

# UNIVERSITÉ DE BLIDA 1

## Faculté de Technologie

Département de Génie Civil

Laboratoire de Matériaux et Environnement

## THÈSE DE DOCTORAT

Spécialité : Structures et Matériaux du Génie civil

# COMPORTEMENT PHYSICO-MECANIQUE ET DURABILITE DU BETON FIBRE A BASE DES GRANULATS RECYCLES

Par

**BAYAH Meriem**

Soutenue le ..... devant le jury composé de :

|                        |                                      |              |
|------------------------|--------------------------------------|--------------|
| Pr. KENAI Said         | Université de Blida1                 | Président    |
| Pr. MENADI Belkacem    | Université de Blida1                 | Examineur    |
| Pr. BOUKENDADJI Otmane | Université de Médéa                  | Examineur    |
| Dr. YAHIAOUI Walid     | Université de Blida1                 | Examineur    |
| Pr. DEBIEB Farid       | Université de Médéa                  | Encadreur    |
| Pr. KADRI El-Hadj      | Université de Cergy Pontoise -France | Co-Encadreur |

Blida, 2024

## REMERCIEMENTS

Je souhaite exprimer ma gratitude envers le Tout-Puissant pour m'avoir doté de la volonté et de la patience nécessaires pour mener à bien ce projet. Je dédie humblement ce travail à deux personnes précieuses dans ma vie : Tout d'abord, à ma mère, REBIHA, qui est ma source de douceur, de tendresse, d'amour et d'affection, et grâce à son soutien et à ses sacrifices, j'ai pu achever ce travail. Ensuite, à mon père bien-aimé, SALAH, pour les sacrifices qu'il a consentis en ce qui concerne mon éducation et pour l'avenir qu'il m'a offert.

Je souhaite exprimer ma profonde reconnaissance envers le Professeur DEBIEB Farid pour m'avoir confié la responsabilité de cette thèse et pour son rôle de mentor. Je tiens à le remercier chaleureusement pour sa disponibilité, son suivi attentif, ses conseils avisés, et ses précieuses orientations qui ont été essentiels pour la réalisation de ce travail de recherche. Sa confiance en moi, sa patience, et son humanité m'ont permis de surmonter les difficultés que j'ai rencontrées tout au long de cette thèse.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers mon co-directeur de thèse, Monsieur KADRI El-Hadj, professeur à l'université de Cergy-Pontoise - France, pour avoir insufflé la rigueur scientifique indispensable au bon déroulement de ce travail. Je le remercie également pour sa bienveillance et sa disponibilité exemplaire.

Je tiens également à exprimer ma reconnaissance envers les membres du jury qui ont accepté l'honneur d'évaluer ce travail :

- Monsieur KENAI Said, Professeur à l'université de Blida1, Président du jury ;
- Monsieur MENADI Belkacem, Professeur à l'université de Blida1, Examineur ;
- Monsieur BOUKENDADJI Otmane, Professeur à l'université de Médéa, Examineur ;
- Monsieur YAHIAOUI Walid, Docteur à l'université de Blida1, Examineur ;
- Monsieur DEBIEB Farid, Professeur à l'université de Médéa, Encadreur ;
- Monsieur KADRI El-Hadj, Professeur à l'université de Cergy Pontoise -France, Co-Encadreur.

Je souhaite exprimer ma reconnaissance envers Monsieur Announ Mohamed, directeur du Laboratoire de Matériaux et Environnement à l'Université de Médéa, pour ses conseils avisés, ses remarques pertinentes, son soutien précieux et ses encouragements constants.

Je tiens également à exprimer ma gratitude envers Monsieur MOULOUD Sofiane, le directeur du Laboratoire de Recherches de Génie Civil (Hall Technologique) de l'Université de Médéa, ainsi qu'à tout le personnel qui a contribué au bon déroulement de la partie expérimentale de ce travail en mettant à disposition les matériaux et l'équipement nécessaires.

Je tiens à exprimer ma sincère gratitude envers les responsables du Centre National d'Étude et de Recherches Intégrées du Bâtiment (CNERIB) pour avoir mis à ma disposition les équipements et les matériaux requis pour réaliser les essais.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers Monsieur BALI Abderrahim, Professeur à l'École Nationale Polytechnique d'Alger, et je lui adresse mes plus sincères remerciements pour sa disponibilité, son soutien, ainsi que pour avoir mis à ma disposition les ressources nécessaires pour que cette thèse se déroule de manière optimale.

J'aimerais exprimer ma gratitude envers Dr Ouldkaoua Younes, Dr Sahraoui Mohamed, Mme Kalou Amel, Mme Bourahla Malika, Dr Hazoute Lila et Mme Charfa pour leurs précieux conseils et leurs remarques pertinentes, qui ont contribué à l'amélioration de ce travail.

J'exprime également ma reconnaissance envers mes collègues Boubekour Asmaa, Bellarbi Mohamed, Yasmine Bouleghebar, Amina Benchouaf et Toumi Youcef, dont le soutien s'est avéré extrêmement précieux tout au long de cette thèse. Je tiens à m'excuser auprès de toutes les personnes que je n'ai pas nommées ici.

En fin, je souhaite exprimer ma sincère reconnaissance envers ma famille entière pour son soutien constant tout au long des années de ma thèse.

## ملخص

تمثل زيادة النفايات مشكلة بيئية رئيسية، لا سيما في البلدان النامية. وعلى مدى العقود الثلاثة الماضية، أعيد تدوير عدة أنواع من النفايات الخاملة إلى خرسانة أو استخدمت في صناعة مواد البناء كمجمعات وملصقات وألياف، مما يوفر حلاً رائعاً للمشاكل البيئية والاقتصادية، في هذا السياق، الهدف الرئيسي من هذا البحث التجريبي هو دراسة تأثير إضافة الألياف البلاستيكية من نوع البولي إثيلين تيريفثالات المصنعة من إعادة التدوير الزجاجات البلاستيكية على سلوك الخرسانة المرصوفة ذاتياً المتكونة أساساً من الرمال المعاد تدويرها والمستخلصة من هدم الخرسانة الصغيرة، حيث تم استبدال الرمال الطبيعية بالرمال المعاد تدويرها التي كسور كتلية مختلفة (0% و 25% و 50% و 75% و 100%) و أربعة كسور حجمية من الألياف (0.3% و 0.5% و 1% و 1.2%) تمت إضافتها و خلطها. يتم تحليل ومقارنة خصائص الحالة الجديدة والمتصلبة للمركب الجديد (الخرسانة المرصوفة ذاتياً المصنوع مع الرمال المعاد تدويره والمعزز بالألياف)، ويتم استنتاج متانة الخرسانة من خلال دراسة بعض مؤشرات الاستدامة. أظهرت النتائج أن الأداء الميكانيكي لـ الخرسانة المرصوفة ذاتياً المصنوع مع الرمال المعاد تدويره والمعزز بالألياف من حيث القوة المرنة ووحدة المرونة قد تحسن، في حين انخفضت قوة الضغط مع زيادة في محتوى الألياف والرمال المعاد تدويره. يمكن أن يؤدي دمج 100% من الرمال المعاد تدويره جنباً إلى جنب مع 1.2% من الألياف التي تحسّن كل من قوة الانحناء ومعامل مرونة الخرسانة حتى 9% و 24% على التوالي. ومع ذلك، يرتبط هذا التحسن بزيادة المسامية ونفاذية أيون الكلوريد ونفاذية الماء ونفاذية الغاز في الخرسانة المرصوفة ذاتياً المصنوع مع الرمال المعاد تدويره والمعزز بالألياف.

**الكلمات المفتاحية:** الخرسانة المرصوفة ذاتياً، الرمال المعاد تدويره، الألياف البولي إثيلين تيري فتالات، المقاومة الميكانيكية، المتانة.

## **ABSTRACT**

Increasing waste is a major environmental problem, especially in developing countries. Over the past three decades, various categories of inert waste have been reintegrated into concrete or incorporated into the production of construction materials in the form of aggregates, binders and fibres, thus offering a remarkable solution to environmental and economic problems. In this context, the main objective of this experimental study is to examine the influence of the introduction of polyethylene terephthalate (PET) type plastic fibers (PF) manufactured from the recycling of plastic bottles on the behavior of self-compacting concrete (SCC) recycled sand (RS) based on the demolition of the vibratory concrete (ordinary) test pieces carried out in the laboratory. Natural sand (NS) was substituted by recycled sand (RS) to different mass fractions (0%, 25%, 50%, 75% and 100%) and four volumetric fractions (Vf) of PET fibers (0.3%, 0.5%, 1% and 1.2%) were added to the mixtures. The properties of the fresh and hardened state of the new composite SCCRF (SCC manufactured with RS and reinforced with PETF) are analyzed and compared and the durability of concrete is deduced by the study of some sustainability indicators. The results indicate an improvement in the mechanical properties of BAPRF, particularly in terms of bending strength and modulus of elasticity, with an increase in the Vf content of PETF and RS, while the compressive strength decreases. The integration of 100% RS with 1.2% PETF can increase the bending strength and modulus of elasticity of concrete up to 9% and 24%, respectively. However, this improvement is associated with increased porosity, chloride ion permeability, water permeability and gas permeability in the SCCRF.

**Keywords:** Self-compacting concrete; Recycled sand; Polyethylene terephthalate fiber; Mechanical resistance; Durability.

## **RESUME**

La multiplication des déchets pose un problème environnemental majeur, surtout dans les pays en développement. Au cours des trois dernières décennies, diverses catégories de déchets inertes ont été réintégrées dans le béton ou incorporées dans la production de matériaux de construction sous forme d'agrégats, liants et fibres, offrant ainsi une solution remarquable aux problèmes environnementaux et économiques. Dans ce cadre, l'objectif principal de cette étude expérimentale est d'examiner l'influence de l'introduction de fibres plastiques (FP) de type polyéthylène téréphtalate (PET) fabriquées à partir du recyclage de bouteilles en plastique sur le comportement du béton autoplaçant (BAP) à base de sable recyclé (SR) obtenu à partir de la démolition des éprouvettes en béton vibré (ordinaire) réalisées en laboratoire. Sable naturel (SN) a été substitué par du sable recyclé (SR) à différentes fractions massiques (0%, 25%, 50%, 75% et 100%) et quatre fractions volumétriques (Vf) de fibres PET (0,3%, 0,5%, 1% et 1,2%) ont été ajoutées et aux mélanges. Les propriétés de l'état frais et durci du nouveau composite BAPRF (BAP fabriqué avec SR et renforcé avec FPET) sont analysées et comparées et la durabilité du béton est déduite par l'étude de quelques indicateurs de durabilité. Les résultats indiquent une amélioration des propriétés mécaniques du BAPRF, notamment en termes de résistance à la flexion et de module d'élasticité, avec une augmentation de la teneur en Vf de FPET et SR, tandis que la résistance à la compression diminue. L'intégration de 100% de SR accompagnée de 1,2% de FPET peut accroître la résistance à la flexion et le module d'élasticité du béton jusqu'à 9% et 24%, respectivement. Toutefois, cette amélioration est associée à une augmentation de la porosité, de la perméabilité aux ions chlorure, de la perméabilité à l'eau et de la perméabilité aux gaz dans le BAPRF.

