de la construction et du BTP et l'utilisation des bétons fibrés devient de plus en plus critiquée sur le plan environnemental. C'est pourquoi des solutions innovantes ont été proposées dans le but de limiter l'impact environnemental des bétons. Parmi ces solutions, le béton de granulats recyclés renforcé par des fibres polypropylènes semble être une bonne alternative au béton conventionnel. Afin de mieux comprendre les bétons de granulats recyclés et leur renforcement par des fibres polypropylènes, une partie entière de ce travail leur est consacrée.

1.6. Béton à base de granulats recyclés

L'utilisation massive et croissante du béton dans le monde a provoqué un grand déséquilibre environnemental à cause des émissions de gaz à effet de serre et des déchets provenant du secteur du BTP, notamment les déchets de démolition et déconstruction. Selon le ministère de

la Transition écologique et solidaire, la quantité des déchets du BTP en France s'est élevée à 227,5 millions de tonnes en 2014. C'est pourquoi des mesures ont été prises dans le monde entier afin de gérer ce problème et le recyclage de ces déchets a été fortement recommandé. En effet, l'une des solutions proposées dans ce contexte consiste à valoriser les déchets du BTP en général, et plus particulièrement ceux issus de la démolition des anciennes structures, en tant que granulats recyclés à utiliser dans la formulation des bétons. Ces derniers sont obtenus via un processus de fabrication similaire à celui des granulats naturels. Cependant, un traitement spécifique, avant et au cours du processus de production, est nécessaire pour éliminer les impuretés telles que les déchets de bois, de plastique et d'acier [84]. Les granulats issus du recyclage possèdent des propriétés physico-chimiques et mécaniques très différentes de celles des granulats naturels. La présence de l'ancien mortier qui enrobe les grains naturels est la caractéristique la plus importante des granulats recyclés [85], et leur qualité dépend essentiellement du taux de cet ancien mortier. L'origine de la formulation de base du béton initial est aussi un autre facteur qui affecte les propriétés physico-chimiques des granulats recyclés. Il a été rapporté par *Juan et Gutiérez* que la masse volumique des granulats recyclés diminue proportionnellement à l'augmentation de la quantité de l'ancien mortier attaché à la surface des granulats [86].

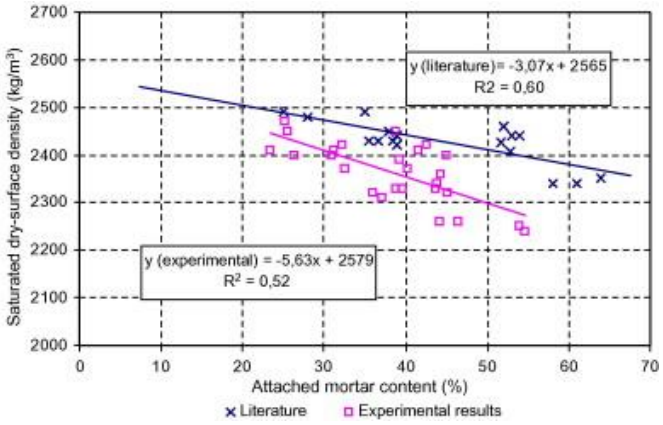


Figure 1.40. La capacité d'absorption d'eau des GR en fonction du mortier attaché [86].

La quantité de mortier attaché et la granulométrie influent également sur la capacité d'absorption des granulats. *Lopez-Gayarre et coll* ont montré que le taux d'absorption des granulats recyclés augmente avec l'augmentation de la quantité de mortier résiduel (Figure 1.40) [87]. De plus, le taux d'absorption des granulats recyclés dépend aussi de la nature du mortier résiduel. À titre d'exemple, il a été rapporté que la présence de particules de gypse dans

le mortier résiduel induit une augmentation considérable du taux d'absorption des granulats recyclés [88]. En ce qui concerne l'effet de la granulométrie des granulats recyclés sur leur taux d'absorption, il est important de noter que cette dernière diminue proportionnellement avec la taille des granulats [86].

Vu sa faible résistance mécanique en comparaison du granulat naturel, le mortier résiduel participe à la dégradation des performances mécaniques des granulats recyclés. Afin d'évaluer la qualité des granulats recyclés en matière de performance mécanique, la résistance à la fragmentation par chocs et à l'usure est souvent caractérisée par l'essai de Los Angeles. Cet essai permet de mesurer la quantité d'éléments fins produite par fragmentation en soumettant le matériau à des chocs de boulets à l'intérieur d'un cylindre en rotation [89]. D'après l'étude menée par *Juan et P. A Gutiérrez,* il a été rapporté que le coefficient de Los Angeles augmente en augmentant la quantité de mortier résiduel attaché aux granulats (Figure 1.41) [86].

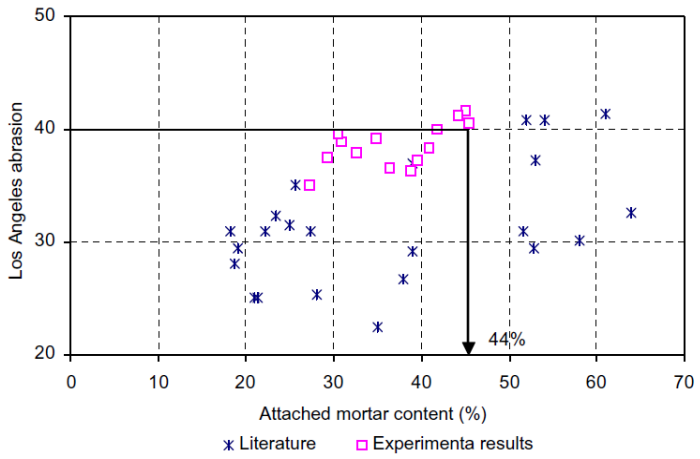


Figure 1.41. Évolution du coefficient LA en fonction de la quantité de vieux mortier attaché [86].

Bien que le remplacement total des granulats naturels par des granulats recyclés pour la formulation de béton ne soit pas souvent recommandé, à cause des faibles performances des granulats recyclés, toutes les études menées sur leur valorisation dans la formulation des nouveaux bétons ont montré que le remplacement partiel, avec des taux de substitution modérés, peut-être effectué en toute sécurité, à condition de respecter certaines recommandations spécifiques. Les propriétés des bétons recyclés ainsi que les techniques liées à leur renforcement par des fibres polypropylènes sont présentées dans les paragraphes qui suivent.

1.7. Impacts du remplacement des granulats naturels par des granulats recyclés

Étant donné la différence des propriétés des granulats recyclés par rapport aux granulats naturels, leur utilisation dans le béton implique un comportement, aux états frais et durci, différent de celui adopté pour un béton à base de granulats naturels. Afin de mieux maîtriser ce comportement, de nombreuses recherches ont été consacrées à l'étude de l'effet du taux de remplacement des granulats naturels par des recyclés sur les propriétés du béton à jeune âge et à long terme.

1.7.1. Propriétés à l'état frais

Comme cela a été mentionné précédemment, les granulats recyclés sont connus pour leur taux d'absorption élevé dû à la présence de vieux mortier. Cette capacité d'absorption tout à fait élevée implique systématiquement une augmentation de la demande en eau de gâchage nécessaire pour la formulation du béton recyclé. Les études menées dans la littérature ont confirmé que les bétons fabriqués par des granulats recyclés nécessitent une quantité d'eau supplémentaire en comparaison avec les bétons de granulats naturels. Pour atteindre un affaissement équivalant à celui d'un béton à base des granulats naturels, *Ravindrarajah & Tam* ont montré qu'une augmentation de 8 % de la quantité d'eau totale est nécessaire dans le cas d'un béton recyclé [90]. D'autres travaux ont évalué l'ouvrabilité et la maniabilité du béton recyclé sans l'addition de cette quantité d'eau supplémentaire. Les résultats obtenus ont révélé qu'un béton fabriqué par 50 % de granulats recyclés est moins maniable qu'un béton fabriqué entièrement par des granulats naturels [91]. Les travaux de *Topçu et Sengel* ont confirmé ce constat et une chute considérable de l'ouvrabilité du béton a été enregistrée au-delà de 50 % de substitution, comme le montre la Figure 1.42 [92]. Cette perte de maniabilité et d'ouvrabilité a été expliquée par la porosité élevée des granulats recyclés et leur grande capacité d'absorption [91].

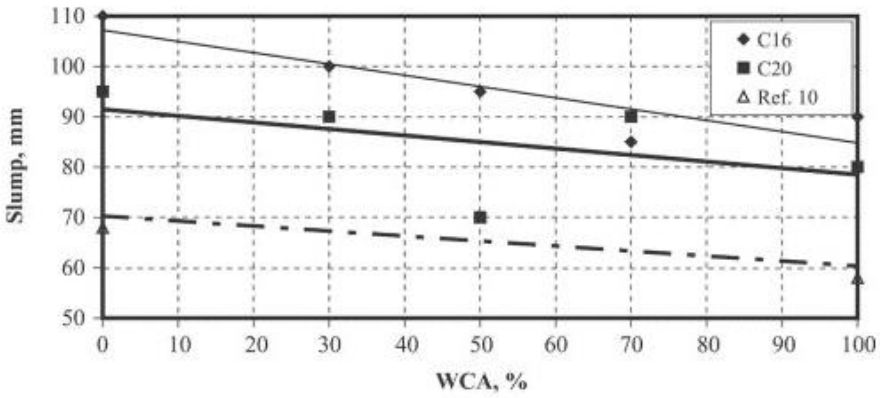


Figure 1.42. Évolution de l'affaissement en fonction du taux de substitution des GR [92].

Par ailleurs, *Poon et al.* ont étudié l'évolution, au cours du temps, de l'ouvrabilité d'un béton fabriqué par des gravillons recyclés. Selon la Figure 1.43, il apparaît que la perte d'ouvrabilité n'est pas significative durant les 20 premières minutes après le malaxage. En revanche, au-delà de 20 minutes, cette perte devient plus accentuée et elle diminue fortement avec l'augmentation du taux d'incorporation des granulats recyclés [93].

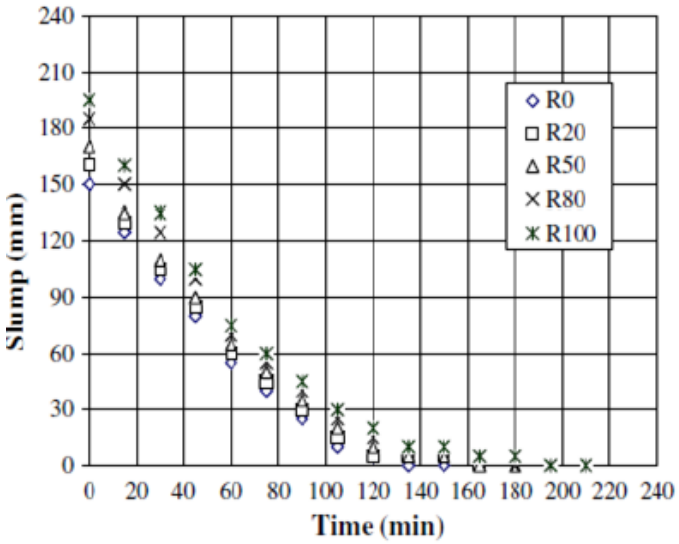


Figure 1.43. Évolution, au cours du temps, de l'affaissement du béton à base de gravier recyclé [93]

En ce qui concerne la teneur en air occlus des bétons recyclés, *Topçu* a rapporté que cette dernière est légèrement plus élevée (environ 0,6 %) en comparaison avec celle du béton naturel. Cela est dû à la rugosité et à la forme géométrique des granulats recyclés qui rendent difficile l'évacuation des bulles formées au sein du béton lors de la vibration, ce qui implique une

augmentation de la teneur en air occlus [94]. Contrairement à l'air occlus, la masse volumique du béton recyclé à l'état frais est inférieure à celle du béton naturel. En effet, le béton recyclé possède une masse volumique aux alentours de 2150 kg/m^3, tandis que la masse volumique à l'ordre de 2400 kg/m^3. Cette différence de densité est due au fait que la masse volumique des granulats recyclés est largement inférieure à celle des granulats naturels [95]. D'autres travaux récents ont été consacrés à l'étude des paramètres rhéologiques des bétons recyclés et ont rapporté que l'introduction de granulats recyclés dans le béton affecte négativement ces paramètres rhéologiques. Selon *Faleschini et al.*, une augmentation significative du seuil de cisaillement et de la viscosité plastique du béton a été constatée en augmentant le taux de granulats recyclés [96].

En général, les études menées dans la littérature montrent, d'une part, que les propriétés du béton à base de granulats recyclés à l'état frais dépend fortement de la nature et de la granulométrie des granulats recyclés [97]–[99]. D'autre part, pour tout type de granulats recyclés, la rhéologie du béton est négativement affectée, notamment avec un taux élevé de granulats recyclés. Pour pallier cela, et afin d'optimiser la performance du béton recyclé à l'état frais, de nombreuses techniques ont été proposées dans la littérature. Parmi ces techniques, l'introduction d'un adjuvant superplastifiant ou bien l'utilisation de granulats recyclés à l'état saturé sont les plus couramment recommandées.

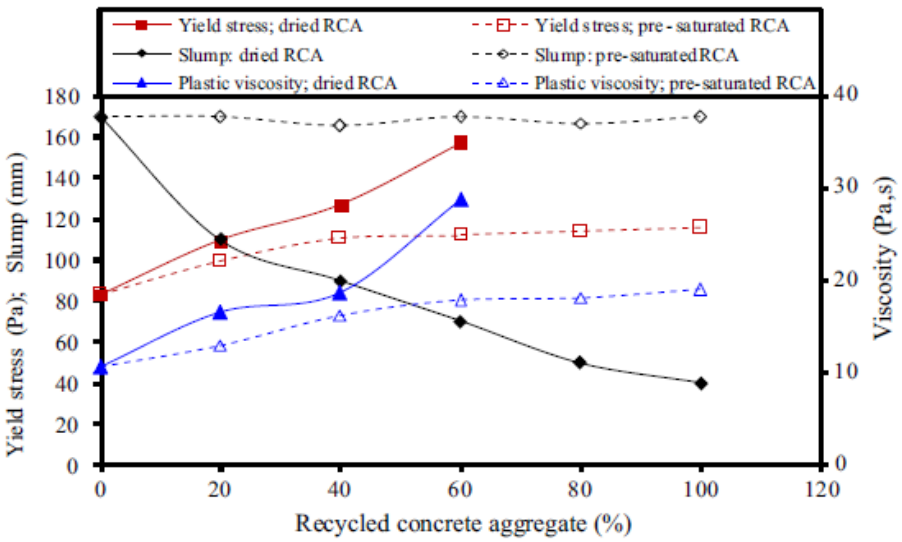


Figure 1.44. Évolution de l'affaissement, du seuil de cisaillement et de la viscosité plastique en fonction du taux de GR [100].

Amer et al. ont étudié l'effet de l'introduction de granulats recyclés saturés sur les propriétés rhéologiques des bétons en remplaçant 20 à 60 % des granulats naturels par des granulats issus du recyclage. Pour ce faire, le comportement rhéologique des bétons recyclés, dont les granulats recyclés ont été préalablement saturés, a été comparé avec celui des bétons recyclés à base de granulats introduits à l'état sec. Les résultats obtenus sont illustrés sur la Figure 1.44, où une forte diminution de l'affaissement a été constatée lorsque les granulats recyclés ont été utilisés à l'état sec. De plus, l'incorporation de granulats recyclés à l'état sec a induit une augmentation de 30 à 90 % du seuil de cisaillement et de 50 à 170 % de la viscosité plastique[100]. Cependant, l'utilisation de granulats recyclés à l'état saturé a permis de maintenir approximativement le même affaissement du béton avec une légère augmentation des paramètres rhéologiques.

1.7.2. Propriétés à l'état durci

Vu que les granulats recyclés sont moins performants que les granulats naturels, il est tout à fait logique que l'incorporation de granulats recyclés en grande quantité conduise à une dégradation de la qualité du béton concernant ses propriétés à l'état durci. En revanche, les recherches antérieures ont montré que l'introduction de granulats recyclés avec des taux de substitution optimisés, n'entraîne pas nécessairement une dégradation totale des performances des bétons, et, dans certains cas, une amélioration des résistances mécaniques a été enregistrée. En effet, le type et l'intensité de la dégradation dépendent de la qualité des granulats recyclés (propriétés physiques et mécaniques), de leur dosage dans la formulation et de la modalité de leur introduction (taux de saturation des granulats, procédure de malaxage…)[101]. De plus, la sensibilité des caractéristiques du béton aux différents paramètres et conditions de formulation n'est pas toujours la même, et elle diffère d'une caractéristique à une autre. Pour ces raisons, les conclusions rapportées dans la littérature sont toujours relatives et le choix d'un dosage en granulats recyclés dépend essentiellement du cahier des charges et des propriétés souhaitées.

En ce qui concerne l'effet des granulats recyclés sur les propriétés physiques des bétons, les recherches antérieures ont montré que le béton fabriqué par des granulats recyclés possède une porosité plus élevée par rapport au béton à base de granulats naturels. Ce constat a été expliqué par la porosité élevée du mortier attaché à la surface des granulats recyclés [95], [102], et il a été confirmé par des observations microstructurales, où le béton recyclé a montré une microstructure plus poreuse. Cette porosité est directement liée à la porosité des granulats recyclés. *Wardeh et al.* ont étudié la relation entre les propriétés des granulats recyclés et celles

des bétons recyclés et ils ont montré que la porosité à l'eau des bétons recyclés augmente linéairement avec l'augmentation du dosage en granulats recyclés (Figure 1.45)[85].

Une porosité élevée conduit souvent à une augmentation de la perméabilité. Ce constat a été confirmé dans le cas des bétons recyclés où il a été rapporté que le béton recyclé est deux à cinq fois plus perméable que le béton naturel [103]. Par ailleurs, d'autres travaux ont signalé que le rapport E/C du béton recyclé peut avoir une influence sur sa perméabilité ; une diminution de 15 % de la perméabilité a été obtenue dans le cas des bétons avec un E/C égal à 0,4 % et un faible taux de granulats recyclés (Figure 1.46). Cependant, en augmentant le rapport E/C, une augmentation nette de la perméabilité a été constatée [104]. L'augmentation de la perméabilité en fonction du taux de substitution des granulats recyclés et du rapport E/C élevé est expliquée par la forte absorption de ces granulats qui affecte la quantité d'eau nécessaire pour l'hydratation de ciment. Par conséquent, la présence des granulats recyclés perturbe le processus d'hydratation du ciment et crée plus de vide dans la matrice, ce qui augmente la perméabilité des bétons [105].

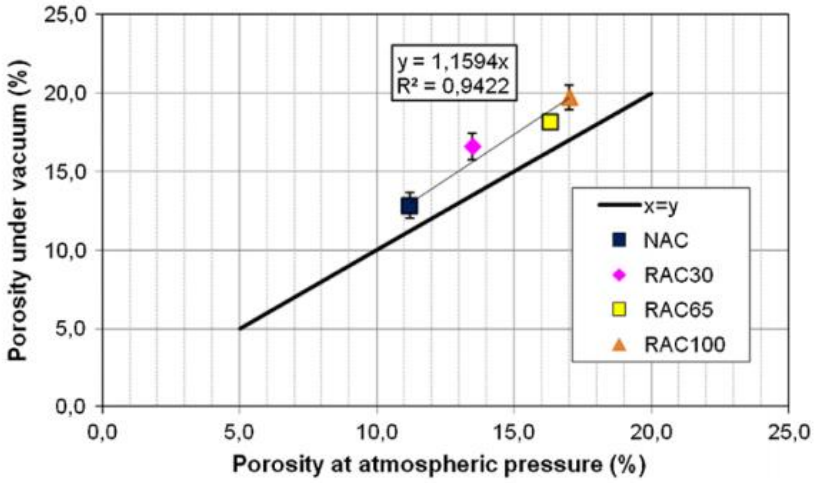


Figure 1.45. Influence du taux de substitution des GR sur la porosité du béton [85].

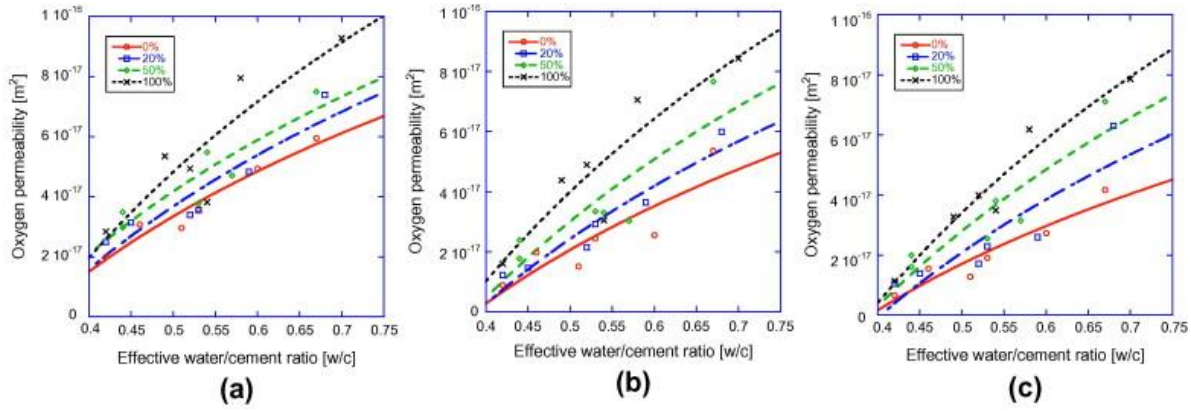


Figure 1.46. Évolution de la perméabilité en fonction du rapport E/C pour des mélanges de béton fabriqués avec plusieurs substitutions des GR à 28jours (a), 180 jours (b) et 365 jours (c) [104].

Une forte dégradation des propriétés physiques du béton affecte négativement ses propriétés mécaniques. *Kou et al.* ont rapporté que l'utilisation de granulats recyclés avec des dosages de 20, 50 et 100 % induit une perte de résistance à la compression à 28 jours respectivement de 6,6, 16,5 et 37,1 % [106]. Ce résultat est en cohérence avec la majorité des travaux publiés dans la littérature où il a été confirmé que l'introduction de granulats recyclés à un pourcentage supérieur à 30 % induit une perte de la résistance à la compression [62], [85], [92], [93], [107], [108]. Cette perte de résistance est très sévère quand le sable recyclé est introduit (Figure 1.47). Cela est dû principalement à la demande en eau très élevée des sables recyclés, d'une part, et, d'autre part, à la rugosité de ce type de granulats qui induit une diminution de la compacité maximale du squelette granulaire.

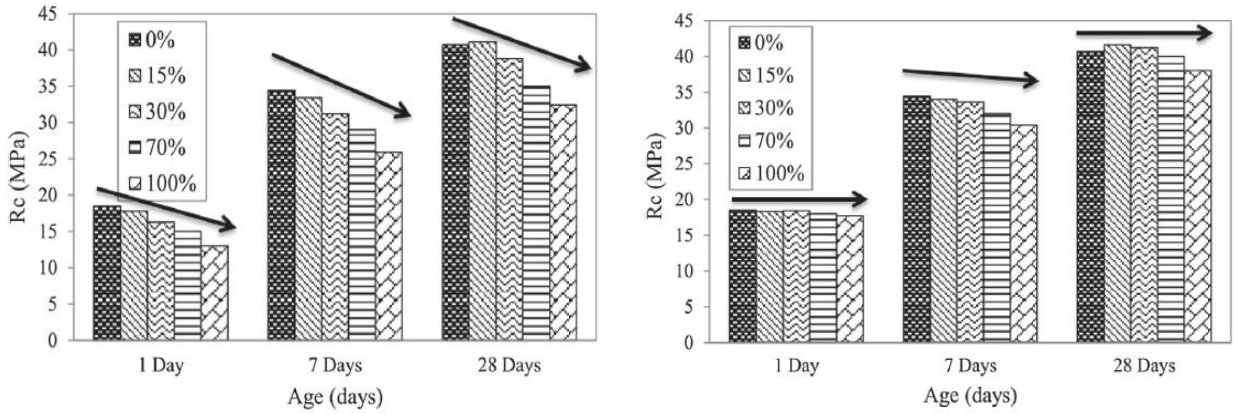


Figure 1.47. Évolution de la résistance à la compression du béton fabriqué avec du sable recyclé (à droite) et des gravillons recyclés (à gauche) [107].

La même tendance de dégradation a été rapportée pour la résistance à la traction et le module d'élasticité des bétons recyclés où il a été révélé que la résistance du béton à la traction avec l'augmentation du taux de substitution des granulats recyclés. Une étude de *Rao et al.* a montré une réduction de 15 à 20 % de la résistance à la traction par fendage avec un remplacement entier des gravillons naturels par des recyclés [109].

Quant au module d'élasticité des bétons recyclés, les études antérieures ont rapporté que le module élastique faible et la porosité élevée des granulats recyclés affectent directement la rigidité du béton recyclé et participent à sa diminution [90], [110]. *Tahar et al.* ont estimé une diminution de 40 % pour les bétons fabriqués par du sable recyclé et de 20 % pour les bétons à base de gravillons recyclés (Figure 1.48) [111].

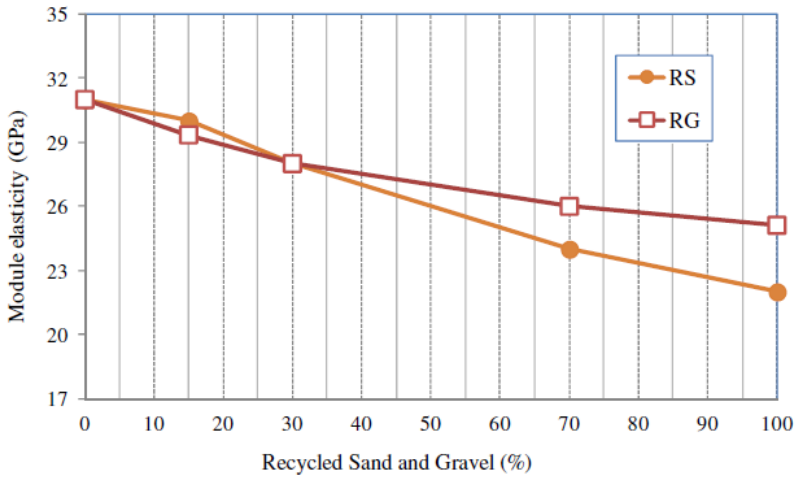


Figure 1.48. Évolution du module d'élasticité en fonction du pourcentage de granulats recyclés [111].

Le retrait fait également partie des paramètres qui peuvent être fortement affectés par l'introduction de granulats recyclés. Les études menées sur l'évolution du retrait des bétons recyclés ont révélé que le retrait de séchage de ces derniers augmente proportionnellement avec le pourcentage de granulats recyclés dans le béton [112], [113]. Cette augmentation est plus prononcée au-delà de 50 % de granulats recyclés, en raison, encore une fois, de la forte demande en eau des granulats recyclés [114]. En effet, la quantité d'eau supplémentaire, ajoutée pour assurer une bonne ouvrabilité, engendre une augmentation de l'eau libre qui participe, après évaporation, à l'augmentation du retrait de séchage.

Afin de surmonter le problème de la dégradation des propriétés des bétons recyclés, certaines techniques ont été proposées telles que l'augmentation du volume de la pâte cimentaire ou bien l'utilisation d'additifs de différentes natures (les fumées de silice, les cendres volantes) [115], [116]. Bien que l'ajout des additifs, qui sont souvent des sous-produits industriels, soit une très bonne solution à l'échelle environnementale, cette technique ne permet pas d'améliorer considérablement les performances des bétons recyclés, notamment quand il s'agit des bétons de structure. En effet, ces derniers sont soumis à des critères de qualité tellement exigeants que l'amélioration apportée par l'ajout d'additifs sera insuffisante pour qu'ils méritent d'être adoptés en tant que bétons de structure. À ce niveau, l'augmentation du dosage en ciment a montré son efficacité lorsqu'elle permet d'obtenir des bétons recyclés avec des propriétés physiques et mécaniques comparables à celles des bétons naturels. L'inconvénient majeur de cette technique est que le dosage élevé en ciment conduit à l'augmentation du coût du béton recyclé et induit également l'augmentation de son bilan carbone. Afin de répondre à cette problématique, l'ajout de fibres a été proposé pour le renforcement des bétons recyclés.

1.8. Propriétés du béton fibré à base de granulats recyclés

Selon la littérature, l'utilisation de granulats recyclés dans le béton induit une dégradation de ses performances. Face à cette problématique, le renforcement des bétons recyclés par un dosage approprié en fibres a été proposé afin d'améliorer certaines de ses propriétés. À titre exemple, une utilisation de 0,15 % de fibres métalliques dans un béton recyclé a permis d'atteindre une résistance à la flexion similaire à celle d'un béton naturel [117]. D'autres types de fibres ont été également utilisées, telles que les fibres de basalte et les fibres polypropylènes. Ces études ont révélé une amélioration des performances des bétons recyclés, notamment leur résistance et leur durabilité [112], [118]. Cette amélioration dépend, en effet, du dosage en fibres adopté ; il a été montré qu'une teneur en fibres polypropylènes de 0,5 % a permis d'augmenter la résistance des bétons recyclés à la compression. Toutefois, l'augmentation du dosage en fibres a induit une diminution de la résistance, comme le montre la Figure 1.49 [8]. En ce qui concerne l'effet des granulats recyclés sur la résistance à la compression, aucun effet significatif n'a été observé et les résistances des bétons recyclés obtenues étaient comparables à celles du béton naturel, ce qui est probablement dû à la bonne qualité des granulats recyclés utilisés.

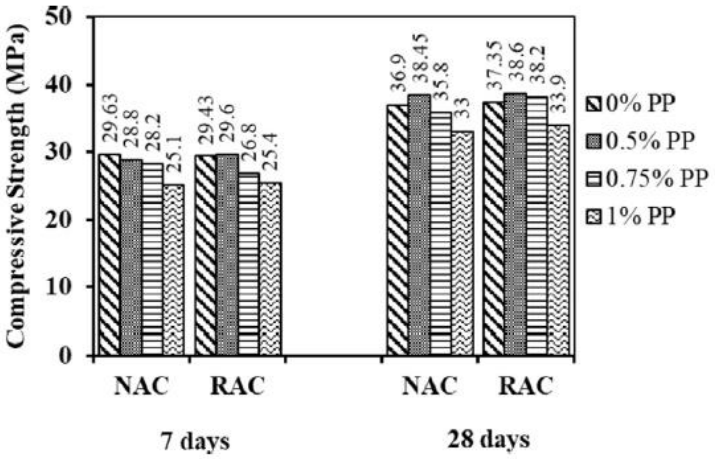


Figure 1.49. Évolution de la résistance à la compression à 7 j et 28 j pour un béton fibré naturel (NAC) et recyclé (RAC) [8] .

Contrairement à l'étude précédente, *Akça et al.* ont rapporté que la résistance du béton à la compression est passée de 55MPa à environ 32MPa en remplaçant 55 % des granulats naturels par des granulats recyclés (série A). Toutefois, l'ajout de 0,5 % de fibres polypropylènes dans ce mélange a permis d'augmenter légèrement sa résistance à la compression (R12-B 55%GR) [7]. L'amélioration de la résistance des bétons recyclés à la compression a été expliquée par la capacité des fibres polypropylènes à limiter la propagation des fissurations dans le béton.

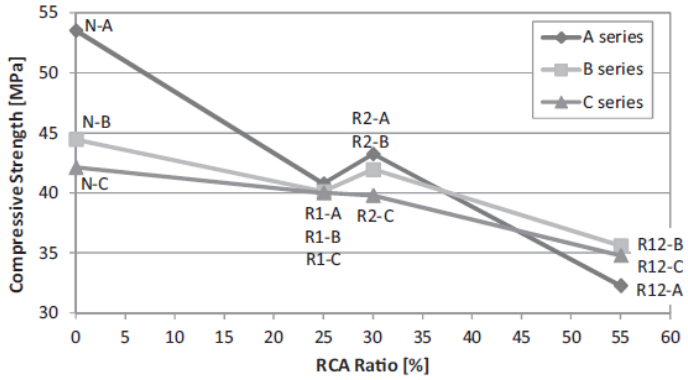
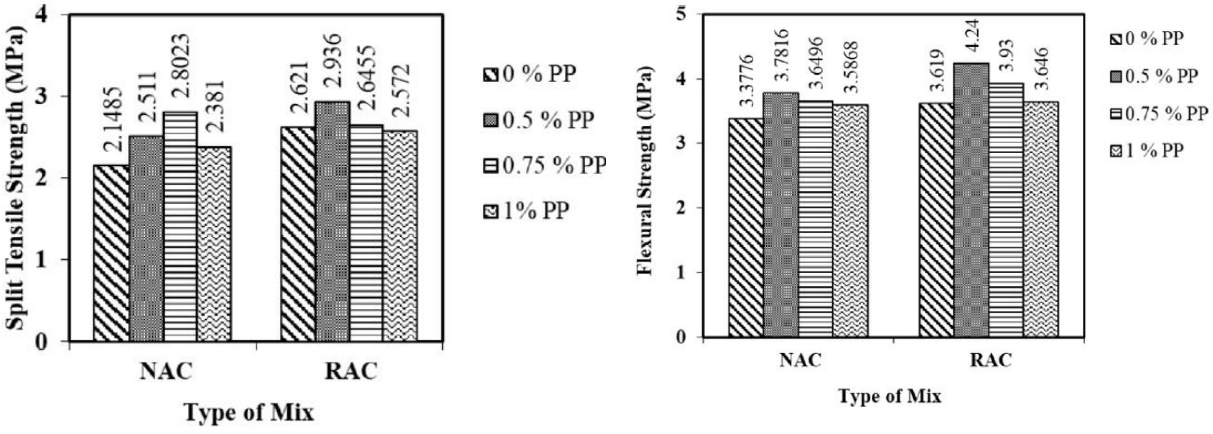


Figure 1.50. Évolution de la résistance à la compression en fonction de la substitution des GR pour un béton non fibré (série A), avec 0,5 % de fibres (série B) et 1 % de fibres (Série C) [7].

À l'instar de la résistance à la compression, la résistance à la traction augmente également avec l'introduction de fibres polypropylènes. Cette augmentation est de 30 % pour les bétons naturels et de 12 % pour les bétons recyclés (Figure 1.51). La même tendance a été rapportée pour la résistance à la flexion. En effet, pour le même pourcentage de fibres, la résistance à la flexion

augmente de 11,96 % dans le cas d'un béton naturel et d'environ 17 % pour les bétons recyclés [8]. En effet, face à des forces de traction, les fibres polypropylènes réagissent comme un pont et transmettent la charge de manière uniforme dans la matrice du béton. Pour cette raison, leur introduction à un dosage approprié permet de limiter la fissuration au sein de la matrice cimentaire et améliore la résistance du béton. En revanche, si la mise en place du béton fibré se fait avec un serrage insuffisant (faible vibration), et compte tenu de la viscosité élevée des bétons recyclés, la présence de fibres peut conduire à une augmentation de la porosité, en raison de la mauvaise adhérence entre la fibre et la pâte de ciment qui induit une zone de transition interfaciale plus poreuse (Figure 1.52). Ce phénomène devient plus prononcé quand le dosage en fibres est élevé et, pour cette raison, le surdosage en fibres doit être évité [8].



(a) **(b)**

Figure 1.51. Évolution de la résistance à la traction (a) et à la flexion (b) des bétons naturels (NAC) et recyclés (RAC) [8].

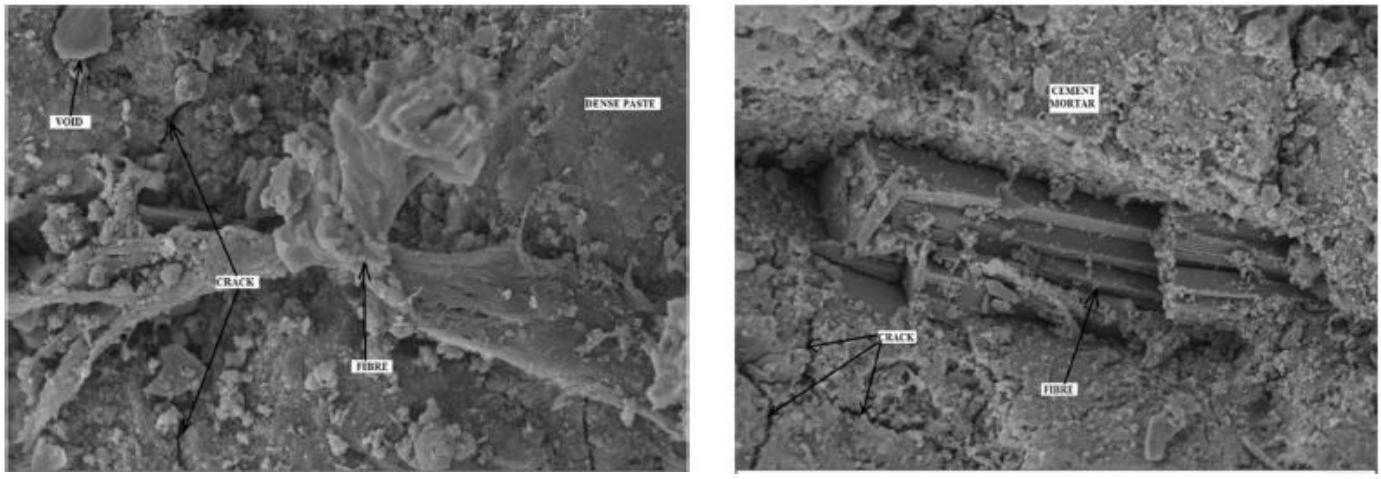


Figure 1.52. Image MEB du béton fibré fabriqué avec des granulats recyclés [8].

1.9. Conclusions et objectifs

À travers ce chapitre, un état de l'art sur le béton fibré a été présenté avec une attention particulière portée aux bétons renforcés par les fibres polypropylènes. Cette synthèse bibliographique peut être résumée en trois parties principales.

Dans la première partie, une brève description des bétons fibrés ainsi qu'une présentation de leurs différentes applications ont été exposées en montrant leur avantage sur le plan technique. Cela a permis de mettre en évidence l'intérêt croissant du secteur du BTP pour le développement des bétons fibrés dont l'utilisation ne cesse d'augmenter à travers le monde entier. Ensuite, les fibres les plus couramment utilisées pour la formulation des bétons ont été présentées, avec une mise en évidence systématique des avantages et des inconvénients de chaque type. Parmi ces différents types de fibres utilisées pour le renforcement des bétons, il a été montré que les fibres polypropènes sont un choix idéal vu leurs avantages techniques, d'une part, et leur faible impact environnemental en comparaison avec les autres types de fibres, d'autre part. La mise en place des bétons fibrés et les différentes techniques liées à leur utilisation ont été également abordées et l'accent a été mis sur l'importance de la bonne distribution et de la bonne orientation des fibres dans les propriétés d'écoulement des bétons fibrés.

La deuxième partie de cette recherche bibliographique a été consacrée aux bétons renforcés par les fibres polypropylènes. Les propriétés de ce type de béton ont été présentées dans cette partie avec un exposé détaillé de l'effet de la géométrie, de la longueur et du dosage en fibres sur les performances des bétons fibrés aux états frais et durci. Les différents travaux de recherche publiés ont rapporté l'efficacité des fibres polypropylènes dans l'amélioration des performances mécaniques et physiques du béton ; celles-ci limitent la propagation des fissures dans le béton et le retrait plastique. En revanche, il a été montré que l'utilisation du dosage approprié en fibres est un facteur clé quant à leur efficacité, vu la grande sensibilité des propriétés des bétons aux différentes caractéristiques des fibres. De plus, bien que l'effet des fibres polypropylènes sur les propriétés des bétons à l'état durci ait été abordé par plusieurs recherches publiées, un manque de recherches concernant la rhéologie et tribologie des bétons fibrés a été constaté. En effet, la majorité des travaux publiés dans la littérature se limitent à l'essai du cône d'Abrams pour l'évaluation de l'ouvrabilité des bétons fibrés tandis que les caractérisations rhéologiques et tribologiques sont souvent ignorées. Cela a permis de rappeler la nécessité de continuer les

recherches sur ces nouveaux bétons afin de mieux maîtriser les propriétés des bétons fibrés aux états frais et durci.

Dans la troisième partie de cette synthèse, le contexte général du recyclage des déchets du BTP a été abordé et l'accent a été mis sur l'intérêt environnemental de la valorisation des granulats recyclés dans la formulation des bétons. Dans ce contexte, il a été constaté que le renforcement des bétons recyclés par les fibres polypropylènes semble être une bonne solution afin de surmonter la dégradation des performances induite par l'introduction de granulats recyclés. Cependant, même si les premiers résultats publiés dans la littérature sont prometteurs, un manque de recherches sur ce sujet a été constaté, notamment lorsqu'il s'agit des propriétés rhéologiques et tribologiques. Ces dernières sont, en effet, des données incontournables vu les différentes méthodes de coulage et de pompage employées in situ où une maîtrise de la rhéologie et de la tribologie du béton est primordiale.