**Mots clés** : Béton autoplaçant ; sable recyclé ; Fibre polyéthylène téréphtalate ; résistance Mécanique, Durabilité.

# **TABLE DES MATIERES**

REMERCIEMENTS

RESUME

TABLE DES MATIERES

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES ABREVIATIONS

INTRODUCTION GENERALE.....20

## **CHAPITRE 1 : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE**

|  |    |
|--|----|
| 1.1.Béton Autoplaçant.....   | 23 |
| 1.1.1.Généralité.....  | 23 |
| 1.1.2.Formulation des BAP.....   | 24 |
| 1.1.3.Particularités de la composition des BAP.....                        | 26 |
| 1.1.4.Propriétés d'un béton autoplaçant.....                               | 29 |
| 1.2.Béton Fibres.....  | 33 |
| 1.2.1.Généralité sur les fibres.....                                       | 33 |
| 1.2.2.Les différents types des fibres.....                                 | 34 |
| 1.2.3.Rôle des fibres.....   | 40 |
| 1.2.4.Mécanismes d'action des fibres dans le béton.....                    | 41 |
| 1.2.5.Effet de l'orientation et de la distribution des fibres.....         | 44 |
| 1.2.6.Influence des fibres sur les propriétés du béton à l'état frais..... | 45 |
| 1.2.7.Influence des fibres sur les propriétés physiques de béton.....      | 48 |
| 1.2.8.Influence des fibres sur les propriétés mécaniques de béton.....     | 50 |

|   |    |
|---|----|
| 1.2.9. Influence des fibres sur la durabilité des bétons.....                       | 56 |
| 1.3. Béton à Base de Granulats Recyclés.....  | 59 |
| 1.3.1. Définition et description du granulat recyclé.....                           | 59 |
| 1.3.2. Caractéristique des granulats recyclés.....                                  | 59 |
| 1.3.3. Influence des granulats recyclés à l'état frais de béton.....                | 62 |
| 1.3.4. Influence des granulats recyclés sur les propriétés mécaniques de béton..... | 67 |
| 1.3.5. Influence des granulats recyclés sur les propriétés physiques de béton.....  | 74 |
| 1.3.6. Influence des granulats recyclés sur la durabilité de béton.....             | 77 |
| 1.3.7. Propriétés du béton fibré à base de granulats recyclé.....                   | 82 |
| 1.3.7. Conclusion.....  | 85 |

## **CHAPITRE 2 : MATERIAUX ET ESSAIS**

|  |    |
|--|----|
| 2.1. Introduction.....   | 88 |
| 2.2. Caractéristiques des matériaux utilisés.....                              | 88 |
| 2.2.1. Ciment.....   | 88 |
| 2.2.2. Granulats.....  | 88 |
| 2.2.3. Fibres de plastiques.....   | 93 |
| 2.2.4. Superplastifiant.....   | 93 |
| 2.3. Formulation.....  | 93 |
| 2.3.1. Formulation du mortier autoplaçant MAP.....                             | 94 |
| 2.3.2. Formulation du béton autoplaçant BAP.....                               | 94 |
| 2.4. Essais sur MAP à l'état frais.....  | 95 |
| 2.4.1. Essais au Mini-Cône.....  | 95 |
| 2.4.2. Essai à l'entonnoir en V (V-Funnel test).....                           | 96 |
| 2.5. Essais sur BAP à l'état frais.....  | 96 |
| 2.5.1. Essai d'étalement au cône d'Abrams (Flow test) et T <sub>50</sub> ..... | 96 |



|   |     |
|---|-----|
| 2.5.2. Essai d'entonnoir en V (V-funnel).....             | 98  |
| 2.5.3. Essai de La Boîte En L (L-Box).....                | 98  |
| 2.5.4. Essai de stabilité au tamis.....                   | 99  |
| 2.6. Essais sur BAP à l'état durci.....                   | 100 |
| 2.6.1. Résistance à la compression.....                   | 100 |
| 2.6.2. Essai de résistance à la traction par fendage..... | 100 |
| 2.6.3. Résistance à la traction par flexion.....          | 101 |
| 2.6.4. Module d'élasticités.....                          | 101 |
| 2.6.5. Essai de Vitesse d'auscultation sonique (VAS)..... | 102 |
| 2.6.6. Essai de Porosité.....                             | 103 |
| 2.6.7. Absorption d'eau par immersion totale.....         | 103 |
| 2.6.8. Essai de Perméabilité à l'eau.....                 | 104 |
| 2.6.9. Essai de Perméabilité aux ions chlorure.....       | 105 |
| 2.6.10. Essai de Perméabilité à gaz.....                  | 105 |
| 2.7. Conclusion.....                                      | 106 |

### **CHAPITRE 3 : INFLUENCE DES FIBRES PLASTIQUES DE TYPE PET SUR UN BAP A BASE DE SABLE RECYCLES**

|  |     |
|--|-----|
| 3.1. Introduction.....   | 110 |
| 3.2. Études des MAP.....   | 110 |
| 3.2.1. Optimisation des rapports S/M et SP/L.....  | 110 |
| 3.3. Études des BAP.....   | 111 |
| 3.4. Etude l'effet du SR et les fibres PET sur le comportement des BAP à l'état frais..... | 113 |
| 3.4.1. Étalement et temps T50 au cône d'Abrams.....  | 113 |
| 3.4.2. Temps d'écoulement par l'essai d'entonnoir en V (V-Funnel).....                     | 115 |
| 3.4.3. Essai de la Boîte en L (L-Box).....   | 117 |

|  |     |
|--|-----|
| 3.4.4.Stabilité au Tamis.....  | 117 |
| 3.5.Etude l'effet du SR et les fibres PET sur le comportement mécaniques du BAP..... | 120 |
| 3.5.1.Résistance à la compression.....   | 120 |
| 3.5.2.Résistance à la traction par fendage.....                                      | 122 |
| 3.5.3.Résistance à la flexion.....   | 124 |
| 3.5.4.Vitesse d'auscultation sonique.....  | 126 |
| 3.5.5.Module d'élasticité.....   | 127 |
| 3.6.Etude l'effet du SR et les fibres PET sur la durabilité du BAP .....             | 129 |
| 3.6.1.Porosité.....  | 129 |
| 3.6.2.Absorption d'eau.....  | 132 |
| 3.6.3.Perméabilité à l'eau.....  | 134 |
| 3.6.4.Perméabilité aux Gaz.....  | 137 |
| 3.6.5.Pénétration aux ions chlorures.....  | 138 |
| 3.7.Conclusion.....  | 141 |
| CONCLUSION GENERALE.....   | 144 |
| REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUES.....  | 147 |
| ANNEXE.....  | 167 |

## LISTE DES FIGURES

|   |    |
|---|----|
| Figure 1.1 : Différence entre les composants d'un BAP et un BO .....  | 26 |
| Figure 1.2: Impact de la qualité du superplastifiant sur l'étalement et la viscosité d'un béton   | 28 |
| Figure 1.3 : Géométrie des fibres métalliques.....  | 34 |
| Figure 1.4: Fibres de verres.....   | 35 |
| Figure 1.5: Fibres de carbones .....  | 36 |
| Figure 1.6 : Fibres d'Aramide hachées et en files.....  | 37 |
| Figure 1.7: fibres polypropylène .....  | 38 |
| Figure 1.8: Les fibres végétales .....  | 38 |
| Figure 1.9:les fibres recyclent PET et PP.....  | 40 |
| Figure 1.10: Évolution de la fissure dans un matériau en service .....  | 41 |
| Figure 1.11: Processus de fissuration du béton .....  | 42 |
| Figure 1.12: Répartition de la déformation autour de la fibre.....  | 43 |
| Figure 1.13 : Distrubution longitudinale de la contrainte axiale dans la fibre et de la contrainte de cisaillement à l'interface fibre-matrice..... | 43 |
| Figure 1.14 : Distrubution de la contrainte de cisaillement à l'interface fibre-matrice dans une matrice fissurée. ....                             | 44 |
| Figure 1.15 : La variation de diamètre étalement du BAP par rapport à la teneur des fibres PP par deux contents de liant.....                       | 46 |
| Figure 1.16: présente la relation entre la capacité de passage, le dosage et l'élancement des fibres (PBWF) .....                                   | 48 |
| Figure 1.17: Présente les densités a l'etat frais et durci du BAPF .....  | 49 |
| Figure 1.18: Le coefficient d'absorption du mortier fibres à différent d'âges .....   | 50 |
| Figure 1.19 : L'évolution de la résistance à la compression du BAP en fonction des fibres de PET .....  | 51 |
| Figure 1.20 : La résistance à la compression des BAPF.....  | 52 |
| Figure 1.21: L'évolution de la résistance à la traction par flexion des BAPF à 28 jours .....   | 53 |

|  |    |
|--|----|
| Figure 1.22 : Évolution de la résistance à la traction en flexion des BAPF .....   | 54 |
| Figure 1.23 : La variation de résistance à la traction des BAPF .....  | 55 |
| Figure 1.24 : La variation de module d'élasticité des BAPF .....   | 55 |
| Figure 1.25: Variation du retrait de séchage pour des bétons renforcés de fibres.....  | 56 |
| Figure 1.26 : Evolution de la pénétration des ions Cl-.....  | 57 |
| Figure 1.27: Présente l'évolution de la densité des mélanges de béton à l'état frais .....   | 63 |
| Figure 1.28 : Évolution de la capacité de remplissage et de passage des BAP.....   | 64 |
| Figure 1.29 : Effet des GRF sur l'étalement (A), temps d'écoulement T50(B).....  | 65 |
| Figure 1.30 : l'effet des GRF sur le temps d'écoulement TVf (C) et le rapport d'hauteur L-box (D) des BAP .....                                    | 65 |
| Figure 1.31 : Evaluation de la résistance à la compression :a) béton continue des grossiers GRG , b) béton continue des fines GRF.....             | 68 |
| Figure 1.32: Variation de la résistance à la compression dans BAP .....  | 68 |
| Figure 1.33 : Variation de la résistance à la compression du BAP avec un taux de substitution de 20% des GR.....                                   | 69 |
| Figure 1.34:Développement de résistance à la compression du BAP .....  | 74 |
| Figure 1.35 : Variation de la résistance à la traction du BAP avec substitution de GR (la résistance du mélange de référence est de 3.26 MPa)..... | 71 |
| Figure 1.36 : Évolution de la résistance à la traction du BAP contenant des GR à 7 et 28 jours .....   | 72 |
| Figure 1.37 : Module d'élasticité de béton a base des GRG et GRF .....   | 73 |
| Figure 1.38 : Variation du retrait des BAPR avec l'incorporation de granulats fins recyclés ..   | 75 |
| Figure 1.39 : Variation du retrait des bétons recyclés contenant des granulats fins provenant de bétons concassée .....                            | 76 |
| Figure 1.40: Retrait de séchage pour un béton avec différents contenus de GRG et GRF .....   | 77 |
| Figure 1.41 : Absorption d'eau du BAPR .....   | 78 |
| Figure 1.42: Coefficient d'absorption d'eau du béton recyclé après 30 minutes.....   | 79 |
| Figure 1.43: Profondeur de pénétration de l'eau des BAP à 56 jours .....   | 80 |