À la lumière de cet état de l'art, il nous a semblé important d'effectuer une étude complète sur les propriétés d'écoulement et de pompage du béton recyclé renforcé par des fibres polypropylènes. Cette étude porte également sur ses propriétés physiques et mécaniques en tenant compte de la géométrie des fibres introduites. Une attention particulière a également été accordée aux modalités expérimentales de l'introduction des granulats recyclés.

CHAPITRE 2

Matériaux et méthodologie expérimentale

2. CHAPITRE 2 Matériaux et méthodologie expérimentale 77

2.1. Objectif 79

2.2. Caractéristiques des matériaux utilisés 79

2.2.1. Le ciment 79

2.2.2. Les granulats 80

2.2.3. Les fibres polypropylènes 84

2.2.4. L'adjuvant 85

2.2.5. L'eau de gâchage 86

2.3. Méthode de caractérisation du béton 86

2.3.1. Essais de caractérisation à l'état frais 86

2.3.2. Essais de caractérisation à l'état durci 98

2.4. Méthodologie expérimentale 107

2.1. Objectif

Dans ce chapitre, nous nous intéressons à la présentation de la démarche expérimentale suivie durant ce travail de thèse. Les matériaux utilisés dans le cadre de cette étude sont d'abord présentés avec la justification de leur utilité ainsi que leurs caractéristiques et leurs différentes propriétés. Ensuite sont détaillées les méthodes de caractérisation effectuées durant cette étude. À la fin du chapitre, une partie est consacrée à l'exposition des différents mélanges de béton testés dans le cadre de cette étude (sans et avec fibres/avec granulats naturels et recyclés).

2.2. Caractéristiques des matériaux utilisés

2.2.1. Le ciment

Le ciment employé dans le cadre de cette étude est un ciment Portland du type **CEM I 52,5 N CE CP2 NF**, fabriqué par EQIOM en France. Ce ciment est caractérisé par une densité de 3,1 et une surface spécifique de 0,43 m²/g. Les principales propriétés chimiques et minéralogiques de ce ciment sont rassemblées dans le Tableau 2.1. De plus, des analyses, microstructurale et chimique, ont été réalisées afin de mieux caractériser ce ciment. Comme cela est indiqué sur l'image obtenue à l'aide du microscope électronique à balayage (MEB) (Figure 2.1), les particules de ce ciment ont des formes différentes. En ce qui concerne l'analyse chimique, nous constatons que ce ciment possède une quantité considérable de calcium (CaO), ce qui confirme les données tirées de la fiche technique et qui sont présentées dans le Tableau 2.1.

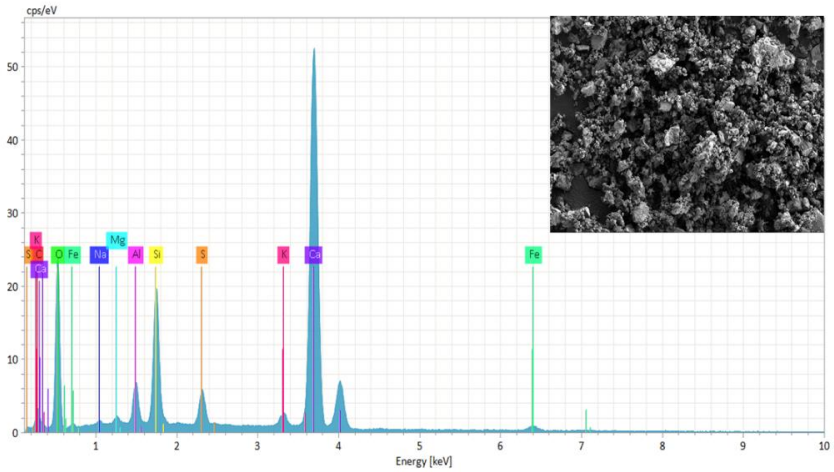


Figure 2.1. Analyse chimique et microstructurale du ciment utilisé.

Tableau 2.1. Composition chimique et minéralogique de CEM I 52,5 N.

Composition chimique		**Composition minéralogique**	
Élément	**Dosage (%)**	**Élément**	**Dosage (%)**
PAF	1,4	C3A	8,5
INS	0,4	C3S	61,8
SiO_2	20	C4AF	10,7
Al_2O_3	5,1	C2S	19
Fe_2O_3	3,2		
CaO	64,5		
MgO	0,8		
SO_3	3,2		
K20	0,82		
Na_2O	0,23		
S--	0,01		
Cl-	0,06		
CO_2	1		
CaO Libre	2		
Na_2O *éq*	0,77		

2.2.2. Les granulats

Quatre types de granulats naturels et recyclés ont été utilisés pour l'élaboration des bétons étudiés (Tableau 2.2). Les granulats naturels se composent d'un sable naturel et de gravillons concassés, tandis que les granulats recyclés ont été utilisés en deux coupures de gravillons.

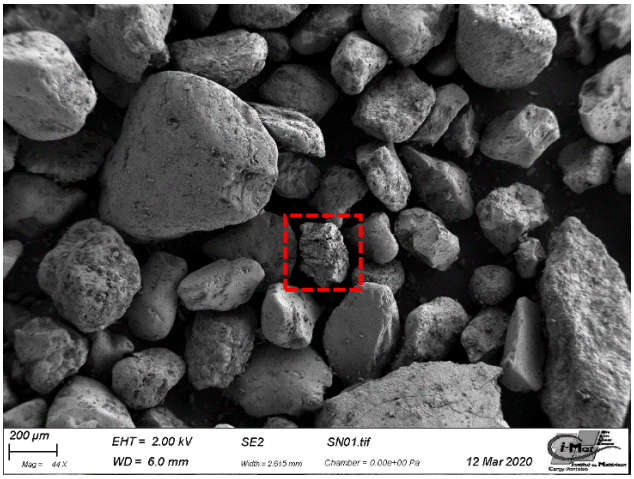
Le sable utilisé est un sable naturel semi-concassé lavé avec une seule fraction granulaire de dimension 0/4mm, issu de la carrière d'Achères en France. Celui-ci a un module de finesse de 2,64, un équivalent de sable de 79 %, un coefficient d'absorption de 1,1 % et une masse volumique absolue de 2630 kg/m^3.

Afin d'observer la morphologie de ce sable et d'identifier sa caractérisation chimique, une analyse au MEB a été effectuée. Les images obtenues sont présentées sur la Figure 2.2 où une forme ovoïde des grains est remarquée. L'image confirme également la présence d'une faible

quantité de fines dans ce sable. En outre, la Figure 2.3 représente les résultats obtenus par la spectroscopie de rayons X à dispersion d'énergie (EDX). D'après les pics obtenus, il est clair qu'il s'agit d'un sable silico-calcaire.

Tableau 2.2. Granulats naturels et recyclés.

Sable naturel 0/4	**Gravier naturel 6,3/20**
	
Gravier recyclé 4/10	**Gravier recyclé 10/20**
	



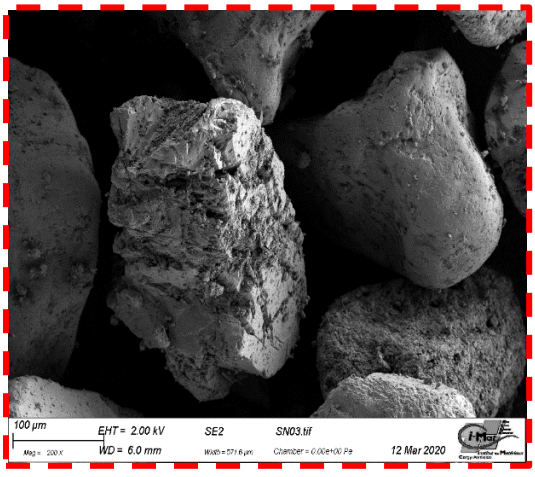


Figure 2.2. Image de l'analyse morphologique des grains de sable.

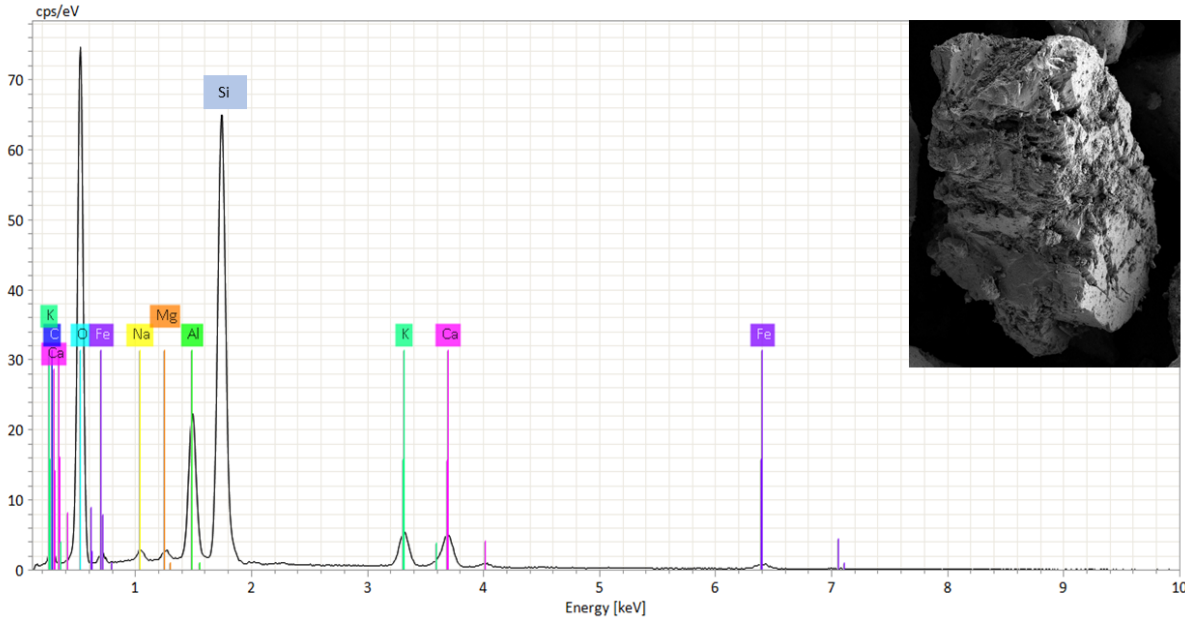


Figure 2.3. Spectre de l'analyse chimique du sable naturel.

Les gravillons naturels, nommées GN, sont des gravillons concassés issus de la carrière d'Achères, utilisés en une seule coupure (6,3/20mm), tandis que les gravillons recyclés proviennent de la carrière de Lafarge, située à Givet (Ardennes, 08), et ils ont été utilisés en deux coupures « GR 4/10mm » et « GR 10/20mm ». Les caractéristiques des gravillons naturels et recyclés sont représentées dans le Tableau 2.3.

Tableau 2.3. Caractéristiques des gravillons utilisés.

Matériaux	**Coeff d'absorption (%)**	**Densité**	**Compacité**
GN 6,3/20	1,8	2,45	0,610
GR 4/10	5,6	2,29	0,569
GR 10/20	5,8	2,26	0,554

Les courbes granulométriques des granulats utilisés dans cette étude sont illustrées dans la Figure 2.4. Il est à noter que la courbe des granulats recyclés 4/20 est le résultat d'une combinaison des deux fractions granulaires (4/10 et 10/20). Cette combinaison a été effectuée afin d'obtenir une courbe similaire à celle des granulats naturels.

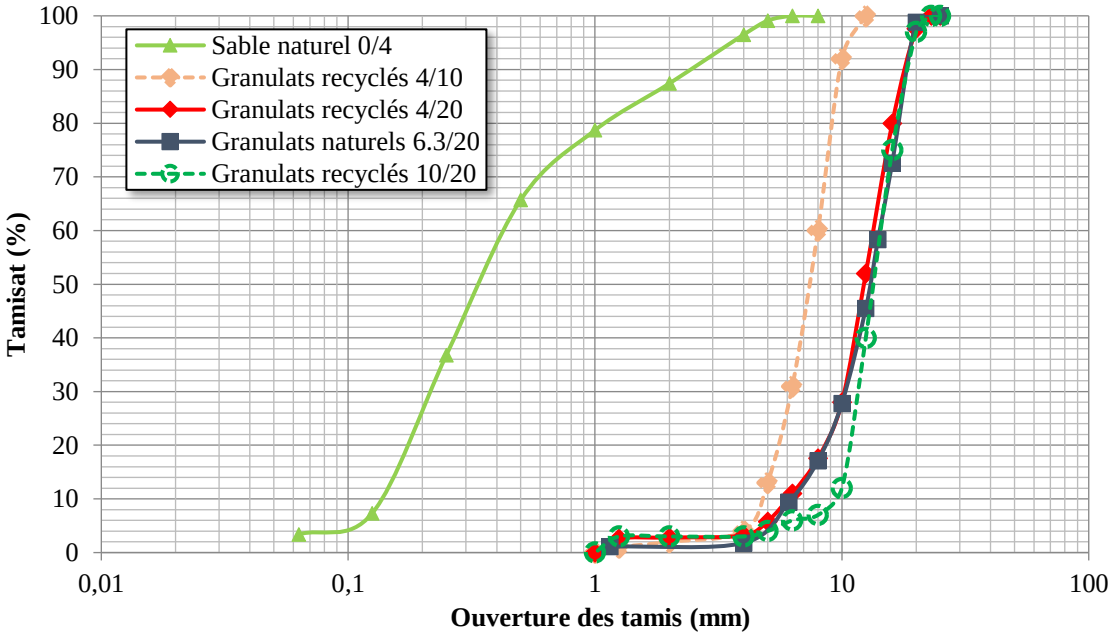


Figure 2.4. Courbe granulométrique des granulats utilisés.

Concernant la morphologie et la composition chimique des granulats recyclés utilisés, une analyse au MEB a été effectuée dont le résultat est représenté sur la Figure 2.5. A partir de cette dernière il apparait que la structure du granulat recyclé est une accumulation de plusieurs grains attachés entre eux par une petite quantité de pâte cimentaire.

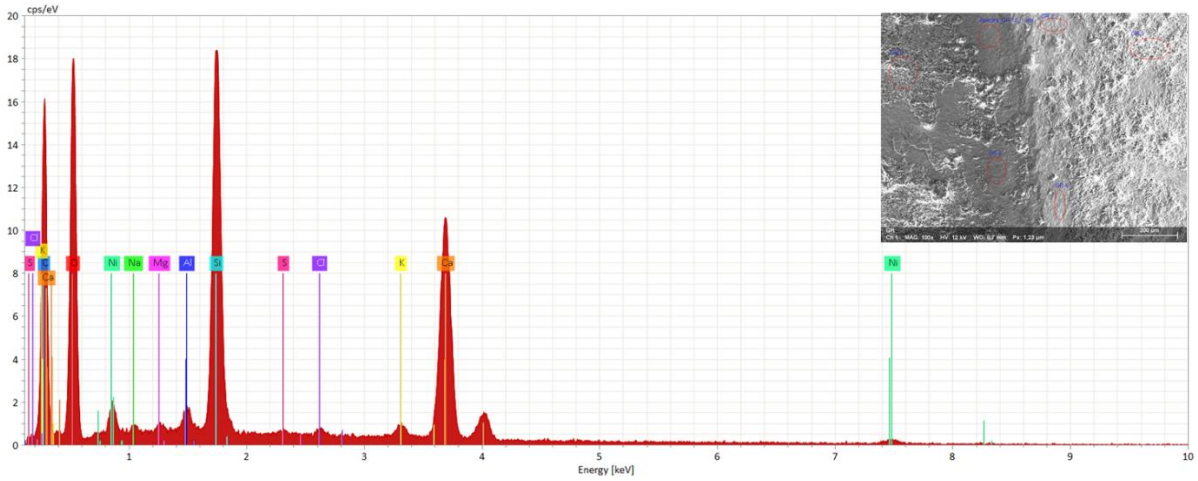


Figure 2.5. Analyse chimique d'un gravillon recyclé.

2.2.3. Les fibres polypropylènes

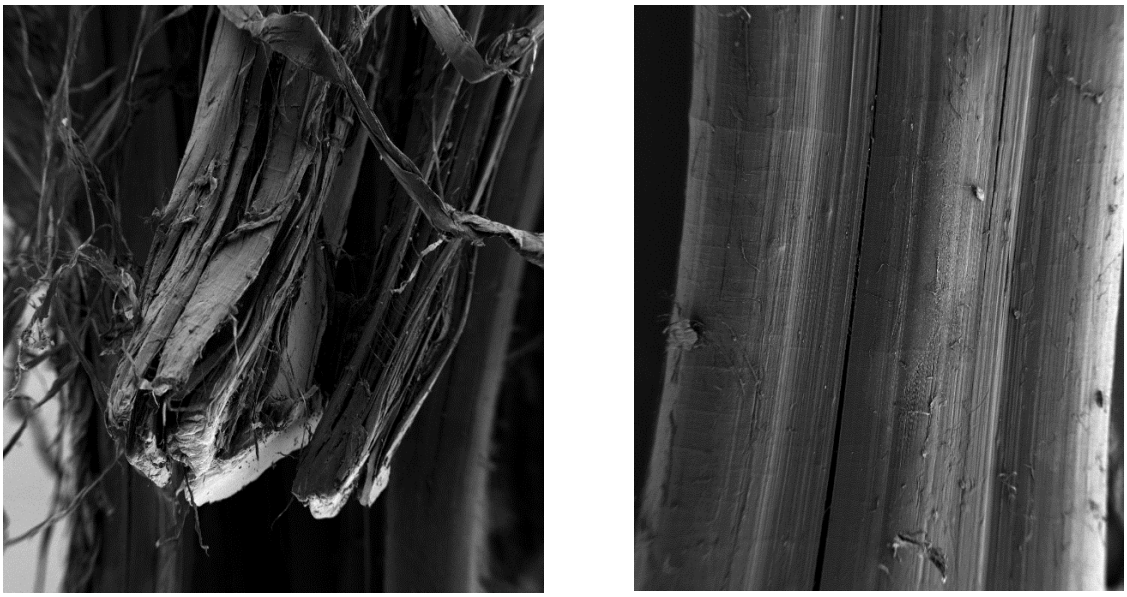
Dans le cadre de cette thèse, trois fibres polypropylènes de morphologie différente ont été considérées. Il s'agit des fibres structurelles macro-synthétiques produites par *SikaFibre*. Ces fibres ont été introduites dans le béton en trois longueurs différentes : 19, 30 et 54mm (Figure 2.6).



Figure 2.6. Les fibres en polypropylène utilisées (19, 30 et 54mm).

Les fibres employées sont destinées au renforcement des bétons en raison de leur très bonne résistance à la traction. Le choix des fibres a été effectué en se basant sur leur disponibilité dans le marché et les recommandations du fabricant. Comme cela a été précédemment mentionné, la longueur et la forme des fibres jouent un rôle crucial sur les performances des bétons. Pour cette raison, il a été décidé de tester différentes morphologies (Figure 2.**7** (b)). Les deux formes

adoptées dans le présent travail sont illustrées à l'échelle microscopique dans la Figure 2.7, et les propriétés physiques et mécaniques des fibres sont détaillées dans le Tableau 2.4.



(a) **(b)**

Figure 2.7. Image MEB des fibres utilisées (a) PPF de forme torsadée fibrillée, (b) PPF de forme rectiligne.

Tableau 2.4. Caractéristiques des fibres utilisées.

Longueur (mm)	**Largeur (mm)**	**Forme**	**Densité**	**Module d'élasticité (GPa)**	**R_T (MPa)**
19	0,34	Torsadée	0,92	5,75	689
30	0,48	Rectiligne	0,91	6,9	486
54	0,34	Torsadée	0,92	5,75	689

2.2.4. L'adjuvant

L'adjuvant utilisé dans cette étude est un superplastifiant/haut réducteur d'eau polyvalent de nouvelle génération, à base de polycarboxylates, fourni par *Sika*. Il a été utilisé pour la confection des bétons de classe de résistance C35/45 et de classe de consistance S4 avec un affaissement visé de 20±2 cm. Il est composé de 29,5 % d'extrait sec et de 70,5 % d'eau. Le

superplastifiant est commercialisé sous le nom de *TEMPO12* et ses caractéristiques sont présentées dans le Tableau 2.5.

Tableau 2.5. Caractéristiques du superplastifiant TEMPO12.

Plage de dosage recommandée (%)	0,1 à 5,0% du poids du liant
Densité	1,060 ± 0,020
Teneur totale en ions chlorure (% de masse)	≤ 0,1 %
Équivalent Oxyde de Sodium	≤ 1 %
Extrait sec (%)	29,5 ± 1,4% (NF EN 480-8)
Valeur pH	5,5 ± 1,0

2.2.5. L'eau de gâchage

L'eau de gâchage utilisée pour la confection des mélanges de béton est l'eau du robinet disponible dans le laboratoire L2MGC.

2.3. Méthode de caractérisation du béton

Cette partie consiste à présenter les techniques utilisées pour la caractérisation des bétons confectionnés aux états frais et durci. Les procédures de préparation des échantillons pour la réalisation des essais ont été également détaillées.

2.3.1. Essais de caractérisation à l'état frais

2.3.1.1. Essai d'affaissement au cône d'Abrams

L'essai d'affaissement a été effectué conformément à la norme NF EN 12350-2 [113], afin d'évaluer l'ouvrabilité des bétons. Dans un premier temps, le moule et le plateau de base sont humidifiés. Ensuite, le cône est rempli de béton en 3 couches. Le serrage du béton est assuré par un piquage où chaque couche est piquée 25 fois à l'aide d'une tige métallique. Il est à noter que les coups doivent être bien répartis sur la surface du béton et la quantité de béton en excès doit être arasée. Le moule est ensuite enlevé en 2 à 5 secondes et l'affaissement « h » est mesuré

en déterminant la différence entre la hauteur du moule et le point le plus haut du béton affaissé (Figure 2.8).

La classe de consistance du béton peut être définie à partir de la valeur d'affaissement obtenu, en se basant sur le tableau de la norme NF EN 206-1 [119]. (Tableau 2.6)

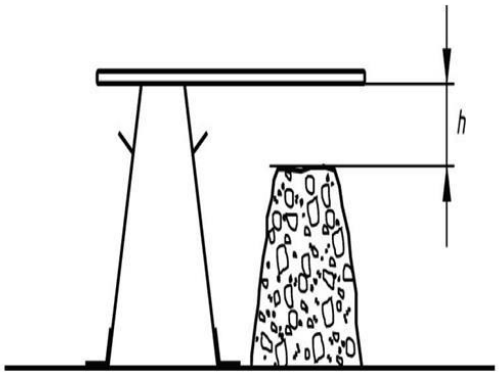


Figure 2.8. Schéma explicatif de la procédure de l'essai d'affaissement [113].

Tableau 2.6. Spécification des classes de consistance *[119]*.

Classe de consistance	**S1**	**S2**	**S3**	**S4**	**S5**
Affaissement (mm)	10-40	50-90	100-150	160-210	>210

2.3.1.2. Essai de l'air occlus

La teneur en air occlus dans les bétons a été déterminée selon les recommandations de la norme NF EN 12350-7 [120] en utilisant la méthode du manomètre. Il s'agit d'une méthode standard qui permet de calculer la quantité d'air contenue dans un échantillon de béton fraichement malaxé. L'essai est réalisé à l'aide d'un aéromètre constitué d'un récipient étanche en aluminium et d'un couvercle rigide muni d'un manomètre gradué (Figure 2.9). D'abord, le moule cylindrique (8 litres) est rempli en trois couches, chacune est piquée 25 fois afin d'assurer le serrage. Ensuite, le couvercle est mis sur le récipient en assurant une bonne étanchéité entre les deux parties et la quantité d'air contenu entre le couvercle et le récipient est éliminée en injectant de l'eau dans un robinet jusqu'à ce qu'elle ressorte du robinet opposé. Les deux robinets

sont ensuite fermés et le récipient rempli de béton est mis sous pression à l'aide d'une pompe à air. La valeur de la teneur en air occlus est finalement affichée en pourcentage sur le manomètre.

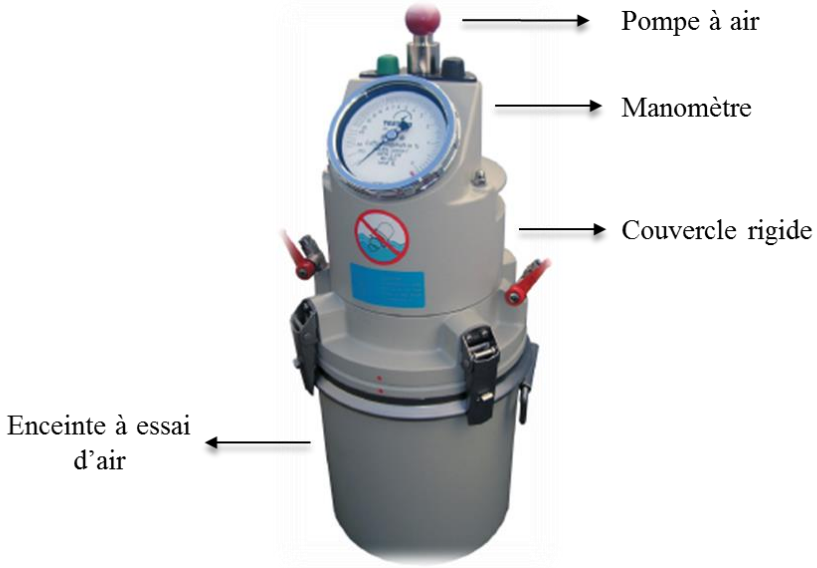


Figure 2.9. Aéromètre de béton.

2.3.1.3. Essai de la masse volumique

La détermination de la masse volumique du béton frais a été réalisée selon la norme NF EN 12350-6 [121]. Pour ce faire, le récipient de l'aéromètre a été rempli de béton et serré avec la même procédure adoptée pour l'essai de l'air occlus, en pesant avant et après remplissage. La masse volumique est ensuite calculée à l'aide de la formule suivante :

$$D = \frac{m_2 - m_1}{V} \qquad \text{(Équation 2.1)}$$

Où :

- D: *la masse volumique du béton frais* Kg/m^3 ;
- m_2: *la masse du récipient vide en* Kg;
- m_1: *la masse du récipient rempli de béton en* Kg;
- V: *le volume du récipient en* m^3.

2.3.1.4. Essai de rhéologie

La rhéologie des bétons formulés dans le cadre de cette étude a été étudié à l'aide d'un rhéomètre développé au sein du laboratoire L2MG par *Soualhi et al.* [122]. Le rhéomètre est de type couette (Figure 2.10), il contient :

- ✓ Une pale avec une géométrie spécifique (4 solides lames en double U avec h= 15 cm et d= 10,5 cm) destinée à minimiser la ségrégation du béton au moment de l'essai ;
- ✓ Un agitateur avec un enregistreur de couple ;
- ✓ Un conteneur cylindrique (d=30 cm, h= 25 cm) ;

Afin d'optimiser l'adhérence du béton à la paroi intérieure du conteneur, 18 bâtonnets d'acier carrés de dimension 9 × 9 × 25 mm^3 ont été soudés.



Figure 2.10. Rhéomètre utilisé [122].

- **Hypothèses de base**

Il est largement admis que le béton frais se comporte comme un fluide Binghamien dont l'écoulement est décrit par l'équation 2.2.

$$\tau = \tau_0 + \mu\dot{\gamma} \qquad \text{(Équation 2.2)}$$

Avec :

τ *(Pa)* est la contrainte de cisaillement.

τ_0 *(Pa)* est le seuil de cisaillement.

μ *(Pa.s)* est la viscosité plastique.

$\dot{\gamma}$*(1/s)* est le taux de cisaillement.

- **Mode opératoire**

L'essai consiste, en premier lieu, à faire tourner la pale à vide (en absence du béton) afin d'avoir un enregistrement des couples à vide ; ensuite, avec la même procédure, l'essai est refait mais avec un échantillon de béton frais en suivant la démarche suivante :

Le béton est rempli en deux couches, chaque couche est piquée 25 fois avec une tige métallique (pareillement à l'essai d'affaissement). La pale est ensuite placée et plongée dans le béton au centre du récipient. Une fois que tout est prêt, l'essai est lancé (l'agitateur fait tourner la pale) selon le profil de vitesse représenté dans la Figure 2.11.Finalement, pour chaque vitesse, les couples imposés sont mesurés. Le résultat brut d'un essai se présente sous la forme d'une fonction linéaire (équation 2.3).

$$M = M_0 + k\Omega \qquad \text{(Équation 2.3)}$$

Avec

$M(N.m)$ est le couple total appliqué sur le béton.

$M_0(N.m)$ le couple à l'origine.

$k(N.m.s)$ un coefficient de régression linéaire.

$\Omega(rad/s)$ est la vitesse angulaire de rotation de la pale.

Temps de pré-cisaillement : 4 min

Nombre de paliers : 7

Vitesse max : 48 tr/min

Vitesse min : 4 tr/min

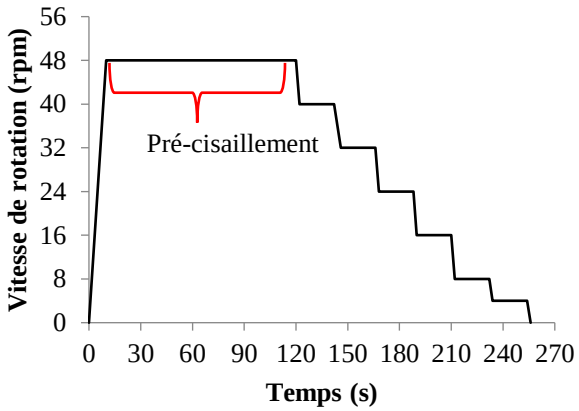


Figure 2.11. Profil de vitesse de rotation [122].

- **Exploitation des résultats**

L'exploitation des mesures rhéométriques consiste à déterminer l'évolution de la contrainte de cisaillement (τ) en fonction du taux de cisaillement ($\dot{\gamma}$) à partir de la paire (Mi- Ωi) mesurée. En assimilant le comportement du béton à un fluide Binghamien, les paramètres rhéologiques τ_0 et μ peuvent être calculés en utilisant les équations de Reiner-Riwlin. Néanmoins, deux cas sont envisageables : le cisaillement peut être total ou partiel (Figure 2.12).

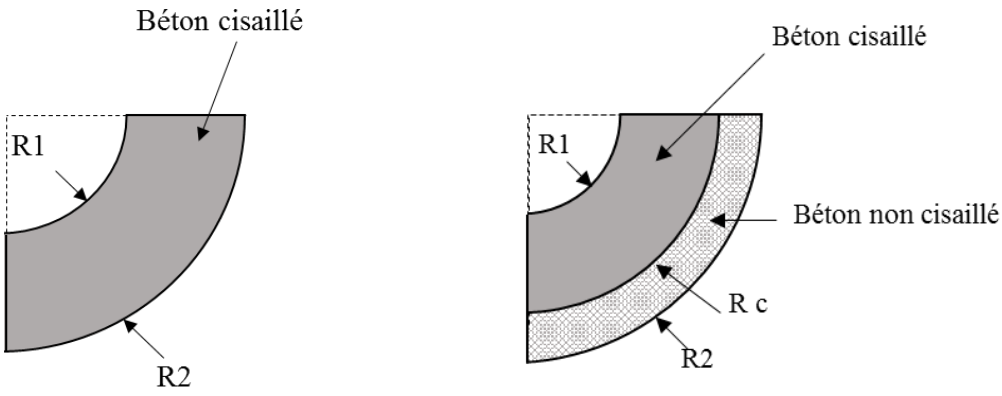


Figure 2.12. Schéma du cisaillement du béton dans le récipient.

Dans le cas du cisaillement total, l'équation de Reiner-Riwlin s'écrit :

$$\Omega = \frac{M}{2\pi h\mu}\left(\frac{1}{R_1^2} - \frac{1}{R_2^2}\right) + \frac{\tau_0}{\mu} ln \frac{R_2^2}{R_1^2} \qquad \text{(Équation 2.4)}$$

Dans le cas de cisaillement partiel, l'équation Reiner-Riwlin devient :

$$\Omega = \frac{M}{2\pi h\mu}\left(\frac{1}{R_1^2} - \frac{1}{R_c^2}\right) + \frac{\tau_0}{\mu} ln \frac{R_c^2}{R_1^2} \quad \text{(Équation 2.5)}$$

Avec

R_1 (m) : le rayon de la pale.

R_2 (m) : le rayon du récipient.

h(m) : la hauteur de la pale.

R_c(m) : le rayon critique qui représente la limite du cisaillement, son expression est la suivante :

$$\mathrm{R}_c = \sqrt{\frac{M}{2\pi h\tau_0}} \quad \text{(Équation 2.6)}$$

Pour chaque couple mesuré le rayon critique R_c est calculé et comparé au rayon du récipient afin de définir si le cisaillement est total ou partiel. Ensuite, une initiation du calcul s'effectue avec une estimation de la viscosité plastique et du seuil de cisaillement du béton testé. Finalement, pour chaque point étudié la vitesse de rotation est calculée via l'équation 2.5 par une optimisation non linéaire [122]. De plus, une étape de finalisation de calcul est effectuée, il s'agit de minimiser l'erreur quadratique moyenne (mse) entre la vitesse de rotation "mesurée" et celle "calculée" en modifiant les valeurs de la viscosité plastique et de la contrainte de cisaillement, comme suit :

$$mse = \sqrt{\frac{\Omega_{calculée} - \Omega_{mesurée}}{n}} \quad \text{(Équation 2.7)}$$

2.3.1.5. Essai de tribologie

L'essai de tribologie se fait à l'aide d'un tribomètre à cylindre coaxial développé au sein du laboratoire L2MGC (Figure 2.14) par *NGO et al.* [123]. Le tribomètre se compose de :

- ✓ Un agitateur à régulation électronique de vitesse permettant l'enregistrement du couple;
- ✓ Une pièce cylindrique en acier lisse de 10 cm de hauteur et de 10,7 cm de diamètre ;
- ✓ Un récipient de 30×20 cm (diamètre et hauteur respectivement).

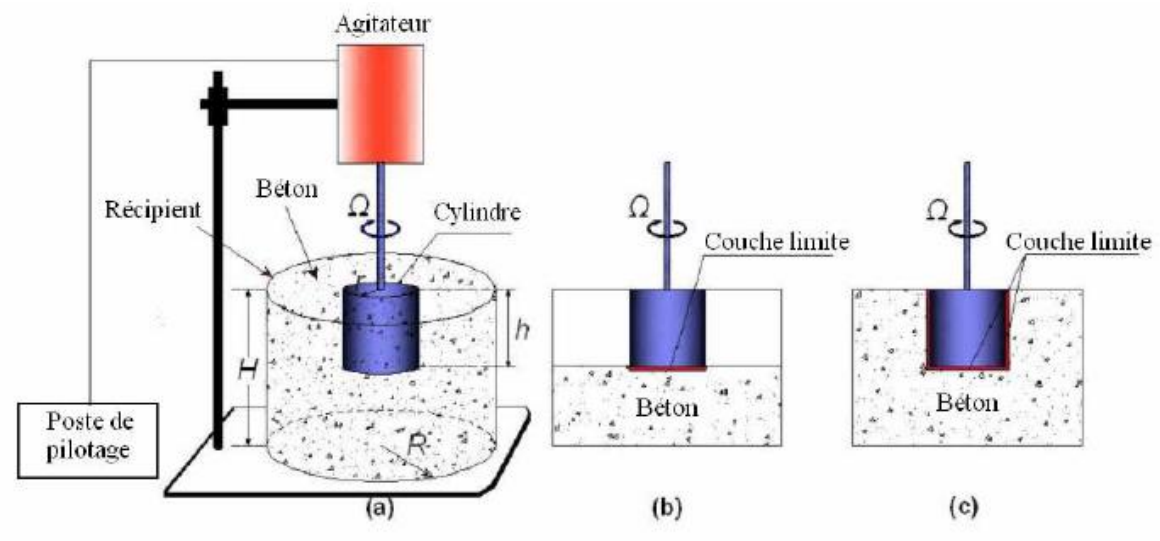
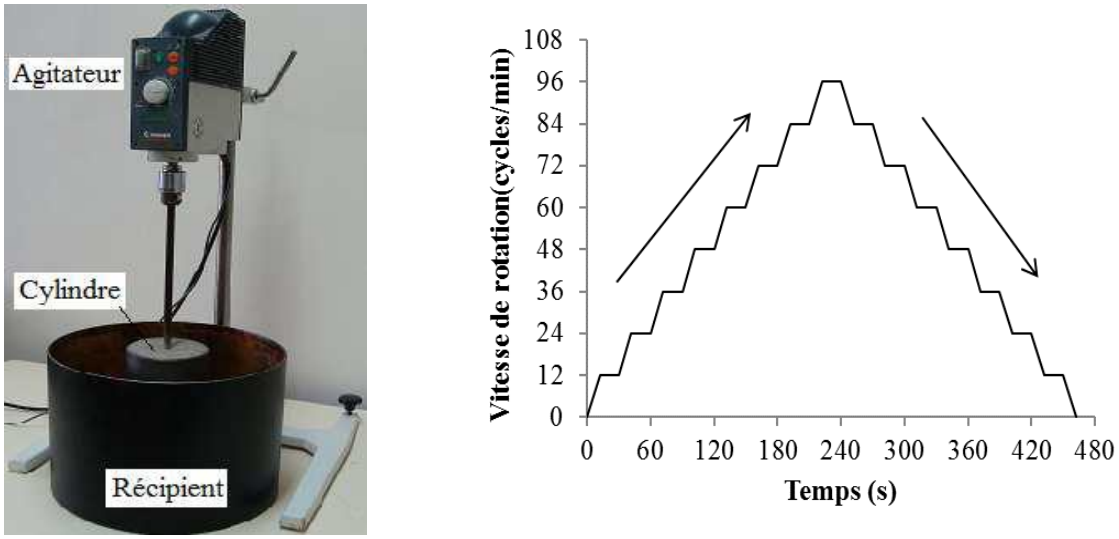


Figure 2.13. Les éléments essentiels du tribomètre [124].



(a) **(b)**

Figure 2.14. Tribomètre utilisé (a), profil de vitesse de rotation (b) [123].

- **Hypothèse de base**

Le tribomètre nous permet de mesurer les paramètres d'interface du béton nommés seuil d'interface et constante visqueuse afin de mieux appréhender le phénomène se produisant dans les tuyaux de pompage. Pour ce faire, le modèle de prévision de la pression de pompage en fonction du débit et des paramètres d'interface suivi dans cet essai est celui proposé par Kaplan

(Équation 2.8 et 2.9) [125]. Ce modèle montre que l'évolution de la pression de pompage en fonction du débit suit deux pentes différentes, comme montré dans la Figure 2.15.

- La première pente est décrite par l'équation :

$$P = \frac{2L}{R}\left(\tau_t + \frac{Q}{3600\pi R^2 k_r}\eta\right) \quad \text{(Équation 2.8)}$$

- La deuxième pente est décrite par l'équation

$$P = \frac{2L}{R}\left(\tau_t + \frac{\frac{Q}{3600\pi R^2 k_r} - \frac{R}{4\mu}\tau_t + \frac{R}{3\mu}\tau_0}{1 + \frac{R}{4\mu}\eta}\eta\right) \quad \text{(Équation 2.9)}$$

Avec :

P (Pa): Pression

L(m) : Longueur du boyau

R (m): Rayon du boyau

Q (m³/h): Débit moyen

kr : Coefficient de remplissage (kr = 0,8 pour la pompe stationnaire, kr =0,7 pour la pompe automotrice) [125], [126].

τ_t *(Pa):* Seuil de l'interface (*mesuré par le tribomètre*)

h (Pas/m): Viscosité de l'interface (*mesurée par le tribomètre*)

τ_0 *(Pa)*: Seuil de cisaillement du béton (*mesuré par le rhéomètre*)

μ *(Pa.s)*: Viscosité plastique du béton (*mesuré par le rhéomètre*)

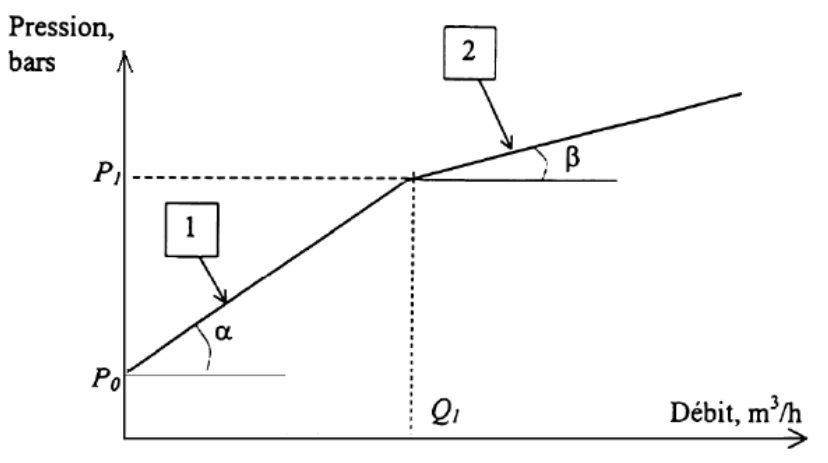


Figure 2.15. Modèle de prévision de la pression de pompage par Kaplan [125].