|   |     |
|---|-----|
| Figure 1.44: Évolution des coefficients de perméabilité apparente aux gaz des BAP à 56 jours .....  | 81  |
| Figure 1.45 : Variation de la pénétration des ions chlorures en fonction des GR .....   | 82  |
| Figure 1.46: Résistance à la pénétration des ions chlorure des BAP . .....  | 82  |
| Figure 1.47 : l'effet de différent fibres et granulats recyclés dans le BAP .....   | 83  |
| Figure 1.48 : Perspectives des surfaces fracturées des poutres en béton autoplaçant (BAP) renforcées par des fibres plastiques recyclées (FPR) avec des agrégats recyclés (AR)..... | 85  |
| Figure 2.1 : Processus de concassage des déchets des bétons.....  | 89  |
| Figure 2.2.Représentation de l'analyse morphologique des grains de sable , montrant (a) le sable naturel et (b) le sable recyclé.. .....  | 90  |
| Figure 2.3. Spectre de l'analyse chimique du sable naturel. ....  | 91  |
| Figure 2.4. Spectre de l'analyse chimique du sable recyclés. ....   | 91  |
| Figure 2.5: Distrubution granulométrique des granulats employés. ....   | 92  |
| Figure 2.6 : les fibres plastiques de type PET : (a) photographie de la fibre (b) image MEB de la fibre. ....   | 93  |
| Figure 2.7: Séquence de malaxage du BAP.....  | 95  |
| Figure 2.8 : Dispositif d'essai d'étalement pour mortier.....   | 96  |
| Figure 2.9 : Test de l'entonnoir en V pour mortier.....   | 96  |
| Figure 2.10 : Essai d'étalements au cône d'Abrams. ....   | 97  |
| Figure 2.11: Méthodologie de l'essai à l'entonnoir en (V-Funnel).. .....  | 98  |
| Figure 2.12 : Méthodologie de l'essai de la boîte en forme de L (L-Box). ....   | 99  |
| Figure 2.13: Protocole de l'essai de stabilité au tamis. ....   | 99  |
| Figure 2.14: Test de résistance à la compression. ....  | 100 |
| Figure 2.15 : Test de résistance à la traction par fendage.....   | 100 |
| Figure 2.16 : Essai de résistance à la flexion de trois points.....   | 101 |
| Figure 2.17 : Essai de module d'élasticité.....   | 102 |
| Figure 2.18: Mesure de la vitesse d'auscultation sonique.....   | 102 |
| Figure 2.19: Essai de porosité. ....  | 103 |

|  |     |
|--|-----|
| Figure 2.20 : Essai de perméabilité a l'eau. ....  | 104 |
| Figure 2.21. Dispositif de l'essai de perméabilité. ....   | 106 |
| Figure 3.1. Étalement en fonction de SR et FPET pour les différents BAP. ....  | 114 |
| Figure 3.2. Évolution du temps d'écoulement $T_{500}$ en fonction de SR et FPET pour les différents BAP. ....                                  | 115 |
| Figure 3.3. Variation du temps d'écoulement en fonction du taux de SR et des fibres de PET pour les divers BAP. ....                           | 116 |
| Figure 3.4. Relation entre le temps d'écoulement $T_{500}$ et TV-F. ....   | 117 |
| Figure 3.5. Rapport H2/H1 en fonction de SR et FPET pour les différents BAP. ....  | 118 |
| Figure 3.6. Indice de ségrégation en fonction de SR et FPET pour les différents BAP. ....  | 119 |
| Figure 3.7. Résistance à la compression en fonction de SR et FPET pour les différents BAP. ....  | 121 |
| Figure 3.8. Résistance à la traction en fonction de SR et FPET pour les différents BAP. ....   | 123 |
| Figure 3.9. Résistance à la flexion en fonction de SR et FPET pour les différents BAP. ....  | 125 |
| Figure 3.10. VAS en fonction de SR et FPET pour les différents BAP. ....   | 127 |
| Figure 3.11. Module d'élasticité en fonction de SR et FPET pour les différents BAP. ....   | 128 |
| Figure 3.12. Porosité accessible à l'eau en fonction de SR et FPET pour les différents BAP. ....   | 129 |
| Figure 3.13. Image au MEB pour le BAP à base SR et FPET. ....  | 131 |
| Figure 3.14. Absorption d'eau en fonction de SR et FPET pour les différents BAP. ....  | 132 |
| Figure 3.15. Relation entre la résistance à la compression, la porosité et le coefficient d'absorption. ....                                   | 134 |
| Figure 3.16. Perméabilité à l'eau en fonction de SR et FPET pour les différents BAP. ....  | 135 |
| Figure 3.17. Présente la relation entre la porosité et le coefficient d'absorption d'eau ainsi que la profondeur de pénétration d'eau ....     | 136 |
| Figure 3.18. Présente la relation établie entre la profondeur de pénétration d'eau et à la fois la résistance à la compression et la VAS. .... | 136 |
| Figure 3.19. Perméabilité à gaz en fonction de SR et FPET pour les différents BAP. ....  | 138 |

|  |     |
|--|-----|
| Figure 3.20. Pénétration aux ions chlorures en fonction de SR et FPET pour les différents BAP.....                         | 139 |
| Figure 3.21. Relation entre la porosité, la charge électrique traversée, et le coefficient de perméabilité au gaz.....     | 140 |
| Figure 3.22. Relation entre la résistance à la compression, la charge passée et le coefficient de perméabilité au gaz..... | 141 |

## LISTE DES TABLEAUX

|  |     |
|--|-----|
| Tableau 1.1 : Propriétés des BAP à l'état frais .....                                      | 30  |
| Tableau 1.2: Résume les caractéristiques et les propriétés des fibres. ....                | 40  |
| Tableau 1.3: Les propriétés des BAP à l'état frais à base des PET .....                    | 46  |
| Tableau 1.4 : les valeurs de certain propriété des BAPR .....                              | 66  |
| Tableau 2.1 : Composition chimiques et minéralogiques du ciment.....                       | 88  |
| Tableau 2.2. Granulats naturels et recyclés.....   | 90  |
| Tableau 2.3 : Caractérisation physique des granulats utilisés. ....                        | 92  |
| Tableau. 2.4. Propriétés physico-mécaniques des fibres plastiques utilisées.....           | 93  |
| Tableau. 2.5. Classification du BAP selon domaine d'utilisation.. ....                     | 97  |
| Tableau 2.6 : Classification du béton selon la perméabilité aux ions chlorure. ....        | 105 |
| Tableau 3.1. Résultats d'étalement sur MAPT pour différents % de SP et S/M. ....           | 111 |
| Tableau 3.2. Composition des différentes BAP étudié par kg dans un 1 m <sup>3</sup> . .... | 112 |



# LISTE DES ABREVIATIONS

---

## LISTE DES ABREVIATIONS

- BAPF** : Béton autoplaçant à base des fibres ;
- BAPR** : Béton autoplaçant à base des granulats recyclés ;
- BAP** : Béton autoplaçant ;
- BO** : Béton ordinaire ;
- BOV** : Béton ordinaires vibrés ;
- C<sub>3</sub>A (3CaO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)** : Aluminate tricalcique ;
- C<sub>3</sub>S (3CaO, SiO<sub>2</sub>)** : Silicate tricalcique ou « alite » ;
- C<sub>2</sub>S (2CaO, SiO<sub>2</sub>)** : Silicate bicalcique ou « bélite » ;
- C<sub>4</sub>AF (4CaO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)** : Alumino-ferrite tétracalcique ;
- DRX** : diffractométrie aux rayons X ;
- DFP** : Déchets de fibres plastique ;
- d** : La dimension du plus petit grain de l'étendue granulaire ;
- D<sub>max</sub>** : La dimension du plus gros grain de l'étendue granulaire ;
- E/C** : le rapport Eau / Ciment ;
- E.S.V** : Équivalent de sable à vue ;
- E/L** : le rapport Eau / Liant ;
- FV** : Fibres de verre ;
- FP** : Fibre plastique ;
- FPET** : Fibres de polyéthylène téréphtalate ;
- FPR** : Fibres plastiques recyclées ;
- F (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)** : Oxyde ferrique (hématite) ;
- H (H<sub>2</sub>O)** : Eau ;
- GN** : Granulats naturels ;
- GR** : Granulats recyclés ;
- GRG** : Granulats recyclés grossier ;
- GRF** : Granulats recyclés fins ;
- G/S** : Gravillons / sable ;
- K (K<sub>2</sub>O)** : Oxyde de potassium ;
- MAP** : Mortier autoplaçant ;
- MAPT** : Mortier autoplaçant témoin ;

## **LISTE DES ABREVIATIONS**

---

- MEB** : Microscope électronique à balayage ;
- ME** : Module d'élasticité ;
- PAN** : Polyacrylonitrile ;
- PVA** : Polyalcool vinylique ;
- PP** : Polypropylène ;
- PEHD** : Polyéthylène haute densité ;
- PPHT** : Polypropylène haute ténacité ;
- R<sub>c</sub>** : Résistance à la compression ;
- R<sub>f</sub>** : Résistance à la flexion ;
- R<sub>t</sub>** : Résistance à la traction ;
- S/G** : Le rapport sable sur granulats ;
- S/M** : Le rapport sable sur mortiers ;
- SP** : Superplastifiant ;
- SP/L** : Le rapport superplastifiant/liant ;
- SR** : Sables recyclés ;
- SN** : Sables naturel ;
- SP** : Superplastifiants ;
- SR** : Sables recyclés ;
- T** : Le temps d'écoulement à l'entonnoir en V exprimé en secondes ;
- ρ** : Densité du constituant exprimée en g/cm<sup>3</sup> ;
- ZTI** : Zone de transition interfaciale ;

# **INTRODUCTION GENERALE**

---

### INTRODUCTION GENERALE

Ces dernières décennies, l'expansion notable de l'industrie de la construction a suscité une demande annuelle d'environ 15 milliards de tonnes de béton, requérant ainsi près de 20 milliards de tonnes de granulats par an.[1]. Dans ce contexte, la recherche de nouveaux matériaux de construction est lancée pour limiter l'utilisation des ressources naturelles dans le béton en les remplaçant par des matériaux alternatifs, tout en garantissant l'obtention d'un béton à la fois économique et écologique. En revanche, la démolition des anciens bâtiments, les guerres et les catastrophes naturelles génère d'énormes quantités de déchets. Ainsi, le recyclage des déchets et leur incorporation dans la construction sous forme de granulats jouent un rôle essentiel dans la préservation de l'environnement et la diminution de l'exploitation des ressources naturelles non renouvelables.