Il est à noter que l'écoulement du béton dans le tuyau de pompage est décrit par la première pente du modèle de Kaplan, tenant compte le fait que le béton lors du pompage avance par glissement, grâce à une couche de coulis qui se forme à l'interface entre le béton et la paroi de tuyau (appelée aussi couche limite). Les propriétés de cette couche limite sont les mêmes que celles formées lors du pompage dans un boyau [125].

Lors de la réalisation d'un essai tribologique, les hypothèses suivantes sont prises en compte :

- ✓ L'épaisseur de la couche lubrifiante est du même ordre de grandeur dans le boyau et en périphérie du tribomètre ;
- ✓ L'effet de la pression sur le volume d'air est négligeable et les propriétés rhéologiques et tribologiques sont peu affectées.

- **Mode opératoire**

L'essai consiste à mettre en rotation à différentes vitesses un cylindre en acier lisse dans un échantillon de béton frais. Au cours de l'essai, une couche de lubrification (appelée couche limite) est formée à l'interface du cylindre tournant. Les couples de frottement requis à l'interface pour maintenir la rotation du cylindre sont enregistrés. Cet essai est effectué selon la démarche suivante :

Le récipient est rempli une première fois en moitié de sa hauteur d'une couche de béton. Cette couche est piquée 25 fois avec une tige métallique afin d'assurer le remplissage correct du volume. Ensuite, le cylindre est posé sur la surface du béton sous son poids propre en s'assurant que le fond touche la surface du béton (Figure 2.16(a)). Le cylindre se met en rotation sous pilotage de profil de vitesse imposé (Figure 2.14(b)), et finalement un logiciel de calcul spécifique permet de déterminer le couple de frottement correspondant à chaque palier de vitesse. Une deuxième couche de béton est rajoutée jusqu'à l'arase du récipient en suivant la même procédure que dans la première étape (Figure 2.16 (b)). Au final, Pour chaque point, le logiciel spécifique installé dans l'ordinateur pour piloter la rotation du cylindre relève le moment de rotation (T) correspondant à la vitesse de rotation (V) en ce point. L'acquisition des différents couples (T, V) est exécutée par l'ordinateur. Le résultat brut d'un essai réalisé avec l'appareil tribométrique se présente sous la forme :

$$T = T_0 + kV \qquad \text{(Équation 2.10)}$$

Où ;

T ($N.m$) est le couple total appliqué sur le cylindre tournant ;
T_0 ($N.m$) le couple à l'origine ;
k ($N.m.s$) un coefficient de régression linéaire;
V ($tour/s$) est la vitesse de rotation du cylindre.



(a) **(b)**

Figure 2.16. Mode opératoire de l'essai tribologique.

- **Exploitation des résultats**

A partir des résultats bruts de l'essai de T_0 et V (équation 2.10), nous cherchons à calculer les paramètres de pompage (τ_t et η). Sachant que la contrainte de cisaillement à l'interface est donnée par la relation :

$$\tau = \frac{T}{R(2\pi Rh)} \qquad \text{(Équation 2.11)}$$

Où :

R(m) est le rayon moyen du cylindre ;

T (N.m) est le couple mesuré ;

h(m) est la hauteur du cylindre.

La vitesse tangentielle à la paroi du tribomètre est égale à :

$$V_t = \Omega R \qquad \text{(Équation 2.12)}$$

Avec :

Vt (m/s) est la vitesse tangentielle ;

Ω (rad/s) est la vitesse angulaire de glissement, donnée par la formule

$$\Omega = \mathrm{V}.\,2\pi \text{ (en rad/s)} \qquad \text{(Équation 2.13)}$$

R (m) le rayon moyen du cylindre.

Le seuil d'interface en unité fondamentale est alors égal à :

$$\tau_t = \frac{T_0}{2\pi R^2 h} \quad \text{(Équation 2.14)}$$

La constante visqueuse d'interface en unité fondamentale est égale à *:*

$$\eta = \frac{d\tau}{dV_t} = \frac{d\left(\frac{T}{2\pi R^2 h}\right)}{d(V2\pi R)} = \frac{dT}{dV}.\frac{1}{(2\pi)^2 R^3 h} \quad \text{(Équation 2.15)}$$

On obtient donc :

$$\eta = \frac{K}{(2\pi)^2 R^3 h}\left(en\ Pa.\frac{S}{m}\right) \quad \text{(Équation 2.16)}$$

La fonction de contrainte d'interface s'écrit alors sous la forme :

$$\tau = \frac{T_0}{2\pi R^2 h} + \frac{K}{(2\pi)^2 R^3 h}.v\ (en\ Pa) \quad \text{(Équation 2.17)}$$

2.3.2. Essais de caractérisation à l'état durci

2.3.2.1. Essai de résistance à la compression

La résistance à la compression des différents bétons a été déterminée conformément à la norme NF EN 12390-3[127], à l'aide d'une presse hydraulique « Schenck » d'une capacité de 3500 kN (Figure 2.17).

L'essai est effectué sur des éprouvettes cylindriques (11 × 22 cm) à 3, 7, 28 et 90 jours. Les éprouvettes ont été surfacées préalablement en utilisant le soufre de type B, placées au centre entre les deux plateaux de la presse et chargées progressivement avec une vitesse de chargement de 0,5 MPa/s jusqu'à la rupture (Figure 2.18).

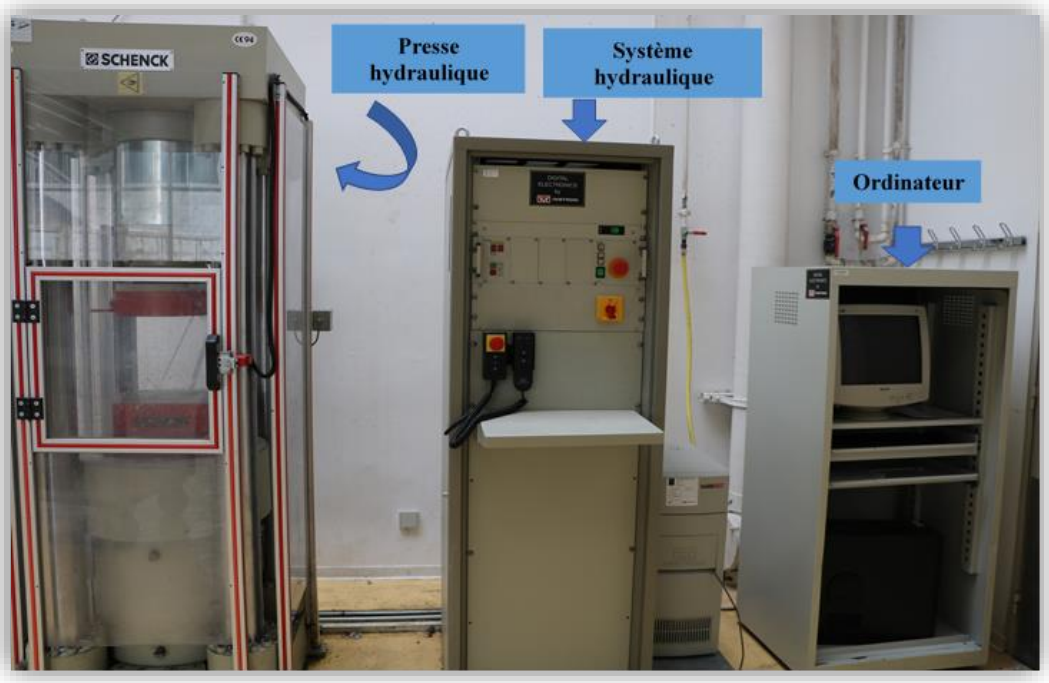


Figure 2.17. Dispositif pour l'essai de compression.



(a) **(b)**

Figure 2.18. Emplacement de l'éprouvette dans la presse (a), Éprouvette après rupture (b).

2.3.2.2. Essai de résistance à la traction par fendage

Les résistances à la traction des bétons ont été également déterminées en utilisant la presse Schenck, selon la norme NF EN 12390-6 [128]. L'essai consiste à faire charger une éprouvette

cylindrique en béton (11×22 cm) avec une vitesse de chargement de 0,05 MPa/s. L'éprouvette est placée horizontalement dans un bâti métallique utilisé pour assurer l'équilibre de l'éprouvette entre les deux plateaux de la presse au cours du chargement (Figure 2.19).



Figure 2.19. Emplacement de l'éprouvette dans le bâti (a), Eprouvette après rupture (b).

Le calcul final de la résistance à la traction ($f_{ctm,sp}$) se fait à partir de la charge maximale (F) correspondant à la rupture du béton, comme suit :

$$f_{ctm,sp} = \frac{2F}{\pi DL} \qquad \text{(Équation 2.18)}$$

Où D et L représentent respectivement le diamètre et la longueur de l'éprouvette.

2.3.2.3. Essais de module d'élasticité

La détermination du module d'élasticité a été faite selon la norme NF EN 12390-13 [129] en utilisant la presse hydraulique (3R) montrée dans la Figure 2.20 (a). L'essai consiste à mettre une éprouvette cylindrique (11× 22 cm) sous trois cycles de chargement avec une vitesse de 0,6 ± 0,2 MPa/s. L'éprouvette est fixée à l'intérieur d'une couronne en métal léger qui contient trois capteurs permettant de mesurer les déformations unitaires longitudinales (Figure 2.20(b)).



(a) **(b)**

Figure 2.20. Appareillage pour l'essai du module d'élasticité (a), emplacement de l'éprouvette dans la couronne entre les deux plateaux de la presse (b).

Finalement, le module d'élasticité est calculé en utilisant la formule suivante :

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon_s} = \frac{\sigma_a^m - \sigma_p^m}{\varepsilon_{a,3} - \varepsilon_{p,2}} \quad \text{(Équation 2.19)}$$

Où

- σ_a^m: Contrainte mesurée correspondant à la limite supérieure de la contrainte nominale σ_a $(f_c/3)$.
- σ_p^m: Contrainte mesurée correspondant à la contrainte de préchargement nominale σ_p.
- $\varepsilon_{a,3}$: Déformation moyenne à la limite supérieure de contrainte lors du 3^e cycle de chargement.
- $\varepsilon_{p,2}$: Déformation moyenne à la limite inférieure de contrainte lors du 2^e cycle de chargement.

2.3.2.4. Essais de porosité à l'eau

Pour la détermination de la porosité des bétons, la méthode de saturation sous vide a été adoptée en se basant sur les recommandations de la norme NF P18-459 [130]. Le but de cet essai est de déterminer la porosité accessible à l'eau des bétons à 28 jours. Pour ce faire, des éprouvettes cylindriques de 11×22 cm ont été préalablement découpées à l'aide d'une scie à béton en trois disques de 50mm d'épaisseur (Figure 2.21).

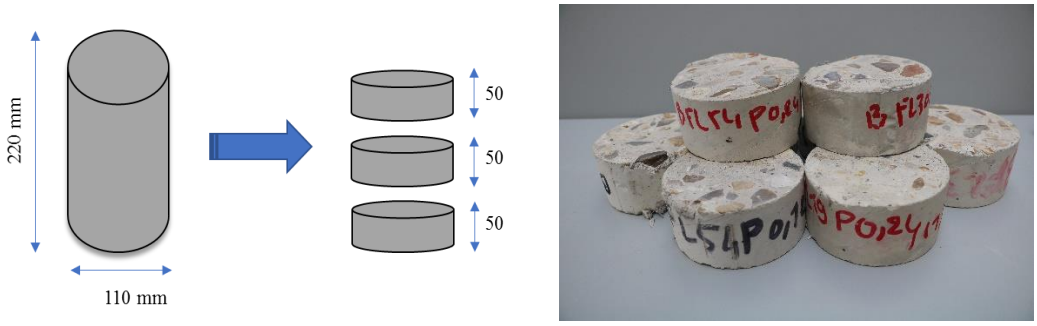


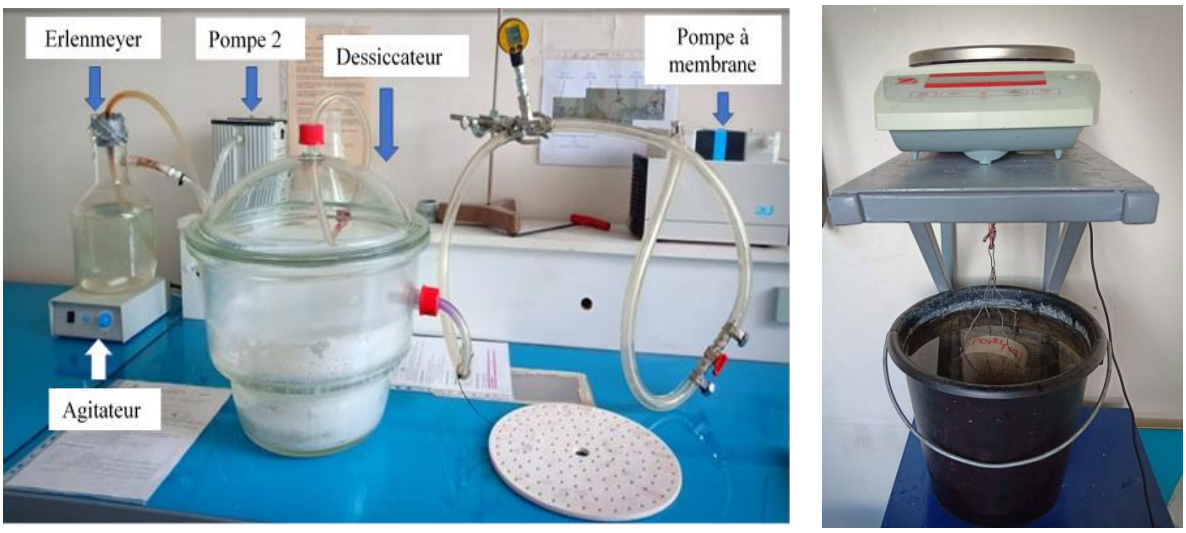
Figure 2.21. Préparation des échantillons pour l'essai de porosité.

Pour chaque formulation de béton, trois disques ont été placés sous vide pendant 4 heures. Ensuite, ils ont été immergés dans l'eau pendant 44 heures (Figure 2.22). Les mesures de la porosité ont été effectuées après 48 heures, comme suit :

- Une pesée hydrostatique des échantillons saturés (M_{eau}).
- Une pesée des échantillons humides (surface sèche) (M_{hss}).

Les échantillons sont ensuite conservés dans une étude ventilée à une température de 105±5ºC jusqu'à l'obtention d'une masse constante (M_s) et la porosité accessible à l'eau est calculée à l'aide de l'équation suivante :

$$\varepsilon = \frac{M_{hss} - M_s}{M_{hss} - M_{eau}} x\ 100 \qquad \text{(Équation 2.20)}$$



(a) (b)

Figure 2.22. Dispositif expérimental de l'essai de porosité à l'eau(a), pesée hydrostatique (b).

2.3.2.5. Essai de perméabilité au gaz

La perméabilité au gaz a été mesurée selon la norme XP P 18-463 [131] à l'aide d'un perméamètre à charge constante de type CEMBUREAU (Figure 2.24). Des éprouvettes cylindriques (15×30 cm) ont été conservées dans l'eau pendant 90 jours puis elles ont été découpées en 5 disques en utilisant une scie à béton. Les disques ont été mis dans une étuve ventilée à 105±5ºC jusqu'à masse constante. Ensuite, le pourtour des disques a été rendu étanche par un film d'aluminium autocollant afin d'assurer un flux monodimensionnel du gaz (Figure 2.23).

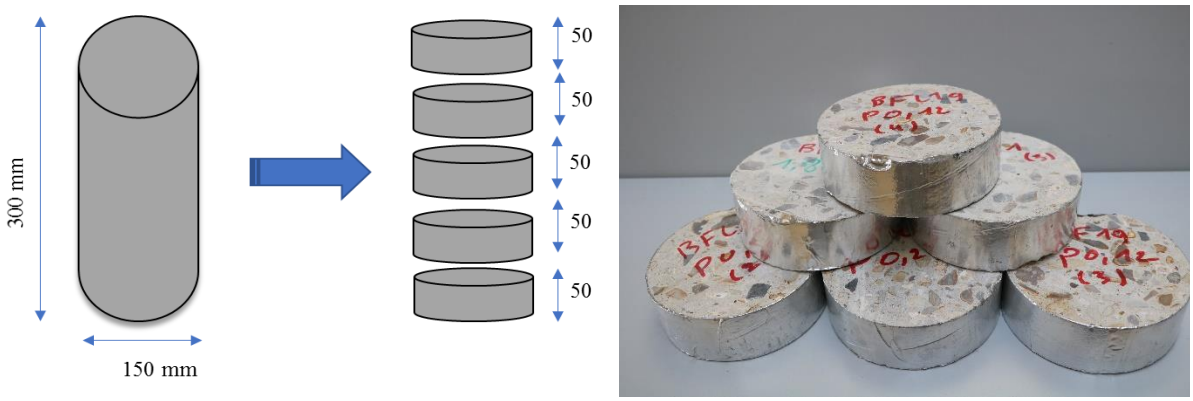


Figure 2.23. Préparation des échantillons pour l'essai de perméabilité au gaz.

L'essai de perméabilité au gaz consiste à soumettre le disque sous 5 pressions différentielles (1, 2, 3, 4 et 5 bars). Pour chaque pression, le coefficient de la perméabilité apparente K_{app} est calculé à partir de l'équation suivante :

$$K_{app} = \frac{2\mu Q L P_{atm}}{A(P_i^2 - P_{atm}^2)} \qquad \text{(Équation 2.21)}$$

avec :

- μ : la viscosité dynamique de l'azote (1,76×10-5 Pa.s à 20°C) ;
- L : l'épaisseur de l'échantillon (m) ;
- A : la section de l'échantillon (m^2) ;
- P_e : la pression imposée (Pa);
- P_{atm} : la pression atmosphérique (Pa);
- Q: le débit volumique de gaz à pression atmosphérique (m^3/s).

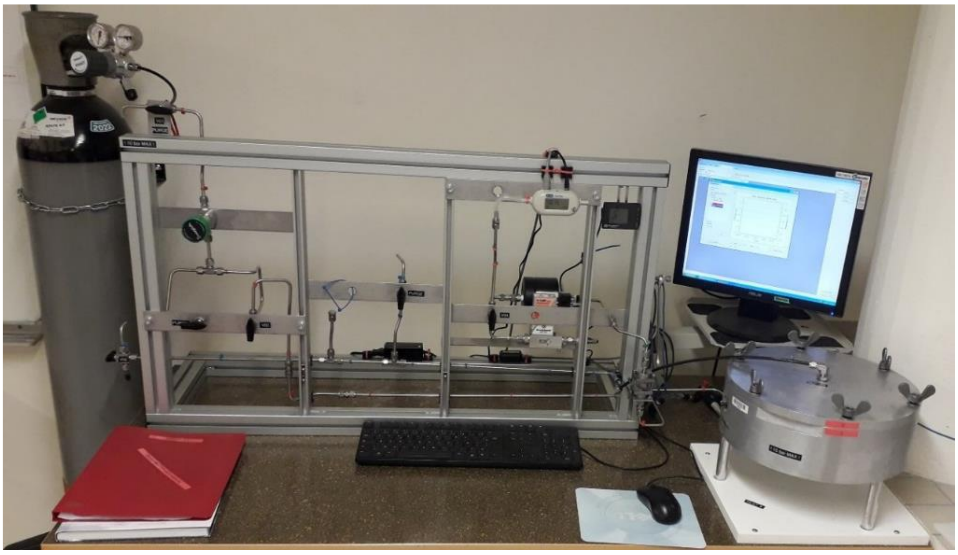


Figure 2.24. Dispositif de l'essai de perméabilité.

Il est à noter que la perméabilité apparente dépend de la pression d'entrée imposée et donc ne représente pas une propriété intrinsèque du matériau. Afin de déterminer la perméabilité intrinsèque (K_{int}), il faut d'abord réaliser une série de mesures à différentes pressions. Une régression linéaire des différentes mesures de perméabilité apparente en fonction de l'inverse

de la pression moyenne est effectuée (Équation 2.22) et la valeur de K_{int} recherchée correspond à l'intersection entre la droite de régression et l'axe des ordonnées (Figure 2.25).

$$p_{moy} = \frac{p_e + p_{atm}}{2} \qquad \text{(Équation 2.22)}$$

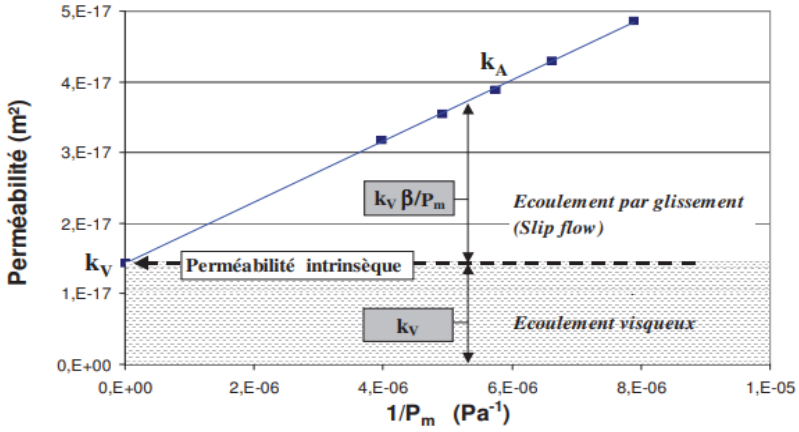


Figure 2.25. Perméabilité apparente en fonction de l'inverse de la pression moyenne [132].

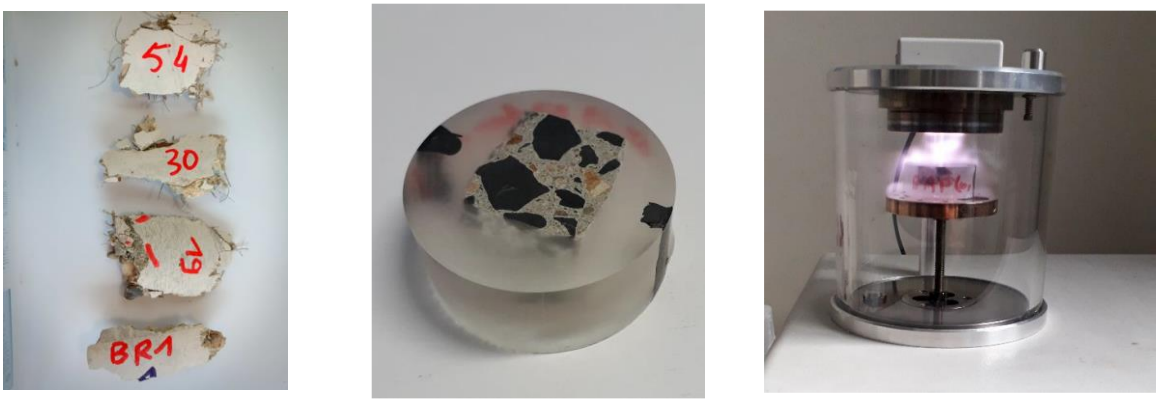
2.3.2.6. Analyse microstructurale par MEB/ EDX

L'analyse microstructurale a été effectuée à l'aide d'un microscope électronique à balayage (MEB ZEISS GeminiSEM 300 couplé à l'EDX) au sein de la plateforme Microscopie & Analyses (Figure 2.27(a)). Cette technique permet de fournir des images de haute résolution de la topologie ou de la surface de l'échantillon testé. La méthode de l'essai est basée sur le principe des interactions électrons-matière, où un fuseau d'électrons est envoyé sur la surface de l'échantillon ; ce dernier réémet un spectre de particules qui sera détecté et analysé afin de construire une image en trois dimensions.

Afin d'obtenir plus d'informations sur la structure chimique des échantillons observés, l'analyse spectroscopique de rayons X à dispersion d'énergie (EDS ou EDX) a été utilisée. Cette technique, souvent couplée au MEB, permet de mieux identifier les matériaux étudiés en précisant à l'échelle microscopique les éléments présents sur les surfaces des échantillons testés. Il s'agit d'une technique qui consiste à projeter des électrons primaires de haute énergie sur la surface étudiée. Des rayons X sont ensuite émis avec une longueur d'ondes qui caractérise

les atomes cibles. Finalement, la nature chimique de l'atome est identifiée en analysant ces rayons détectés.

Dans cette étude, la préparation des échantillons pour les analyses microstructurales diffère d'un échantillon à l'autre selon le besoin. Certains échantillons ont été caractérisé sans imprégnation de résine ni polissage, et seulement une mise en place sous vide pour une longue période (24 à 48 heures) a été effectuée (Figure 2.26(a)). Pour d'autres échantillons, la technique d'imprégnation de résine a été adoptée avec un démoulage après 24 heures. Les échantillons imprégnés de résine ont par la suite été polis à l'aide d'une polisseuse MeteServ 250 pour assurer des surfaces planes (Figure 2.26(b)). La métallisation au nickel (Ni) (Figure 2.26(c)) a été également utilisée afin d'éviter la surcharge d'électrons sur les surfaces.



(a) (b) (c)

Figure 2.26. Préparation des échantillons pour les analyses microstructurales : (a) échantillons caractérisés sans imprégnation de résine, (b) échantillon imprégné de résine, (c) métallisation des échantillons.



(a) (b)

Figure 2.27. Équipement de test de l'analyse microstructurale (a) et polisseuse utilisée (b).

2.4. Méthodologie expérimentale

Ce projet de recherche se divise en trois phases distinctes dont la première concerne la formulation et la caractérisation des bétons sans fibre avec des granulats naturels. Cette phase a pour but de fixer une formulation optimale (béton de témoin) qui sera utilisée par la suite dans les deuxième et troisième phases. Pour cela, 4 mélanges de béton formulés avec la méthode de Dreux-Gorisse ont été testés seulement à l'état frais (essais d'affaissement, rhéologie et tribologie). Le choix de la formulation optimale a été effectué au regard des paramètres rhéologiques.

La deuxième phase consiste à introduire des fibres polypropylènes dans le mélange afin d'étudier leurs effets sur le béton. À partir de la formulation optimale validée dans la première phase de l'étude, 9 formulations de béton fibré ont été effectuées en utilisant trois longueurs de fibres différentes (19, 30 et 54mm) avec trois dosages (0,12 ; 0,24 ; 0,36 %). Ensuite, les 9 mélanges ont été reformulés en rajoutant un adjuvant de type polycarboxylate afin de rattraper la perte d'ouvrabilité induite par l'ajout des fibres. L'ajout de l'adjuvant a été optimisé de sorte que tous les bétons atteignent un affaissement de $20^{\pm 2}$ cm (béton fluide). Par ailleurs, une étude de l'effet d'hybridation des fibres de différentes géométries dans le même mélange a été réalisée en utilisant les fibres de 19 et 30mm avec des proportions massiques de 30/70 % ; 50/50 % et

70/30 %. Tous les bétons effectués ont été testés à l'état frais en caractérisant leur ouvrabilité, leur masse volumique, leur teneur en air occlus el leur performances rhéologique et tribologique. En revanche, seuls les bétons adjuvantés ont été caractérisés à l'état durci (performances mécaniques et physiques). En se basant sur les résultats obtenus, une formulation optimale de béton fibré a été sélectionnée.

Dans la troisième phase, l'influence de remplacement des granulats naturels par des granulats recyclés a été abordée. De plus, l'influence de deux méthodes de préparation des granulats recyclés sur les propriétés du béton aux états frais et durci a été évaluée. Pour cela, 6 mélanges de béton ont été confectionnés en utilisant la formulation optimale obtenue dans la phase précédente comme étant la formulation du béton témoin, tout en variant le taux de remplacement massique des gravillons naturels par des gravillons recyclés (30 ; 50 et 70 %). Afin de mieux présenter le déroulement expérimental de cette thèse, un résumé de la démarche expérimentale adoptée se trouve dans la Figure 2.28.

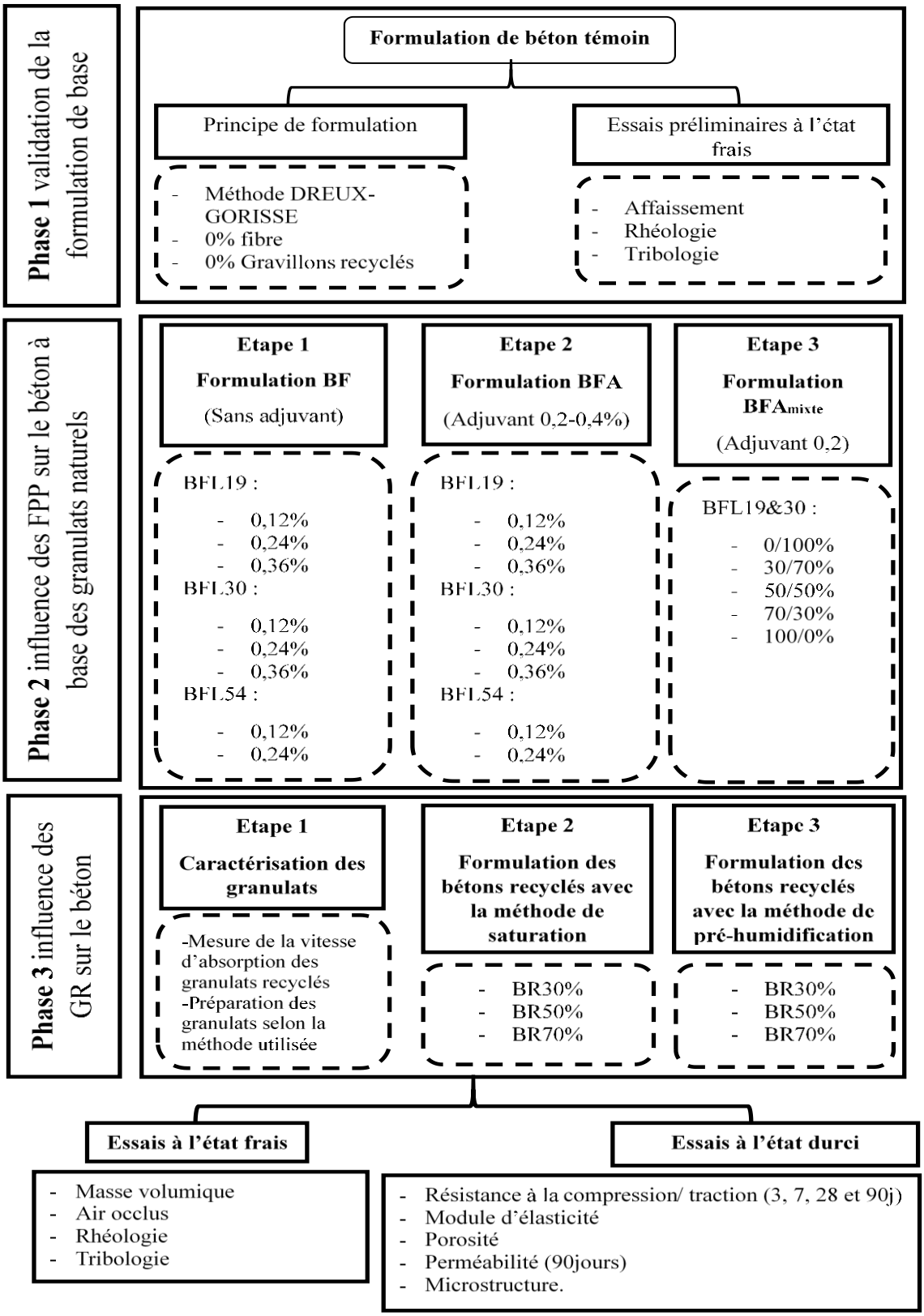


Figure 2.28. Programme expérimental.

CHAPITRE 3

Étude de l'influence des fibres polypropylènes sur un béton fluide à base de granulats naturels

3. CHAPITRE 3 Étude de l'influence des fibres polypropylènes sur un béton fluide à base de granulats naturels 110

3.1. Objectif 113

3.2. Programme expérimental 113

3.3. Procédure de formulation du béton 116

3.4. Résultats et discussion 116

3.4.1. Série 1 : Choix de la formulation du béton témoin 116

3.4.2. Série 2 : Étude de l'effet des fibres polypropylènes « FPP » sur les propriétés du béton frais 121

3.4.3. Série 3 : Étude de l'effet de superplastifiant sur les propriétés du béton frais 127

3.4.3.1. Effet de l'adjuvant sur l'ouvrabilité du béton 127

3.4.3.2. Effet de l'incorporation de l'adjuvant sur la masse volumique et sur l'air occlus du béton frais 128

3.4.3.3. Effet de l'adjuvant sur le comportement rhéologique 129

3.4.3.4. Effet de l'adjuvant sur le comportement tribologique 131

3.4.4. Série 4 : Étude de l'effet de la longueur mixte des fibres dans le même béton 134

3.4.4.1. Effet de la longueur mixte des FPP sur l'affaissement, la masse volumique et l'air occlus 135

3.4.4.2. Effet de la longueur mixte des FPP sur les propriétés rhéologiques 135

3.4.4.3. Effet de la longueur mixte des FPP sur les propriétés tribologiques 136

3.4.5. Étude de l'effet des fibres et de l'adjuvant sur les propriétés physiques/mécaniques du béton 138

3.4.5.1. Porosité et masse volumique apparente 138

3.4.5.2. Perméabilité 140

3.4.5.3. Résistance à la compression 142

3.4.5.4. Résistance à la traction par fendage 145

3.4.5.5. Module d'élasticité 148

3.4.5.6. Vérification de l'application des modèles prédictifs des propriétés mécaniques des bétons fibrés 149

3.5. Conclusion 154

3.1. Objectif

L'objectif de ce chapitre est de mettre en évidence l'effet de la longueur, du dosage et de la forme des fibres polypropylènes sur les performances rhéologique et mécanique du béton fabriqué à base de granulats naturels. Afin d'atteindre cet objectif, un programme expérimental a été établi et il est présenté dans la partie suivante.

3.2. Programme expérimental

Dans cette campagne expérimentale, quatre séries de bétons ordinaires sans et avec fibres ont été testées. La première série a été réalisée dans le but de choisir une formulation de béton témoin (sans fibres). Pour cela, des formulations de béton nommées BT1, BT2, BT3 et BT4, rassemblées dans la première partie du Tableau 3.1, ont été effectuées en variant uniquement le volume de pâte et en maintenant constants les autres paramètres (E_{eff} /C=0,5 ; G/S=1,44). Le choix de variation du volume de pâte est basé sur le fait que le volume de pâte permet de varier l'espacement maximal entre les granulats et de faciliter son écoulement tout en évitant le problème de ségrégation.

La formulation du béton témoin est choisie au regard des paramètres rhéologiques et tribologiques optimaux (viscosité et constance visqueuse faibles et un affaissement de l'ordre de 20 ±2cm). Ce choix est retenu afin de pouvoir réaliser suffisamment d'essais rhéologiques et tribologiques en introduisant les fibres (dans la 2ème série), en tenant compte de leur effet négatif sur les paramètres rhéologiques du béton qui a été prouvé par les recherches antérieures. De plus, il est primordial que ce béton soit stable contre la ségrégation lorsque l'adjuvant est introduit (dans la 3e série). Pour cela, un dosage en pâte optimal va permettre, d'une part, de minimiser l'effet négatif de l'introduction des fibres dans le béton, et, d'autre part, d'obtenir un béton stable vis-à-vis de la ségrégation.

Cette formulation optimale est ensuite étudiée dans la 2e série avec l'introduction de différents dosages en fibres polypropylènes (0,12 ; 0,24 et 0,36 %) en 3 longueurs (19, 30 et 54mm) tout en évaluant leurs effets sur la rhéologie des bétons réalisés.

La 3ème série consiste à maintenir un affaissement constant des bétons, afin d'étudier l'effet des fibres uniquement sur les propriétés rhéologiques des bétons, en écartant l'effet de l'ouvrabilité.

Pour cela, les mélanges de béton testés dans la deuxième série ont été adoptés en rajoutant un superplastifiant en plusieurs dosages.

Quant à la 4ème série, elle concerne l'étude de l'effet de l'introduction de fibres hybrides dans le même mélange de béton. Ce choix est justifié par les résultats des recherches antérieures mentionnées précédemment (synthèse bibliographique), qui prouvent que l'utilisation hybride des fibres (longueurs différentes) est une technique efficace en termes de limitation du développement des fissures. En effet, les fibres courtes limitent la microfissuration, tandis que les fibres longues limitent la macrofissuration du béton durci. Pour cela, cette méthode d'hybridation est souvent adoptée dans le domaine de construction.

À cet égard et afin de nous rapprocher de la réalité, trois mélanges de béton fibré ont été testés avec un dosage massique en fibres de 0,12 %, en utilisant deux longueurs (19 et 30mm) à différentes proportions (30 %, 50 % et 70 %) afin d'étudier les propriétés des bétons renforcés par des fibres hybrides à l'état frais. Les différentes formulations de béton sont présentées dans le Tableau 3.1.

Tableau 3.1. Formulations imbibées des bétons étudiés dans différentes séries.

Séries	**Béton**	**C_{VP}**	**$E_{efficace}/C$**	**G/S**	**L_{Fibre}**	**Fibre**	**Ciment**	**$E_{efficace}$**	**Gravillons**	**Sable**	**Sp**
		(m^3)			**(mm)**	**(%)**	**(Kg)**	**(Kg)**	**(Kg)**	**(Kg)**	**(%)**
1	B1	0,280	0,5	1,44	-	-	340	170	1071	744	-
	B2	0,316					384	192	1032	717	
	B3	0,380					462	231	963	669	
	B4	0,395					480	240	947	658	
2	BFL19	0,380	0,5	1,44	19	0,120	462	231	963	669	-
						0,240					
						0,360					
	BFL30				30	0,120					
						0,240					
						0,360					
	BFL54				54	0,120					
						0,240					
						0,360					
3	$BFL19_{Sp}$	0,380	0,5	1,44	19	0,120	462	231	963	669	0,2
						0,240					0,4
						0,360					0,4
	$FFL30_{Sp}$				30	0,120					0,2
						0,240					0,2
						0,360					0,4
	$FFL54_{Sp}$				54	0,120					0,2
						0,240					0,2
						0,360					-
4	$FFL19/30_{Sp}$	0,380	0,5	1,44	19=50%	0,060	462	231	963	669	0,2
					30=50%	0,060					
					19=70%	0,084					
					30=30%	0,036					
					19=30%	0,036					
					30=70%	0,084					

3.3. Procédure de formulation du béton

Dans notre étude, les formulations effectuées ont été basées sur la méthode Dreux-Gorisse modifiée. Les bétons étudiés ont été confectionnés selon la procédure de malaxage du béton fibré présentée dans la fiche technique des fibres SIKA [133]. La Figure 3.1 présente les étapes suivies pour le malaxage des bétons sans et avec fibres.

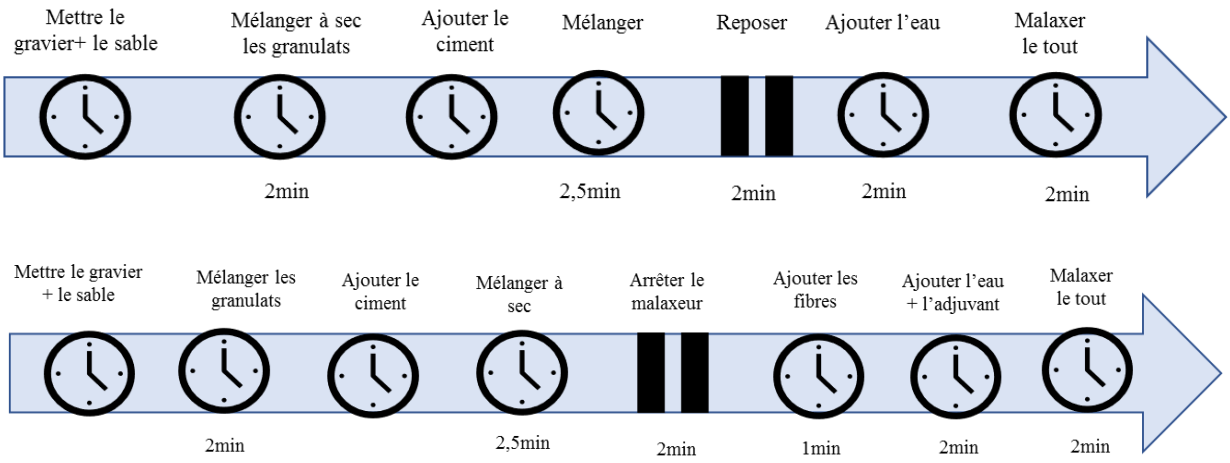


Figure 3.1. Protocole de malaxage du béton sans et avec fibres.