Des études antérieures ont exploré la possibilité de remplacer les granulats naturels (GN) par des granulats recyclés (GR). Ces recherches ont mis en évidence que lorsque les taux de remplacement sont faibles (inférieurs à 50 %), le béton recyclé montre des performances comparables à celles du béton naturel. Néanmoins, l'emploi de granulats recyclés à des taux élevés entraîne une dégradation des propriétés mécaniques, physico-chimiques et de la durabilité, telles qu'une diminution des résistances mécaniques et une augmentation de la porosité, qui peut être causée par l'ancien mortier attaché à la surface des granulats vierges. Cette détérioration nécessite souvent l'utilisation de plusieurs méthodes pour améliorer la qualité du béton recyclé. Parmi ces solutions figurent l'incorporation d'adjuvants, l'augmentation de la proportion de ciment, l'intégration de fibres, l'élimination du mortier adhérent, et le renforcement du mortier adhérent.

À l'heure actuelle, le renforcement par fibres est une méthode largement adoptée pour améliorer les propriétés mécaniques du béton. Cette approche inclut l'utilisation de divers types de fibres telles que les fibres d'acier, de verre, de carbone, ainsi que des fibres organiques comme celles en polyéthylène téréphtalate (PET). De nombreux chercheurs ont signalé que l'incorporation des (FPET) dans le mélange réduit sa maniabilité et nécessite donc un rapport eau/ciment plus élevé ou l'utilisation de superplastifiants (SP) supplémentaires pour généralement atteindre la plasticité souhaitée.

Par ailleurs, les chercheurs ont progressivement mis au point de nouveaux types de bétons visant à simplifier le processus de mise en œuvre, notamment le béton autoplaçant (BAP). Ce dernier se distingue par sa grande fluidité, son homogénéité et sa stabilité. Ces bétons sont en mesure de s'auto-épancher dans des coffrages complexes et très encombrés, uniquement grâce à leur propre poids, sans nécessiter de vibration externe ou interne.

Cette thèse se concentre sur l'exploration de l'impact des fibres de polyéthylène téréphtalate (FPET) dans le béton autoplaçant (BAP) utilisant du sable recyclé (SR) sur une gamme de propriétés, notamment la rhéologie, les caractéristiques physiques, mécaniques et la durabilité. Cette recherche est structurée en trois chapitres distincts.

Le premier chapitre de cette thèse propose une revue de la littérature, couvrant l'histoire du béton autoplaçant (BAP), ainsi que les différentes méthodes de formulation utilisées et leurs caractéristiques à l'état frais et durci. Par la suite, nous explorons les différents types de fibres répertoriés dans la littérature et leur incidence sur les caractéristiques du béton à l'état frais, durci et leur durabilité. Enfin, une section est dédiée à l'étude de l'ajout de GR dans le béton.

Le deuxième chapitre met l'accent sur la présentation du programme expérimental mené dans le cadre de cette étude. Il expose les matériaux employés, les méthodes de caractérisation, ainsi que les principes de formulation et les techniques d'analyse qui ont été utilisés.

Dans le dernier chapitre, nous débutons en exposant la méthode de validation de la formulation du BAP. Par la suite, nous procédons à l'analyse et à la discussion des résultats obtenus à partir des différents mélanges de BAP à base de GR et de fibres. Les bétons produits au cours de cette campagne expérimentale ont été soumis à des tests à l'état frais afin d'évaluer leur aptitude au passage et au remplissage. De même, à l'état durci, ces bétons ont été testés pour déterminer leurs propriétés physiques et mécaniques, notamment la porosité, la perméabilité, la résistance mécanique et le module d'élasticité.

En conclusion, le document se clôt par une synthèse générale des résultats obtenus et une discussion sur les implications de ces résultats, en rappelant les principaux résultats obtenus concernant la faisabilité du BAP en fibre de PET et le remplacement du sable par des GR.

# **CHAPITRE 1**

## **SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE**

---

### 1.1. Béton Autoplaçant

Le béton est largement employé comme l'un des matériaux de construction les plus répandus à travers le monde. Sa composition devient spécifiquement adaptée à la problématique de chaque ouvrage, que ce soit en termes de fluidité pour la mise en place, de comportement mécanique pour supporter diverses sollicitations, ou encore de durabilité pour résister aux environnements agressifs.

De nombreux ouvrages présentent une architecture complexe et une concentration élevée en armatures, ce qui rend souvent difficile l'utilisation des bétons conventionnels en termes de plasticité. Afin de répondre à ces défis, des recherches ont été entreprises ces dernières années pour élaborer des formulations de béton offrant une grande maniabilité tout en restant stables, c'est-à-dire présentant peu de ségrégation, de ressuage et de tassement, ainsi que des caractéristiques mécaniques et de durabilité satisfaisante.

Ces bétons sont caractérisés par leur grande fluidité, leur homogénéité et leur stabilité, et ils s'auto-placent sans nécessiter de vibration grâce à leur propre poids. Ils offrent à la structure une qualité comparable, voire supérieure, à celle des bétons classiques mis en place par vibration, d'où leur appellation d'« autoplaçant ».

Ce segment offre une vue d'ensemble détaillée du béton autoplaçant en tant que matériau innovant. Cette section résume la composition des BAP ainsi que leurs caractéristiques à la fois à l'état frais et à l'état durci.

#### 1.1.1. Généralité

##### ➤ Historique

Dans les années 1980 au Japon, des efforts de recherche significatifs ont été déployés pour remédier aux problèmes de compactage inadéquat du béton frais, ce qui compromettrait la durabilité des structures. En 1986, le professeur Okamura a proposé ce type de béton, suivi d'études approfondies sur son aptitude au travail menées par Ozawa et Maekawa à l'Université de Tokyo. Le premier prototype de béton autoplaçant a été développé en 1988 par le professeur Okamura de l'Université de Kochi [2]. Cette découverte en matière de technologie du béton suscitait un énorme intérêt à l'échelle mondiale. À la fin des années 90, les premières applications sont apparues en Europe, et par la suite, ce matériau a fait son apparition presque partout dans le monde comme un nouveau matériau [3].

### ➤ Définition

Le béton autoplaçant (BAP), également appelé béton autocompactant (SCC pour Self Compacting Concrete en anglais), est un matériau bétonné extrêmement fluide, uniforme et stable. Il peut être déployé dans des coffrages complexes et encombrés uniquement par l'effet de son poids propre, sans nécessiter l'application de vibrations externes ou internes.

De plus, ces bétons présentent des avantages qui justifient le nouvel intérêt qu'ils suscitent auprès des industriels [4] :

- Élimination de la nécessité de vibrations et des nuisances sonores ;  
Réduction du temps de travail ;
- Amélioration de la stabilité de la matrice et de la qualité de l'interface entre la pâte de ciment et les granulats ou les armatures ;
- Amélioration de l'adhérence à l'interface entre un ancien béton et le BAP de réparation ;
- Après le retrait des couches de béton endommagé de l'élément structurel, en les remplaçant par une couche de BAP de réparation, on observe une diminution de la perméabilité et donc une amélioration de la durabilité de cet élément structurel ;
- Amélioration de la qualité des parements.

### 1.1.2. Formulation des BAP

Pour obtenir un béton autoplaçant de qualité, présentant les propriétés essentielles suivantes;[5] la capacité de remplissage, permettant un écoulement efficace dans des formes complexes et assurant le comblement intégral de tous les espaces sous son propre poids, ainsi que la capacité de passage, qui autorise la circulation à travers et autour des espaces confinés entre les barres d'armature en acier sans provoquer de ségrégation ni de blocage, sont des critères primordiaux. De plus, la résistance à la ségrégation est cruciale pour maintenir la cohérence du mélange tout au long du transport et après son placement, ce qui demande une précision dans le calcul des proportions des différents matériaux utilisés. La méthode de formulation ou de composition des BAP dépend de l'analyse des résultats d'une série d'essais préliminaires, suivie de l'ajustement des propositions de mélange et de l'évaluation d'autres combinaisons jusqu'à ce que les propriétés désirées soient obtenues. En vue d'optimiser la formulation des bétons autoplaçants, diverses méthodologies ont été développées, comprenant notamment l'approche japonaise d'Okamora (1999), l'approche française du LCPC, une méthode basée sur l'optimisation des mortiers[6], l'approche suédoise du CBI par Peterson et al



[7], qui recourt à la méthode des plans d'expérience, ainsi que d'autres méthodes centrées sur l'optimisation du volume de pâte[6].

### ➤ Formulation OKAMURA ou "La Méthode Générale" (Japon)

Cette approche s'appuie sur une compréhension des doses approximatives des différents composants du BAP. Elle facilite l'établissement des proportions initiales du mélange BAP par le biais de tests d'étude.

Okamura et al. [8][9] ont été parmi les premiers à introduire une méthode de formulation des BAP basée sur des expériences. Les principaux éléments de cette méthode comprenaient :

- La teneur volumique en gravillons du béton fixé à 50% du volume solide ;

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

Où :

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

$G_{lim}$  : volume absolu d'un mètre cube de gros agrégats.

- Le volume du sable est fixé à 40% du volume total du mortier ;

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

Où :

$K_{sf}$  : taux de fines particules (<0.09mm) dans le sable.

Le dosage de superplastifiant ainsi que le rapport eau/poudre final sont modifiés jusqu'à ce que le mortier atteigne une viscosité adéquate et une fluidité élevée répondant aux critères recherchés. Ces critères incluent la viscosité mesurée par le temps d'écoulement à l'entonnoir en V et l'important étalement mesuré par le cône.

La fluidité du mortier, est déterminée par :

$$D = \frac{d^2 - d_0^2}{d_0^2} \quad 1.3$$

Où :

D : est le diamètre de la galette et  $d_0$  la base du cône.

Le temps d'écoulement du mortier, donnée par :

$$T = \frac{10}{t} \quad 1.4$$

Où :

T : le temps d'écoulement à l'entonnoir en V exprimé en secondes.

Cette méthode de formulation se caractérise par sa simplicité et sa sécurité, c'est-à-dire que l'estimation du volume de gravillon permet d'éliminer le risque de blocage. Par ailleurs, le volume de la pâte devient très important, ce qui nécessite également l'utilisation d'un dosage élevé en superplastifiants ; cela rend la démarche moins économique et peut entraîner une augmentation des risques de déformations inégales.

### 1.1.3. Particularités de la composition des BAP

Le béton autoplaçant se distingue d'un autre type de béton par sa composition et ses propriétés à l'état frais (figure 1.1). Les BAP sont composés d'une plus grande variété d'éléments que le béton ordinaire, comprenant les granulats, le ciment, les additions minérales, les adjuvants et l'eau. Chaque composant contribue de manière spécifique à l'écoulement et à la rhéologie du béton, et des interactions se produisent entre certains d'entre eux.

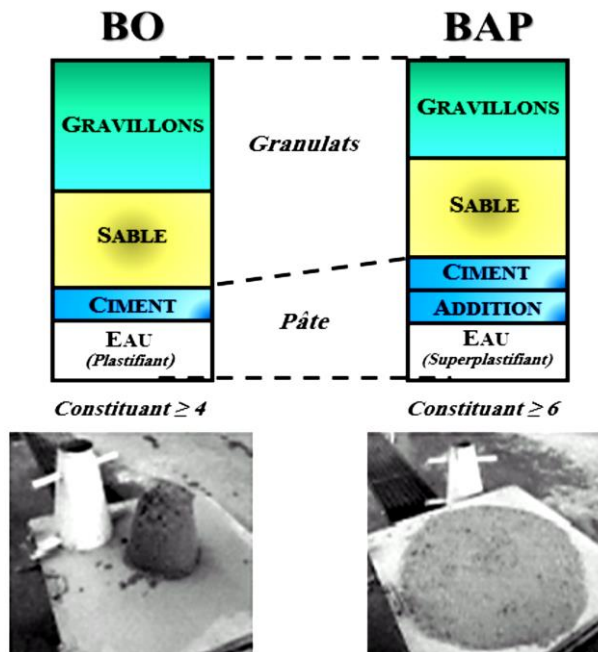


Figure 1.1 : Différence entre les composants d'un BAP et un BO [10].