3.4. Résultats et discussion

3.4.1. Série 1 : Choix de la formulation du béton témoin

Afin de faciliter la lecture et l'analyse des différents données obtenues, ces derniers ont été résumés dans un seul tableau au début de la discussion des résultats de chaque série expérimentale. Ainsi, le

Tableau 3.2 présente les résultats enregistrés dans le cadre de cette première série. Par ailleurs, il a été choisi de discuter séparément l'effet de chaque paramètre sur les propriétés des bétons pour plus de clarté. Pour cela, l'interprétation et la discussion détaillée des résultats du

Tableau 3.2 sont présentées dans les paragraphes qui suivent.

Tableau 3.2. Formulation des bétons et leurs résultats rhéologiques.

Séries	Béton	C_{VP} (m^3)	E/C	G/S	L_{Fibre} (mm)	Fibre (%)	Aff (cm)	τ_0 (Pa)	μ (Pa.s)	τ_t (Pa)	ŋ (Pa.s/m)
1	B1	0,280	0,5	1,44	-	-	9	467,10	18,10	62,33	592,60
	B2	0,316					17	207,32	10,53	58,14	396,04
	B3	0,380					22	146,30	6,56	42,89	101,43
	B4	0,395					18	-	-	-	-

3.4.1.1. Effet du volume de pâte sur l'ouvrabilité

L'évolution de l'affaissement des bétons en fonction du volume de pâte de ciment est présentée sur la Figure 3.2, où une augmentation d'affaissement est observée avec la variation du volume de pâte de 0,280 jusqu'à 0,380 m^3. Au-delà de cette valeur, l'affaissement diminue à cause d'un phénomène de ségrégation observé à la fin de l'essai. Par conséquent, la rhéologie du béton de 0.400 m^3 de pâte cimentaire n'a pas été étudié.

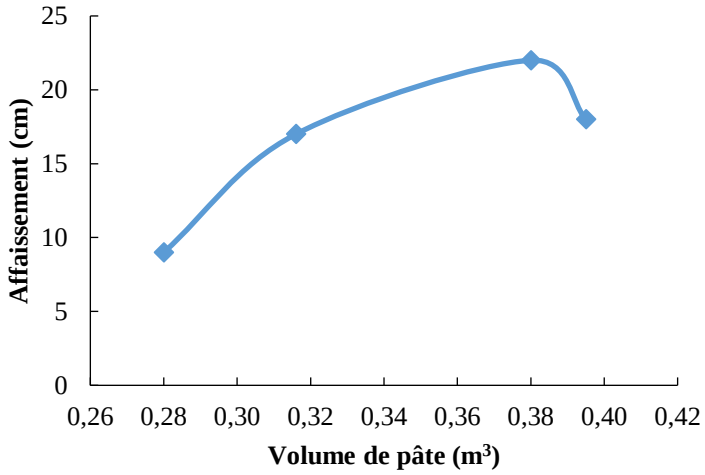


Figure 3.2. Évolution de l'affaissement des bétons en fonction du volume de pâte.

3.4.1.2. Effet du volume de pâte sur la masse volumique et l'air occlus

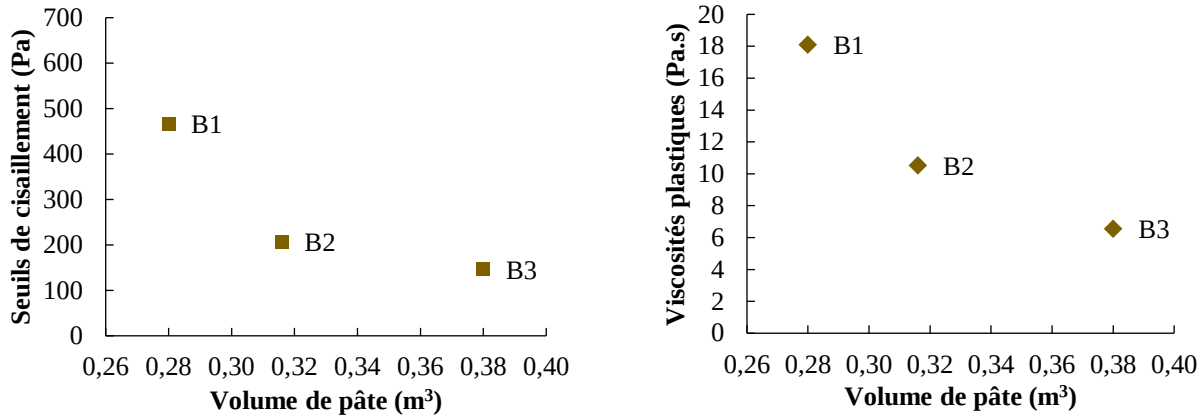
Les résultats de la masse volumique et de l'air occlus des bétons frais en fonction de volume de pâte sont présentés dans le Tableau 3.3. D'après ce dernier, il apparaît que le volume de l'air occlus est quasiment constant, contrairement à la masse volumique ($\boldsymbol{\delta}$) qui augmente avec l'augmentation du volume de pâte. Ce constat est expliqué par le fait que la masse volumique du ciment est plus élevée que celle des granulats. Par conséquent l'augmentation du volume de pâte dans le béton implique une augmentation de la masse volumique totale du béton.

Tableau 3.3. Résultats de la masse volumique et de la teneur en air des bétons testés.

Séries	Béton	C_{VP} (m^3)	E/C	G/S	Ciment (Kg)	Eau (Kg)	Graviers (Kg)	Sable (Kg)	δ (Kg/m^3)	Teneur en air (%)
1	B1	0,280	0,5	1,44	340	170	1071	744	2335	2,2
	B2	0,316			384	192	1032	717	2339	2,1
	B3	0,380			462	231	963	669	2358	2,2
	B4	0,395			480	240	947	658	2361	2,3

3.4.1.3. Effet du volume de pâte sur la rhéologie des bétons

Les paramètres rhéologiques obtenus (la viscosité et le seuil de cisaillement) sont présentés sur la Figure 3.3. D'après cette dernière, il apparaît clairement qu'une augmentation du volume de pâte (de 0,280 à 0,380) engendre une diminution des deux propriétés rhéologiques. En effet, l'utilisation d'un volume de pâte élevé permet d'écarter les granulats grâce à l'effet lubrifiant de la pâte cimentaire. Une distance plus importante entre les granulats est créée par la suite et une réduction de frottement intergranulaire est obtenu, de ce fait les propriétés rhéologiques sont améliorées. Des résultats similaires ont été trouvés dans la littérature par *Soualhi et al.* qui confirment que le volume élevé de la pâte permet d'avoir un béton frais de bon caractéristiques rhéologiques [134].



(a) (b)

Figure 3.3. Évolution du seuil de cisaillement (a) et de la viscosité plastique (b) en fonction du volume de pâte.

3.4.1.4. Effet du volume de pâte sur le comportement tribologique

La Figure 3.4 présente l'évolution des paramètres tribologiques des bétons frais. Les résultats montrent que l'augmentation du volume de pâte de ciment entraîne une diminution très importante du seuil d'interface. De même, la constante visqueuse diminue fortement d'une manière quasiment linéaire en fonction de l'augmentation du volume de pâte, ce qui est cohérent avec les résultats d'autres études antérieurs [135], [136]. L'évolution de la constante visqueuse en fonction du volume de pâte est expliquée par le fait que la pâte de ciment réagit en tant que transporteur des particules fines dans le béton, pour cela un volume de pâte élevé favorise la formation d'une couche limite épaisse à l'interface entre le béton et la paroi. Cette couche permet de diminuer le frottement à l'interface et facilite le mouvement du béton dans le récipient du tribomètre, ce qui se traduit par une bonne pompabilité du béton frais, étant donné que l'essai de tribologie consiste à simuler l'écoulement du béton dans les tuyaux de pompage où la zone interfaciale béton/cylindre représente l'interface béton/paroi interne du tuyau au moment du pompage (Figure 3.5).

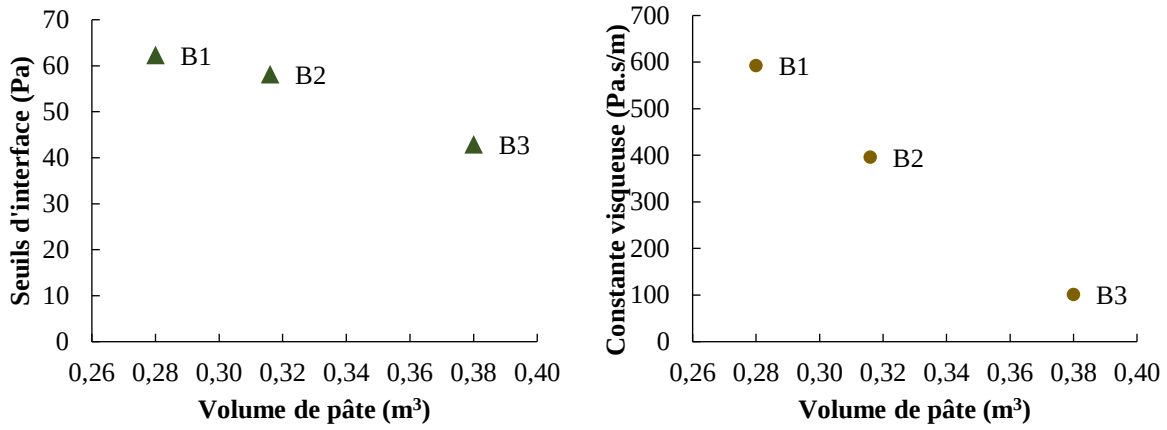
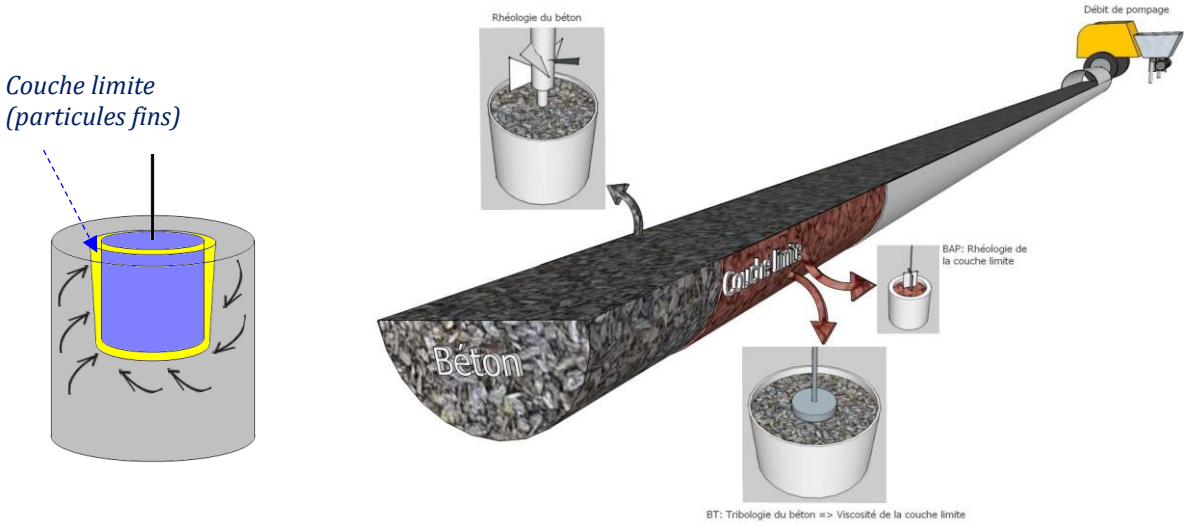


Figure 3.4. Évolution du seuil d'interface (a) et de la constante visqueuse (b) en fonction du volume de pâte.



(a) (b)

Figure 3.5. Mouvement du béton dans le tribomètre au moment de l'essai (a) et dans le tuyau lors au moment du pompage (b)

À la lumière de ce qui précède et compte tenu des critères définis au début de cette étude, le mélange nommé « B3 » a été retenu comme béton témoin, qui sera étudié par la suite avec l'introduction des fibres. Ce dernier a montré des propriétés rhéologiques optimales (viscosité plastique et constante visqueuse faibles et affaissement élevé), au regard de la facilité de la mise

en œuvre. La formulation du béton témoin choisie ainsi que ses paramètres rhéologiques et tribologiques sont présentées dans le Tableau 3.4.

Tableau 3.4. Formulation du béton de témoin « B3 ».

Béton	**$C_{V\,P}$** **(m^3)**	**E_{eff}/C**	**G/S**	**δ** **(Kg/m^3)**	**Teneur en air** **(%)**	**τ_0** **(Pa)**	**μ** **(Pa.s)**	**τ_t** **(Pa)**	**η** **(Pa.s/m)**
B3	0,380	0,5	1,44	2358	2,2	146,30	6,56	42,89	101,43

3.4.2. Série 2 : Étude de l'effet des fibres polypropylènes « FPP » sur les propriétés du béton frais

Après avoir défini la formulation du béton témoin « B3 », nous nous sommes intéressés dans cette partie à l'effet de la longueur et du dosage des fibres sur l'ouvrabilité du béton (affaissement au cône d'Abrams) et sur ses performances rhéologique et tribologique. Pour ce faire, 12 formulations de béton fibré basées sur la formulation « B3 » ont été étudiées en utilisant des fibres de trois longueurs (19, 30 et 54mm), dans des mélanges de béton nommés BFL19, BFL30 et BFL54. Pour chaque longueur de fibre utilisée, différents pourcentages ont été testés (0,12 % ; 0,24 % et 0,36 %). Ces formulations et les résultats obtenus sont récapitulés dans le Tableau 3.5. Il est à noter que les équipements d'essais rhéologique et tribologique sont adaptés uniquement pour des bétons avec affaissement supérieur à 10 cm ; pour cette raison, les mélanges de béton ayant un affaissement inférieur à cette valeur ont été écartés de ces essais (BFL54 P0.36 %).

Tableau 3.5. Formulation des bétons fibrés (BF) et leurs résultats rhéologiques et tribologiques.

Séries	Béton	C_{VP} (m^3)	$E_{efficace}/C$	G/S	L_{Fibre} (mm)	Fibre (%)	Aff (cm)	τ_0 (Pa)	μ (Pa.s)	τ_t (Pa)	η (Pa.s/m)
2	BFL19	0,380	0,5	1,44	19	0,120	19	146,3	9,9	41,0	296,3
						0,240	17	214,2	10,5	27,6	151,3
						0,360	11	182,5	14,8	32,4	181,4
	BFL30				30	0,120	20	114,0	7,1	70,4	244,1
						0,240	16	140,0	12,6	77,9	250,3
						0,360	10	159,4	11,7	91,2	141,8
	BFL54				54	0,120	16	146,2	9,3	75,5	256,5
						0,240	13	250,0	10,8	32,7	225,5

3.4.2.1. Effet de l'introduction des FPP sur l'ouvrabilité du béton

Les résultats de l'essai d'affaissement sont présentés sur la Figure 3.6. D'après cette dernière, nous constatons que pour tous les mélanges, l'affaissement diminue progressivement avec l'augmentation du dosage en fibres. Ces résultats sont cohérents avec des résultats d'autres chercheurs trouvés dans la littérature qui montrent que l'introduction de fibres influe négativement sur l'ouvrabilité du béton [54],[5],[69].

Nous constatons également que les valeurs d'affaissement obtenues pour les bétons renforcés par les fibres de 30 et 19mm sont quasiment identiques, en raison de la faible différence de longueur entre les deux fibres. Par ailleurs, avec le même pourcentage en fibres, l'affaissement diminue si l'on augmente la longueur de la fibre jusqu'à 54mm, ce qui montre l'influence importante de ce paramètre sur l'ouvrabilité du béton. En conclusion, la longueur et le dosage élevés des fibres provoquent des frottements supplémentaires entre les particules ce qui se traduit par un mauvais écoulement de béton et donc une faible ouvrabilité.

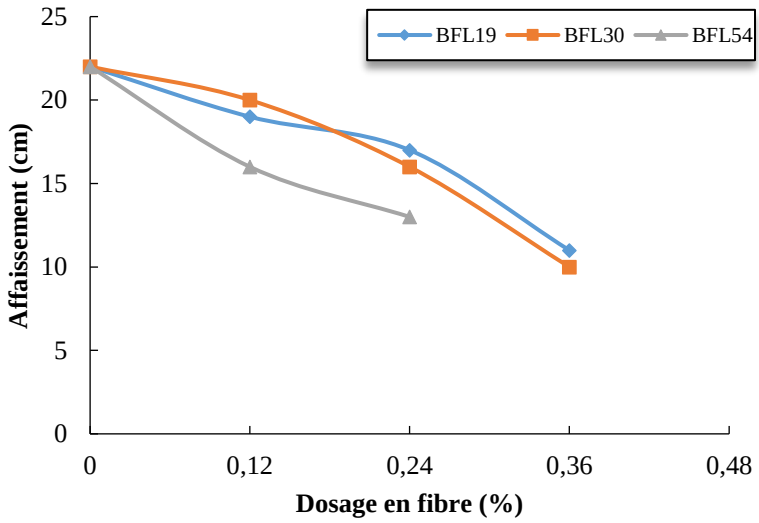


Figure 3.6. Évolution de l'affaissement des BF en fonction du dosage en FPP.

3.4.2.2. Effet de l'introduction des FPP sur la masse volumique et l'air occlus du béton frais

Les résultats de la teneur en air occlus et de la masse volumique des bétons frais en fonction du dosage en fibre sont présentés dans le Tableau 3.6. D'après ce dernier, nous constatons que l'introduction des fibres n'a pas d'influence sur la masse volumique ni sur la teneur en air occlus du béton frais, en raison de la masse volumique faible de ce type de fibre. Des résultats similaires ont été trouvés par *Hassanpour et al.* qui ont étudié l'effet des fibres polypropylènes et métalliques sur les propriétés du béton frais. Les résultats issus de ce travail ont prouvé que la masse volumique du béton ne change pas en rajoutant les fibres polypropylènes, contrairement aux fibres métalliques qui possèdent une masse volumique élevée [36]. Quant à la quantité d'air occlus, il a été rapporté par *Akça et al.* [7] que l'addition de 1,5 % de FPP (par volume) augmente légèrement le volume d'air de 1 jusqu'à 1,3 %.

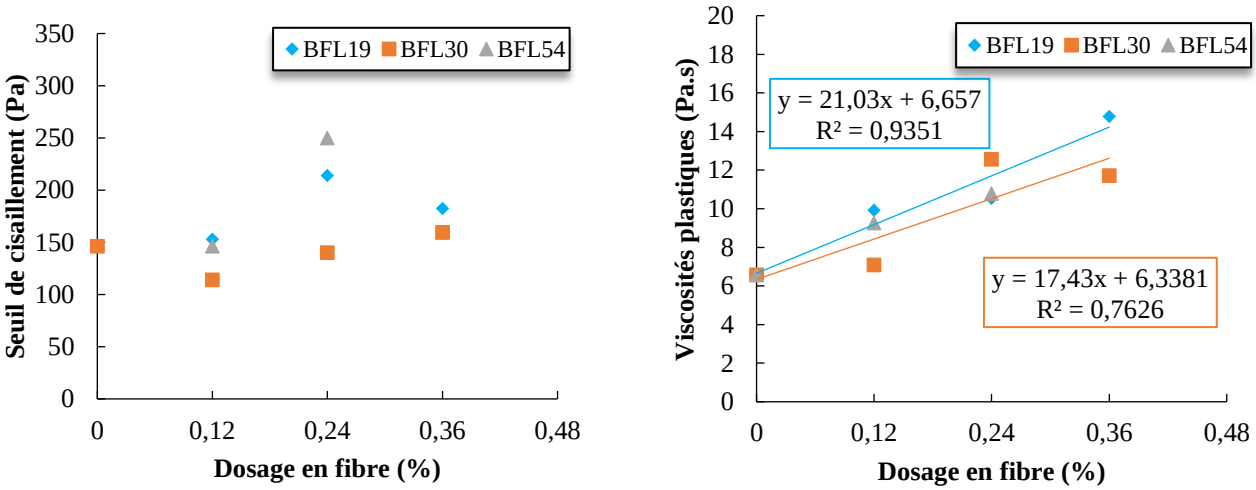
Tableau 3.6. Résultats de la masse volumique et de la teneur en air des BF testés.

Séries	Béton	C_{VP} (m^3)	E/C	G/S	L_{Fibre} (mm)	Fibre (%)	δ (Kg/m^3)	Air occlus (%)
2	BFL19	0,380	0,5	1,44	19	0,120	2308	2,0
						0,240	2305	2,2
						0,360	2301	2,1
	BFL30				30	0,120	2310	2,1
						0,240	2309	2,0
						0,360	2306	2,1
	BFL54				54	0,120	2316	2,1
						0,240	2314	2,2

3.4.2.3. Effet des fibres sur la rhéologie du béton

Compte tenu des résultats présentés précédemment, il a été confirmé que l'introduction des fibres diminue l'ouvrabilité du béton. Cependant, au même taux d'affaissement, les bétons peuvent avoir des paramètres rhéologiques différents. Pour cette raison, les paramètres rhéologiques des mélanges précédents ont été étudiés et leur évolution en fonction du dosage en fibres est présentée sur la Figure 3.7. Cette dernière montre que l'introduction des fibres ait augmenté la viscosité plastique et le seuil de cisaillement en fonction de l'augmentation du dosage en fibres. Cette augmentation est due à une modification de la structure granulaire et à une diminution de la compacité maximale causée par l'introduction des fibres. De plus, la présence des fibres dans le béton entrave le mouvement des granulats durant le test rhéologique (le cisaillement), ce qui entraîne une augmentation de la viscosité plastique et du seuil de cisaillement. Dans ce contexte, *Abdelrazi et Khayat* ont étudié la rhéologie du béton autoplaçant renforcé par des fibres polypropylènes où il a été révélé que l'introduction des fibres à un dosage de 0,5 % induit une augmentation des paramètres rhéologiques d'environ 50 %, ce qui est confirmé avec les résultats trouvés dans ce travail [137].

Quant à l'effet de la longueur et de la forme de fibre, les valeurs de la viscosité des bétons « BFL19 et BFL54 » renforcés par des fibres de même forme (19 et 54mm) sont quasiment identiques. Cela indique que la longueur de la fibre n'a pas d'influence significative sur la viscosité du béton lorsque la forme des fibres utilisées est identique. En revanche, le comportement rhéologique du BFL30 est complètement différent dû à la forme différente de la fibre de 30mm, cette fibre est caractérisée par une bonne flexibilité qui lui permet de s'adapter au mouvement des granulats dans le mélange. Par conséquent, elle peut facilement remplir les vides et passer à travers les granulats, ce qui donne une meilleure dispersion par rapport au FPP de 19 et 54mm.



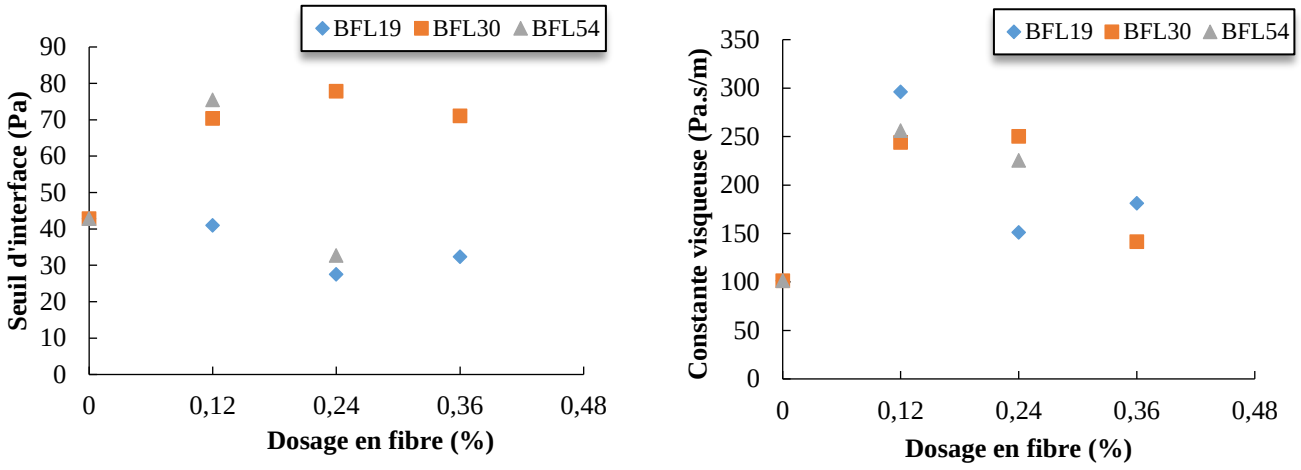
(a) (b)

Figure 3.7. Évolution du seuil de cisaillement (a) et de la viscosité plastique (b) en fonction du dosage en fibres.

3.4.2.4. Effet des fibres sur le comportement tribologique du béton

En ce qui concerne les paramètres tribologiques (τ_0, η), l'évolution du seuil d'interface et de la constante visqueuse en fonction du dosage en fibres est représentée sur la Figure 3.8 (a) et (b). Une augmentation du seuil d'interface et de la constante visqueuse a été enregistrée pour les bétons renforcés par 0,12 % des fibres par rapport au béton témoin. Néanmoins, à un dosage en fibres supérieur à 0,12 %, les valeurs des paramètres tribologiques obtenus sont de plus en plus perturbées pour les trois mélanges BFL19, BFL30 et BFL54. Cette perturbation est due

principalement à la mauvaise dispersion des fibres dans le béton compte tenu le protocole de l'essai. Ce dernier consiste à mettre en rotation un cylindre plein en acier à l'intérieur du récipient rempli du béton ; cette rotation attire les fibres dans la zone cisaillée où elles restent bloquées en raison de la forme pleine du cylindre, ce qui induit une ségrégation du béton comme le montre la Figure 3.9.



(a) (b)

Figure 3.8. Évolution du seuil d'interface (a) et de la constante visqueuse (b) en fonction du dosage en fibre des BF.



Figure 3.9. Concentration des PPF de 54mm autour de la pale au moment de l'essai.

3.4.3. Série 3 : Étude de l'effet de superplastifiant sur les propriétés du béton frais

En se basant sur les résultats obtenus précédemment, il a été conclu que l'introduction des fibres dans le béton en pourcentage élevé induit une dégradation d'ouvrabilité et de paramètres rhéologiques et tribologiques du béton, ce qui conduit à une mise en œuvre difficile. À cet effet, un superplastifiant a été ajouté aux 8 mélanges de béton de l'étude précédente, rassemblés dans le Tableau 3.1 (série 2), afin de caractériser l'effet du superplastifiant sur leurs propriétés d'écoulement en maintenant un affaissement constant (autour de 20 cm). Le Tableau 3.7 résume les formulations de cette série (3) ainsi que les résultats d'affaissement, de rhéologie et de tribologie obtenus, ensuite l'effet de l'adjuvant sur chaque paramètre est présenté dans les parties qui suivent.

Tableau 3.7. Formulation des bétons fibrés adjuvantés (BFLA) et leur résultat rhéologique et tribologique.

Séries	Béton	C_{VP} (m^3)	$E_{efficace}/C$	G/S	L_{Fibre} (mm)	Fibre (%)	Sp (%)	Aff (cm)	τ_0 (Pa)	μ (Pa.s)	τ_t (Pa)	η (Pa.s/m)
3	BFL19	0,380	0,5	1,44	19	0,120	0,2	22	80,1	3,9	39,2	127,1
						0,240	0,4	22	39,8	4,1	27,6	151,3
						0,360	0,4	20	77,8	5,5	19,6	121,0
	BFL30				30	0,120	0,2	22	69,5	2,6	29,6	64,9
						0,240	0,2	18	26,5	13,7	34,8	106,8
						0,360	0,4	20	45,2	13,1	25,0	228,7
	BFL54				54	0,120	0,2	22	86,5	7,1	32,4	186,8
						0,240	0,2	19	169,2	12,1	45,8	177,8

3.4.3.1. Effet de l'adjuvant sur l'ouvrabilité du béton

La Figure 3.10 présente l'évolution de l'affaissement des bétons testés vis-à-vis du dosage en fibres avec l'ajout du superplastifiant. Il est à noter que le dosage en superplastifiant a été déterminé de manière à assurer un affaissement autour de 20 cm et il a été fixé à 0,4 % comme dosage maximal, car au-delà de cette limite, une ségrégation sévère du béton a été observée. Effectivement, les résultats obtenus montrent que l'ajout de superplastifiant a permis

d'améliorer l'ouvrabilité des bétons, de sorte que les valeurs d'affaissement varient entre 18 à 22 cm, ce qui a été visé dès le début.

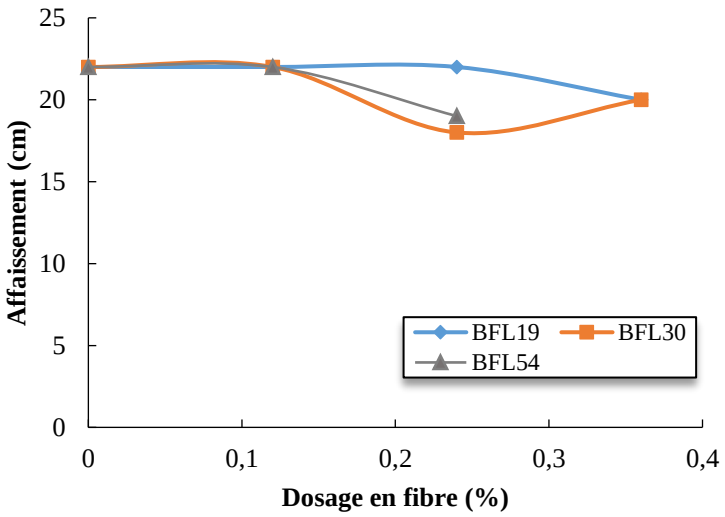


Figure 3.10. Les résultats de l'affaissement des bétons fibrés avec adjuvant.

3.4.3.2. Effet de l'incorporation de l'adjuvant sur la masse volumique et sur l'air occlus du béton frais

L'ajout d'un superplastifiant a permis d'améliorer l'ouvrabilité des bétons fibrés avec un affaissement autour de 20 cm. D'autres paramètres peuvent être également affectés, comme la masse volumique et l'air occlus du béton frais. Les données obtenues de ces deux derniers paramètres sont représentées dans le Tableau 3.8 où il apparaît que le volume d'air occlus n'a pas été affecté par l'ajout de superplastifiant. En revanche, une légère augmentation (2 %) de la masse volumique des bétons a été observée avec l'ajout de l'adjuvant ; par conséquent, il a été conclu que le superplastifiant n'a pas d'effet significatif sur la teneur en air occlus ni sur la masse volumique.

Tableau 3.8. Résultats de la masse volumique et de la teneur en air occlus des BF avec adjuvant.

Séries	Béton	C_{VP} (m^3)	E/C	G/S	L_{Fibre} (mm)	Fibre (%)	Sp (%)	δ (Kg/m^3)	Air occlus (%)
3	$BFL19_{Sp}$	0,380	0,5	1,44	19	0,120	0,2	2329	2,1
						0,240	0,4	2350	2,3
						0,360	0,4	2347	2,3
	$BFL30_{Sp}$				30	0,120	0,2	2333	2,2
						0,240	0,2	2330	2,3
						0,360	0,4	2353	2,2
	$BFL54_{Sp}$				54	0,120	0,2	2357	2,2
						0,240	0,2	2355	2,3

3.4.3.3. Effet de l'adjuvant sur le comportement rhéologique

L'évolution du seuil de cisaillement et de la viscosité plastique en fonction de l'augmentation du dosage en fibres de différentes longueurs 19, 30 et 54mm pour les bétons avec et sans superplastifiant est présentée sur les Figure 3.11, Figure 3.12 et Figure 3.13.

Concernant le seuil de cisaillement, les résultats montrent que pour tous les mélanges du béton étudiés, le seuil de cisaillement diminue avec l'ajout du superplastifiant, ce qui s'explique par l'augmentation de l'affaissement étant donné le fait que les deux paramètres sont liés. Cette liaison a fait l'objet de nombreuse études antérieures y compris le travail de *Abdelrazi et Khayat* [137] (présenté dans la partie 1.4.1). Ces derniers ont rapporté que l'affaissement et le seuil de cisaillement du béton sont inversement liés selon l'équation suivante :

$$\tau_0 = \frac{3{,}985 \times 10^{15}}{D_s^5} \qquad Avec\ \ R^2 = 0{,}99 \qquad \text{Équation 3.1 [137]}$$

Quant à la viscosité plastique des bétons, il a été observé que pour tous les mélanges de 19mm, et ceux de 30 et 54mm à faible dosage (<0,12 %), la viscosité plastique a été amélioré par l'introduction de l'adjuvant. Cependant, l'ajout de l'adjuvant n'a pas montré d'effets sur la viscosité plastique des bétons à fort dosage/longueur en fibre (dosage > 0,12 % & longueur = 30 et 54mm). Ce phénomène est expliqué par le fait que les fibres de longueur importante gênent le mouvement des granulats et rendent leur déplacement plus difficile au moment du cisaillement ; par conséquent, le mouvement relatif entre les couches de béton devient plus difficile et la viscosité augmente. Cette interprétation est en cohérence avec les résultats rapporté par *Zhang et al*.. En effet, ces derniers ont étudié l'influence de dosage en fibres (0,1 % ; 0,5 % ; 1 % ; 1,5 % et 2 %) sur la rhéologie de la pâte de ciment, avec un dosage fixe en adjuvant. Ils sont révélé qu'un dosage élevé en fibres de longueur importante engendre des floculations au niveau de la pâte de ciment, ce qui augmente sa viscosité [54].

En général, l'ajout de superplastifiant a permis d'améliorer plusieurs propriétés du béton frais, notamment sa maniabilité et son comportement rhéologique, malgré l'augmentation du dosage de fibres. En outre, un écoulement stable des mélanges a été observé durant l'essai ce qui indique que la dispersion des fibres dans le mélange a été également améliorée.

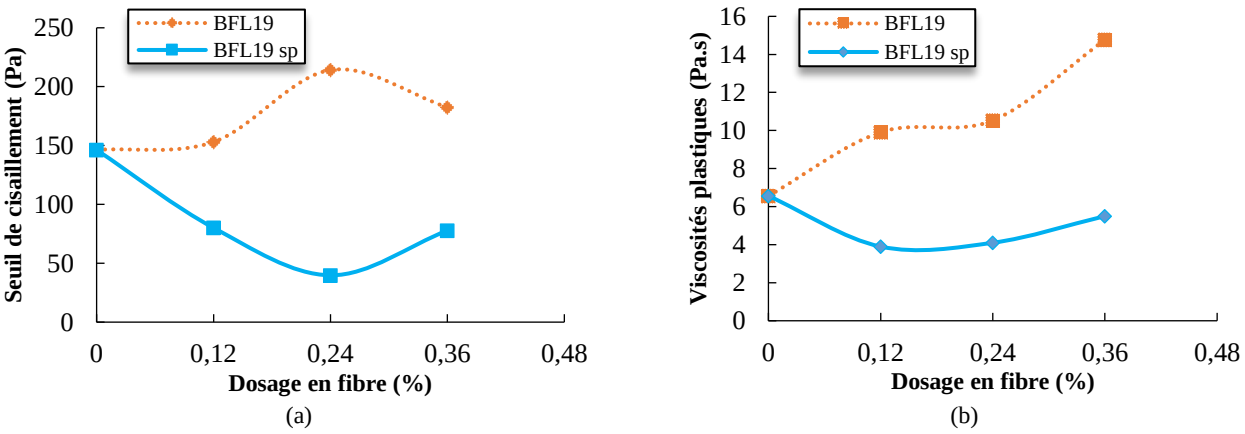
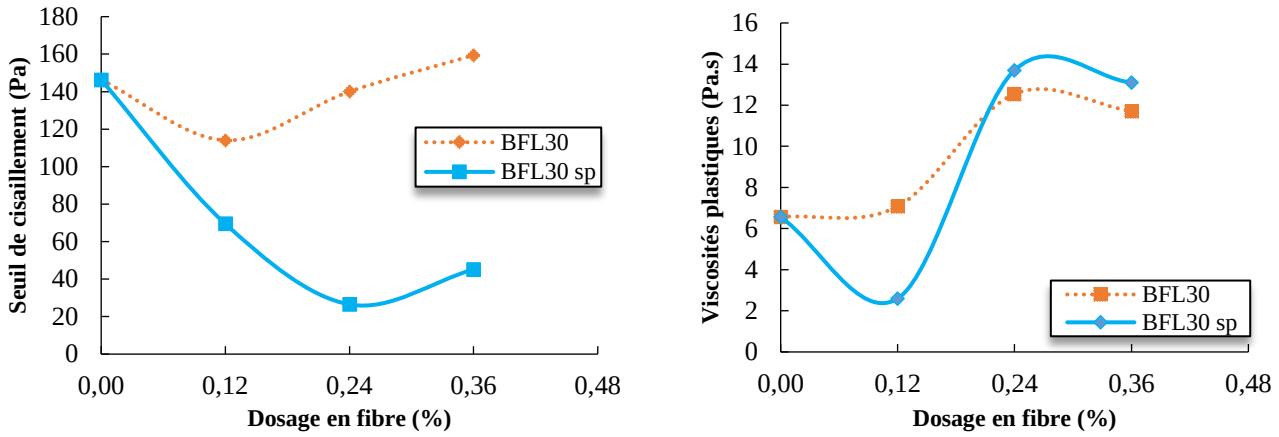
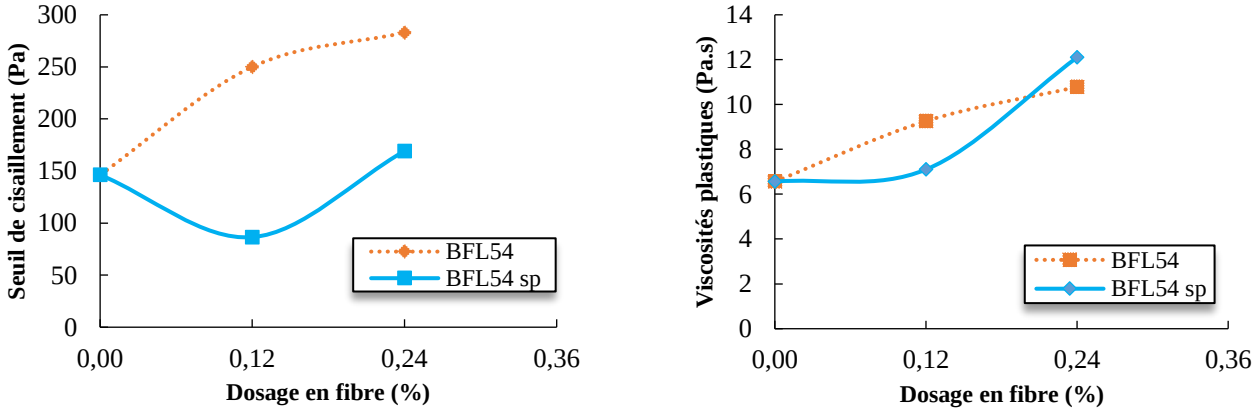


Figure 3.11. Évolution du seuil de cisaillement(a) et de la viscosité plastique(b) de BFL19 avec et sans adj.



(a) (b)

Figure 3.12. Évolution du seuil de cisaillement (a) et de la viscosité plastique (b) de BFL30 avec et sans adj.



(a) (b)

Figure 3.13. Évolution du seuil de cisaillement (a) et de la viscosité plastique (b) de BFL54 avec et sans adj

3.4.3.4. Effet de l'adjuvant sur le comportement tribologique

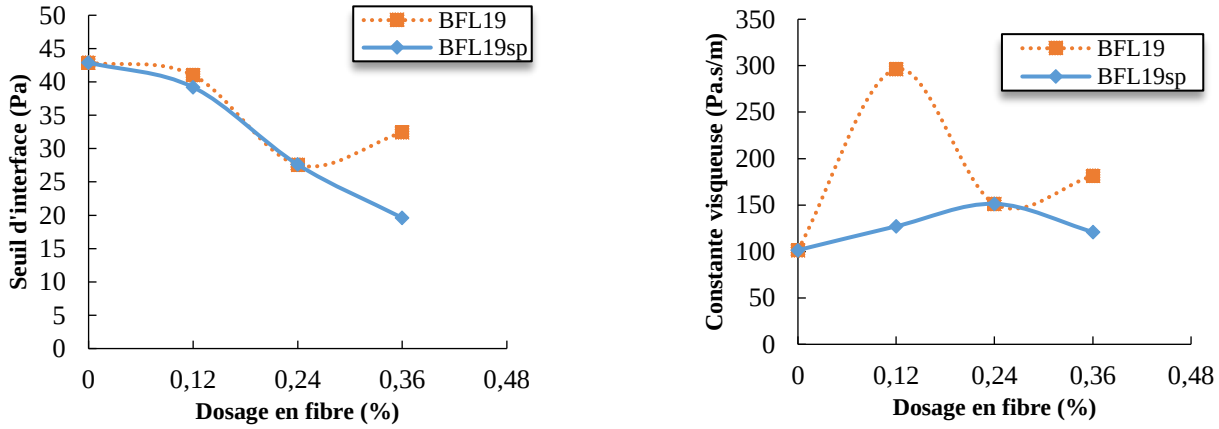
Le propriétés tribologiques des bétons renforcés par les trois longueurs de fibres avec et sans adjuvant est présenté dans la Figure 3.14, la Figure 3.15 et la Figure 3.16. Il apparaît que, pour les bétons renforcés par les fibres de 19mm, le seuil d'interface n'est pas affecté par la présence de l'adjuvant où les deux courbes (du béton avec et sans adjuvant) sont quasiment superposées. Cela est dû à l'effet faible de cette fibre sur le seuil d'interface expliqué précédemment. Le

dernier mélange de 0,36 %FPP19 fait exception avec un seuil plus faible par rapport à celui du béton sans adjuvant, ce qui est probablement dû au pourcentage élevé d'adjuvant (0,4 %).