### A. Faible volume de gravillon

Il existe deux types de granulats utilisés dans la formulation de BAP en fonction de leur origine : les granulats concassés ou roulés. Ils sont classés selon leurs dimensions de grains, ce qu'on appelle leur granulométrie, et la forme des granulats dépend du processus d'élaboration. D'autres ont exprimé que certains facteurs, plus importants, influencent le béton par l'utilisation des granulats. Cela peut entraîner un risque de blocage dans les zones confinées, donc il est nécessaire de limiter leur volume.

En outre, ils contribuent également à accroître la compacité du squelette granulaire du béton, ce qui permet de réduire la quantité de liant requise pour atteindre une bonne maniabilité et la résistance désirée. En revanche, à mesure que la taille maximale des granulats augmente, le risque de blocage augmente également [11]. (La taille maximale des gravillons varie généralement entre 10 et 20 mm).

### B. Fines et volume de pâte élevé

Le BAP se distingue par la présence d'une importante quantité de fines (environ 500 kg/m<sup>3</sup>), destinée à réduire les risques de ressuage et de ségrégation [12]. Ces fines comprennent des additions minérales finement broyées telles que le laitier de haut fourneau, la fumée de silice et les cendres volantes.

L'ajout de fines permet d'augmenter le volume de pâte, qui représente généralement entre 35 % et 45 % du volume total. Cela joue un rôle crucial dans la fluidité en réduisant les interactions entre les granulats plus gros, les écartant les uns des autres. De plus, dans le cas du BAP, il est indispensable de remplacer une partie du ciment par des additions minérales afin de limiter les chaleurs d'hydratation excessives.

Ces substances peuvent provoquer des altérations de la porosité de la matrice cimentaire et impacter les propriétés mécaniques ainsi que l'autoplaçage du béton.

### C. Adjuvants

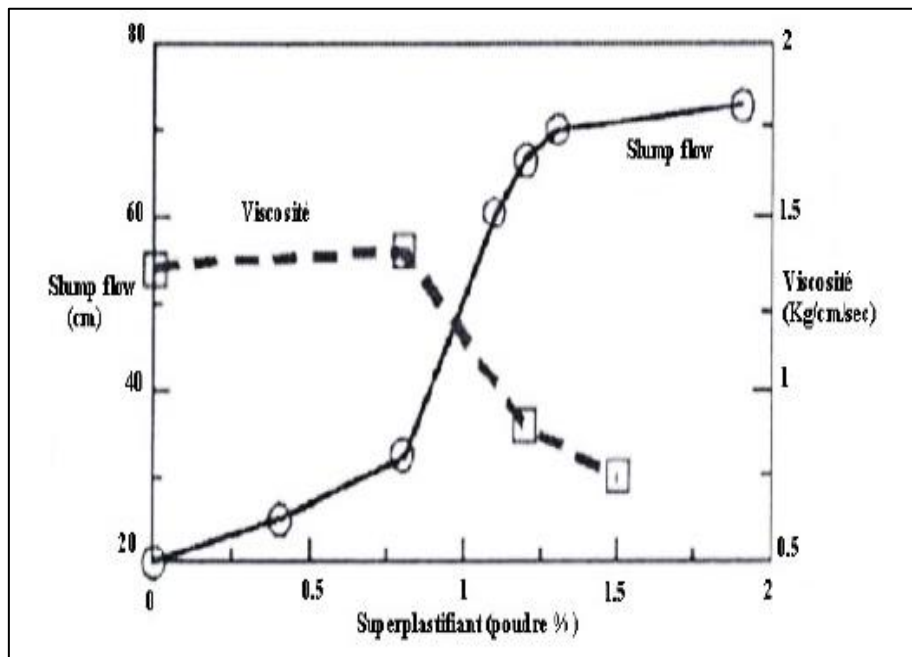
#### ➤ Superplastifiants

Il s'agit d'un produit chimique soluble dans l'eau. Il est ajouté en faibles proportions (habituellement de 1 à 5% de la masse du ciment) au béton frais lors du malaxage, dans le but de modifier ses caractéristiques à l'état frais et à l'état durci.

Les superplastifiants agissent en se liant à l'interface solide-eau, favorisant l'acquisition de charges similaires par les grains de ciment. Cela engendre une dispersion des particules grâce

à une répulsion électrostatique, libérant ainsi une partie de l'eau piégée par les grains de ciment agglomérés et réduisant les frottements intergranulaires[13]. Cette action permet la réalisation d'un béton très fluide, même avec des rapports E/C faibles.

La Figure 1.2 met en évidence l'impact d'un superplastifiant sur la maniabilité du béton : plus la quantité de superplastifiant est élevée, plus le béton devient fluide, atteignant un point où l'augmentation de la dose n'a plus d'effet sur son étalement[14]. De manière similaire, la viscosité du BAP connaît une légère variation jusqu'à un certain dosage, au-delà duquel elle diminue de manière significative.



**Figure 1.2:** Impact de la quantité du superplastifiant sur l'étalement et la viscosité d'un béton .[14]

### ➤ Agent de viscosité

En règle générale, les superplastifiants ont tendance à améliorer la maniabilité du béton et à diminuer sa viscosité à l'état frais, ce qui le rend moins susceptible à la ségrégation. C'est la raison pour laquelle des agents de viscosité sont employés.

Ces substances sont d'origine naturelle et agissent en prévenant le phénomène de ressuage et en réduisant les risques de ségrégation en épaississant la pâte[15].

### 1.1.4. Propriétés d'un béton autoplaçant

#### A. Propriétés des BAP à l'état frais

Les BAP sont des matériaux qui s'auto-placent sans nécessiter de contrainte externe. Ils se distinguent généralement des autres types de béton par leur fluidité et leur homogénéité. Les caractéristiques générales d'un béton autoplaçant lorsqu'il est frais sont étudiées selon divers aspects et peuvent être classées en quatre critères évaluables à l'aide de tests empiriques :[16],[17]

- La Capacité au Remplissage ;
- La Capacité de Passage ;
- La Résistance à la Ségrégation ;
- Rhéologie.

#### ➤ La Capacité au Remplissage

La capacité de remplissage du béton fait référence à sa capacité à se déformer [16] , à remplir les vides et à occuper les espaces restreints dans un environnement confiné, sous son propre poids, sans nécessiter de vibration mécanique externe.

Cette capacité de remplissage peut être évaluée à l'aide de l'essai d'étalement au cône d'Abrams, qui fournit des indications liées à la capacité de remplissage et à la vitesse de remplissage. La première concerne la capacité du béton à se déformer, exprimant le pourcentage d'espace comblé ou la distance parcourue. La seconde est associée à la rapidité de déformation, indiquant la vitesse d'écoulement du béton.

#### ➤ La Capacité de Passage

La capacité de passage se réfère à la capacité du mélange frais à s'écouler à travers des espaces étroits, comme les zones de renforcement encombrées, sans risque de ségrégation ou de blocage. Pour évaluer la capacité de passage, il est nécessaire de prendre en compte la géométrie et la densité du ferrailage, ainsi que la taille maximale des granulats. Cette capacité peut être mesurée à l'aide de la boîte en L (L-Box) en calculant le rapport H2/H1.

#### ➤ La Résistance à la Ségrégation

La résistance à la ségrégation désigne la capacité du béton à maintenir son homogénéité dans la distribution de ses constituants, évitant ainsi une séparation entre les phases solide et liquide, à la fois lors de la mise en place et avant le durcissement.

## CHAPITRE 1 : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

La résistance à la ségrégation devient un paramètre crucial dans le cas de bétons présentant une haute fluidité ou de faible viscosité, ou encore lorsque les conditions de mise en place favorisent la ségrégation. Si aucune de ces circonstances ne survient, il est généralement superflu de préciser la classe de résistance à la ségrégation. Le test de résistance à la ségrégation des BAP est effectué à l'aide d'un tamis de 5 mm.

Ainsi, le tableau 1.1 présente les caractéristiques des BAP, les techniques pour les produire et les actions entreprises pour les mettre en place.

**Tableau 1.1** : Propriétés des BAP à l'état frais .[18]

| Propriétés d'un BAP            | Moyens d'obtention                              | Actions à mener dans la formulation              |
|--------------------------------|---|--|
| Remplissage (fluidité)         | Réduction des frictions<br>Entre les particules | Augmentation du volume de pâte                   |
|                                | Optimisation de la pâte                         | Utilisation des superplastifiants                |
|                                |   | Optimisation du rapport E/C                      |
| Capacité de passage            | Réduction de blocage des<br>Granulats           | Réduction du volume de gravier                   |
|                                |   | Réduction de la taille maximale des<br>Granulats |
| Résistance à la<br>ségrégation | Réduction de l'eau libre<br>Dans le béton       | Réduction du rapport E/C                         |
|                                |   | Utilisation de matériaux de grande<br>surface    |
|                                |   | Utilisation d'agents de viscosité                |
|                                | Réduction de la séparation de<br>phases         | Réduction du rapport E/C                         |
|                                |   | Utilisation d'agents de viscosité                |
|                                |   | Réduction de la taille maximale des<br>granulats |

### ➤ Rhéologie

La rhéologie peut être définie par le comportement du béton pendant la mise en œuvre. Elle permet ainsi d'analyser le flux et l'interaction entre les contraintes et les déformations du matériau, en prenant en compte leur viscosité, leur élasticité et leur plasticité. L'utilisation de ces paramètres conduit à la création de rhéogrammes ou de courbes d'écoulement, qui établissent généralement la relation entre la contrainte de cisaillement et la vitesse de cisaillement.

### **B. Propriétés des BAP à l'état durci**

Cette section examine les diverses caractéristiques du béton autoplaçant lorsqu'il est durci sous deux angles : d'une part, ses propriétés mécaniques et, d'autre part, ses propriétés physico-chimiques, notamment sa durabilité.

#### ➤ **Résistance mécanique**

En règle générale, parmi les caractéristiques du béton, les performances mécaniques telles que la résistance à la compression et à la traction sont primordiales et subissent l'influence de divers facteurs, tels que la forme et le type des granulats (concassés ou roulés) ainsi que le rapport (E/C). Cependant, le rapport (E/C)[19]. Cela entraîne une résistance à la compression supérieure à celle des bétons ordinaires vibrés (BOV), tandis que la résistance à la traction par flexion évolue de manière parallèle pour les BAP et les BOV.

D'autres recherches portant sur la cinétique de la force de compression sont souvent menées en normalisant la résistance à la compression par rapport à sa valeur à 28 jours. Plusieurs analyses ont été réalisées par Valcuende, Parra et al .[20] Leurs résultats indiquent que la résistance à la compression pour diverses compositions de BAP se situe généralement entre 50 et 60 MPa.