Contrairement aux $BFL19_{sp}$, le seuil d'interface des $BFL30_{sp}$ et $BFL54_{sp}$ a diminué significativement pour tous les dosages en FPP. Etant donné que l'introduction des fibres de 30 et 54mm sans adjuvant a montré un effet négatif sur le seuil d'interface (paragraphe 3.4.2.4), l'ajout de l'adjuvant a permis d'éliminer les floculations de la pâte de ciment dues aux rajouts des fibres.

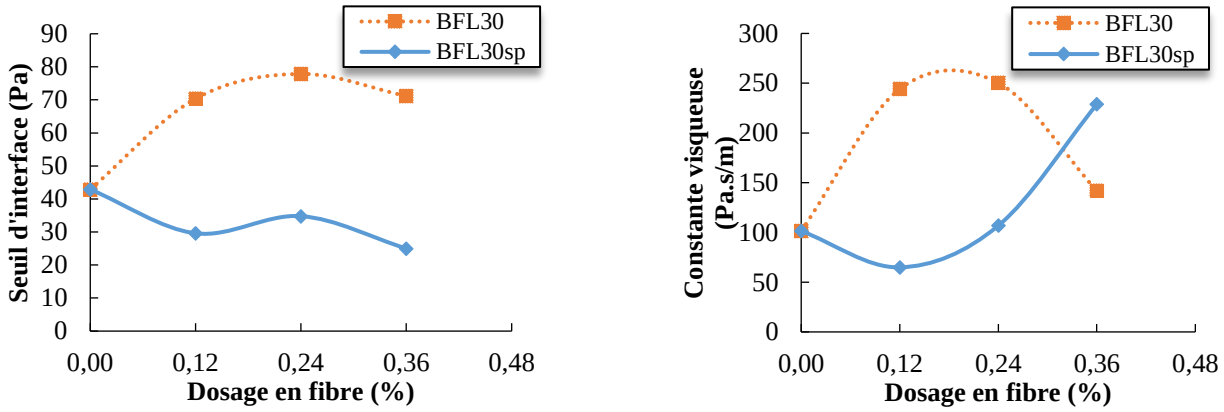
Quant à la constante visqueuse, les résultats montrent une amélioration avec l'utilisation de l'adjuvant pour les bétons renforcés par des fibres de faible longueur (19mm) et de faible dosage (0.36 %). Cependant, l'utilisation d'une longueur élevée de fibre (54mm) diminue l'effet de l'adjuvant, tandis qu'avec un dosage élevé en fibres (0.36 % du BFL30), l'adjuvant est devenu inefficace, ce qui a entraîné une augmentation de la constante visqueuse.

Ce constat nous mène à conclure que le superplastifiant améliore la pompabilité des bétons renforcés par des fibres de longueur et dosage faibles, au point d'éliminer l'effet négatif d'ajout des fibres. En effet, le superplastifiant est absorbé par chaque particule de ciment, et grâce à la répulsion électrostatique et aux effets d'empêchement stérique du superplastifiant dans les mélanges, l'état de floculation des particules de ciment avec les fibres est détruit. En conséquence, les fibres sont mieux dispersées dans le béton et l'affaissement, les propriétés rhéologiques et tribologiques s'améliorent, comme le montre la Figure 3.17 [54].



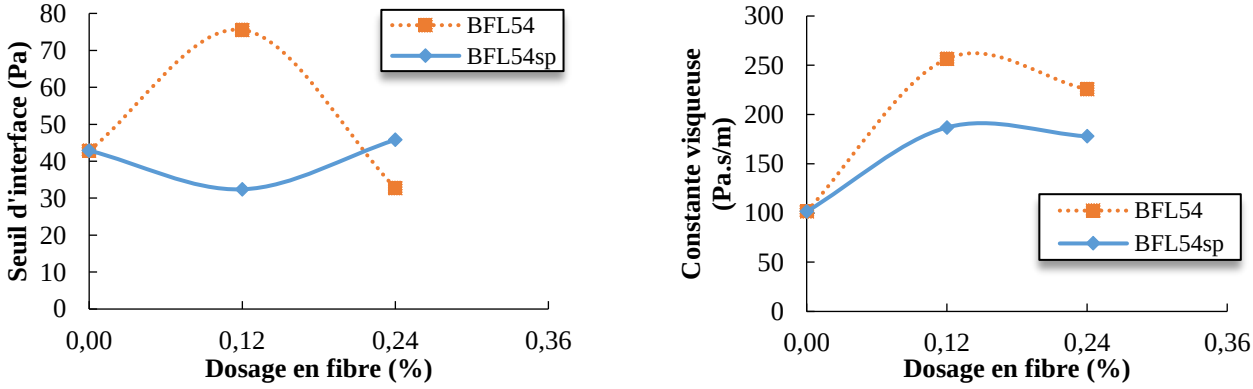
(a) (b)

Figure 3.14. Évolution du seuil d'interface(a) et de la constante visqueuse (b) de BFL19 avec et sans adj.



(a) (b)

Figure 3.15. Évolution du seuil d'interface(a) et de la constante visqueuse (b) de BFL30 avec et sans adj.



(a) (b)

Figure 3.16. Évolution du seuil d'interface(a) et de la constante visqueuse (b) de BFL54 avec et sans adj.

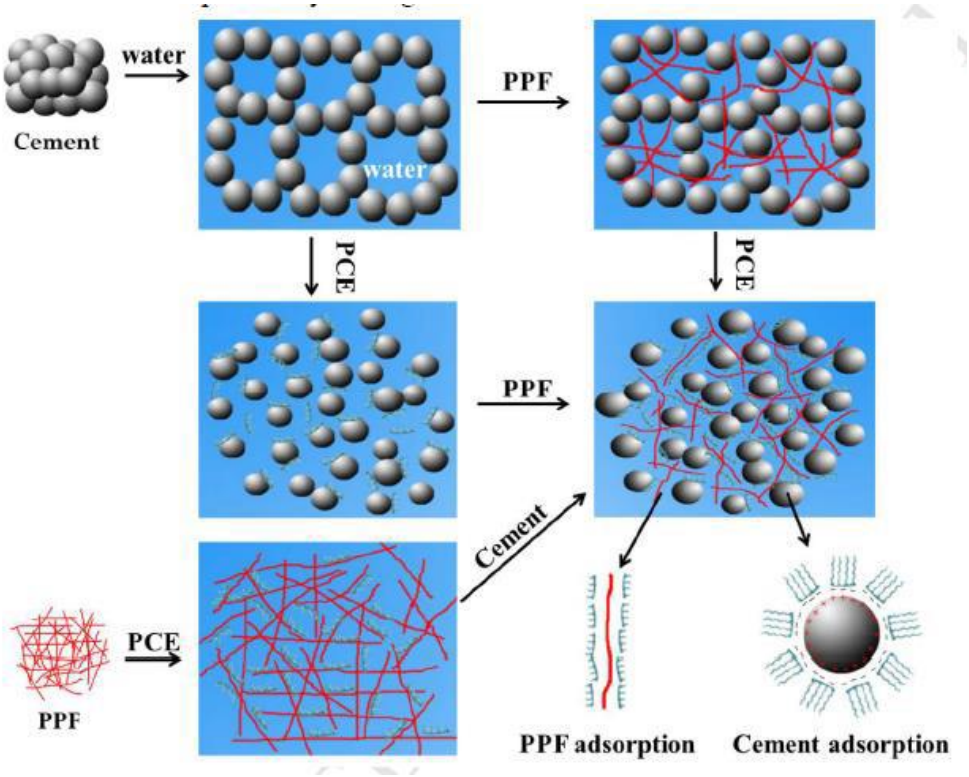


Figure 3.17. Diagramme de l'action de PCE sur le comportement d'absorption des particules de ciment et de dispersion de PPF dans une pâte cimentaire [54].

3.4.4. Série 4 : Étude de l'effet de la longueur mixte des fibres dans le même béton

L'objectif de cette série est d'étudier l'effet des fibres de longueur mixte (courte et longue), dans le même mélange, sur les performances rhéologique et tribologique du béton, sachant que les fibres courtes ont été utilisées dans la littérature pour limiter la microfissuration et les fibres longues pour la macrofissuration et cela a abouti à des résultats intéressants. En revanche, leurs effets sur les propriétés d'écoulement des bétons sont peu documentés. Comme c'est montré précédemment, l'écoulement des bétons adjuvantés est optimal au dosage en fibres de 0,12 %, quelle que soit la longueur utilisée. Pour cette raison, nous avons introduit, dans le béton témoin choisi précédemment, un pourcentage total en fibres de 0,12 % et de longueur mixte avec des fractions différentes, respectivement 30/70 %, 50/50 % et 70/30 % de FPP19 et FPP30.

3.4.4.1. Effet de la longueur mixte des FPP sur l'affaissement, la masse volumique et l'air occlus

L'effet de l'introduction des fibres mixtes sur l'affaissement, la masse volumique et l'air occlus de différents mélanges est présenté dans le Tableau 3.9. D'après ce dernier, nous constatons que le dosage en adjuvant utilisé a permis de garder la classe de consistance avec un affaissement quasiment constant, autour de 22 cm. De même, la masse volumique et le volume d'air occlus semblent ne pas être affectés par cette mixité de fibres, ce qui confirme les résultats trouvés dans les parties précédentes qui concernent l'effet des fibres individuelles sur ces paramètres.

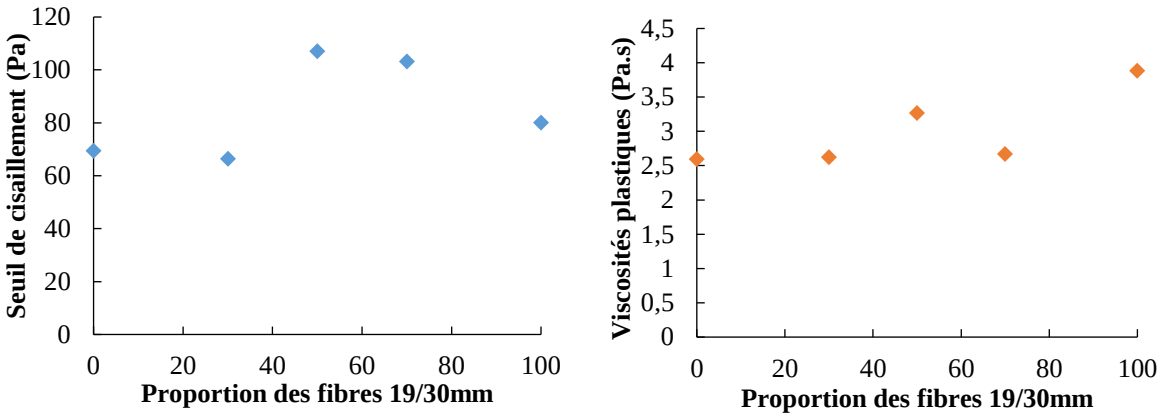
Tableau 3.9. Les résultats d'affaissement, de masse volumique et d'air occlus des BFPP19/30.

Séries	**Béton (19/30) %**	**C_{VP} (m^3)**	**E/C**	**G/S**	**Fibre (%)**	**Sp (%)**	**Affaissement (cm)**	**δ (Kg/m^3)**	**Air occlus (%)**
4	50/50	0,380	0,5	1,44	0,060 0,060	0,2	22	2329	2,3
	70/30				0,084 0,036	0,2	21	2330	2,2
	30/70				0,036 0,084	0,2	22	2328	2,2

3.4.4.2. Effet de la longueur mixte des FPP sur les propriétés rhéologiques

En termes de rhéologie, la Figure 3.18 présente l'évolution du seuil de cisaillement et de la viscosité plastique des bétons renforcés par deux fibres différentes (19 et 30mm) en fonction du dosage en fibres mixte. Il apparait que le seuil de cisaillement est plus élevé pour les mélanges 50/50 et 70/50 de FPP19/30. En revanche, la viscosité plastique reste constante avec l'augmentation du pourcentage de PPF19 et la diminution de la quantité de PPF30 jusqu'à l'introduction de 70 % de PPF19 ; au-delà de ce pourcentage, elle augmente de manière significative. La combinaison des deux formes (rectiligne/torsadée) et longueurs (19 et 30mm)

jusqu'à 70/30 de FPP19 et 30mm a éliminé l'effet négatif du PPF19 sur la viscosité plastique du béton. Cela s'explique par la forme différente des fibres (détaillée dans la partie des matériaux), et de la bonne dispersion des fibres dans le mélange en raison de l'introduction du superplastifiant.



(a) (b)

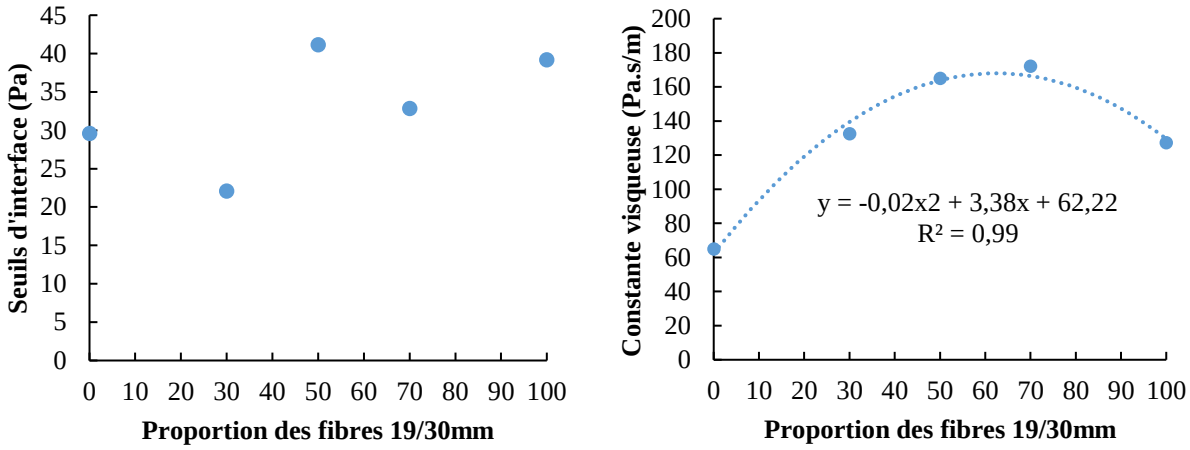
Figure 3.18. Les résultats du seuil de cisaillement (a) et de la viscosité plastique (b) des $BFL19/30_{sp}$ à 0,12 % de fibres.

3.4.4.3. Effet de la longueur mixte des FPP sur les propriétés tribologiques

En termes de tribologie, la Figure 3.19 représente l'évolution des paramètres tribologiques vis-à-vis de la proportion des fibres 19/30mm pour un dosage total de 0,12 %. Nous remarquons que le seuil varie de manière arbitraire en fonction de l'augmentation du dosage en fibres de 19mm, avec une tendance globale légèrement croissante. En revanche, la variation de la constante visqueuse suit une tendance quasi parabolique, parallèle à l'augmentation de la proportion des fibres 19/30mm pour un dosage total de 0,12 %. En effet, lorsque le mélange contient plus de fibres de 30mm de longueur, la constante visqueuse est faible, ce qui diminue les frottements de l'interface et favorise la pompabilité. Cependant, lorsqu'on rajoute plus de fibre 19mm, la constante visqueuse augmente et atteint sa valeur maximale à une proportion de L19/30mm égale à environ 70 %. Ce fait est expliqué par la morphologie de la fibre de 30mm et sa grande flexibilité qui lui permet un déplacement facile entre les granulats au moment de

l'essai, contrairement à la forme torsadée de la fibre de 19mm. Par conséquent, il a été conclu que l'introduction de 30 et 70 % de fibres respectivement de 19 et 30mm permet d'obtenir des paramètres rhéologiques et tribologiques optimaux (plus faibles) par rapport à d'autres pourcentages.

Il est à noter que le paramètre le plus important pour évaluer la pompabilité d'un béton est sa constante visqueuse, car le seuil d'interface est responsable au démarrage du pompage du béton uniquement et, une fois que ce dernier est amorcé dans les tuyaux, la constante visqueuse conditionne les frottements à l'interface (béton/paroi de la pompe) durant tout le processus.



(a) (b)

Figure 3.19. Les résultats du seuil d'interface (a) et de la constante visqueuse (b) des BFL19/30sp.

Tenant compte de ce qui précède, il a été conclu que l'utilisation des fibres polypropylènes dans le béton influe négativement sur ses propriétés d'écoulement. Afin de remédier à cela, un superplastifiant a été ajouté aux mélanges et une amélioration significative des propriétés du béton fibré à l'état frais a été constatée. Par ailleurs, l'utilisation des fibres mixtes (longueurs et formes) a permis également d'améliorer certaines propriétés rhéologiques. Par conséquent, les formulations du béton fibré avec adjuvant ont été réétudiées à l'état durci, tout en caractérisant leurs paramètres physiques et mécaniques afin d'obtenir une étude complète. Les résultats obtenus seront présentés dans les parties suivantes.

3.4.5. Étude de l'effet des fibres et de l'adjuvant sur les propriétés physiques/mécaniques du béton

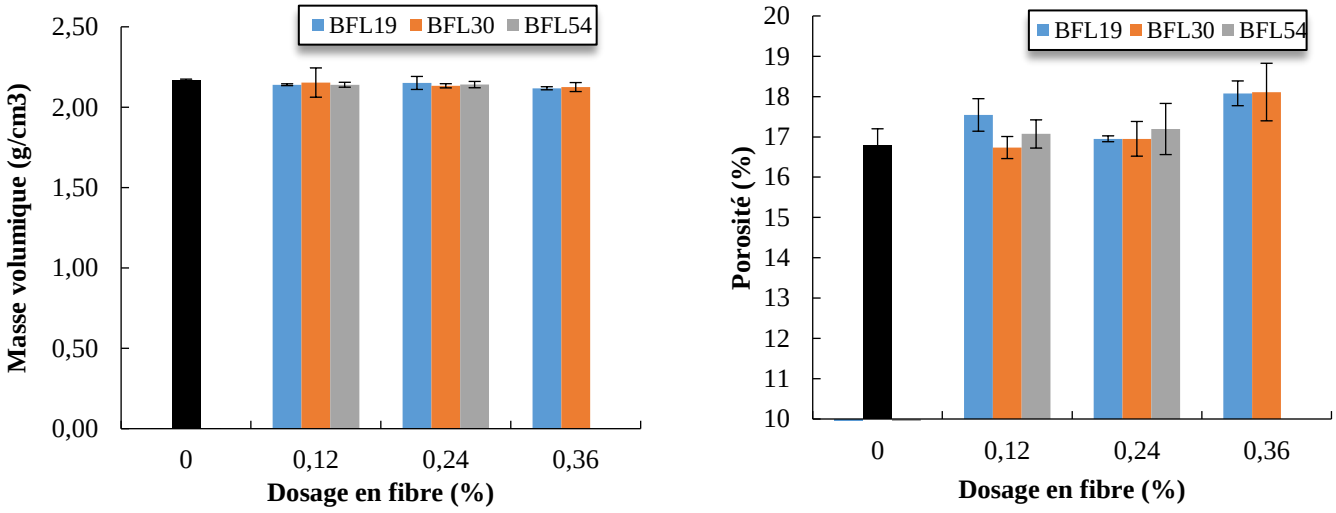
Comme nous l'avons montré précédemment, l'utilisation de l'adjuvant a permis d'améliorer les propriétés des bétons fibrés (séries 3 et 4) à l'état frais ; ces derniers ont été testés également à l'état durci. En effet, après avoir fait les essais à l'état frais, neuf éprouvettes de béton ont été confectionnées pour chaque formulation (99 éprouvettes finales ont été confectionnées pour réaliser ces essais). Les tests ont été réalisés au-delà de 28 jours, lorsque le béton atteint quasiment sa résistance finale. Pour les formulations de la série 3, des paramètres physiques ont été abordés, tels que la porosité, la masse volumique apparente et la perméabilité, afin de mettre en évidence l'effet de la proportion et de la longueur des fibres sur les paramètres physiques. Les paramètres mécaniques, quant à eux, ont été testés pour les séries 3 et 4 ; il s'agit notamment de la résistance à la compression, la résistance à la traction et le module d'élasticité. Les résultats obtenus sont présentés ci-dessous.

3.4.5.1. Porosité et masse volumique apparente

Les essais de porosité accessible à l'eau ont été réalisés selon la norme NF P18-459 [130] présentée dans la partie 2.2.2.4 du deuxième chapitre. Les résultats sont donnés sur la Figure 3.20 qui montre l'évolution de la masse volumique apparente et de la porosité en fonction du dosage et de la longueur des fibres.

Les résultats montrent, d'une part, que la masse volumique est quasiment constante pour tous les mélanges, ce qui est confirmé par les résultats de la littérature [53]. D'autre part, quelle que soit la longueur de la fibre utilisée, la porosité des bétons pour un même dosage en fibres est presque la même ; cependant, elle augmente légèrement avec l'augmentation du dosage en fibres. D'après la littérature [60], cette augmentation est causée par les bulles d'air formées par l'introduction des fibres qui augmente la zone d'interface pâte/fibre et les microfissures. Pour confirmer cela, des échantillons de béton ont été visualisés par un microscope électronique à balayage (MEB) et les images obtenues sont représentées sur la Figure 3.21. À partir de cette dernière, une importante concentration des pores apparaît dans la zone d'interface pâte/fibre,

ce qui peut être expliqué par la mauvaise adhérence entre la fibre et la pâte. Ce phénomène est probablement causé par le départ de l'eau libre par évaporation et la formation des bulles d'air dans le béton, d'une part, et, d'autre part, par la surface des fibres non homogènes (multi-filament) qui crée des vides entre la pâte et la fibre elle-même. Par conséquent, en augmentant le dosage en fibres, le nombre de fibres existant dans le mélange augmente parallèlement, ce qui donne une zone interfaciale plus importante et donc une porosité plus élevée ; les résultats obtenus sont comparables aux résultats trouvés par *Karahan et al.* [60]. Par ailleurs, nous constatons que la porosité semble être optimale à un dosage en fibres autour de 0,24 %.



(a) (b)

Figure 3.20. Résultats de la masse volumique apparente (a) et de la porosité des BF $_{sp}$.

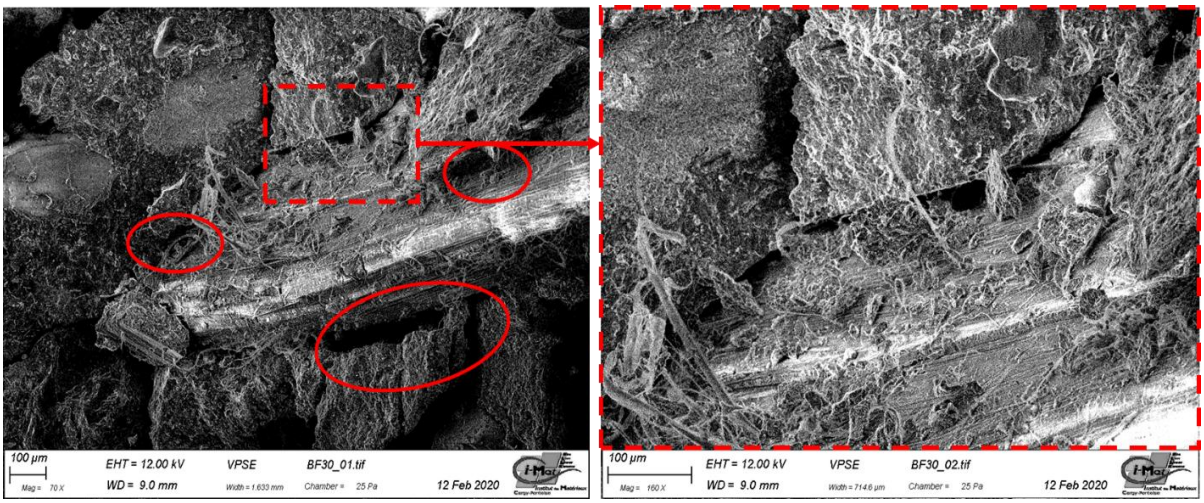


Figure 3.21. Image MEB de la zone d'interface pâte/fibre.

3.4.5.2. Perméabilité

Le test de perméabilité a été réalisé en se basant sur la norme XP P 18-463 [131] présentée précédemment, dans la partie 2.2.2.5 du deuxième chapitre. Pour chaque formulation de béton, trois échantillons (appelés également disques) de ϕ 150x50mm ont été testés afin d'assurer la répétabilité. Ces derniers ont été obtenus en sciant des éprouvettes de 150x300mm après qu'elles ont été conservées dans l'eau pendant 90 jours à 20°C. Les échantillons ont été séchés dans une étuve à 105°C jusqu'à masse constante et, ensuite, mis dans un dessiccateur pendant quelques heures avant le test pour refroidissement.

Les mesures de perméabilité ont été réalisées en appliquant 4 pressions différentes : 1,5 ; 2,5 ; 3,5 et 4,5 bars sur chaque échantillon (disque). Pour chaque pression, le K_{app} est mesuré pour établir une droite de tendance pour chaque échantillon ; à partir de cette droite, le K_{intr} correspondant à chaque droite est déterminé et le K_{intr} retenu est la moyenne des trois échantillons testés selon la loi de Darcy (voir Équation 2.4). Un exemple de BFL19 est présenté sur la Figure 3.22. Ensuite, l'évolution de la perméabilité intrinsèque moyenne en fonction du dosage en fibres de différentes longueurs pour les formulations testées est représentée sur la Figure 3.23.

L'analyse des résultats montre que, pour toutes les fibres testées, l'augmentation du dosage cause une augmentation de la perméabilité intrinsèque du béton ; les valeurs les plus élevées de la perméabilité sont attribuées aux mélanges renforcés par les fibres de 54mm, de même que les valeurs les plus faibles ont été trouvées dans les mélanges BFL19. L'augmentation de la perméabilité est expliquée par le volume des pores créés en rajoutant les fibres aux mélanges, comme c'est expliqué précédemment. Sur ce sujet, nous concluons que les fibres de 19mm ont un effet moindre sur la perméabilité du béton par rapport aux autres fibres testées dans cette étude. Ces résultats correspondent aux résultats trouvés par *A.A. Ramezanianpour et al.* [53].

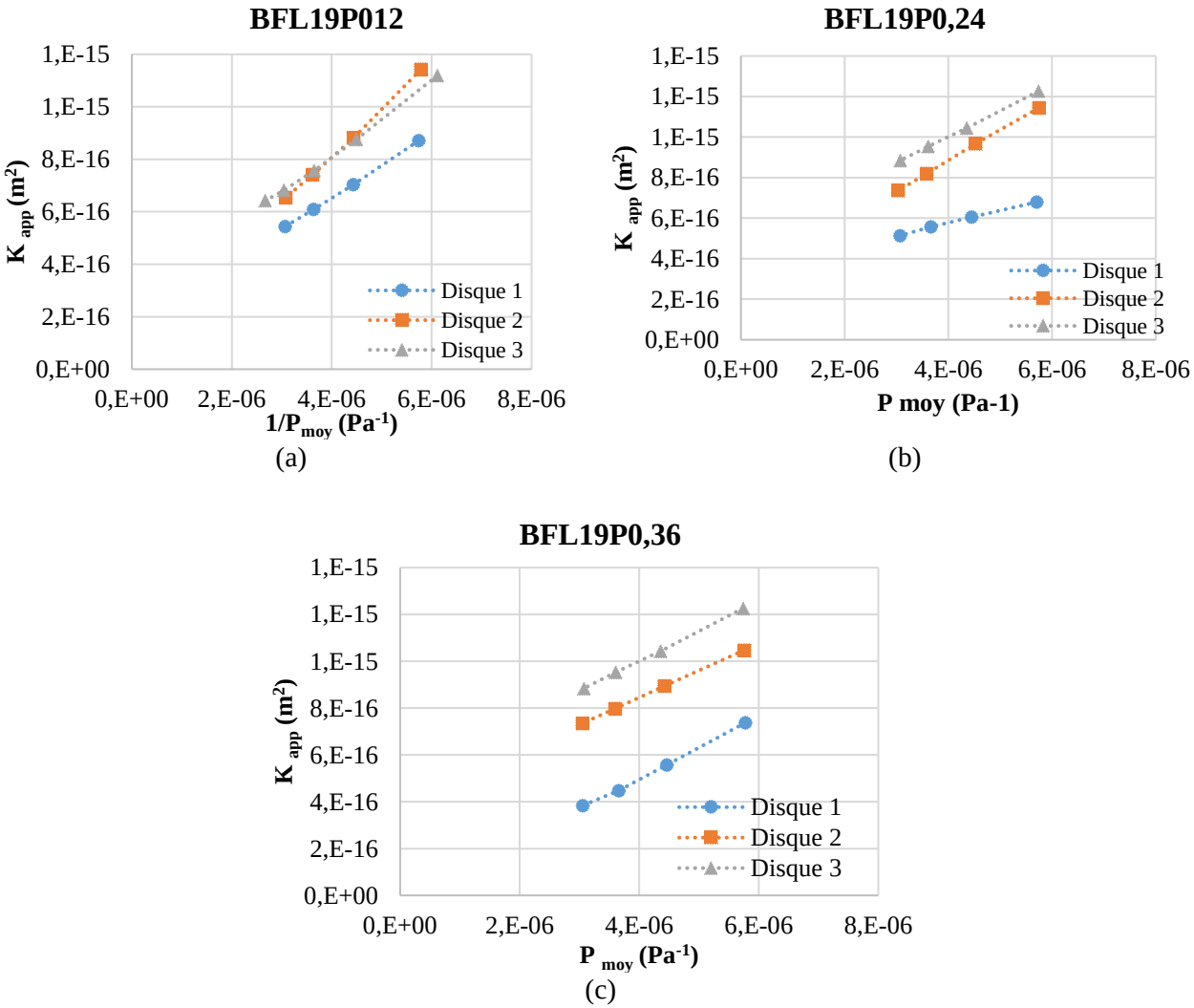


Figure 3.22. Évolution de la perméabilité apparente des BFL19 avec 0,12 % (a) ; 0,24 % (b) et 0,36 % de FPP.

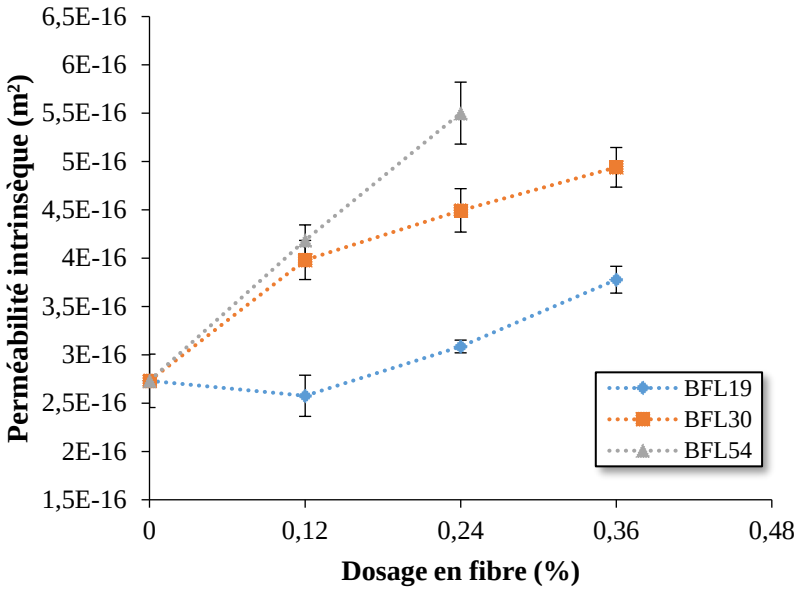


Figure 3.23. Évolution de la perméabilité intrinsèque à 90 j des BF $_{sp}$.

3.4.5.3. Résistance à la compression

La Figure 3.25 présente la variation de la résistance à la compression des bétons renforcés par des mono-fibres(a) et multifibres (b) polypropylènes en fonction du dosage en fibres, à 90 jours. L'objectif de cette partie est de mettre en évidence l'évolution de la résistance à la compression du béton fibré, d'une part, en fonction de la longueur et du dosage en fibres polypropylènes dans le cas des bétons renforcés par des mono-fibres et, d'autres part, en fonction de l'hybridation de deux types de fibres (forme et longueur) dans le même béton.

En ce qui concerne l'effet des mono-fibres sur la résistance à long terme des bétons, les résultats présentés sur la Figure 3.25 (a) montrent qu'à un faible dosage en fibres (0,12 %), la longueur et la forme des mono-fibres n'ont pas d'effet sur la résistance en compression à long terme. Des résultats semblables ont été trouvés par *Das et al.* qui ont rapporté que l'utilisation de 0,5 % de fibres polypropylènes n'influe pas sur la résistance à la compression [8]. En revanche, à un dosage plus élevé (0,24 % ou 0,36 %), nous constatons que la résistance en compression à long terme diminue significativement pour les bétons renforcés par des fibres longues, en

comparaison des valeurs obtenues pour des bétons de fibres courtes. Cette diminution peut être expliquée par un surdosage des fibres dans le béton en raison de l'introduction de fibres longues à un dosage élevé, qui semble avoir un effet négatif sur la répartition et l'orientation des fibres dans le béton. Ces résultats correspondent au constat rapporté par *Yin et al.*, qui ont montré qu'un dosage important en fibres (de 13 à 18 Kg/m3) induit une diminution significative de la résistance du béton à la compression. *Yin et al.* ont attribué cette diminution à un phénomène de gonflement des fibres qui pourrait se produire dans le béton, et qui favorise la formation de bulles d'air dans la zone interfaciale fibre/pâte [15]. Ce constat est confirmé par ce que nous avons noté précédemment, à savoir l'obtention d'une porosité plus élevée dans le cas des bétons fibrés par rapport au béton témoin.

Quant à l'influence de la longueur et de la forme de la fibre sur la résistance mécanique, il est clair que les valeurs obtenues pour les bétons renforcés par la fibre de 19mm sont plus élevées que celles obtenues avec les autres fibres. De plus, il s'avère que l'influence de cette fibre dépend principalement du dosage introduit dans le béton, car à un dosage faible (0,12 %), aucun changement de la résistance n'a été observé. Cependant, à 0,24 %, la résistance à la compression est maximale, et au-delà de ce pourcentage (0,36 %), elle diminue significativement. En effet, l'introduction de 0,24 % de PPF19 a permis d'atteindre la compacité maximale du mélange granulaire, ce qui a amélioré la répartition et l'orientation des fibres dans le béton. De plus, il apparait que les fibres de forme torsadée limite la formation des microfissures produites durant l'application des charges, comme illustré dans la Figure 3.24. Par conséquent, la porosité diminue et la résistance du béton à la compression augmente.

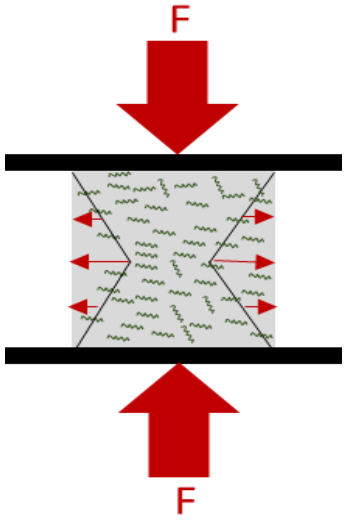
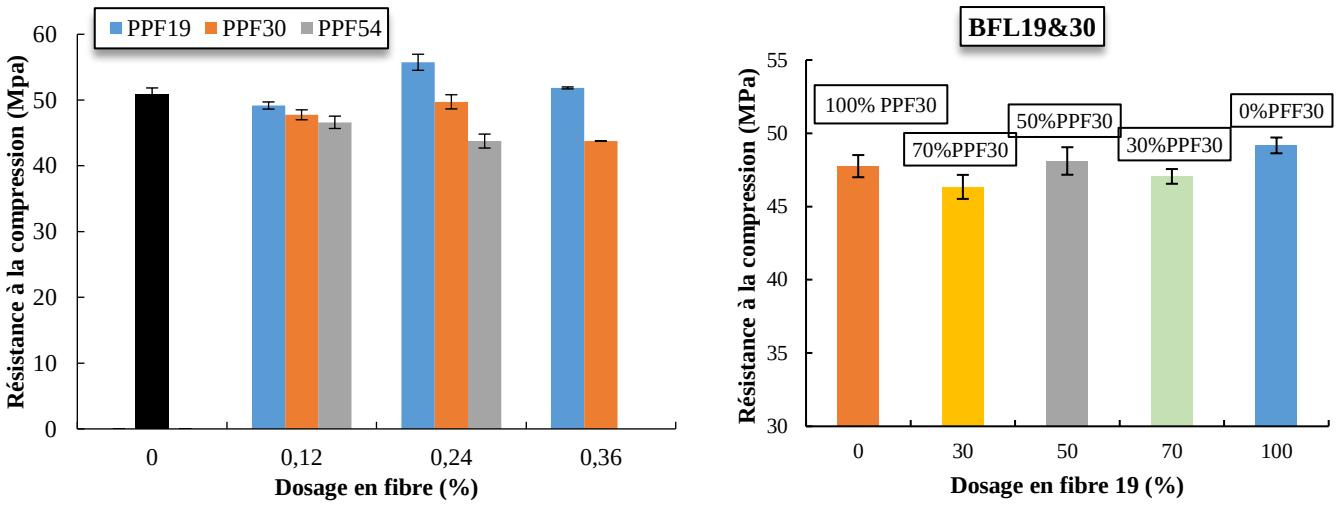


Figure 3.24. Image illustrative de l'écrasement d'une éprouvette fabriquée par un béton fibré.

Contrairement à la fibre de 19mm, l'introduction de fibres de 30 et 54mm induit une dégradation de la résistance du béton à la compression. Ce constat s'explique par la longueur importante des fibres utilisées qui cause une mauvaise distribution dans le béton, tout en affectant leurs propriétés physiques et mécaniques (porosité et résistance mécanique).

Étant donné que l'effet des fibres à 0,12 % sur la résistance est négligeable, le béton avec ce pourcentage en fibre a donc été retenu pour étudier l'effet de l'hybridation des fibres PPF19&PPF30 sur la résistance à long terme. Il est à noter qu'en pratique, il est avantageux d'utiliser des fibres de longueur mixte afin de limiter à la fois la propagation des microfissures par les fibres courtes, et des macrofissures par les fibres les plus longues. Les résultats de cette étude sont représentés sur la Figure 3.25 (b), où l'on remarque que l'utilisation des multi-fibres à différentes proportions affecte très peu la résistance du béton à la compression à long terme. À cet égard, un mélange équilibré de fibres de 50 % PPF19 et 50 % PPF30 a été retenu comme proportion optimale d'hybridation des fibres de 19 et 30mm.



(a) (b)

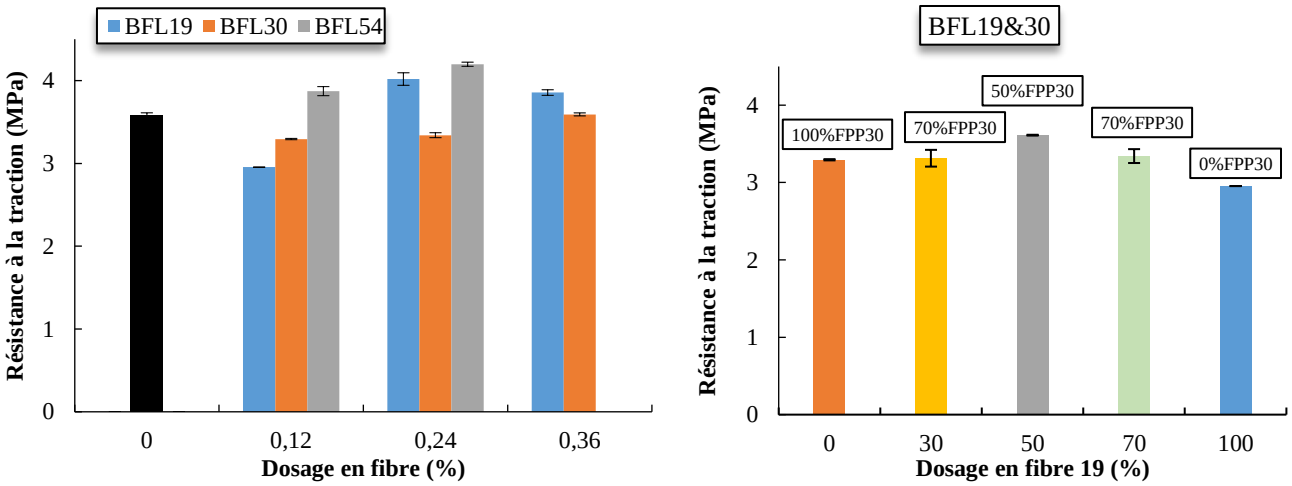
Figure 3.25. Évolution de la résistance à la compression vis-à-vis du dosage en mono-fibres de différentes longueurs (a) ; évolution de la résistance à la compression vis-à-vis des proportions de PPF19/PPF30 pour un dosage en multifibres de 0,12 % (b).