L'utilisation d'additions minérales dans la formulation du BAP conduit généralement à une résistance à la compression plus élevée et semble également susceptible de modifier la cinétique d'hydratation dans la matrice de ciment. Notamment, les charges de calcaire actuellement en utilisation ont pour effet d'accélérer l'hydratation à un jeune âge[21][22].

#### ➤ **Module d'élasticité**

Le module d'élasticité, défini comme le rapport entre la contrainte et la déformation, est influencé à la fois par les proportions et les modules des différentes phases constitutives du béton. Selon diverses normes telles que l'Eurocode ou le DTU, le module d'élasticité est corrélé à la résistance en compression du béton. Ainsi, le module d'élasticité évoluera de manière similaire pour les BAP et les BOV.

Après de nombreuses recherches, il a été constaté que le module d'élasticité est influencé par le coefficient d'élasticité de l'agrégat utilisé. Les dimensions de l'agrégat et la proportion de liant dans le mélange de béton sont des facteurs importants. La variété, le dosage et la quantité d'agrégats dans le BAP sont également des éléments significatifs à considérer, car ils ont un impact significatif sur le coefficient d'élasticité. L'utilisation d'agrégats dotés d'un module élastique élevé entraîne un module d'élasticité plus élevé du béton. [23]. En ce qui

concerne le volume de pâte, il a été remarqué que le module diminue à mesure que le rapport E/L augmente.

En règle générale, les bétons autoplaçants (BAP) présentent généralement une meilleure résistance à la compression et à la traction, ce qui est attribuable à un rapport liant qui améliore les microstructures et réduit la perméabilité. Cela a un impact significatif sur la performance globale du béton.

### **C. Propriétés physico-chimiques et durabilité**

Il est crucial de prendre en compte la durabilité d'une structure afin d'assurer sa longévité et de maintenir ses fonctions opérationnelles. La durabilité peut être définie comme la capacité du béton à résister aux agressions chimiques ou physiques susceptibles d'affecter ses propriétés physico-chimiques. Des recherches ont été entreprises pour évaluer la durabilité des bétons autoplaçants (BAP) et des bétons ordinaires (BO) ayant des résistances à la compression comparables, en employant des essais expérimentaux tels que la perméabilité à l'oxygène, la diffusion des ions chlorure, l'absorption d'eau, la carbonatation accélérée et le lessivage au nitrate d'ammonium.

Il n'y a pas de différence significative entre les bétons autoplaçants (BAP) et les bétons ordinaires (BO) en ce qui concerne la diffusion des ions chlorure et l'absorption d'eau par capillarité. De plus, à résistance équivalente, le taux de carbonatation et la cinétique de lessivage au nitrate d'ammonium restent comparables entre les deux types de béton. En outre, la perméabilité à l'oxygène des bétons autoplaçants est inférieure à celle des bétons ordinaires vibrés dans une plage de résistance donnée [24]. Par conséquent, on peut considérer que le BAP présente une durabilité similaire à celle des BO en termes de physico-chimique, malgré une résistance en compression identique.



### 1.2. Béton Fibres

Depuis les années 1990, plusieurs recherches et des avancées technologiques ont été menées pour obtenir de nouveaux matériaux dans Le domaine de la construction, notamment en ce qui concerne la formulation des bétons[25]. Les chercheurs rivalisent sans cesse pour améliorer la résistance, la ductilité et la durabilité du béton. Les études se concentrent désormais sur les bétons renforcés par des fibres.

L'introduction de fibres dans la matrice de béton améliore sa résistance à la traction par flexion, tout en permettant de contrôler l'ouverture et de limiter la propagation des fissures, ce qui joue un rôle crucial dans l'absorption d'énergie. Cependant, cette amélioration s'accompagne d'une réduction de la maniabilité du matériau. Les fibres ont également la capacité de transférer les charges grâce à leur résistance en traction, à condition qu'une bonne adhérence entre la fibre et la matrice soit garantie.

L'alignement des fibres est un élément clé pour garantir les dimensions optimales des structures, ce qui permet d'optimiser la quantité de fibres à intégrer dans la formulation. En ce sens, le dimensionnement des bétons renforcés de fibres repose sur l'hypothèse d'une distribution aléatoire des fibres en termes d'orientation, tout en étant uniformément réparties dans la masse.

#### 1.2.1. Généralité sur les fibres

##### ➤ Définition

Les fibres, des composants discontinus, sont uniformément dispersées dans la matrice avec une orientation aléatoire. Le comportement de ce matériau composite dépend largement du type et de la nature des fibres utilisées. Deux types principaux de fibres sont couramment utilisés : les macrofibres, dont la longueur dépasse généralement 10 mm, sont ajoutées principalement pour accroître la ténacité du béton, tandis que les microfibres, d'une longueur généralement inférieure ou égale à 10 mm, sont incorporées dans la pâte de ciment pour améliorer principalement la résistance à la traction

L'intégration de fibres offre une amélioration dans le contrôle de la fissuration, ce qui se traduit par une plus grande durabilité et une ductilité accrue. Ces fibres agissent comme des "points de suture" pour les fissures, offrant une résistance à leur ouverture et augmentant ainsi les propriétés de résistance après la fissuration.

## 1.2.2. Les différents types des fibres

Il existe différentes catégories de fibres pouvant être intégrées dans le béton. Ces fibres sont catégorisées selon leur source (naturelle, synthétique ou industrielle), leur configuration (droite, ondulée, aiguille), leurs dimensions (diamètre, longueur, etc.) et leurs caractéristiques chimiques, physiques et mécaniques. Voici quelques exemples de types courants :

### A. Fibres métalliques

Les fibres métalliques comprennent les fibres d'acier et les fibres de fonte amorphe (figure 1.3), qui ont démontré une excellente compatibilité avec le béton et ont fait l'objet de nombreuses études. Les fibres d'acier sont largement utilisées dans le domaine du génie civil en raison de leur résistance élevée à la traction et de leur module d'élasticité supérieur à celui de la matrice cimentaire[26].

D'autres chercheurs ont tenté d'améliorer l'adhérence entre les fibres et la matrice cimentaire en modifiant certaines caractéristiques. Des facteurs tels que l'irrégularité de la surface, les variations de diamètre et de longueur, la forme de la section et le mode de fonctionnement sont pris en compte. Ces modifications ont un impact positif sur les propriétés mécaniques du béton renforcé par ce type de fibres[26]. La figure 1.3 illustre les différentes géométries des fibres métalliques. En général, la longueur des fibres varie de 25 à 60 mm et leur diamètre varie de 0,5 à 1,3 mm.

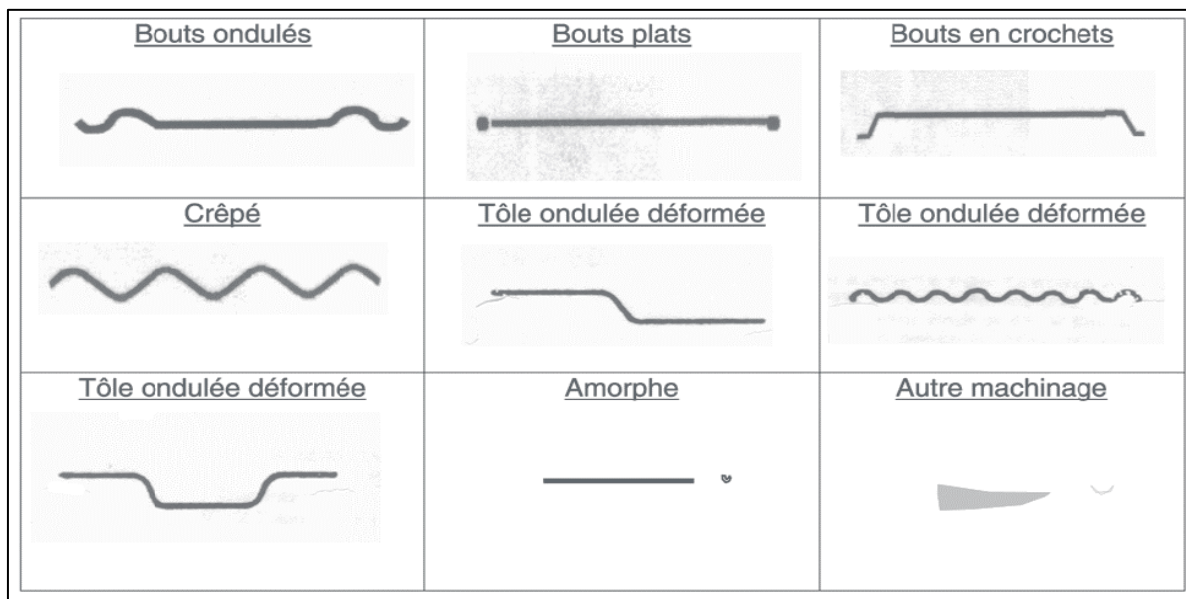


Figure 1.3 : Géométrie des fibres métalliques [27].

### B. Fibres minérales

Les fibres minérales comprennent deux catégories : les fibres de verre et les fibres de carbone, qui sont produites par fusion et fibrage de divers minéraux. Ce type de fibre offre une isolation thermique efficace et une remarquable résistance au feu.

#### ➤ Fibre de verre

Les fibres de verre (FV) sont des matériaux solides et légers fabriqués à partir de verre fondu qui est extrudé à travers une filière (figure 1.4). Elles se caractérisent par leur grande résistance à la traction (1500-4000 N/mm<sup>2</sup>), quatre fois supérieure à celle de l'acier, tout en étant très fragiles. Leur coefficient de dilatation est pratiquement similaire à celui de la pâte de ciment. Le dosage habituel des fibres de verre dans le béton varie généralement de 0,5 à 15 kg/m<sup>3</sup> en fonction de l'application prévue [28].

Le verre ordinaire n'est pas résistant dans l'environnement alcalin du béton. Pour les rendre utilisables dans le béton, il est nécessaire d'incorporer du dioxyde de zirconium ou d'appliquer un revêtement spécifique sur les fibres de verre. Cela permet d'augmenter leur résistance aux alcalins, assurant ainsi la préservation de leurs propriétés à plus long terme au sein du béton.



**Figure 1.4:** Fibres de verres. [28]

Sivakumar et al. [29] ont observé que la résistance à la traction et à la flexion augmente proportionnellement à l'augmentation du dosage de fibres dans le BAP. De plus, des observations ont été faites concernant la réduction de la perméabilité aux ions chlorure, attribuée à la bonne liaison entre les fibres de verre (FV) et les liants, ainsi qu'à la diminution de l'absorption d'eau dans le BAPFV. Ces résultats suggèrent que l'addition de métakaolin et de

fibres de verre contribue à améliorer à la fois les caractéristiques mécaniques et la durabilité du BAPFV.

### ➤ **Fibre carbon**

Les fibres de carbone sont produites à partir de trois principaux précurseurs : la cellulose (rayonne), le goudron de pétrole et le polyacrylonitrile (PAN)(figure1.5). Cependant, le polyacrylonitrile (PAN) est de loin le plus répandu, et le processus de fabrication des fibres de carbone dépend du type de précurseur [30]. De plus, elles peuvent être classées en fonction du précurseur utilisé ainsi que de leurs propriétés physiques et mécaniques. Leur production est très coûteuse, mais elles sont néanmoins considérées comme les fibres les plus performantes.



**Figure 1.5:** Fibres de carbones [31].

En général, les fibres de carbone se distinguent par leur grande résistance à la traction et le module d'élasticité élevé, ainsi qu'une rigidité spécifique (rapport rigidité/densité) élevée. Elles présentent également une excellente résistance aux produits chimiques et à l'humidité, tout en étant peu sensibles aux contraintes de fatigue [32].

### **C. Fibres organiques**

Les **fibres organiques** sont composées de carbone et d'**hydrogène**. Elles peuvent être regroupées en fonction de leur d'origine, qu'elle soit naturelle (**cellulose**, soie, lin) ou artificiel, sous forme de dérivés de produits pétrochimique tels que le polyester, polyéthylène...etc.

### ➤ **Fibres d'Aramide**

La fibre d'aramide est le terme générique désignant un groupe de fibres organiques à faible densité. Ces matériaux se présentent sous forme de filaments continus, de fibres coupées (de 40 à 80 mm), de fibres courtes (de 2 à 15 mm) ou de pulpe (jusqu'à 3 mm). Le diamètre des fibres d'aramide se situe entre 12 et 15 microns (figure 1.6). Elles sont caractérisées par leur haute résistance, leur rigidité élevée, leur stabilité face aux températures élevées et leur bonne résistance chimique aux carburants et à l'eau de mer, mais elles ne résistent pas aux acides forts et aux bases.



**Figure 1.6 :** Fibres d'Aramide hachées et en files [33].

### ➤ **Les fibres polypropylène**

Les fibres de polypropylène (PP) sont catégorisées parmi les fibres organiques, étant issues de la carbonisation de matières organiques telles que les fibres de polyacrylonitrile ou de produits organiques comme les brais pétroliers (figure 1.7). Découvert en 1954, ce matériau de synthèse a connu une expansion croissante dans l'industrie textile [34]. Elle se caractérise par leur longueur qui varie entre 30 et 60 mm, leur légèreté et leur résistance à l'attaque en milieux alcalins. Elles offrent les avantages suivants :

- Renforcent la manipulabilité et la cohésion du béton ;
- Minimisent le retrait plastique du béton frais ;
- Accroissent considérablement la résistance aux chocs ;
- Maîtrisent l'ouverture des fissures.



**Figure 1.7:** fibres polypropylène [35].

Walid Laifa et al. [36] ont démontré que l'augmentation de la quantité de fibres de PP entraîne une diminution de l'étalement du BAP. Le dosage optimal en fibres de PP, qui a conduit aux meilleures résistances en traction, est de 0,6 kg par mètre cube de béton.

### **D. Les fibres végétales**

Les fibres végétales (figure 1.8) sont des composites naturels présentant une structure cellulaire composée de différentes proportions de cellulose, de polymères, d'hémicellulose et de lignine, disposées en différentes couches[37]. Ces fibres se distinguent par leurs propriétés mécaniques intéressantes ainsi que leur faible densité, ce qui permet la fabrication de bétons à la fois légers et performants. Elles possèdent une grande résistance à la traction et un faible module d'élasticité, et résistent durablement aux agressions chimiques des alcalins, contrairement aux fibres de verre.



**Figure 1.8 :** Les fibres végétales [38].

Les auteurs ont étudié les bétons renforcés avec ces fibres. Filho R et al .[39] ont mené des études qui ont démontré que lorsque les fibres sont intégrées dans les compositions à des dosages optimaux en fonction de leurs formes et de leur nature, elles réduisent les fissures causées par le retrait plastique à un stade précoce, tout en augmentant la résistance mécanique des matériaux.

### **E. Autre type des fibres**

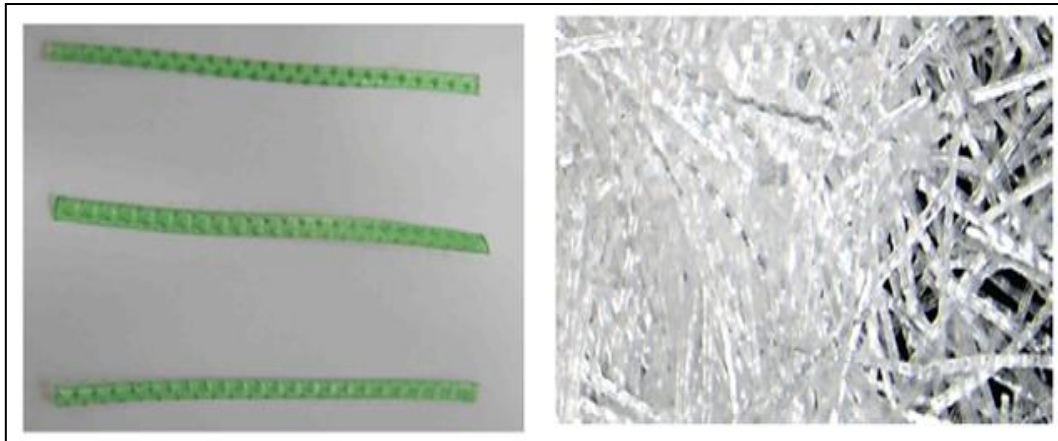
Il existe un autre type de fibres produites à partir du recyclage des déchets, mais elles ne sont pas largement disponibles sur le marché en raison de leur coût élevé. Des études ont montré que cette approche pourrait être une solution potentielle pour réduire la propagation des déchets. Cependant, leur utilisation reste limitée dans le domaine de la construction, notamment dans le ciment ou le béton, contrairement aux fibres plastiques.

Les fibres plastiques, qu'elles soient sous forme de microfibres ou de macrofibres, sont des matériaux synthétiques. Les microfibres plastiques se caractérisent par un diamètre variant entre 5 et 100  $\mu\text{m}$  et une longueur allant de 10 à 20 mm. Elles permettent de contrôler la fissuration liée au retrait à un stade précoce[40].

Les microfibres plastiques peuvent être produites à partir de polypropylène (PP) vierge ou recyclé, de fibres de polyéthylène haute densité (PEHD) ou de polyéthylène téréphtalate (PET). Elles sont produites par extrusion à partir de matrices rectangulaires pour former des feuilles de film d'une épaisseur 0,2 à 0,5 mm. Ensuite, elles sont fendues longitudinalement en bandes de largeur uniforme (1,0 à 1,3 mm) à l'aide d'une machine. Ces bandes sont ensuite déformés mécaniquement à l'aide d'une roue à motifs, puis coupés aux longueurs souhaitées (40 à 60 mm)[41]. Les propriétés physiques et chimiques de ces fibres varient selon les méthodes de fabrication utilisées.

Les fibres plastiques (figure 1.9) présentent les avantages suivants :

- La facilité de conception et de fabrication, ainsi qu'une disponibilité à un prix relativement abordable ;
- Résistance aux agressions dans des environnement alcalins et corrosifs ;
- Prévention et limitation de la propagation des fissures.



**Figure 1.9:** les fibres recyclées PET et PP [42].

Les différentes propriétés des fibres les plus fréquemment utilisées sont répertoriées dans le tableau 1.2.

**Tableau 1.2:** Résumé des caractéristiques et des propriétés des fibres.

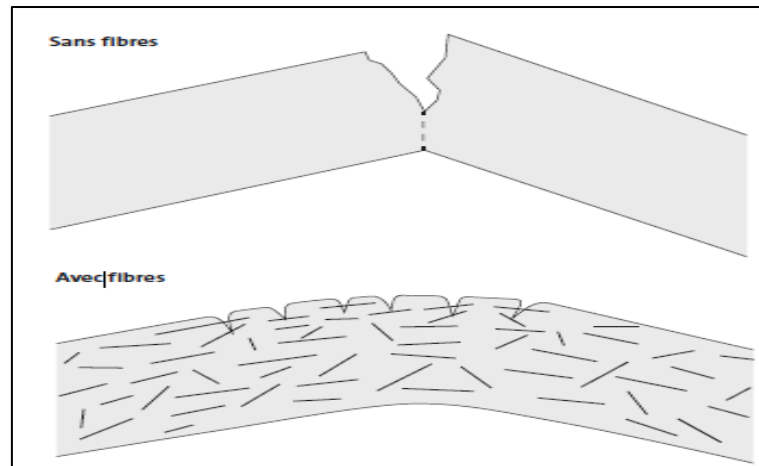
|                      | Masse volumique (kg/dm <sup>3</sup> ) | Diamètre moyen (µm) | Résistance à la traction (N/mm <sup>2</sup> ) | Module d'élasticité (kN/mm <sup>2</sup> ) | Allongement à la rupture (%) |
|----------------------|---------------------------------------|---------------------|---|---|------------------------------|
| Fibres acier         | 7,85                                  | 100-1000            | 500-2600                                      | 200                                       | 5-35                         |
| Fibres de verre      | 2.7                                   | 12-20               | 1500-3700                                     | 75  | 20-35                        |
| Fibres de carbone    | 1.75-1.91                             | 15                  | 2000-5000                                     | 26-30                                     | 4-20                         |
| Fibres d'Aramide     | 1.4                                   | 12                  | 2800  | 80  | 4.2                          |
| Fibres polypropylène | 0.98                                  | 18-50               | 450-700                                       | 7.5-12                                    | 60-90                        |

### 1.2.3. Rôle des fibres

Les chercheurs se sont penchés sur l'optimisation des propriétés mécaniques du béton, notamment sa résistance à la compression et à la flexion, en intégrant des fibres. Leur analyse a également porté sur l'importance d'une répartition homogène des fibres au sein du matériau cimentaire, un aspect crucial qui a un impact significatif sur les performances mécaniques et la durabilité des composites.