3.4.5.4. Résistance à la traction par fendage

Concernant la résistance à la traction, les Figure 3.26 (a) et (b) représentent respectivement son évolution en fonction du dosage en mono-fibres et vis-à-vis des proportions PPF19/PPF30 pour un dosage total en fibres de 0,12 %.

D'après la Figure 3.26 (a), il semble que l'utilisation de fibres de forme torsadée (PPF19 et PPF54) à un dosage proche de 0,24 % permet d'améliorer légèrement la résistance à la traction des bétons fibrés. Cela peut être attribuée à la nature des fibres torsadées (19 & 54mm) et à leur résistance élevée à la traction de 689MPa. Néanmoins, il a été constaté qu'une chute de la résistance est obtenue en incorporant un dosage plus important en fibres (0,36 %), ce qui est expliqué par une mauvaise dispersion des fibres produite par un surdosage. Dans ce cas, la mauvaise dispersion des fibres est visuellement apparue de façon très claire, comme nous pouvons constater sur la Figure 3.27 ; des fuseaux de fibres se sont formés durant l'essai, ce qui indique la mauvaise dispersion de ces dernières.

En contrepartie, les bétons renforcés par la fibre de 30mm possèdent des résistances à la traction quasi identiques et égales à celles du béton témoin. Cette différence de comportement par rapport aux bétons renforcés par les fibres de 19 et 54mm est expliquée par la forme rectiligne de la fibre de 30mm qui possède une résistance à la traction plus faible que celles des fibres de forme torsadée. En ce qui concerne les mélanges multi-fibres, il a été démontré que l'hybridation des fibres polypropylènes dans le béton à différentes proportions n'a pas d'influence significative sur la résistance du béton à la traction. Par ailleurs, une proportion de 50 % de chaque fibre (19 et 30mm) semble avoir un effet optimal sur la résistance et permet de l'améliorer légèrement. En outre, pour tous les bétons testés, la ductilité du béton a été améliorée avec l'utilisation de fibres polypropylènes, car, contrairement aux éprouvettes du béton témoin (sans fibres) qui ont été complètement divisées en deux après l'essai, les éprouvettes des bétons fibrés ont été seulement fissurées (Figure 3.28).



(a) (b)

Figure 3.26. Évolution de la résistance à la traction vis-à-vis du dosage en mono-fibres de différentes longueurs (a) ; évolution de la résistance à la traction vis-à-vis des proportions de PPF19/PPF30 pour un dosage en multifibres de 0,12 % (b).



Figure 3.27. Formation d'un fuseau de fibres dans le béton renforcé avec un dosage élevé en fibres.



(a) **(b)** **(c)**

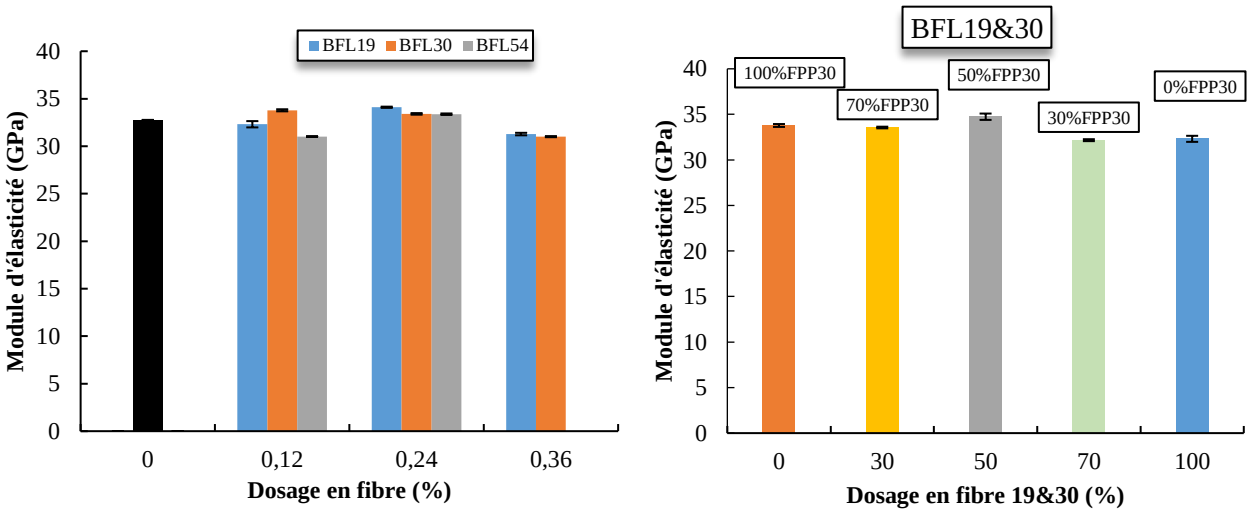
Figure 3.28. Image d'une éprouvette de béton témoin (a) et fibré (b) –(c) après essai d'écrasement par fendage.

3.4.5.5. Module d'élasticité

En ce qui concerne l'évolution du module d'élasticité, la Figure 3.29 présente les résultats obtenus pour les bétons renforcés par des fibres mono (a) et par des fibres hybrides (b) en fonction du dosage en fibres. Il convient de rappeler que, dans le cadre de notre étude, le module d'élasticité déterminé est le module statique.

À partir des résultats obtenus, nous constatons que, pour chaque longueur de fibre à un dosage de 0,12 %, le module statique est quasiment constant, ensuite le module augmente légèrement avec 0,24 % de FPP et diminue finalement avec l'introduction de 0,36 % de fibres. Ces résultats sont en accord avec des résultats antérieurs de la littérature [8]. Cependant, une amélioration du module élastique est observée pour le mélange mixte BFL19&30 à un dosage de 50 %.

Il est largement admis que l'évolution du module élastique dépend principalement de l'élasticité des constituants du béton ; ainsi l'augmentation du module statique en utilisant les fibres de 30mm est probablement due au module d'élasticité élevé de cette fibre « 6,9GPa » par rapport aux autres « 5,6GPa ». Néanmoins, un dosage important de fibres induit une perte légère d'élasticité du béton avec une différence d'environ 5 %. Ce constat est expliqué par le fait que le module d'élasticité dépend également de la résistance à la compression moyenne, et, comme cette dernière a été négativement affectée par le dosage élevé en fibres, automatiquement le module d'élasticité a également diminué.



(a) (b)

Figure 3.29. Évolution du module d'élasticité vis-à-vis du dosage en mono-fibres de différentes longueurs (a) et des proportions de PPF19/PPF30 pour un dosage en multifibres de 0,12 % (b).

3.4.5.6. Vérification de l'application des modèles prédictifs des propriétés mécaniques des bétons fibrés

D'après la littérature, plusieurs modèles analytiques ont été proposés pour la prédiction de la résistance à la traction par fendage (f_{ctm}) et du module d'élasticité statique (E_c), en fonction de la résistance à la compression (f_{cm}) pour plusieurs types de béton (ordinaire, autoplaçant, béton haute performance, etc.) [138], [139]. Cependant, l'applicabilité de ces modèles pour les bétons fibrés est peu étudiée dans la littérature, d'autant plus que l'introduction de fibres a montré un comportement mécanique différent (résistance et module statique) pour le béton fibré par rapport au béton sans fibres.

Afin de vérifier l'applicabilité de ces modèles sur le béton fibré, les résultats du présent travail en plus d'autres recherches antérieures ont été analysés en utilisant des modèles existants destinés au béton sans fibres. Il convient de noter qu'actuellement peu d'études ont développé un modèle analytique pour la prédiction de la résistance à la traction et du module statique pour

les bétons fibrés en fonction de la résistance à la compression. Cette analyse est basée sur le facteur de corrélation $R^2 = 1 - \frac{SSE}{SST}$ et le coefficient $\xi = \frac{(f_{ctm}^{prédite})_{moyenne}}{(f_{ctm}^{expérimental})_{moyenne}}$.

Relation entre la résistance à la traction « f_{ctm} » et la résistance à la compression « f_{cm} »

Dans cette analyse, les résultats de 9 études antérieures sur des bétons fibrés ont été vérifiés par plusieurs modèles proposés dans la littérature pour prédire la résistance à la traction de différents types de bétons (ordinaire, haute performance, fibré, etc.). L'objectif de cette partie est de vérifier l'applicabilité de ces modèles sur les résistances des bétons fibrés obtenus. Il est à noter que les résultats récupérés de la littérature concernent des bétons renforcés par des fibres polypropylènes en dosage et longueur différents [3], [5], [6], [8], [58], [140]–[143]. De plus, ces bétons fibrés sont de plusieurs types (haute performance, ordinaire, béton léger, etc.), ce qui nous a permis d'avoir une base de données riche et diverse.

Les résistances à la traction collectées en plus des résultats de notre étude en fonction des résistances à la compression utilisée sont présentées sur la Figure 3.30 et les modèles évalués avec les résultats obtenus sont regroupés dans le Tableau 3.10.

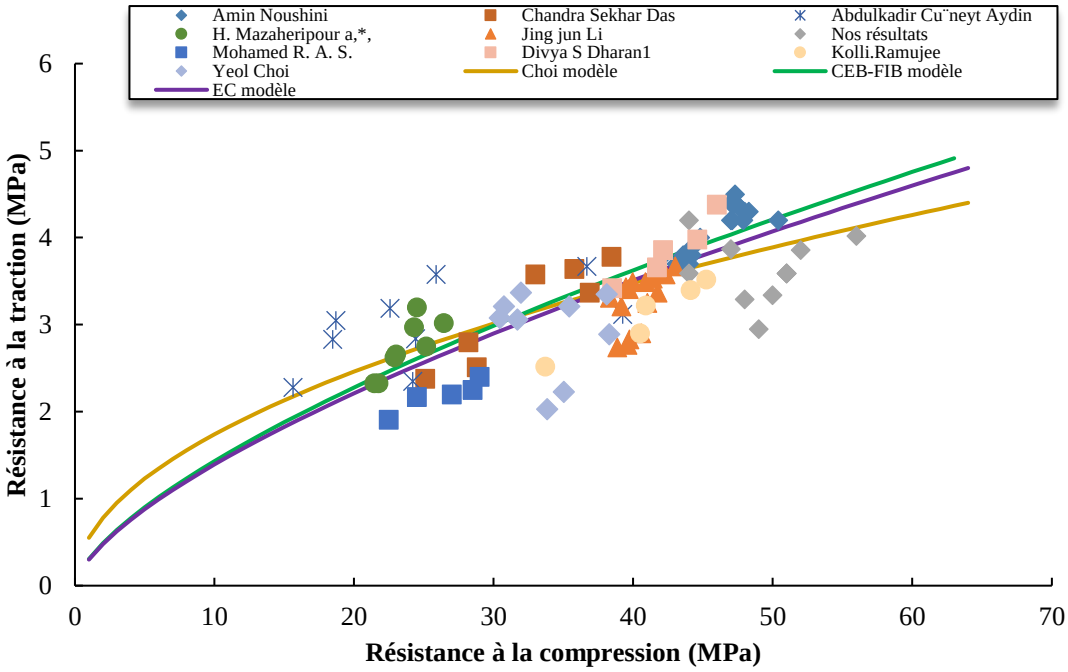


Figure 3.30. Relation entre f_{ctm} et f_{cm}.

À partir de la Figure 3.30, nous constatons que les résultats présentés sont de plus en plus éloignés ; cela est probablement dû au dosage et à la longueur de fibres utilisées dans chaque formulation qui sont différents.

Les résultats rapportés dans le Tableau 3.10 montrent que les modèles proposés par *Choi et Yuan* [141] *et Omary et al.* [143] sont les plus adéquats, avec un coefficient de corrélation égal respectivement à 0,46 et 0,45 et un coefficient ξ de 0,99 et 1,1. En outre, le R^2 obtenu pour le modèle de CEB-FIB [144] est plus faible (R^2=0,39). L'expression proposée par l'Eurocode [145] est la moins adéquate par rapport aux autres modèles proposés pour prédire la résistance à la traction avec un R^2 de 0,27.

Tableau 3.10. Modèles de prédiction de la résistance à la traction par fendage et résultats obtenus.

Auteur	Champ d'applicabilité	Équation	R^2	ξ
EC2. [145] (Équation 3.5)	Béton ordinaire	$f_{ctm} = 0{,}3(f_{ck})^{2/3}$ $f_{ck} = f_{cm} - 8$ $f_{ctm} = 0{,}9f_{ctm,exp}$	0,27	0,99
CEB-FIB. [144] (Équation 3.6)	Béton fibré	$f_{ctm,exp} = 0{,}301(f_{cm})^{0{,}67}$	0,39	0,96
Omary et al. [143] (Équation 3.7)	Tous types de béton	$f_{ctm,exp} = 0{,}364(f_{cm})^{0{,}608}$	0,45	1,10
Choi et Yuan. [141] (Équation 3.8)	Béton renforcé par des fibres polypropylènes	$f_{ctm,exp} = 0{,}55(f_{cm})^{0{,}5}$	0,46	0,99

Il a été rapporté par *Choi et Yuan* [141] que le coefficient de corrélation R^2 varie entre 0,81 et 0,87, contrairement à ce que nous avons trouvé. Cette grande différence est due au fait que, dans l'étude de Choi et Yuan, peu de résultats ont été analysés (12), ce qui a donné un bon coefficient de corrélation. Mais en appliquant le modèle sur d'autres bétons fibrés (plus de 70 valeurs de résistances), le coefficient R^2 diminue significativement.

Par conséquent, nous concluons que les modèles utilisés ne sont pas adaptés pour un béton fibré. La faible corrélation obtenue réside dans le fait que les données expérimentales utilisées représentent des bétons fibrés avec des longueurs de fibres très différentes, qui varient entre 6 à 60mm. De plus, le dosage en fibres joue un rôle très important à ce sujet. En effet, il a été rapporté précédemment qu'à un certain dosage de fibres, la résistance à la compression diminue significativement alors que la résistance à la traction continue à augmenter, contrairement au béton sans fibres. La forme de la fibre est également un facteur important qui affecte la résistance à la traction, ce qui a été montré à travers ce travail.

Relation entre la résistance à la compression « f_{cm}» et le module d'élasticité « E_c »

Cette partie consiste à étudier la relation entre la résistance à la compression f_{cm} et le module d'élasticité statique E_c. Pour ce faire, des résultats de plusieurs recherches rapportés dans la littérature ont été analysés à partir des modèles de prédiction proposés. La validité des modèles a été vérifiée sur les résultats de quatre études antérieures [6], [7], [140], [146]. L'évaluation des modèles proposés a été faite en calculant le coefficient de corrélation R^2 et le ξ, les résultats obtenus sont récapitulés dans le Tableau 3.11.

Tableau 3.11. Modèles de prédiction du module d'élasticité en fonction de la résistance à la compression et résultats obtenus.

Auteur	Champ d'applicabilité	Équation	R^2	ξ
EC2 [145] (Équation 3.9)	Béton ordinaire	$E_C = 22000\ (^{f_{cm}}/_{10})^{0,3}$	*Aucune corrélation*	0,79
ACI 318 [147] (Équation 3.10)	Béton ordinaire	$E_C = 4700(\sqrt{f_{cm}})$	0,28	0,87
Jones et McCarthy [148] (Équation 3.11)	Béton mousse	$E_c = 0{,}42(f_{cm})^{1,18}$	*Aucune corrélation*	0,73
Hardjito et al.[149] (Équation 3.12)	Béton géopolymère	$E_c = 2910\ (f_{cm})^{0,54}$	0,11	1,21
Modèle proposé	Béton de résistance $[20 - 70\ MPa]$	$E_c = 0{,}36 f_{cm} e^{0,01 f_{cm}}$	0,82	1

À la lecture du tableau précédent, nous pouvons remarquer que les expressions proposées initialement pour différents types de béton non fibré ne s'appliquent pas pour les bétons fibrés. Ainsi le coefficient de corrélation R^2 est très faible pour les quatre modèles testés avec une

valeur maximale égale à 0,28. En effet, l'ajout de fibres a affecté la résistance à la compression d'une manière différente pour chaque longueur, pourcentage et forme de fibre. Le module d'élasticité était moins influencé par la présence de fibres, comme c'est montré précédemment, ce qui a conduit à un changement de comportement du béton et donc la relation résistance/module a été modifiée. Ce constat nous a permis de conclure que les modèles utilisés ne sont pas adéquats pour un béton fibré et de proposer un modèle plus adéquat sur les bétons fibrés, comme le montrent le Tableau 3.11 et la Figure 3.31. L'équation proposée a permis d'obtenir une bonne prédiction avec un coefficient de corrélation R^2= 0,82.

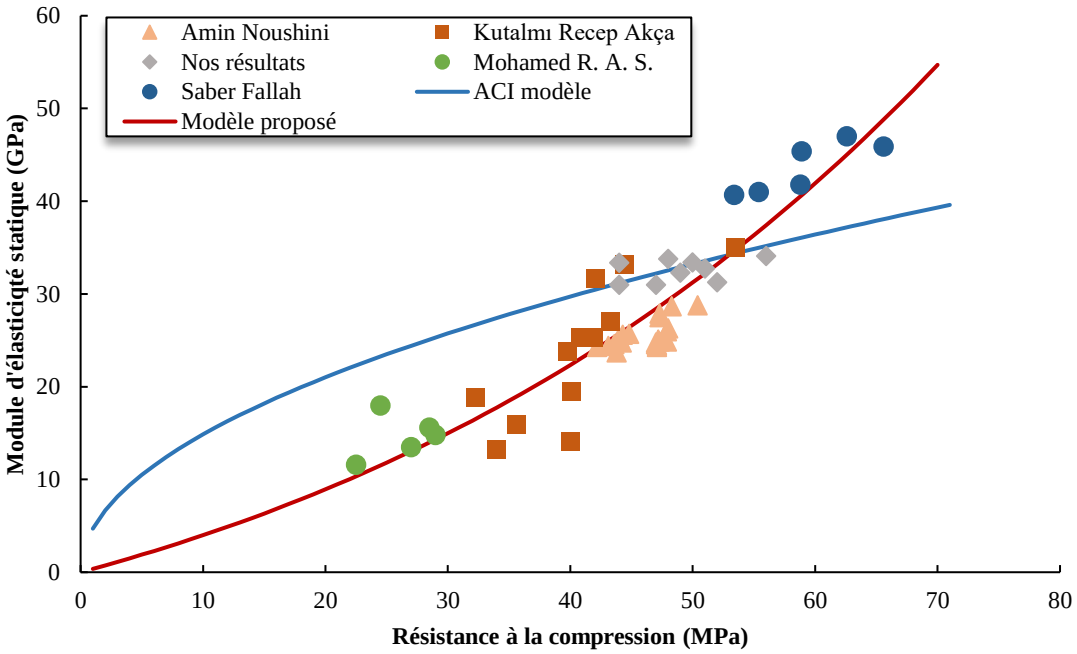


Figure 3.31. Relation entref_{ctm} et E_c.

3.5. Conclusion

Dans ce chapitre, les bétons témoins et fibrés à base de granulats naturels ont été étudiés dans le but d'obtenir une formulation de béton fibré optimale qui va être prochainement étudiée avec l'incorporation des granulats recyclés.

Cette étude a montré que l'introduction de fibres polypropylènes affecte plusieurs propriétés du béton, et les principales conclusions établies sont les suivantes :

- L'utilisation d'un volume de pâte de 0.280 m^3 nous a permis d'obtenir une meilleure ouvrabilité et des propriétés rhéologiques optimales.
- L'introduction d'un dosage élevé de fibres polypropylène induit une perte des propriétés rhéologiques.
- Contrairement au dosage, la longueur de la fibre ne présente aucun effet sur la rhéologie, mais elle affecte négativement la pompabilité du béton (la tribologie).
- L'essai de tribologie n'est pas adapté aux bétons fibrés sans adjuvant.
- L'introduction de l'adjuvant a amélioré les propriétés du béton frais ainsi que la dispersion des fibres dans le mélange.
- La masse volumique semble ne pas être affectée par l'introduction des FPP, contrairement à la porosité qui augmente avec l'augmentation de la longueur et du dosage des fibres dans le béton.
- De même, une longueur et un dosage importants entraînent une augmentation de la perméabilité.
- D'un point de vue général, les résistances à la compression et à la traction diminuent avec l'ajout de fibres, à l'exception du dosage à 0,24 % de FPP19 qui représente un dosage optimal.
- Le module d'élasticité diminue légèrement avec l'ajout de fibres à un fort dosage (0,36 %) et augmente significativement avec l'utilisation de longueurs mixtes.
- Pour les modèles de prédiction des propriétés mécaniques, les équations proposées pour la prédiction de la résistance à la traction et du module d'élasticité des bétons non fibrés semblent ne pas être adaptées aux bétons fibrés. Par ailleurs, cette étude a permis de proposer une nouvelle équation pour la prédiction du module d'élasticité des bétons fibrés.

CHAPITRE 4

Étude de l’effet des granulats recyclés sur le comportement du béton aux états frais et durci

4. CHAPITRE 4 Étude de l'effet des granulats recyclés sur le comportement du béton aux états frais et durci 156

4.1. Objectif 159

4.2. Étude des méthodes de formulation 159

4.2.1. Méthode de saturation des granulats recyclés 159

4.2.2. Méthode de mélange en deux étapes 160

4.2.3. Méthode de la pré-humidification et de la compensation d'eau 161

4.2.4. Méthodes utilisées dans nos travaux de recherche 161

4.3. Préparation des granulats recyclés pour les deux méthodes 161

4.4. Formulation des bétons à base des GR 163

4.5. Propriétés des bétons fibrés aux granulats recyclés à l'état frais 164

4.5.1. Effet de substitution des granulats recyclés sur la masse volumique et l'air occlus 164

4.5.2. Effet de substitution des granulats recyclés sur les propriétés rhéologiques ... 168

4.5.3. Effet de substitution des granulats recyclés sur les propriétés tribologiques ... 169

4.6. Propriétés physiques et mécaniques des bétons à base de granulats recyclés 171

4.6.1. Porosité et masse volumique apparente 171

4.6.2. Perméabilité 172

4.6.3. Résistance à la compression 173

4.6.4. Résistance à la traction par fendage 174

4.6.5. Module d'élasticité 175

4.7. Conclusion 176

4.1. Objectif

Ce chapitre présente les résultats de la dernière partie de notre étude, axée sur l'influence des granulats recyclés sur les propriétés d'écoulement du béton frais et ses propriétés physiques et mécaniques. La première partie consiste à présenter les différentes méthodes de formulation adoptées dans cette étude ainsi que les étapes de préparation des gravillons recyclés. La deuxième partie concerne la caractérisation de la performance du béton à l'état frais, tout en comparant les résultats de deux méthodes de formulation. Finalement, la dernière partie a été consacrée à l'étude des propriétés physiques et mécaniques du béton recyclé.

4.2. Étude des méthodes de formulation

Différentes méthodes de formulation du béton aux granulats recyclés ont été proposées dans la littérature afin de limiter leurs effets négatifs sur les performances du béton. Parmi ces méthodes, nous citerons :

4.2.1. Méthode de saturation des granulats recyclés

Cette méthode consiste à saturer les granulats recyclés à un état d'humidité correspondant à leur taux d'absorption +1 % pour limiter le phénomène d'absorption d'eau des granulats recyclés [150]. Cette opération se déroule comme suit :

- Évaluation de la teneur initiale en eau des granulats ;
- Essuyage de la quantité de granulats nécessaire par un fût étanche, ce dernier doit être humidifié au préalable à l'aide d'une éponge en essuyant tout excès d'eau ;
- Ajout d'une quantité d'eau équivalente à la valeur d'absorption des granulats +1 % pour atteindre la teneur en eau visée ;
- Homogénéisation des granulats et de l'eau en faisant rouler le fût ;
- Mise au repos du fût à l'horizontale pendant au minimum 2 h avant le malaxage du béton.

Quant au protocole de malaxage, la Figure 4.1 illustre la séquence de malaxage proposée par cette méthode :

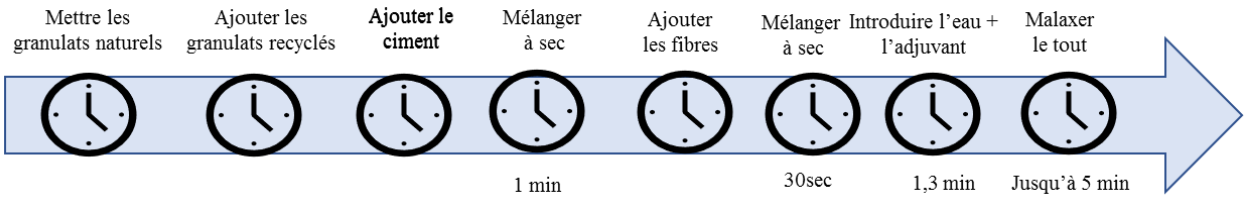


Figure 4.1. Protocole de malaxage pour la méthode de saturation des GR.

4.2.2. Méthode de mélange en deux étapes

Cette méthode consiste principalement à mettre la quantité d'eau nécessaire en deux étapes dans le mélange (Figure 4.2), dans le but d'augmenter l'adhérence des particules de liant avec la surface des granulats recyclés. Cela permet de réduire le rapport E/C et favorise la formation d'une interface granulat/pâte plus dure. Par conséquent, une amélioration des propriétés mécaniques, notamment la limitation de la déformation du béton causée par la présence des granulats recyclés [151]. Les étapes à suivre dans cette méthode sont les suivantes :

- Mettre en premier lieu les granulats à l'état sec et les malaxer pendant 60 secondes ;
- Incorporer la moitié de la quantité d'eau et malaxer pendant 60 secondes (cette étape favorise l'hydratation des granulats) ;
- Ajouter le ciment au mélange et malaxer pendant 30 secondes (cela permet d'assurer une bonne adhérence granulats/ciment) ;
- Incorporer le reste de l'eau et malaxer le tout pendant 120 secondes.

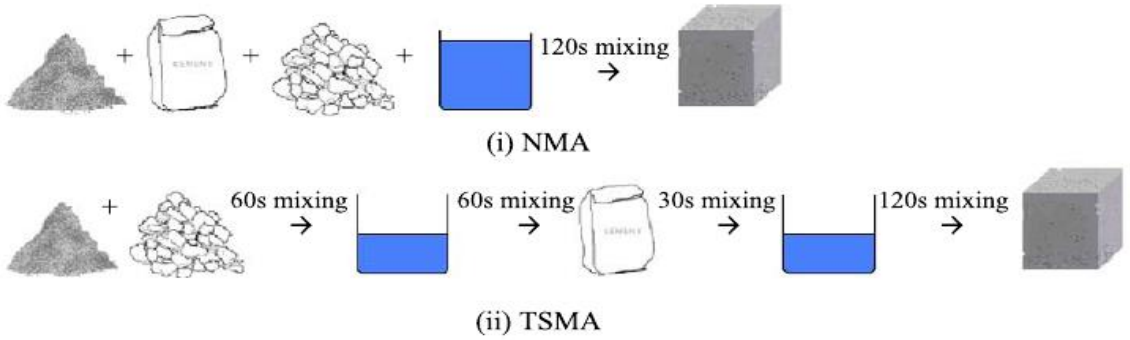


Figure 4.2. Séquence de malaxage donnée par la méthode normale (i) et celle proposée par la méthode en deux étapes (ii) [151].

4.2.3. Méthode de la pré-humidification et de la compensation d'eau

Cette méthode est la combinaison des deux méthodes précédentes dont le principe est de mettre les granulats recyclés en contact avec la quantité d'eau appropriée pendant 5 minutes avant le malaxage, selon le protocole de malaxage illustré sur la Figure 4.3. La quantité d'eau rajoutée correspond à la quantité d'eau pour atteindre le taux d'absorption des granulats recyclés en tenant compte leur teneur en eau [152].

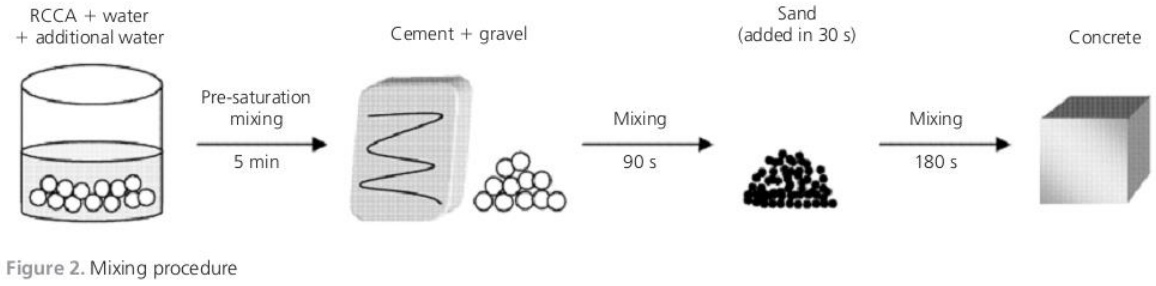


Figure 4.3. Méthode de malaxage par la méthode de pré-saturation [108].

4.2.4. Méthodes utilisées dans nos travaux de recherche

Dans notre étude, deux méthodes de fabrication de béton aux granulats recyclés ont été étudiées. Il s'agit de la « méthode de saturation des granulats recyclés », appelée « M1 » et de la « méthode de pré-humidification et compensation d'eau », appelée « M2 ». D'après les résultats des études précédentes dans la littérature, la méthode « M1 » permet d'améliorer les propriétés du béton à l'état frais (affaissement, rhéologie), tandis que la méthode « M2 » permet d'améliorer les propriétés mécaniques.

4.3. Préparation des granulats recyclés pour les deux méthodes

- Méthode de saturation des granulats recyclés « M1 »

Les granulats utilisés dans cette méthode ont été d'abord séchés dans une étuve ventilée à 105°C pendant 48 h et, ensuite, ils ont été laissés à refroidir pendant quelques heures. Une fois les granulats refroidis, ils sont mis dans un fût étanche dans lequel, une quantité d'eau correspondant à la valeur d'absorption des granulats +1 % est ajouté, soit 6,6 % pour les GR de classe 4/10 et 6,8 % pour les GR de classe 10/20, pendant 48 h. Avant la formulation, le fût est

mis à l'horizontale pendant 2 heures pour une bonne homogénéisation et la séquence de malaxage suivie est celle illustrée sur la Figure 4.1.

- Méthode de pré-humidification et compensation d'eau « M2 »

Tout d'abord, la vitesse d'absorption des granulats recyclés doit être évaluée ; cette opération a été effectuée selon la méthode de *Ferreira et al.*[152]. L'essai consiste à évaluer la variation de la masse des granulats séchés sous l'eau. La mesure de la variation de la masse permet de suivre l'évolution de l'absorption relative et, par conséquent, la vitesse d'absorption des granulats. Cet essai a été effectué sur les granulats recyclés utilisés dans cette étude, à l'aide d'un dispositif montré sur la Figure 4.4, en suivant les étapes mentionnées ci-dessous :

- Un échantillon de granulats est lavé et tamisé par un tamis de 5mm.
- Les granulats sont mis dans une étuve ventilée à 105°C jusqu'à masse constante.
- Un échantillon de 1,5 kg est ensuite prélevé et placé dans un panier d'acier attaché sous une balance pour assurer un suivie de la pesée hydrostatique.

Une mesure de la masse des granulats est prise à t_0 (moment de contact entre granulats/eau) et chaque 30 secondes pendant 5 minutes ; ensuite, elle a été enregistrée chaque minute pendant 30 minutes, tout en remuant avant chaque enregistrement de masse.

L'évolution du coefficient d'absorption en fonction du temps est présentée sur la Figure 4.5 ; d'après cette dernière, il semble que 50 % d'absorption des granulats se fait dans les 30 premières minutes. Nous constatons également que la vitesse d'absorption est beaucoup plus élevée durant les 5 premières minutes et qu'elle diminue significativement par la suite. Des résultats similaires ont été trouvés dans la littérature par *Malesev et al.*[153] et *Ferreira et al.*[152].

En ce qui concerne le malaxage, le processus suivi dans ce travail est celui proposé par la méthode des deux mélanges (Figure 4.2), afin de permettre la pré-humidification des granulats pendant 5 minutes avant l'introduction des autres composants.

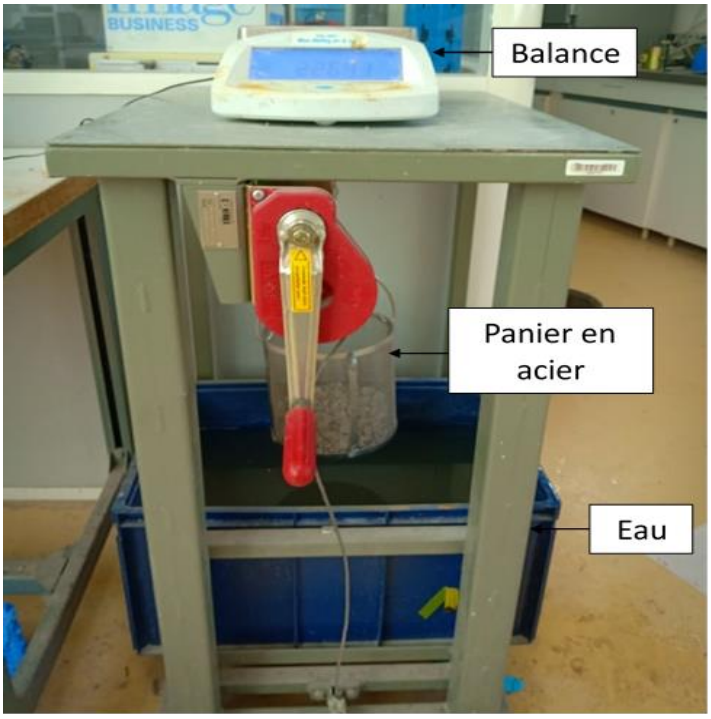


Figure 4.4. Dispositif utilisé pour effectuer l'essai de vitesse d'absorption des GR.

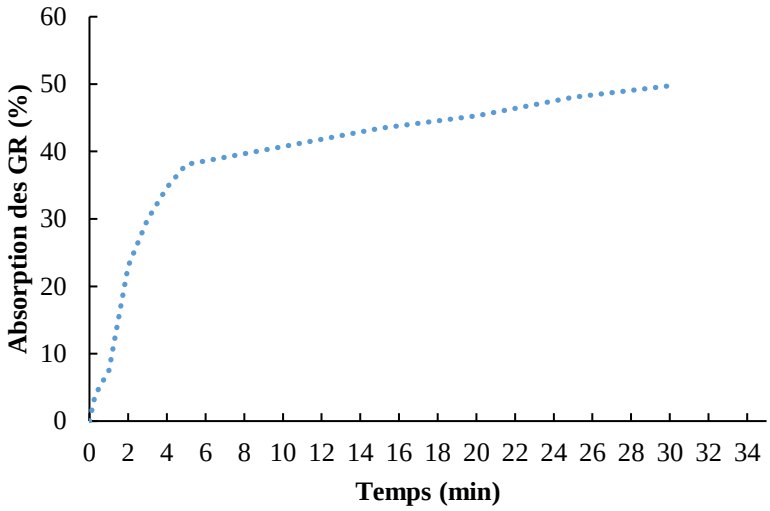


Figure 4.5. Vitesse d'absorption des GR en fonction du temps.

4.4. Formulation des bétons à base des GR

Comme nous l'avons déjà mentionné, dans cette partie, nous nous intéressons à l'étude de l'effet d'incorporation des granulats recyclés par substitution massique sur les propriétés du

béton aux états frais et durci. D'après les résultats obtenus précédemment, présentés dans le chapitre ci-dessus, la formulation choisie comme béton témoin dans cette partie est celle d'un béton renforcé par les fibres polypropylènes de longueur 19mm, de forme torsadée, à dosage volumique de 0,24 %, appelé « BFL19P0,24 ». Cette formulation (100 % de granulats naturels) et les formulations des bétons fibrés à différents dosages des granulats recyclés (30, 50 et 70%) sont rassemblées dans le Tableau 4.1. Les bétons formulés ont été testés à l'état frais (affaissement, air occlus, masse volumique, rhéologie et tribologie) et à l'état durci (porosité, perméabilité, résistance mécanique et module d'élasticité).

Tableau 4.1. Formulations des bétons à base de granulats recyclés.

Séries	**Béton**	**C_{VP} (m^3)**	**E/C**	**G/S**	**L_{Fibre} (mm)**	**Fibre (%)**	**Ciment (Kg)**	**Eau (Kg)**	**GN (Kg)**	**GR (Kg)**	**Sable (Kg)**	**Sp (%)**
M1	BFL19P0,24	0,380	0,5	1,44	19	0,24	462	231	963	0	669	0,4
	BR30%								674,2	288,9		
	BR50%								481,6	481,6		
	BR70%								288,9	674,2		
M2	BFL19P0,24	0,380	0,5	1,44	19	0.24	462	231	963	0	669	0,4
	BR30%								674,2	288,9		
	BR50%								481,6	481,6		
	BR70%								288,9	674,2		

4.5. Propriétés des bétons fibrés aux granulats recyclés à l'état frais

4.5.1. Effet de substitution des granulats recyclés sur la masse volumique et l'air occlus

L'effet du dosage des granulats recyclés sur la teneur en air et sur la masse volumique à l'état frais des bétons formulés par les deux méthodes étudiées (M1 et M2) est présenté sur la Figure 4.6.

Une diminution de la masse volumique à l'état frais est observée si l'on augmente le taux de substitution des granulats recyclés. Par ailleurs, la teneur en air occlus augmente significativement pour les bétons formulés par les deux méthodes.

Ces résultats sont expliqués par le fait que les granulats recyclés possèdent une porosité élevée et une masse volumique plus faible par rapport aux granulats naturels, ce qui est souvent rapporté dans le cas des bétons recyclés [62].

Nous constatons également une différence négligeable des valeurs de la masse volumique à l'état frais et de la teneur en air occlus correspondant aux bétons formulés par les deux méthodes. Cela signifie que le degré de saturation des granulats recyclés avant l'utilisation n'a pas d'effet sur la masse volumique ni sur la teneur en air du béton

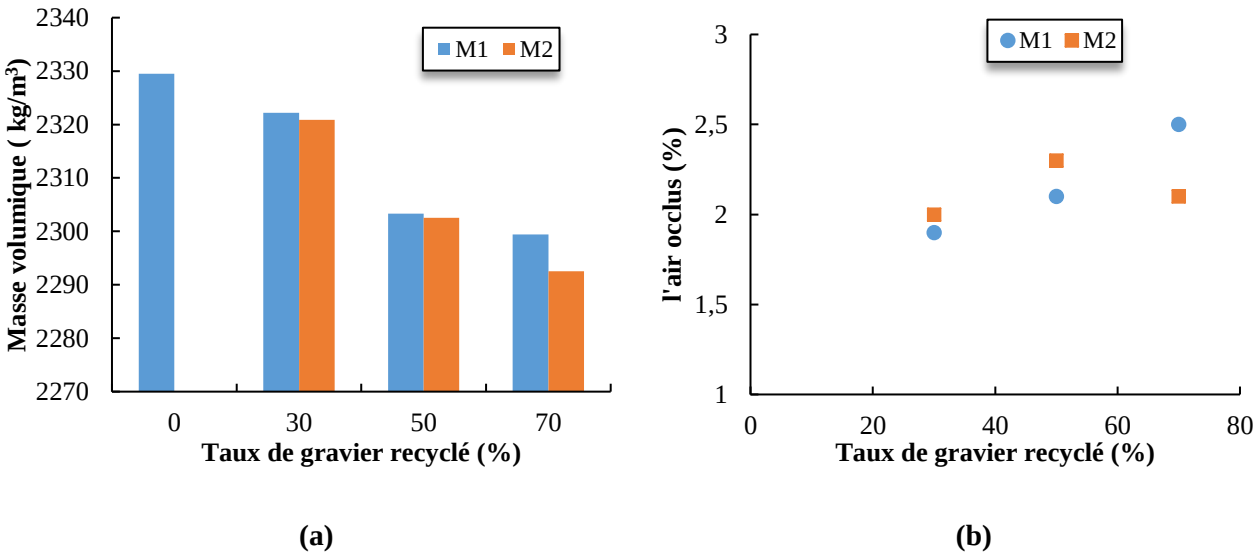


Figure 4.6. Évolution de la masse volumique (a) et de la teneur en air occlus (b) en fonction du taux de gravillons recyclés pour les deux méthodes de préparation, M1 et M2.

1.1.1. Effet du dosage des granulats recyclés sur l'ouvrabilité

À l'aide de l'essai du cône d'Abrams, l'effet de substitution des granulats recyclés sur l'ouvrabilité du béton a été étudié. L'évolution de l'affaissement des bétons par rapport au

dosage des granulats recyclés pour les deux méthodes étudiées est représentée sur la Figure 4.7. Les résultats montrent que :

- ✓ L'affaissement (l'ouvrabilité) est maintenu constant pour les mélanges formulés par la méthode de saturation des granulats recyclés (M1), quel que soit le taux de substitution des granulats.
- ✓ L'affaissement des bétons formulés par la méthode de compensation d'eau (M2) diminue avec l'augmentation du taux de substitution des granulats naturels par des granulats recyclés.

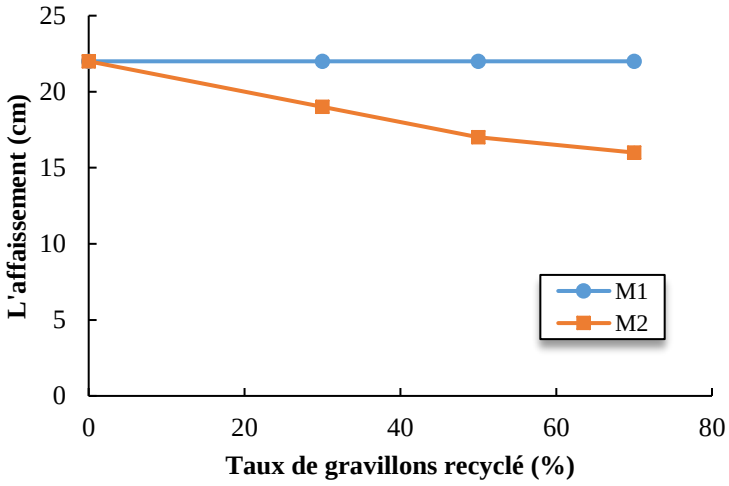


Figure 4.7. Variation d'affaissement en fonction du taux de gravillons recyclés pour les deux méthodes.

Afin d'expliquer ces phénomènes, nous comparons, sur la figure ci-dessous, deux méthodes de fabrication d'un même béton (même formulation) : dans la première méthode (M1), le béton est fabriqué avec des granulats saturés (autrement dit, granulats imbibés) (voir la formule « imbibée ») ; dans la deuxième méthode (M2), le béton est fabriqué avec des granulats pré-humidifiés mais pas saturés (voir la formule « utile »). Les résultats peuvent être expliqués comme suit :

Pour la première méthode « M1 », avant le malaxage, les granulats ont été saturés à 100 %, ce qui signifie que les résidus du mortier collés sur la surface des granulats ont bien réagis chimiquement avec de l'eau avant le processus de malaxage avec les autres éléments, tels que le ciment et le sable. La quantité d'eau de gâchage versée dans le malaxeur lors de la fabrication des bétons représente la quantité d'eau efficace qui sert à hydrater les grains de ciment (moins la quantité d'eau constante dans l'adjuvant). Cette quantité d'eau efficace est quasiment constante lorsque le dosage de granulats recyclés augmente ; donc, avec quasiment le même volume de granulats présents dans le béton et avec les mêmes propriétés rhéologiques de la pâte de ciment qui les entourent, les mélanges conservent leur ouvrabilité.

C'est le contraire dans la deuxième méthode « M2 » dans laquelle les granulats recyclés sont saturés à 50 % de leur capacité d'absorption. Dans ce sas, les granulats recyclés continuent à absorber de l'eau (E_{abs}), car les réactions chimiques entre l'eau et le mortier collés sur les granulats recyclés ne sont pas encore terminées ($E_{réaction}$). Il est à noter que ces dernières sont difficiles à estimer lors du calcul des formulations. Cela engendre la perte d'une certaine quantité d'eau efficace qui sert à hydrater le ciment. Cette perte croît avec l'augmentation du dosage des granulats recyclés et entraîne une pâte de ciment avec de moins en moins d'eau, et donc une diminution de l'ouvrabilité des mélanges.

Tenant compte de ce qui précède, nous considérons que la méthode de saturation des granulats recyclés, appelée « M1 », est une technique efficace pour conserver une bonne ouvrabilité des bétons aux granulats recyclés. Ce résultat a été confirmé par d'autres recherches antérieures dans le cadre du projet PN RECYBETON [103].

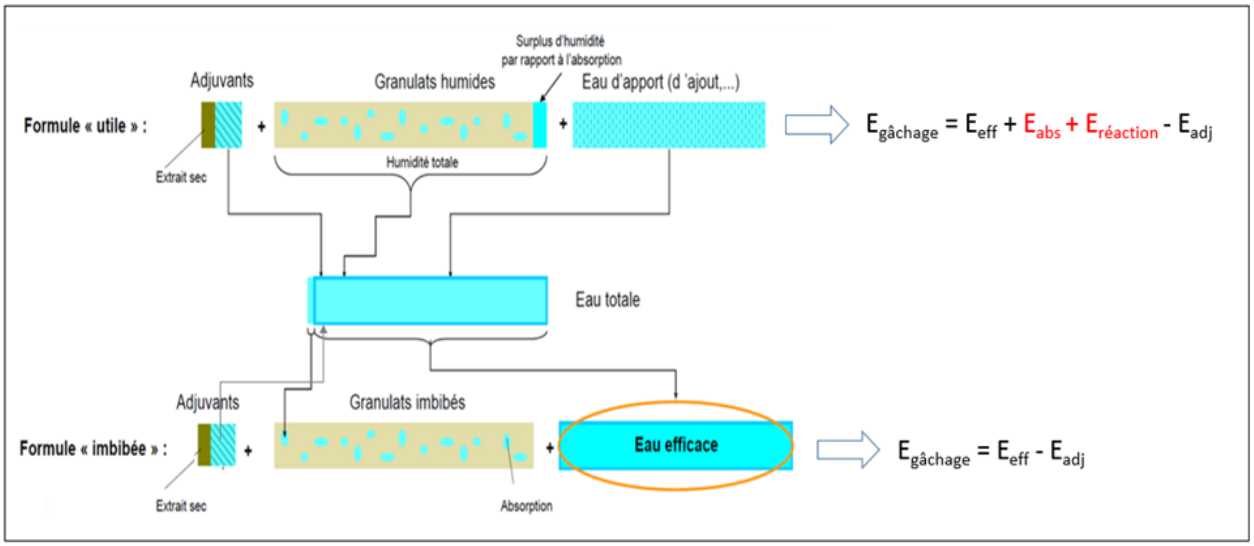


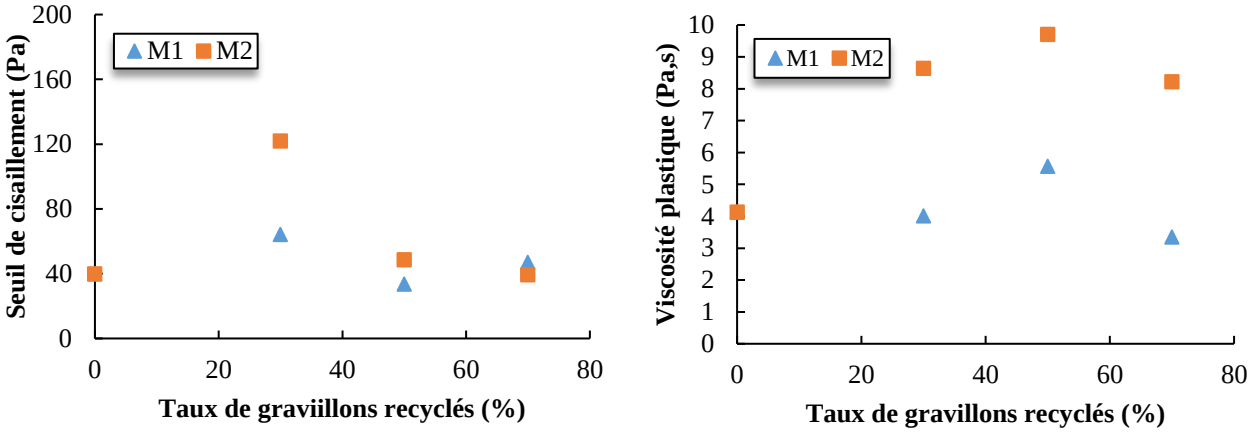
Figure 4.8. Schéma explicatif de la différence de quantité d'eau dans les bétons fabriqués par les deux méthodes.

4.5.2. Effet de substitution des granulats recyclés sur les propriétés rhéologiques

Les propriétés rhéologiques (seuil de cisaillement et viscosité plastique) des bétons fibrés à base de granulats recyclés sont présentées sur la Figure 4.9. Les résultats montrent que :

- Le seuil de cisaillement est constant pour les bétons de la première méthode. Ce constat est dû au fait que le seuil de cisaillement est proportionnel à l'affaissement [154], ce dernier a montré un comportement identique pour les bétons de la même méthode de fabrication. En revanche, les seuils de cisaillement obtenus par les bétons de la deuxième méthode semblent légèrement perturbés en raison du changement de la quantité d'eau dans les mélanges.
- La viscosité plastique des bétons de granulats saturés (M1) reste constante avec une augmentation de la substitution des granulats recyclés. Par ailleurs, une augmentation significative de la viscosité est constatée pour les bétons de granulats pré-humidifiés (M2). En effet, la quantité d'eau nécessaire pour la saturation des granulats recyclés a été déjà atteinte pour les mélanges de la première méthode avant la formulation ; ils ne présentent donc aucun effet négatif sur les paramètres du béton à l'état frais. En revanche, pour la deuxième méthode, les granulats sont saturés à 50 % seulement, ce

qui entraîne une quantité d'eau plus faible dans les mélanges de la deuxième méthode et donc une pâte de ciment plus visqueuse et une viscosité plastique des bétons plus importante.



(a) **(b)**

Figure 4.9. Évolution du seuil de cisaillement (a) et de la viscosité plastique (b) des bétons formulés avec M1 et M2 en fonction du taux de gravillons recyclés.

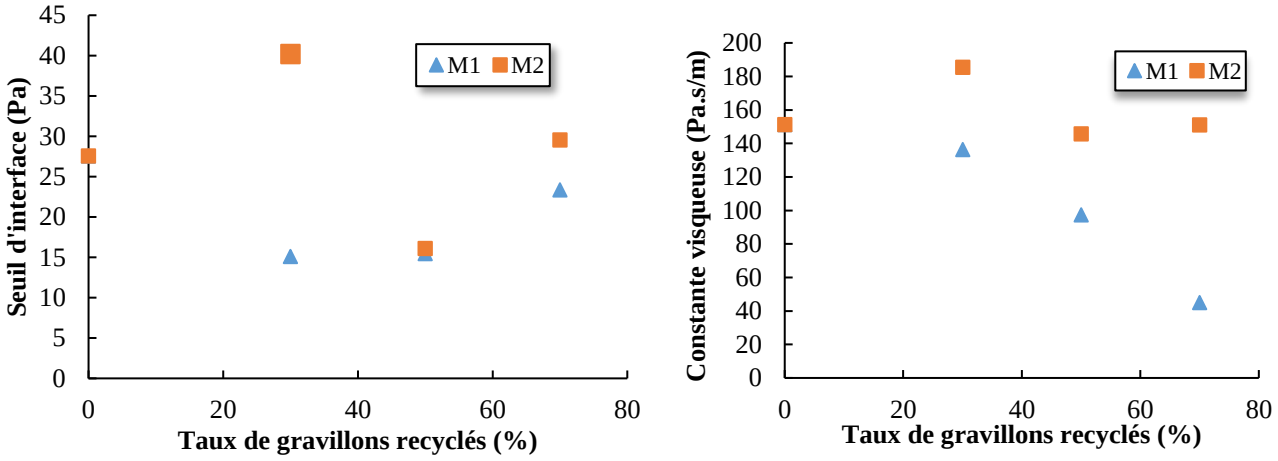
4.5.3. Effet de substitution des granulats recyclés sur les propriétés tribologiques

Tout d'abord, il est utile de rappeler que le comportement rhéologique d'un béton est décrit par une relation entre les contraintes à appliquer à l'interface de deux couches successives du béton pour les cisailler aux taux de cisaillement souhaités, tandis que le comportement tribologique est décrit par la relation entre la contrainte de frottement à l'interface béton-paroi et la vitesse relative de glissement du béton par rapport à la paroi lors de son écoulement. De plus, le comportement rhéologique permet d'évaluer l'écoulement (cisaillé facilement ou difficilement) du béton dans les tuyaux ou dans un coffrage. Cependant, l'étude tribologique est utilisée pour décrire le comportement d'un béton à l'interface entre le matériau et une paroi lors de son écoulement. La maîtrise des paramètres tribologiques (le seuil d'interface et la constante visqueuse) des bétons fibrés aux granulats recyclés permet de bien évaluer et d'améliorer la pompabilité de ces bétons lorsque la technique de pompage est adaptée.

L'effet d'incorporation des granulats recyclés sur les paramètres tribologiques est représenté sur la Figure 4.10. Une diminution du seuil d'interface et de la constante visqueuse est observée pour les bétons à base de granulats recyclés formulés avec la première méthode. Comme les granulats sont saturés à 100 %, il est possible qu'au moment de l'hydratation du ciment, avec le dégagement de la chaleur, les granulats recyclés relâchent une certaine quantité d'eau qui est proportionnelle au dosage des granulats recyclés dans les bétons. Cette quantité supplémentaire d'eau dilue la pâte de ciment, diminue sa viscosité et celle de la couche limite, qui présente une forme plus épaisse à l'interface béton-paroi. Cette dernière diminue les contraintes à l'interface et baisse les paramètres tribologiques des bétons, ce qui favorise leur pompabilité.

En revanche, le seuil d'interface et la constante visqueuse des mélanges de la deuxième méthode sont quasiment constants. Ce résultat est expliqué par le fait que les granulats sont saturés à 50 % seulement, contrairement aux granulats de la première méthode ; cela indique que la préparation des granulats recyclés avec la deuxième méthode n'a pas d'effet significatif sur les propriétés tribologiques du béton.

Au final, à partir des résultats obtenus, nous concluons que la méthode de préparation des granulats recyclés avant l'utilisation dans le béton joue un rôle très important sur les caractéristiques du mélange à l'état frais. Ainsi, la méthode de pré-saturation des granulats (M1) a montré un effet positif sur tous les paramètres du béton à l'état frais, contrairement à la méthode de compensation d'eau (M2).



(a) **(b)**

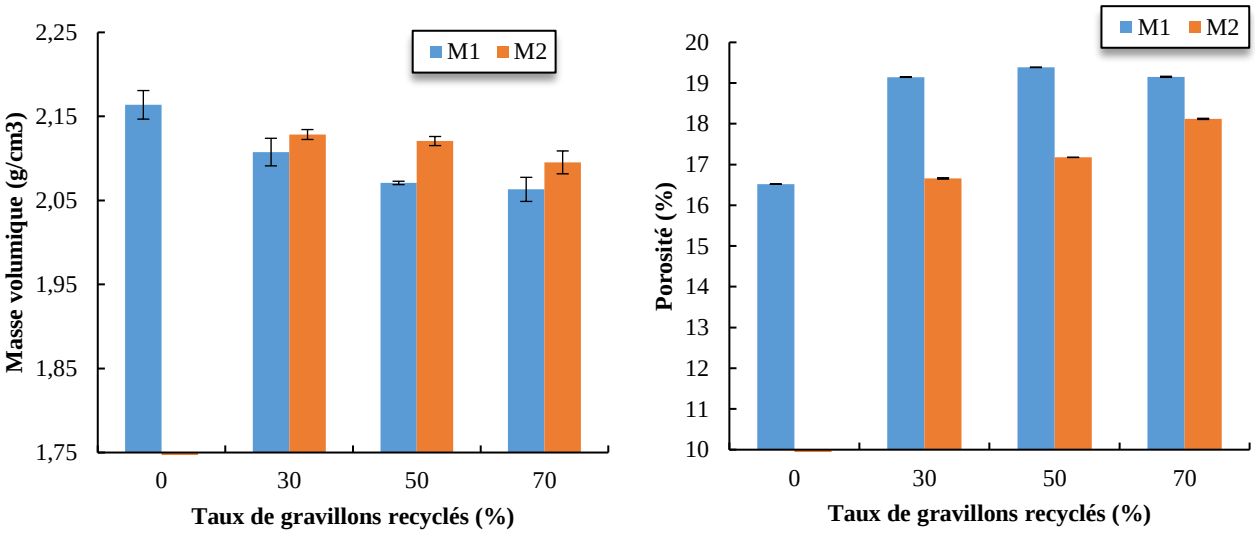
Figure 4.10. Évolution du seuil d'interface (a) et de la constante visqueuse (b) des bétons formulés avec M1 et M2 en fonction du taux de gravillons recyclés.

4.6. Propriétés physiques et mécaniques des bétons à base de granulats recyclés

4.6.1. Porosité et masse volumique apparente

Les résultats de la porosité accessible à l'eau et de la masse volumique apparente des bétons recyclés à 28 jours sont illustrés sur la Figure 4.11. D'après cette dernière, une diminution de la masse volumique apparente des bétons avec l'augmentation du taux de substitution été observée. Cette diminution est causée par la nature plus poreuse des granulats recyclés par rapport aux granulats naturels et elle concerne les bétons formulés par les deux méthodes proposées (saturation (M1) et pré-humidification des granulats (M2)). Par ailleurs, cette diminution est plus significative pour les bétons de granulats recyclés saturés, contrairement aux mélanges réalisés par des granulats pré-humidifiés, qui présentent des masses volumiques légèrement inférieures à celle du béton naturel. Cette différence est expliquée par la formation des pores générés lors de l'évaporation d'eau au moment du séchage des échantillons (méthode de préparation des échantillons expliquée dans le chapitre 2). En effet, les bétons réalisés avec la première méthode (saturation totale des granulats recyclés) possèdent une quantité d'eau libre plus importante que ceux de la deuxième méthode (saturation partielle de 40 % des granulats recyclés). Ce constat est confirmé par les valeurs de la porosité obtenues, où une forte

augmentation de la porosité est enregistrée pour les bétons de granulats saturés et une légère augmentation pour les autres mélanges. Les présents résultats sont cohérents avec les valeurs du volume de l'air occlus et de la masse volumique du béton frais dont les teneurs en air occlus les plus faibles sont obtenues dans le cas des bétons de granulats saturés. Compte tenu de ce qui précède, il est recommandé d'utiliser la méthode de pré-humidification pour la préparation des granulats recyclés afin de maintenir une porosité quasi identique à celle du béton naturel.



(a) (b)

Figure 4.11. Résultats de la masse volumique apparente (a) et de la porosité des bétons recyclés.

4.6.2. Perméabilité

La Figure 4.12 présente l'évolution de la perméabilité des bétons formulés par la méthode de saturation et la méthode de pré-humidification en fonction du taux de remplacement des granulats recyclés. En premier lieu, nous constatons que la perméabilité diminue pour presque tous les mélanges. Cette diminution est très légère pour les bétons de la méthode de saturation qui présentent des valeurs de perméabilité comparables à celle du béton naturel. Quant à la perméabilité des bétons de granulats pré-humidifiés, nous constatons qu'elle est trois fois plus faible que celle des autres bétons. Ce fait est probablement dû à la porosité des bétons des deux

méthodes expliquées ci-dessus ; comme la perméabilité au gaz du béton dépend essentiellement de sa porosité, les valeurs de la perméabilité obtenues sont cohérentes avec celles de la porosité.

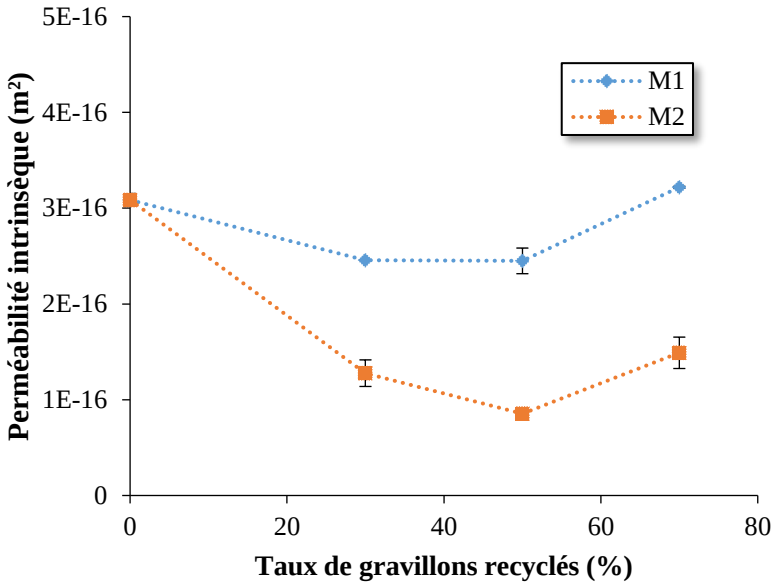


Figure 4.12. Évolution de la perméabilité intrinsèque à 90 j des bétons recyclés.

4.6.3. Résistance à la compression

Les résultats de la résistance à la compression des bétons recyclés formulés avec la méthode de saturation et celle de pré-humidification à 3,7, 28 et 90 jours sont présentés sur la Figure 4.13 (a) et (b) respectivement. D'après ces dernières, nous constatons qu'à 3 et à 7 jours, les bétons des deux méthodes présentent une forte diminution de la résistance à la compression en comparaison à celle du béton naturel. En revanche, à 28 et 90 jours, la cinétique d'évolution de la résistance mécanique est différente entre les bétons de la première et ceux de la deuxième méthode. Les bétons de granulats recyclés saturés possèdent des résistances à la compression inférieures à celles du béton naturel. La diminution de la résistance à court et long termes est probablement due, d'une part, à la forte porosité enregistrée pour ces derniers mélanges et, d'autre part, à la présence d'ancien mortier sur la surface des granulats. Ces résultats sont cohérents avec d'autres études dans la littérature, qui ont démontré que l'introduction de granulats recyclés induit une perte de résistance à la compression [108], [155].

En ce qui concerne les bétons de granulats recyclés pré-humidifiés, nous constatons une légère amélioration de la résistance à la compression à 28 et 90 jours pour les taux de substitution de 30 % et 50 % ; cela peut être le résultat de la faible porosité de ces mélanges en comparaison avec les bétons de la première méthode. De plus, l'augmentation de la résistance est également expliquée par le phénomène de murissement interne où l'eau présent dans les pores des granulats recyclés permettra une meilleure hydratation des particules de ciment à long terme, ce qui donne un meilleur gain de résistance [155].

En effet, le phénomène de murissement interne peut avoir lieu dans les deux cas de préparation de granulats. Cependant, dans le cas de saturation totale des granulats (M1) l'excès d'eau libre est plus important par rapport à celui de granulats pré-humidifiés, ce qui contribue à l'augmentation du réseau poreux dans le béton en diminuant l'effet positif du murissement interne sur la résistance mécanique.

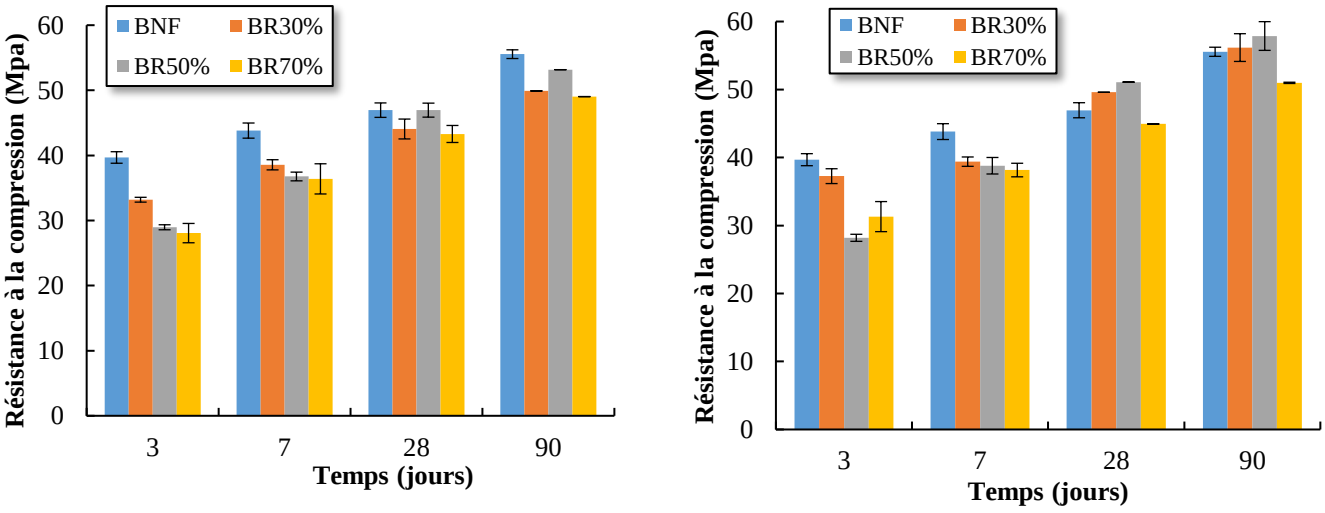


Figure 4.13. Évolution de la résistance à la compression des bétons de la méthode de saturation (a) et de la méthode de pré-humidification (b) en fonction du temps.

4.6.4. Résistance à la traction par fendage

Les résultats de la résistance à la traction des bétons de granulats recyclés saturés et pré-humidifiés sont présentés sur les Figure 4.14 (a) et (b) respectivement. Une évolution de la

résistance à la traction semblable à celle de la résistance à la compression a été observée où une diminution de la résistance à la traction a été enregistrée pour presque tous les mélanges. La diminution de la résistance à la traction des bétons est causée par la fragilité des granulats recyclés utilisés, compte tenu de leur nature, puisqu'ils sont entourés par un vieux mortier de faible résistance. De plus, ce type de granulats possède une porosité plus élevée par rapport aux granulats naturels, ce qui nécessite une quantité d'eau supplémentaire occasionnant une chute de la résistance mécanique du béton. Ces résultats confirment les valeurs de la résistance à la compression obtenues, de même que les deux paramètres se relient linéairement par l'équation suivante proposée par le BAEL :

$$f_{t28} = 0.6 + 0.06 f_{c28}\ [156] \qquad \text{Équation 4.4}$$

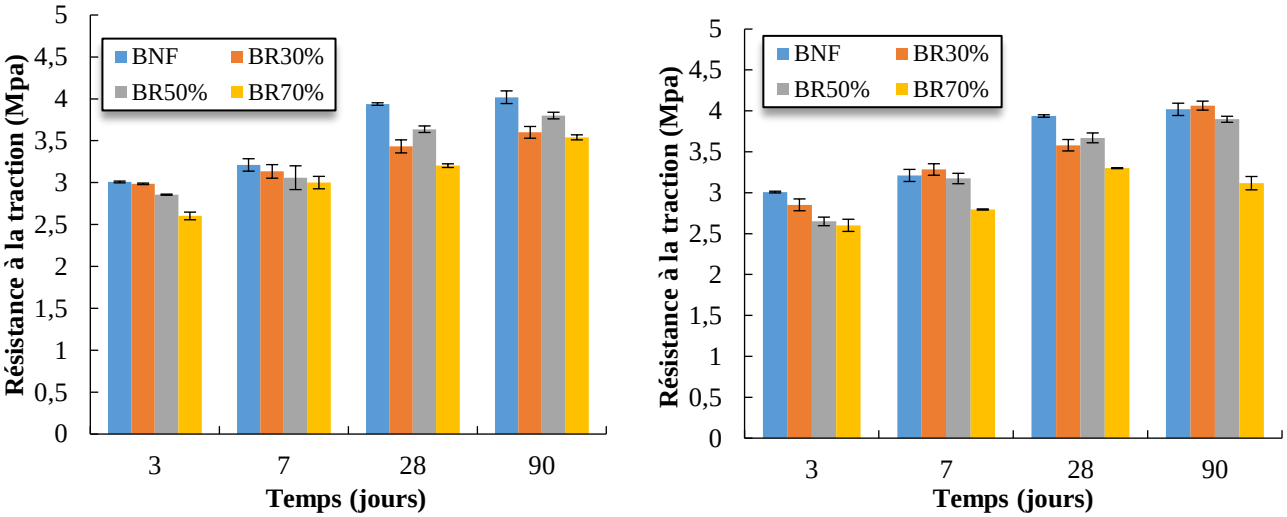


Figure 4.14. Évolution de la résistance à la traction des bétons de granulats recyclés saturés (a) et pré-humidifiés (b) en fct du taux de substitution des GR.

4.6.5. Module d'élasticité

L'effet de substitution des granulats recyclés dans le béton à l'état saturé ou pré-humidifié sur le module d'élasticité statique est présenté sur la Figure 4.15. Une diminution importante du module d'élasticité avec l'augmentation du taux de substitution des granulats recyclés a été

constatée. Cependant, cette diminution est plus significative dans le cas des bétons de granulats saturés par rapport aux bétons de granulats pré-humidifiés qui présentent une légère diminution du module statique. Ce fait est principalement dû à l'effet de la porosité des mélanges et au faible module d'élasticité des granulats recyclés. Par ailleurs, les résultats obtenus sont cohérents avec l'évolution de la résistance mécanique présentée ci-dessus, compte tenu de la relation linéaire entre cette dernière et le module d'élasticité démontré par de nombreux chercheurs dans la littérature ; parmi les équations proposées dans la littérature, Nous citons :

$$E = 4.63Rc_i^{0.5}\ [157] \qquad \text{Équation 4.5}$$

$$E = 4.125Rc_i^{0.5}[147] \qquad \text{Équation 4.6}$$

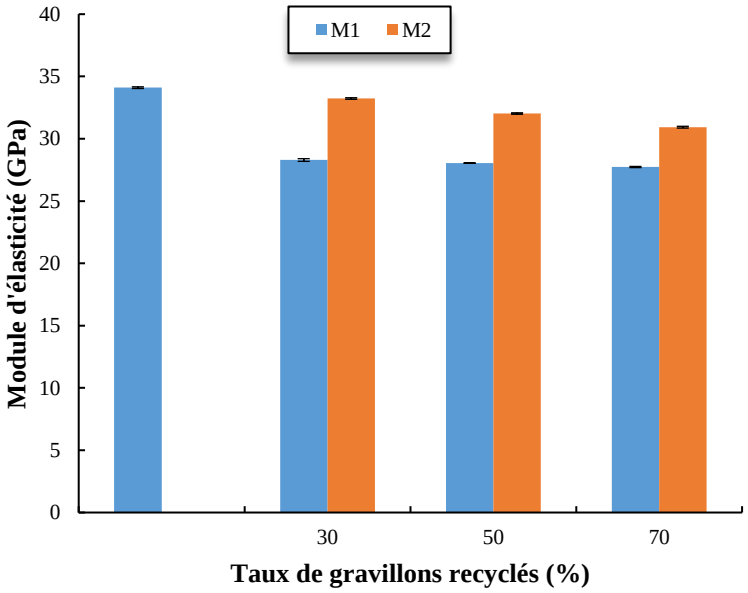


Figure 4.15. Module d'élasticité statique des bétons de granulats recyclés saturés et pré-humidifiés en fonction du taux de substitution des GR.

4.7. Conclusion

Dans le présent chapitre, l'effet des granulats recyclés sur les performances du béton aux états frais et durci a été étudié. En premier lieu, les méthodes de préparation des granulats recyclés choisies ont été définies. Ensuite, les propriétés à l'état frais des bétons formulés, tels que

l'affaissement, le volume d'air occlus, la masse volumique, la rhéologie et la tribologie, ont été déterminés. Enfin, une partie a été consacrée à l'étude des propriétés physiques et mécaniques. Les résultats obtenus à travers cette partie ont montré que :

- En termes d'ouvrabilité, la substitution des granulats recyclés saturés ne présente aucun effet sur l'affaissement du béton, contrairement à la méthode de pré-humidification qui a montré une perte d'ouvrabilité significative.
- Une diminution de la masse volumique ainsi qu'une augmentation de la teneur en air occlus du béton frais ont été observées lorsque l'on augmente le taux de substitution des granulats recyclés aux deux états saturés ou pré-humidifiés, avec une différence négligeable entre les deux méthodes.
- Les comportements rhéologique et tribologique du béton ont été fortement affectés par le choix de la méthode de préparation des granulats. La méthode de saturation a permis de maintenir de faibles paramètres rhéologiques et tribologiques, ce qui favorise la mise en œuvre des bétons. En revanche, la méthode de pré-humidification des granulats entraîne une augmentation de la viscosité plastique et de la constante visqueuse, ce qui rend plus difficile la mise en œuvre des matériaux.
- L'introduction des granulats recyclés saturés induit une forte diminution de la masse volumique apparente et une augmentation de la porosité des bétons. En revanche, l'effet de pré-humidification des granulats est moins significatif.
- La perméabilité des bétons de granulats recyclés saturés semble ne pas être affectée par le taux de remplacement des granulats, contrairement aux bétons de granulats pré-humidifiés qui présentent des valeurs de perméabilité trois fois plus faibles par rapport à celles du béton naturel.
- La résistance mécanique (à la compression et à la traction) aux jeune âges (3 et 7 jours) diminue lorsque l'on augmente le taux de substitution des granulats recyclés. Par ailleurs, à long terme, la résistance mécanique est influencée par la méthode de préparation des granulats ; ainsi, elle continue de diminuer dans le cas des granulats saturés mais augmente légèrement pour les bétons de granulats pré-humidifiés.

- Une évolution de la rigidité semblable à celle de la résistance mécanique a été enregistrée. En effet, le module d’élasticité diminue avec l’augmentation du pourcentage de granulats recyclés ; cette diminution est plus significative dans le cas des bétons de granulats saturés.
- Finalement, il a été conclu que la méthode de saturation des granulats permet de maintenir une bonne ouvrabilité et de faibles paramètres rhéologiques et tribologiques par rapport au béton de granulats naturels, tandis que les valeurs optimales des propriétés physiques et mécaniques du béton durci ont été enregistrées pour les bétons de granulats pré-humidifiés.

Conclusion générale et perspectives

En vue de diminuer l'utilisation des matières premières naturelles et de réduire la consommation d'énergie, le remplacement des granulats naturels par des granulats recyclés issus des constructions démolies pour la formulation des nouveaux bétons a été largement proposé comme étant l'une des solutions envisageables face aux enjeux liés au développement durable. De ce fait, les bétons à base de granulats recyclés ont fait l'objet de plusieurs projets de recherche afin de promouvoir et d'accompagner leur utilisation dans le secteur du BTP.

Bien qu'il ait été montré à travers de nombreuses études que l'introduction de granulats recyclés dans le béton, avec de faibles dosages, peut être effectuée en toute sécurité, une détérioration plus au moins importante des principales performances du béton peut avoir lieu, notamment avec des taux de remplacement allant au-delà de 30 %. Pour répondre à cette problématique, des techniques d'optimisation ont été proposées dans la littérature afin d'améliorer les caractéristiques des bétons recyclés. Parmi ces techniques, l'ajout de fibres organiques, y compris les fibres polypropylènes, a montré une grande efficacité d'amélioration des propriétés à l'état durci des bétons naturels. Cette technique semble donc prometteuse dans le cas des bétons recyclés ; cependant, très peu d'études ont été consacrées à l'effet des fibres polypropylènes sur les performances des bétons recyclés, notamment en termes de propriétés d'écoulement. Pour cela, l'influence des fibres polypropylènes sur les propriétés d'un béton recyclé aux états frais et durci a été étudiée à travers ce travail de thèse.

Dans un premier temps, quatre mélanges de béton, de différents volumes de pâte, ont été confectionnés afin de valider une formulation de béton témoin avec des propriétés rhéologiques et tribologiques optimales au regard de la facilité de la mise en œuvre des bétons. Les résultats expérimentaux de cette étude ont montré que l'augmentation du volume de pâte permet d'améliorer les propriétés du béton frais, notamment son affaissement et ses paramètres rhéologiques et tribologiques. Par conséquent, le mélange (B3) a été retenu comme étant la formulation optimale qui présente des paramètres rhéologiques et tribologiques faibles et une bonne stabilité à la ségrégation.

Dans un deuxième temps, différents dosages et longueurs en fibres ont été introduits dans la formulation optimale choisie précédemment. Les nouveaux mélanges de béton renforcés par des fibres ont été testés afin d'étudier l'influence des fibres sur les propriétés du béton frais. Les résultats obtenus ont montré que l'introduction des fibres dans le béton n'affecte pas sa masse volumique et ni la quantité d'air occlus. Néanmoins, un effet négatif de l'ajout des fibres sur l'ouvrabilité des bétons a été constaté ; ainsi, une diminution significative de l'affaissement a été enregistrée avec l'augmentation du dosage et de la longueur des fibres. Quant aux paramètres rhéologiques, il a été montré que l'augmentation du dosage en fibres augmente la viscosité plastique et le seuil de cisaillement du béton, contrairement à la longueur qui ne présente aucun effet sur ces derniers paramètres lorsque la forme des fibres utilisées est identique. Par ailleurs, l'introduction des fibres a également augmenté les paramètres tribologiques, ce qui a permis de conclure que l'introduction des fibres dans le béton fluide diminue son ouvrabilité et augmente ses propriétés rhéologiques et tribologiques.

En se basant sur les résultats de la première et de la deuxième partie, la troisième partie du présent travail a été consacrée à l'évaluation de l'effet d'un superplastifiant sur les mélanges de béton fibré effectués précédemment. L'objectif de cette partie est de pouvoir rattraper la chute d'ouvrabilité et des paramètres rhéologiques causée par l'ajout des fibres, en utilisant un superplastifiant.

La réflexion menée dans cette partie nous a permis de confirmer que l'ajout du superplastifiant améliore significativement l'ouvrabilité ; ainsi, les valeurs d'affaissement obtenues varient entre 18 et 22 cm. De plus, le seuil de cisaillement a été également amélioré et une diminution significative a été enregistrée avec l'introduction du superplastifiant. En revanche, la viscosité plastique s'est améliorée uniquement pour les mélanges contenant des fibres de faible longueur et faible dosage. De même, le seuil d'interface et la constante visqueuse des bétons adjuvantés sont plus faibles que ceux du béton sans adjuvant et ils sont quasiment égaux aux paramètres tribologiques du béton témoin sans fibres. En outre, un écoulement stable des mélanges a été observé durant l'essai, ce qui indique que la dispersion des fibres dans le béton a été également améliorée.

Étant donné qu'une combinaison de deux types de fibres polypropylènes est souvent adoptée dans certains projets de construction, des essais supplémentaires ont été réalisés sur des bétons renforcés par un mix de deux types de fibres (longueur/ forme), afin de déterminer l'influence de l'hybridation des fibres sur les propriétés du béton frais. Les résultats obtenus ont révélé que l'utilisation de deux longueurs et formes différentes de fibres à un dosage approprié permet de diminuer l'effet négatif des fibres utilisées individuellement.

En matière de propriétés physiques et mécaniques, l'étude de ces formulations à l'état durci a montré que la masse volumique du béton durci n'a pas été affectée par l'introduction des fibres, contrairement à sa porosité et à sa perméabilité qui augmentent avec l'augmentation de la longueur et du dosage des fibres dans le béton. Quant à la résistance mécanique, il a été conclu que les résistances à la compression et à la traction diminuent avec l'ajout de fibres, à l'exception du dosage 0,24 % de FPP19 qui présente des valeurs de résistance optimales. Par ailleurs, le module d'élasticité diminue légèrement avec un ajout de fibres à fort dosage (0,36%) et augmente significativement avec l'utilisation de longueurs mixtes.

Dans la dernière partie de cette thèse, l'influence des granulats recyclés sur les performances des bétons fibrés a été étudiée en substituant aux granulats naturels des granulats recyclés avec des taux massiques de 30 et 70 %. Les granulats recyclés ont été utilisés une fois à l'état sec avec une pré-humidification lors de la formulation du béton, et une autre fois à l'état saturé, afin de mettre en évidence le choix de préparation des granulats recyclés et leurs effets sur les propriétés du béton. Les résultats issus de cette étude ont révélé que, d'une part, l'introduction de granulats recyclés à l'état saturé permet de préserver les propriétés du béton frais telles que l'affaissement, les paramètres rhéologiques et tribologiques, tandis que la pré-humidification des granulats lors de la formulation a induit une perte significative de l'ouvrabilité et des paramètres rhéologiques du béton. D'autre part, la saturation des granulats a négativement affecté les paramètres mécaniques du béton ; ainsi, la résistance mécanique du béton à la compression et à la traction diminue avec l'introduction de granulats recyclés. Toutefois, les résultats obtenus pour les bétons de granulats recyclés pré-humidifiés semblent ne pas être affectés par la substitution de ces derniers. Finalement, il a été conclu que le choix de la méthode

de préparation des granulats recyclés est un facteur majeur qui influe sur les paramètres du béton frais et durci.

D'après l'ensemble des résultats obtenus dans le cadre de cette thèse, l'utilisation des fibres polypropylènes en combinaison avec un superplastifiant s'avère une bonne méthode de renforcement du béton ordinaire sans que soient affectées ses propriétés à l'état frais. En ce qui concerne la valorisation des granulats recyclés, l'étude a démontré que l'utilisation de granulats recyclés avec la méthode de pré-humidification permet d'obtenir des propriétés mécaniques comparables à celles du béton de granulats naturels.

En perspective, une étude sur l'optimisation de l'adhérence entre les fibres et la pâte cimentaire est nécessaire afin de pouvoir améliorer les performances du béton fibré. Ce projet de thèse peut être également complété par une étude de durabilité plus approfondie, notamment vis-à-vis de la diffusion des ions chlorures et de la résistance aux cycles gel-dégel ainsi que de la résistance au feu. Sachant que les fibres réagissent contre la fissuration, il serait intéressant d'étudier l'effet de la géométrie des fibres sur l'endommagement et la rupture des bétons fibrés. De plus, la mise en œuvre de ce matériau est un peu compliquée, notamment pour des éléments structuraux (voile, poteau...) ; étant donné que ces éléments sont fabriqués avec un béton armé, le passage des fibres polypropylènes entre les armatures de manière équilibrée et homogène représente un réel défi qui vaut la peine d'être relevé.

Références

[1] R. F. Zollo, « Fiber-reinforced concrete: an overview after 30 years of development », *Cement and Concrete Composites*, vol. 19, nº 2, p. 107-122, janv. 1997, doi: 10.1016/S0958-9465(96)00046-7.

[2] P. K. Mehta et P. J. Monteiro, *Concrete: microstructure, properties, and materials*. McGraw-Hill Education, 2014.

[3] J. jun Li, J. gang Niu, C. jun Wan, B. Jin, et Y. liu Yin, « Investigation on mechanical properties and microstructure of high performance polypropylene fiber reinforced lightweight aggregate concrete », *Construction and Building Materials*, vol. 118, p. 27-35, août 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.04.116.

[4] M. Zeiml, D. Leithner, R. Lackner, et H. A. Mang, « How do polypropylene fibers improve the spalling behavior of in-situ concrete? », *Cement and Concrete Research*, vol. 36, nº 5, p. 929-942, mai 2006, doi: 10.1016/j.cemconres.2005.12.018.

[5] H. Mazaheripour, S. Ghanbarpour, S. H. Mirmoradi, et I. Hosseinpour, « The effect of polypropylene fibers on the properties of fresh and hardened lightweight self-compacting concrete », *Construction and Building Materials*, vol. 25, nº 1, p. 351-358, janv. 2011, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2010.06.018.

[6] A. Noushini, M. Hastings, A. Castel, et F. Aslani, « Mechanical and flexural performance of synthetic fibre reinforced geopolymer concrete », *Construction and Building Materials*, vol. 186, p. 454-475, oct. 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.07.110.

[7] K. R. Akça, Ö. Çakır, et M. İpek, « Properties of polypropylene fiber reinforced concrete using recycled aggregates », *Construction and Building Materials*, vol. 98, p. 620-630, nov. 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.08.133.

[8] C. S. Das, T. Dey, R. Dandapat, B. B. Mukharjee, et J. Kumar, « Performance evaluation of polypropylene fibre reinforced recycled aggregate concrete », *Construction and Building Materials*, vol. 189, p. 649-659, nov. 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.09.036.

[9] L. Dvorkin et O. Dvorkin, « BASICS OF CONCRETE SCIENCE », p. 200.

[10] G. L. Guerrini, L. Cassar, L. Biolzi, et G. Rosati, « Production and mechanical characterization of very high performance fibre-reinforced concrete beams », in *Innovation in Concrete Structures: Design and Construction*, 0 vol., Thomas Telford Publishing, 1999, p. 311-321. doi: 10.1680/iicsdac.28241.0031.

[11] « ACI 544.1R : Report on Fiber Reinforced Concrete ». https://global.ihs.com/doc_detail.cfm?document_name=ACI%20544%2E1R&item_s_key=00117436 (consulté le avr. 30, 2020).

[12] K. Holschemacher, T. Mueller, et Y. Ribakov, « Effect of steel fibres on mechanical properties of high-strength concrete », *Materials & Design (1980-2015)*, vol. 31, nº 5, p. 2604-2615, mai 2010, doi: 10.1016/j.matdes.2009.11.025.

[13] M. Usman Rashid, « Experimental investigation on durability characteristics of steel and polypropylene fiber reinforced concrete exposed to natural weathering action », *Construction and Building Materials*, vol. 250, p. 118910, juill. 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118910.

[14] D. M. Özcan, A. Bayraktar, A. Şahin, T. Haktanir, et T. Türker, « Experimental and finite element analysis on the steel fiber-reinforced concrete (SFRC) beams ultimate behavior », *Construction and Building Materials*, vol. 23, nº 2, p. 1064-1077, févr. 2009, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2008.05.010.

[15] « Passerelle des Anges », *Office de tourisme de Saint-Guilhem-le-Désert - Vallée de l'Hérault*. https://www.saintguilhem-valleeherault.fr/2@980 (consulté le mai 03, 2020).

[16] I. Irki, F. Debieb, E.-H. Kadri, O. Boukendakdji, M. Bentchikou, et H. Soualhi, « Effect of the length and the volume fraction of wavy steel fibers on the behavior of self-compacting concrete », *Journal of Adhesion Science and Technology*, vol. 31, nº 7, p. 735-748, avr. 2017, doi: 10.1080/01694243.2016.1231394.

[17] B. Miao, J.-C. Chern, et C.-A. Yang, « Influences of fiber content on properties of self-compacting steel fiber reinforced concrete », *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, vol. 26, nº 4, p. 523-530, juin 2003, doi: 10.1080/02533839.2003.9670805.

[18] N. N. Li, A. G. Fane, W. W. Ho, et T. Matsuura, *Advanced membrane technology and applications*. John Wiley & Sons, 2011.

[19] O. A. Düzgün, R. Gül, et A. C. Aydin, « Effect of steel fibers on the mechanical properties of natural lightweight aggregate concrete », *Materials Letters*, vol. 59, nº 27, p. 3357-3363, nov. 2005, doi: 10.1016/j.matlet.2005.05.071.

[20] N. Banthia, V. Bindiganavile, J. Jones, et J. Novak, « Fiber-reinforced concrete in precast concrete applications: Research leads to innovative products », *pcij*, vol. 57, nº 3, p. 33-46, juin 2012, doi: 10.15554/pcij.06012012.33.46.

[21] « AR Glass Fibers for GFRC - 3/4" - 12-lb bag », *Concrete Countertop Institute*. https://concretecountertopinstitute.com/shop/glass-fibers-gfrc/ (consulté le mai 07, 2020).

[22] S. S. P.t, « Self Compacting Concrete Using Fly Ash and Glass Fibre », *International Journal of Engineering Research & Technology*, vol. 2, nº 9, sept. 2013, Consulté le: juin 17, 2021. [En ligne]. Disponible sur: https://www.ijert.org/research/self-compacting-concrete-using-fly-ash-and-glass-fibre-IJERTV2IS90591.pdf, https://www.ijert.org/self-compacting-concrete-using-fly-ash-and-glass-fibre

[23] M. Vidhya, E. Ezhilarasi, M. Nandhini Chella Kavitha, K. Rubini, et Karpagam university, « An Experimental Study on Self Consolidating Concrete with Silica Fume and Glass Fibre », *IJERT*, vol. V5, n° 12, p. IJERTV5IS120296, déc. 2016, doi: 10.17577/IJERTV5IS120296.

[24] « Nanjing International Youth Cultural Center, Nanjing », *Verdict Designbuild*. https://www.designbuild-network.com/projects/nanjing-international-youth-cultural-center-nanjing/ (consulté le mai 04, 2020).

[25] M. Ardanuy, J. Claramunt, et R. D. Toledo Filho, « Cellulosic fiber reinforced cement-based composites: A review of recent research », *Construction and Building Materials*, vol. 79, p. 115-128, mars 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.01.035.

[26] M. Bentchikou, A. Guidoum, K. Scrivener, K. Silhadi, et S. Hanini, « Effect of recycled cellulose fibres on the properties of lightweight cement composite matrix », *Construction and Building Materials*, vol. 34, p. 451-456, sept. 2012, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.02.097.

[27] H. Savastano, P. G. Warden, et R. S. P. Coutts, « Mechanically pulped sisal as reinforcement in cementitious matrices », *Cement and Concrete Composites*, vol. 25, n° 3, p. 311-319, avr. 2003, doi: 10.1016/S0958-9465(02)00055-0.

[28] G. J. Liu, E. L. Bai, J. Y. Xu, B. X. Meng, T. J. Wang, et S. Chang, « Study on Dynamic Mechanical Properties of Carbon Fiber Reinforced Concrete », in *Materials Science Forum*, 2020, vol. 976, p. 180-185.

[29] A. S. Karzad, S. Al Toubat, M. Maalej, et P. Estephane, « Repair of reinforced concrete beams using carbon fiber reinforced polymer », *MATEC Web Conf.*, vol. 120, p. 01008, 2017, doi: 10.1051/matecconf/201712001008.

[30] P. S. Song, S. Hwang, et B. C. Sheu, « Strength properties of nylon- and polypropylene-fiber-reinforced concretes », *Cement and Concrete Research*, vol. 35, n° 8, p. 1546-1550, août 2005, doi: 10.1016/j.cemconres.2004.06.033.

[31] M. Said, A. A. Abd El-Azim, M. M. Ali, H. El-Ghazaly, et I. Shaaban, « Effect of elevated temperature on axially and eccentrically loaded columns containing Polyvinyl Alcohol (PVA) fibers », *Engineering Structures*, vol. 204, p. 110065, févr. 2020, doi: 10.1016/j.engstruct.2019.110065.

[32] S. Hamoush, T. Abu-Lebdeh, et T. Cummins, « Deflection behavior of concrete beams reinforced with PVA micro-fibers », *Construction and Building Materials*, vol. 24, n° 11, p. 2285-2293, nov. 2010, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2010.04.027.

[33] A. Noushini, B. Samali, et K. Vessalas, « Ductility and Damping Characteristics of PVA-FRC Beam Elements », *Advances in Structural Engineering*, vol. 18, n° 11, p. 1763-1787, nov. 2015, doi: 10.1260/1369-4332.18.11.1763.

[34] A. Tsuchida, *High-performance and specialty fibers: concepts, technology and modern applications of man-made fibers for the future*, 1st edition. New York, NY: Springer Berlin Heidelberg, 2016.

[35] V. Guerini, A. Conforti, G. Plizzari, et S. Kawashima, « Influence of Steel and Macro-Synthetic Fibers on Concrete Properties », *Fibers*, vol. 6, nº 3, p. 47, juill. 2018, doi: 10.3390/fib6030047.

[36] M. Hassanpour, P. Shafigh, et H. B. Mahmud, « Lightweight aggregate concrete fiber reinforcement – A review », *Construction and Building Materials*, vol. 37, p. 452-461, déc. 2012, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.07.071.

[37] N. Banthia et R. Gupta, « Hybrid fiber reinforced concrete (HyFRC): fiber synergy in high strength matrices », *Mat. Struct.*, vol. 37, nº 10, p. 707-716, déc. 2004, doi: 10.1007/BF02480516.

[38] M. Halvaei, M. Jamshidi, H. R. Pakravan, et M. Latifi, « Interfacial bonding of fine aggregate concrete to low modulus fibers », *Construction and Building Materials*, vol. 95, p. 117-123, oct. 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.07.024.

[39] K. T. Soe, Y. X. Zhang, et L. C. Zhang, « Material properties of a new hybrid fibre-reinforced engineered cementitious composite », *Construction and Building Materials*, vol. 43, p. 399-407, juin 2013, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.02.021.

[40] H. R. Pakravan, M. Latifi, et M. Jamshidi, « Hybrid short fiber reinforcement system in concrete: A review », *Construction and Building Materials*, vol. 142, p. 280-294, juill. 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.03.059.

[41] I. Marković, *High-performance hybrid-fibre concrete: development and utilisation*. IOS Press, 2006.

[42] L. Huang, L. Xu, Y. Chi, et H. Xu, « Experimental investigation on the seismic performance of steel–polypropylene hybrid fiber reinforced concrete columns », *Construction and Building Materials*, vol. 87, p. 16-27, juill. 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.03.073.

[43] M. Hsie, C. Tu, et P. S. Song, « Mechanical properties of polypropylene hybrid fiber-reinforced concrete », *Materials Science and Engineering: A*, vol. 494, nº 1, p. 153-157, oct. 2008, doi: 10.1016/j.msea.2008.05.037.

[44] B. Boulekbache, M. Hamrat, M. Chemrouk, et S. Amziane, « Flowability of fibre-reinforced concrete and its effect on the mechanical properties of the material », *Construction and Building Materials*, vol. 24, nº 9, p. 1664-1671, sept. 2010, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2010.02.025.

[45] I. H. Yang, C. Joh, et B.-S. Kim, « Structural behavior of ultra high performance concrete beams subjected to bending », *Engineering Structures*, vol. 32, nº 11, p. 3478-3487, nov. 2010, doi: 10.1016/j.engstruct.2010.07.017.

[46] M. G. Alberti, A. Enfedaque, et J. C. Gálvez, « Fracture mechanics of polyolefin fibre reinforced concrete: Study of the influence of the concrete properties, casting procedures, the fibre length and specimen size », *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 154, p. 225-244, mars 2016, doi: 10.1016/j.engfracmech.2015.12.032.

[47] « NF EN 14651+A1 - Décembre 2007 ». https://www.boutique.afnor.org/norme/nf-en-14651a1/methode-d-essai-du-beton-de-fibres-metalliques-mesurage-de-la-resistance-a-la-traction-par-flexion-limite-de-proportionnalite-lo/article/655040/fa155701 (consulté le mai 12, 2020).

[48] D. Dupont et L. Vandewalle, « Distribution of steel fibres in rectangular sections », *Cement and Concrete Composites*, vol. 27, nº 3, p. 391-398, mars 2005, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2004.03.005.

[49] B. Chen et J. Liu, « Contribution of hybrid fibers on the properties of the high-strength lightweight concrete having good workability », *Cement and Concrete Research*, vol. 35, nº 5, p. 913-917, mai 2005, doi: 10.1016/j.cemconres.2004.07.035.

[50] T. Simões, H. Costa, D. Dias-da-Costa, et E. Júlio, « Influence of type and dosage of micro-fibres on the physical properties of fibre reinforced mortar matrixes », *Construction and Building Materials*, vol. 187, p. 1277-1285, oct. 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.08.058.

[51] Y.-S. Heo, J. G. Sanjayan, C.-G. Han, et M.-C. Han, « Synergistic effect of combined fibers for spalling protection of concrete in fire », *Cement and Concrete Research*, vol. 40, nº 10, p. 1547-1554, oct. 2010, doi: 10.1016/j.cemconres.2010.06.011.

[52] L. G. Li, Z. W. Zhao, J. Zhu, A. K. H. Kwan, et K. L. Zeng, « Combined effects of water film thickness and polypropylene fibre length on fresh properties of mortar », *Construction and Building Materials*, vol. 174, p. 586-593, juin 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.03.259.

[53] A. A. Ramezanianpour, M. Esmaeili, S. A. Ghahari, et M. H. Najafi, « Laboratory study on the effect of polypropylene fiber on durability, and physical and mechanical characteristic of concrete for application in sleepers », *Construction and Building Materials*, vol. 44, p. 411-418, juill. 2013, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.02.076.

[54] K. Zhang *et al.*, « How does adsorption behavior of polycarboxylate superplasticizer effect rheology and flowability of cement paste with polypropylene fiber? », *Cement and Concrete Composites*, vol. 95, p. 228-236, janv. 2019, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2018.11.003.

[55] P. Balaguru et A. Foden, « Properties of Fiber Reinforced Structural Lightweight Concrete », *SJ*, vol. 93, n° 1, p. 62-78, janv. 1996, doi: 10.14359/9833.

[56] H. Soualhi, « Optimisation de la viscosité des bétons à faible impact environnemental », Cergy-Pontoise, 2014.

[57] K. Yamada, « Basics of analytical methods used for the investigation of interaction mechanism between cements and superplasticizers », *Cement and Concrete Research*, vol. 41, n° 7, p. 793-798, juill. 2011, doi: 10.1016/j.cemconres.2011.03.007.

[58] A. C. Aydin, « Self compactability of high volume hybrid fiber reinforced concrete », *Construction and Building Materials*, vol. 21, n° 6, p. 1149-1154, juin 2007, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2006.11.017.

[59] Z. Sun et Q. Xu, « Microscopic, physical and mechanical analysis of polypropylene fiber reinforced concrete », *Materials Science and Engineering: A*, vol. 527, n° 1-2, p. 198-204, déc. 2009, doi: 10.1016/j.msea.2009.07.056.

[60] O. Karahan et C. D. Atiş, « The durability properties of polypropylene fiber reinforced fly ash concrete », *Materials & Design*, vol. 32, n° 2, p. 1044-1049, févr. 2011, doi: 10.1016/j.matdes.2010.07.011.

[61] S. Kakooei, H. M. Akil, M. Jamshidi, et J. Rouhi, « The effects of polypropylene fibers on the properties of reinforced concrete structures », *Construction and Building Materials*, vol. 27, n° 1, p. 73-77, févr. 2012, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.08.015.

[62] A. Hasnaoui, « Optimisation d'un géopolymère à base de laitier et de metakaolin pour la rélisation d'un béton de structure », Cergy-Pontoise, 2019.

[63] N. Banthia et R. Gupta, « Influence of polypropylene fiber geometry on plastic shrinkage cracking in concrete », *Cement and Concrete Research*, vol. 36, n° 7, p. 1263-1267, juill. 2006, doi: 10.1016/j.cemconres.2006.01.010.

[64] V. Slowik, T. Hübner, M. Schmidt, et B. Villmann, « Simulation of capillary shrinkage cracking in cement-like materials », *Cement and Concrete Composites*, vol. 31, n° 7, p. 461-469, août 2009, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2009.05.004.

[65] C. Qi, J. Weiss, et J. Olek, « Characterization of plastic shrinkage cracking in fiber reinforced concrete using image analysis and a modified Weibull function », *Mat. Struct.*, vol. 36, n° 6, p. 386-395, juill. 2003, doi: 10.1007/BF02481064.

[66] V. M. Malhotra, A, G. G. Carette, et A. Bilodeau, « Mechanical Properties and Durability of Polypropylene Fiber Reinforced High-Volume Fly Ash Concrete for Shotcrete Applications », *MJ*, vol. 91, n° 5, p. 478-486, sept. 1994, doi: 10.14359/4070.

[67] S. Yin, R. Tuladhar, T. Collister, M. Combe, Nagaratnam Sivakugan, et Z. Deng, « Post-cracking performance of recycled polypropylene fibre in concrete », *Construction and Building Materials*, vol. 101, p. 1069-1077, déc. 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.10.056.

[68] R. F. Zollo, « COLLATED FIBRILLATED POLYPROPYLENE FIBERS IN FRC. », *Publication SP-American Concrete Institute*, p. 397-409, 1984.

[69] A. J. Al-Tayyib, M. M. Al-Zahrani, Rasheeduzzafar, et G. J. Al-Sulaimani, « Effect of polypropylene fiber reinforcement on the properties of fresh and hardened concrete in the Arabian Gulf environment », *Cement and Concrete Research*, vol. 18, n° 4, p. 561-570, juill. 1988, doi: 10.1016/0008-8846(88)90049-X.

[70] N. A. Libre, M. Shekarchi, M. Mahoutian, et P. Soroushian, « Mechanical properties of hybrid fiber reinforced lightweight aggregate concrete made with natural pumice », *Construction and Building Materials*, vol. 25, n° 5, p. 2458-2464, mai 2011, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2010.11.058.

[71] S. Djebali, « Caractérisation des éléments de structures en béton de fibres métalliques », Universite Mouloud Mammeri, 2013.

[72] O. Kayali, M. N. Haque, et B. Zhu, « Some characteristics of high strength fiber reinforced lightweight aggregate concrete », *Cement and Concrete Composites*, vol. 25, n° 2, p. 207-213, févr. 2003, doi: 10.1016/S0958-9465(02)00016-1.

[73] A. E. Naaman, « New Fiber Technology (Cement, Ceramic, and Polymeric Composites) », *CI*, vol. 20, n° 7, p. 57-62, juill. 1998.

[74] A. E. Naaman, « Engineered Steel Fibers with Optimal Properties for Reinforcement of Cement Composites », *ACT*, vol. 1, n° 3, p. 241-252, 2003, doi: 10.3151/jact.1.241.

[75] D.-Y. Yoo et Y.-S. Yoon, « Structural performance of ultra-high-performance concrete beams with different steel fibers », *Engineering Structures*, vol. 102, p. 409-423, nov. 2015, doi: 10.1016/j.engstruct.2015.08.029.

[76] K. Wille et A. E. Naaman, « Pullout Behavior of High-Strength Steel Fibers Embedded in Ultra-High-Performance Concrete », *MJ*, vol. 109, n° 4, p. 479-488, juill. 2012, doi: 10.14359/51683923.

[77] Z. Xu, H. Hao, et H. N. Li, « Experimental study of dynamic compressive properties of fibre reinforced concrete material with different fibres », *Materials & Design*, vol. 33, p. 42-55, janv. 2012, doi: 10.1016/j.matdes.2011.07.004.

[78] D.-Y. Yoo, G. Zi, S.-T. Kang, et Y.-S. Yoon, « Biaxial flexural behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete with different fiber lengths and placement

methods », *Cement and Concrete Composites*, vol. 63, p. 51-66, oct. 2015, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2015.07.011.

[79] D.-Y. Yoo, S.-T. Kang, et Y.-S. Yoon, « Effect of fiber length and placement method on flexural behavior, tension-softening curve, and fiber distribution characteristics of UHPFRC », *Construction and Building Materials*, vol. 64, p. 67-81, août 2014, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.04.007.

[80] D.-Y. Yoo, N. Banthia, G. Zi, et Y.-S. Yoon, « Comparative Biaxial Flexural Behavior of Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete Panels Using Two Different Test and Placement Methods », *JTE*, vol. 45, nº 2, p. 624-641, févr. 2017, doi: 10.1520/JTE20150275.

[81] P. S. Song, J. C. Wu, S. Hwang, et B. C. Sheu, « Statistical analysis of impact strength and strength reliability of steel–polypropylene hybrid fiber-reinforced concrete », *Construction and Building Materials*, vol. 19, nº 1, p. 1-9, févr. 2005, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2004.05.002.

[82] L. Ferrara et A. Meda, « Relationships between fibre distribution, workability and the mechanical properties of SFRC applied to precast roof elements », *Mater Struct*, vol. 39, nº 4, p. 411-420, mai 2006, doi: 10.1617/s11527-005-9017-4.

[83] J. F. Lataste, M. Behloul, et D. Breysse, « Characterisation of fibres distribution in a steel fibre reinforced concrete with electrical resistivity measurements », *NDT & E International*, vol. 41, nº 8, p. 638-647, déc. 2008, doi: 10.1016/j.ndteint.2008.03.008.

[84] R. Siddique et P. Cachim, *Waste and Supplementary Cementitious Materials in Concrete: Characterisation, Properties and Applications*. Woodhead Publishing, 2018.

[85] G. Wardeh, E. Ghorbel, et H. Gomart, « Mix Design and Properties of Recycled Aggregate Concretes: Applicability of Eurocode 2 », *Int J Concr Struct Mater*, vol. 9, nº 1, p. 1-20, mars 2015, doi: 10.1007/s40069-014-0087-y.

[86] M. S. de Juan et P. A. Gutiérrez, « Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate », *Construction and Building Materials*, vol. 23, nº 2, p. 872-877, févr. 2009, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2008.04.012.

[87] F. López-Gayarre, P. Serna, A. Domingo-Cabo, M. A. Serrano-López, et C. López-Colina, « Influence of recycled aggregate quality and proportioning criteria on recycled concrete properties », *Waste Management*, vol. 29, nº 12, p. 3022-3028, déc. 2009, doi: 10.1016/j.wasman.2009.07.010.

[88] F. Agrela, M. Sánchez de Juan, J. Ayuso, V. L. Geraldes, et J. R. Jiménez, « Limiting properties in the characterisation of mixed recycled aggregates for use in the manufacture of concrete », *Construction and Building Materials*, vol. 25, nº 10, p. 3950-3955, oct. 2011, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.04.027.

[89] S. Omary, « Effet de l'incorporation des granulats recyclés sur le comportement et la durabilité vis-à-vis du gel-dégel des bétons », Cergy-Pontoise, 2017.

[90] R. Sri Ravindrarajah et C. T. Tam, « Properties of concrete made with crushed concrete as coarse aggregate », *Magazine of Concrete Research*, vol. 37, n° 130, p. 29-38, mars 1985, doi: 10.1680/macr.1985.37.130.29.

[91] A. André, J. de Brito, A. Rosa, et D. Pedro, « Durability performance of concrete incorporating coarse aggregates from marble industry waste », *Journal of Cleaner Production*, vol. 65, p. 389-396, févr. 2014, doi: 10.1016/j.jclepro.2013.09.037.

[92] İ. B. Topçu et S. Şengel, « Properties of concretes produced with waste concrete aggregate », *Cement and Concrete Research*, vol. 34, n° 8, p. 1307-1312, août 2004, doi: 10.1016/j.cemconres.2003.12.019.

[93] C. S. Poon, S. C. Kou, et L. Lam, « Influence of recycled aggregate on slump and bleeding of fresh concrete », *Mater Struct*, vol. 40, n° 9, p. 981-988, nov. 2007, doi: 10.1617/s11527-006-9192-y.

[94] I. B. Topçu, « Physical and mechanical properties of concretes produced with waste concrete », *Cement and Concrete Research*, vol. 27, n° 12, p. 1817-1823, déc. 1997, doi: 10.1016/S0008-8846(97)00190-7.

[95] J. M. V. Gómez-Soberón, « Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate: An experimental study », *Cement and Concrete Research*, vol. 32, n° 8, p. 1301-1311, août 2002, doi: 10.1016/S0008-8846(02)00795-0.

[96] F. Faleschini, C. Jiménez, M. Barra, D. Aponte, E. Vázquez, et C. Pellegrino, « Rheology of fresh concretes with recycled aggregates », *Construction and Building Materials*, vol. 73, p. 407-416, déc. 2014, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.09.068.

[97] P. F. G. Banfill, « Additivity effects in the rheology of fresh concrete containing water-reducing admixtures », *Construction and Building Materials*, vol. 25, n° 6, p. 2955-2960, juin 2011, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2010.12.001.

[98] O. H. Wallevik et J. E. Wallevik, « Rheology as a tool in concrete science: The use of rheographs and workability boxes », *Cement and Concrete Research*, vol. 41, n° 12, p. 1279-1288, déc. 2011, doi: 10.1016/j.cemconres.2011.01.009.

[99] E. Vázquez, M. Barra, D. Aponte, C. Jiménez, et S. Valls, « Improvement of the durability of concrete with recycled aggregates in chloride exposed environment », *Construction and Building Materials*, vol. 67, p. 61-67, sept. 2014, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.11.028.

[100] A. Ait Mohamed Amer, K. Ezziane, A. Bougara, et M. Adjoudj, « Rheological and mechanical behavior of concrete made with pre-saturated and dried recycled concrete

aggregates », *Construction and Building Materials*, vol. 123, p. 300-308, oct. 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.06.107.

[101] F. Debieb, S. Kenai, L. Courard, et M. Bentchikou, « from concrete to concrete », p. 9, 2009.

[102] M. Etxeberria, E. Vázquez, A. Marí, et M. Barra, « Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete », *Cement and Concrete Research*, vol. 37, n° 5, p. 735-742, mai 2007, doi: 10.1016/j.cemconres.2007.02.002.

[103] Z. Tahar, « Optimisation des caractéristiques rhéologiques, mécaniques et thermiques des bétons à base de granulats recyclés avec différents couples ciment/adjuvant », These de doctorat, Cergy-Pontoise, 2016. Consulté le: juin 17, 2021. [En ligne]. Disponible sur: https://www.theses.fr/2016CERG0841

[104] C. Thomas, J. Setién, J. A. Polanco, P. Alaejos, et M. Sánchez de Juan, « Durability of recycled aggregate concrete », *Construction and Building Materials*, vol. 40, p. 1054-1065, mars 2013, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.11.106.

[105] R. Zaharieva, F. Buyle-Bodin, F. Skoczylas, et E. Wirquin, « Assessment of the surface permeation properties of recycled aggregate concrete », *Cement and Concrete Composites*, vol. 25, n° 2, p. 223-232, févr. 2003, doi: 10.1016/S0958-9465(02)00010-0.

[106] S. C. Kou, C. S. Poon, et D. Chan, « Properties of steam cured recycled aggregate fly ash concrete », *INTERNATIONAL CENTER FOR NUMERICAL METHODS IN ENGINEERING (CIMNE). Marco Cioffi*, vol. 6201, p. 00201, 2004.

[107] Z. Tahar, T.-T. Ngo, E. H. Kadri, A. Bouvet, F. Debieb, et S. Aggoun, « Effect of cement and admixture on the utilization of recycled aggregates in concrete », *Construction and Building Materials*, vol. 149, p. 91-102, sept. 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.04.152.

[108] V. Boulay, R. GAGNÉ, et R. MORIN, « Valorisation des matériaux granulaires recyclés dans le béton de ciment pour usage résidentiel », Université de Sherbrooke, 2014.

[109] A. Rao, « Experimental investigation on use of recycled aggregates in mortar and concrete », *Civil Engineering, Department of Engineering, Indian Institute of Technology, Kanpur, India*, 2005.

[110] C. J. Zega, Y. A. Villagrán-Zaccardi, et A. A. Di Maio, « Effect of natural coarse aggregate type on the physical and mechanical properties of recycled coarse aggregates », *Mater Struct*, vol. 43, n° 1, p. 195-202, janv. 2010, doi: 10.1617/s11527-009-9480-4.

[111] Z. Tahar, E. H. Kadri, T.-T. Ngo, A. Bouvet, et A. Kaci, « Influence of recycled sand and gravel on the rheological and mechanical characteristic of concrete », *Journal of Adhesion Science and Technology*, vol. 30, n° 4, p. 392-411, févr. 2016, doi: 10.1080/01694243.2015.1101185.

[112] H. Katkhuda et N. Shatarat, « Improving the mechanical properties of recycled concrete aggregate using chopped basalt fibers and acid treatment », *Construction and Building Materials*, vol. 140, p. 328-335, juin 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.02.128.

[113] « NF EN 12350-2 - Juin 2019 ». https://www.boutique.afnor.org/norme/nf-en-12350-2/essais-pour-beton-frais-partie-2-essai-d-affaissement/article/904932/fa190558 (consulté le mars 11, 2020).

[114] X. Li, « Recycling and reuse of waste concrete in China: Part I. Material behaviour of recycled aggregate concrete », *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 53, n° 1, p. 36-44, déc. 2008, doi: 10.1016/j.resconrec.2008.09.006.

[115] S. C. Kou, C. S. Poon, et D. Chan, « Properties of steam cured recycled aggregate fly ash concrete », *INTERNATIONAL CENTER FOR NUMERICAL METHODS IN ENGINEERING (CIMNE). Marco Cioffi*, vol. 6201, p. 00201, 2004.

[116] A. Ajdukiewicz et A. Kliszczewicz, « Influence of recycled aggregates on mechanical properties of HS/HPC », *Cement and Concrete Composites*, vol. 24, n° 2, p. 269-279, avr. 2002, doi: 10.1016/S0958-9465(01)00012-9.

[117] W.-H. Kang, R. B. Ramesh, O. Mirza, S. Senaratne, V. Tam, et D. Wigg, « Reliability Based Design of RC Beams With Recycled Aggregate and Steel Fibres », *Structures*, vol. 11, p. 135-145, août 2017, doi: 10.1016/j.istruc.2017.05.002.

[118] J. F. Dong, Q. Y. Wang, et Z. W. Guan, « Material properties of basalt fibre reinforced concrete made with recycled earthquake waste », *Construction and Building Materials*, vol. 130, p. 241-251, janv. 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.08.118.

[119] « NF EN 206-1 - Avril 2004 ». https://www.boutique.afnor.org/norme/nf-en-206-1/beton-partie-1-specification-performances-production-et-conformite/article/692232/fa125184 (consulté le mars 11, 2020).

[120] « Saga Web - NF EN 12350-7 ». https://sagaweb.afnor.org/fr-FR/sw/Consultation/Xml/1523183/?lng=FR&supNumDos=FA190563 (consulté le mars 11, 2020).

[121] « Saga Web - NF EN 12350-6 ». https://sagaweb.afnor.org/fr-FR/sw/Consultation/Xml/1523182/?lng=FR&supNumDos=FA190562 (consulté le mars 11, 2020).

[122] H. Soualhi, E.-H. Kadri, T.-T. Ngo, A. Bouvet, F. Cussigh, et Z.-E.-A. Tahar, « Design of portable rheometer with new vane geometry to estimate concrete rheological parameters », *Journal of Civil Engineering and Management*, vol. 23, n° 3, p. 347-355, avr. 2017, doi: 10.3846/13923730.2015.1128481.

[123] T. T. Ngo, E. H. Kadri, R. Bennacer, et F. Cussigh, « Use of tribometer to estimate interface friction and concrete boundary layer composition during the fluid concrete pumping », *Construction and Building Materials*, vol. 24, n° 7, p. 1253-1261, juill. 2010, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2009.12.010.

[124] T.-T. Ngo, « Influence de la composition des bétons sur les paramètres de pompage et validation d'un modèle de prévision de la constante visqueuse », Cergy-Pontoise, 2009.

[125] D. Kaplan, « Pompage des bétons, Etudes et recherches des laboratoires des Ponts et Chaussées », *Rapp. LCPC, Paris, France*, 2000.

[126] D. Kaplan, F. de Larrard, et T. Sedran, « Design of concrete pumping circuit », *ACI materials journal*, vol. 102, n° 2, p. 110, 2005.

[127] « Saga Web - NF EN 12390-3 ». https://sagaweb.afnor.org/fr-FR/sw/Consultation/Xml/1523585/?lng=FR&supNumDos=FA190566 (consulté le mars 13, 2020).

[128] « Saga Web - NF EN 12390-6 ». https://sagaweb.afnor.org/fr-FR/sw/Consultation/Xml/1287449/?lng=FR&supNumDos=FA163501 (consulté le mars 13, 2020).

[129] « Saga Web - NF EN 12390-13 ». https://sagaweb.afnor.org/fr-FR/sw/Consultation/Xml/1398472/?lng=FR&supNumDos=FA177674 (consulté le mars 13, 2020).

[130] « Saga Web - NF P18-459 ». https://sagaweb.afnor.org/fr-FR/sw/Consultation/Xml/1286358/?lng=FR&supNumDos=FA160729 (consulté le mars 13, 2020).

[131] « Saga Web - XP P18-463 ». https://sagaweb.afnor.org/fr-FR/sw/Consultation/Xml/1291702/?lng=FR&supNumDos=FA175662 (consulté le mars 13, 2020).

[132] V. Picandet, A. Khelidj, et G. Bastian, « Perméabilité au gaz de bétons endommagés », *Revue Française de Génie Civil*, vol. 6, p., 2002, doi: 10.1080/12795119.2002.9692387.

[133] « SikaFibre® Force 19mm », p. 2, 2018.

[134] H. Soualhi, E.-H. Kadri, A. Bouvet, T.-T. Ngo, F. Cussigh, et A.-S.-E. Belaidi, « New model to estimate plastic viscosity of eco-friendly and conventional concrete »,

Construction and Building Materials, vol. 135, p. 323-334, mars 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.01.009.

[135] D. Burns, M. Jolin, F. Gagnon, et F. Chapdelaine, « État des connaissances dans le béton projeté par voie humide », p. 11.

[136] F. Chapdelaine, « Étude fondamentale et pratique sur le pompage du béton », 2007.

[137] A. T. Abdelrazik et K. H. Khayat, « Effect of fiber characteristics on fresh properties of fiber-reinforced concrete with adapted rheology », *Construction and Building Materials*, vol. 230, p. 116852, janv. 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.116852.

[138] M. F. M. Zain, H. B. Mahmud, A. Ilham, et M. Faizal, « Prediction of splitting tensile strength of high-performance concrete », *Cement and Concrete Research*, vol. 32, nº 8, p. 1251-1258, août 2002, doi: 10.1016/S0008-8846(02)00768-8.

[139] P. Zia, *High performance concretes: a state-of-the-art report*, vol. 91. Strategic Highway Research Program, National Research Council, 1991.

[140] M. RAS, « Effect of polypropylene fibers on the mechanical properties of normal concrete », *JES. Journal of Engineering Sciences*, vol. 34, nº 4, p. 1049-1059, 2006.

[141] Y. Choi et R. L. Yuan, « Experimental relationship between splitting tensile strength and compressive strength of GFRC and PFRC », *Cement and Concrete Research*, vol. 35, nº 8, p. 1587-1591, août 2005, doi: 10.1016/j.cemconres.2004.09.010.

[142] D. S. Dharan et A. Lal, « STUDY THE EFFECT OF POLYPROPYLENE FIBER IN CONCRETE », vol. 03, nº 06, p. 4.

[143] S. Omary, E. Ghorbel, G. Wardeh, et M. D. Nguyen, « Mix Design and Recycled Aggregates Effects on the Concrete's Properties », *Int J Civ Eng*, vol. 16, nº 8, p. 973-992, août 2018, doi: 10.1007/s40999-017-0247-y.

[144] « CEB Bulletins : CEB-FIP Model Code 90 (PDF) ». https://www.fib-international.org/publications/ceb-bulletins/ceb-fip-model-code-90-pdf-detail.html (consulté le avr. 03, 2020).

[145] « Designers' Guide to EN 1992-1-1 and EN 1992-1-2. Eurocode 2: Design of Concrete Structures by R. S Narayanan, A. W Beeby: New hardback (2005) | Blackwell's ». https://www.abebooks.com/9780727731050/Designers-Guide-1992-1-1-1992-1-2-Eurocode-072773105X/plp (consulté le avr. 03, 2020).

[146] S. Fallah et M. Nematzadeh, « Mechanical properties and durability of high-strength concrete containing macro-polymeric and polypropylene fibers with nano-silica and silica fume », *Construction and Building Materials*, vol. 132, p. 170-187, févr. 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.11.100.

[147] ACI Committee 318 et American Concrete Institute (ACI), *Building code requirements for structural concrete (ACI 318-14): an ACI standard and commentary on building code requerements for structural concrete (ACI 318R-14) : an ACI report*. Farmington Hills, Michigan: American Concrete Institute, ACI, 2014.

[148] M. R. Jones et A. McCarthy, « Behaviour and assessment of foamed concrete for construction applications », in *Use of Foamed Concrete in Construction*, 0 vol., Thomas Telford Publishing, 2005, p. 61-88. doi: 10.1680/uofcic.34068.0008.

[149] D. Hardjito et B. V. Rangan, « Development and properties of low-calcium fly ash-based geopolymer concrete », 2005.

[150] « RECYBETON - Mise au point des formules de béton de référence », *IREX*. https://irex.asso.fr/produit/recybeton-mise-au-point-des-formules-de-beton-de-reference/ (consulté le juin 17, 2021).

[151] V. W. Y. Tam et C. M. Tam, « Assessment of durability of recycled aggregate concrete produced by two-stage mixing approach », *J Mater Sci*, vol. 42, nº 10, p. 3592-3602, mai 2007, doi: 10.1007/s10853-006-0379-y.

[152] L. Ferreira, J. De Brito, et M. Barra, « Influence of the pre-saturation of recycled coarse concrete aggregates on concrete properties », *Magazine of Concrete Research*, vol. 63, nº 8, p. 617-627, 2011.

[153] M. Malešev, V. Radonjanin, et S. Marinković, « Recycled concrete as aggregate for structural concrete production », *Sustainability*, vol. 2, nº 5, p. 1204-1225, 2010.

[154] C. F. Ferraris et F. de Larrard, « Modified Slump Test to Measure Rheological Parameters of Fresh Concrete », *CCA*, vol. 20, nº 2, p. 241-247, déc. 1998, doi: 10.1520/CCA10417J.

[155] M. Nesmene, « Propriétés des bétons autoplaçants de haute performance préparés avec des granulats recyclés », 2018. [En ligne]. Disponible sur: https://savoirs.usherbrooke.ca/handle/11143/12984

[156] « BULLETIN Officiel ». Consulté le: août 18, 2020. [En ligne]. Disponible sur: https://www.fntp.fr/sites/default/files/content/fascicule_ndeg62_titre_i_section_i.pdf

[157] P. B. Cachim, « Mechanical properties of brick aggregate concrete », *Construction and Building Materials*, vol. 23, nº 3, p. 1292-1297, mars 2009, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2008.07.023.