Après de nombreuses années d'études, il a été constaté que l'incorporation de fibres peut jouer un rôle crucial, notamment en offrant un meilleur contrôle de la fissuration du béton en service. Cela se traduit par une réduction de l'ouverture des fissures et par la transition du comportement initialement fragile du béton vers un comportement ductile, renforçant ainsi la sécurité lors de charges extrêmes. (Voir Figure 1.10)





**Figure 1.10** : Évolution de la fissure dans un matériau en service [43].

Selon les propriétés des fibres et les structures dans lesquelles elles sont intégrées, ce rôle se manifeste par des améliorations dans les domaines suivants :

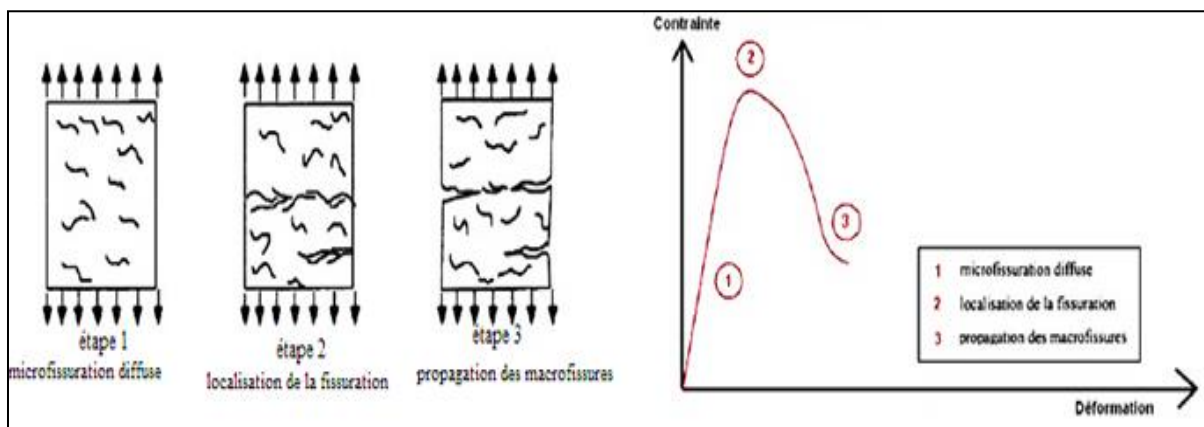
- L'accroissement de la résistance au feu ainsi que de la résistance aux chocs, à la fatigue, à l'usure et à l'abrasion ;
- L'augmentation de la ductilité du béton (sa capacité à se déformer plastiquement sans se rompre) ;
- La protection contre les éclatements provoqués par le gel ;
- Le renforcement de la résistance à la traction par flexion ;
- Conférence d'une meilleure cohésion au béton frais ;
- Le meilleur contrôler et la réduction du phénomène de fissuration, ainsi que l'augmentation des propriétés mécaniques après la fissuration.

### 1.2.4. Mécanismes d'action des fibres dans le béton

Le rôle des fibres dans le béton est souvent comparable à celui des barres d'armature classiques, car le béton renforcé de fibres résiste aux efforts de traction. Les fibres entravent la formation, le développement et la propagation des fissures. Elles agissent comme des "points de couture" pour les fissures existantes, empêchant ainsi leur progression, tout en limitant la formation de nouvelles fissures en renforçant la matrice cimentaire.

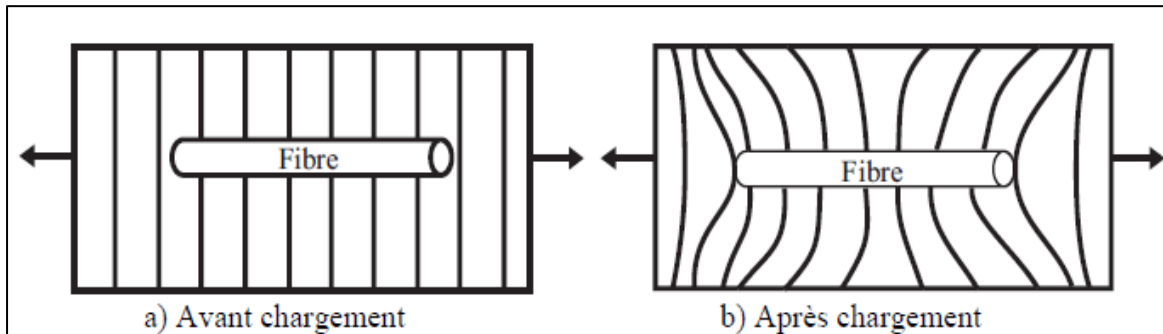
Les chercheurs ont démontré que ce mécanisme est en accord avec un phénomène physique qui concerne l'apparition, la propagation et l'expansion des fissures dans le béton lors d'un essai de traction. Rossi. [43] a identifié trois étapes distinctes de propagation des fissures dans une matrice cimentaire (voir figure 1.11).la première étape concerne la microfissuration

diffuse et intrinsèque au matériau, où l'on observe la formation précoce de microfissures, généralement dans la zone élastique, en raison des hétérogénéités engendrées par la nature irrégulière du matériau. Lorsque ces fissures se forment, elles ont tendance à se regrouper naturellement par coalescence pour réduire l'énergie. Les fibres de petites dimensions peuvent intervenir à ce stade pour « coudre » les microfissures, retardant ainsi leur coalescence. Ensuite, dans la deuxième étape, ces microfissures ont tendance à s'orienter le long des directions d'extensions maximales. Cette phase marque le début de la localisation de l'endommagement du matériau et indique la transition du comportement du matériau vers celui de la structure. Dans cette étape suivante, correspondant au développement de fissures à une échelle plus importante mais limitée, ces microfissures peuvent éventuellement aboutir à une macro-fissuration. Cela entraîne finalement la défaillance de la structure. À ce stade, les fissures peuvent généralement dépasser les centaines de microns, et leur ouverture critique est déterminée par la géométrie de la structure. À ce stade, le processus de défaillance n'est plus propre au matériau lui-même, mais dépend de l'échelle de la structure par rapport aux dimensions des fibres et à leur disposition géométrique.

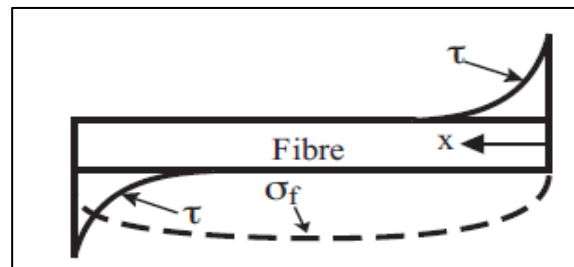


Au début du processus de chargement, l'interaction entre les fibres et la matrice est principalement élastique. À ce stade, on observe la diffusion des fissures au niveau de l'interface du matériau, avec une distribution des contraintes au-delà de la phase élastique induite par les fibres. Ces contraintes comprennent une composante de friction au niveau de la fissure, en plus de la contrainte élastique. Le premier modèle analytique décrivant le transfert d'effort dans la zone élastique a été développé par Cox.[45]. Son modèle repose sur l'analyse du champ de contraintes autour d'une fibre discontinue intégrée dans une matrice cimentaire élastique. D'autres chercheurs ont démontré que ce phénomène dépend de plusieurs paramètres,

notamment les dimensions des fibres et les modules d'élasticité du béton et des fibres. La figure 1.12 offre une représentation claire du champ de déformation, tandis que la figure 1.13 présente la répartition des contraintes dans la fibre.

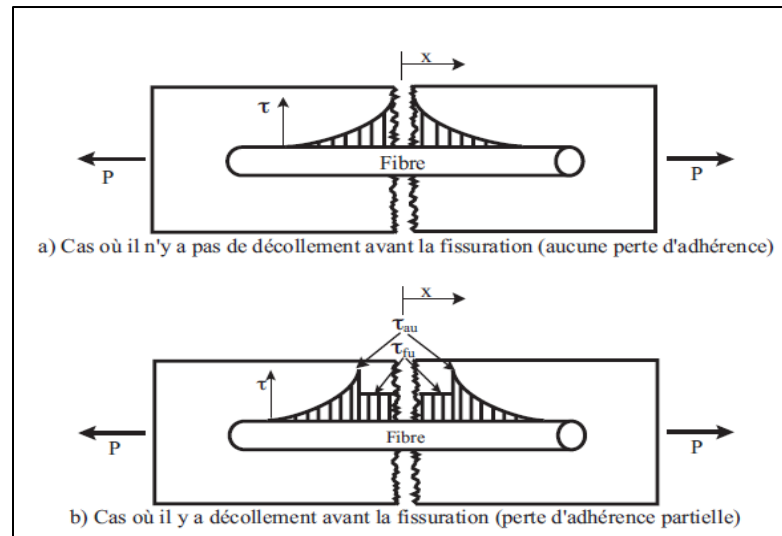


**Figure 1.12:** Répartition de la déformation autour de la fibre [46].



**Figure 1.13 :** Distribution longitudinale de la contrainte axiale dans la fibre et de la contrainte de cisaillement à l'interface fibre-matrice [46].

Selon d'autres observations, les fibres sont introduites non seulement dans le but d'améliorer la résistance à la traction, mais également pour jouer un rôle dans les composites cimentaires fissurés. Elles agissent comme des points de couture pour les fissures déjà existantes, empêchant ainsi une ouverture incontrôlée des fissures et retardant leur propagation. [47]. Les mécanismes de transfert de force dans les matrices fissurées sont essentiellement similaires à ceux des matrices non fissurées. La principale distinction se produit lorsque l'adhérence est compromise. À ce stade, la répartition des contraintes de cisaillement sera caractérisée par une combinaison d'un cisaillement de friction adjacent à la fissure ( $\tau_f$ ) et d'une contrainte élastique décroissante ( $\tau$ ) en s'éloignant de la fissure, comme illustré dans la figure 1.14.



**Figure 1.14 :** Distribution de la contrainte de cisaillement à l'interface fibre-matrice dans une matrice fissurée [46].

Li et Leung et al. [48] ont conclu que les fibres doivent avoir une longueur suffisante pour favoriser le développement de frottement, ce qui renforce considérablement la ténacité. De plus, la qualité de la zone de transition entre les fibres et la pâte de ciment joue un rôle crucial. En effet, une interface trop solide entraînera une adhérence élevée, réduisant ainsi l'impact relatif du frottement.

### 1.2.5. Effet de l'orientation et de la distribution des fibres

L'orientation et la répartition des fibres, ainsi que leur densité, sont des paramètres qui peuvent influencer les performances et les caractéristiques mécaniques des matériaux renforcés par des fibres (BRF). De nombreux chercheurs ont mené des études sur ces aspects, soulignant l'importance de la résistance à l'arrachement des fibres et de la quantité de fibres traversant un plan de rupture. Şanal et al. [49] ont pour objectif de favoriser une distribution homogène des fibres, ce qui nécessite un bon contrôle du mélange à l'état frais pour éviter l'agglomération et la ségrégation des fibres [49]. En effet, en dosant correctement les différents composants du béton, il est possible de prévenir la ségrégation des fibres, qui survient en raison de leur densité élevée par rapport aux autres éléments du béton. Un dosage approprié permet ainsi d'éviter la séparation des fibres tout en favorisant leur orientation dans le sens de l'écoulement. Pour un béton renforcé par des fibres standard, le pourcentage volumique de fibres utilisé varie généralement entre 0,25 et 1,5 %.

D'autres chercheurs ont observé que le type d'écoulement généré induit une orientation préférentielle des fibres. Zerbino et al. [46] ont constaté que le phénomène d'écoulement

rectiligne conduit à l'alignement des fibres parallèlement aux lignes de courant de fluide visqueux, c'est-à-dire le béton. Cette tendance à l'alignement augmente lorsque le rapport entre la distance d'écoulement et la longueur de la fibre augmente.

Dans cette optique, plusieurs études ont mis en évidence l'importance significative de l'orientation des fibres sur le comportement en traction et en flexion des BRF. Par exemple, Abrishambaf et al. [34] ont démontré que des fibres alignées perpendiculairement au plan de fissuration entraînent une augmentation notable des résistances post-fissuration. Certains auteurs ont observé des augmentations de plus de 100 % pour des BRF. En revanche, des fibres alignées parallèlement au plan de fissuration ont peu d'influence selon ces recherches.

### **1.2.6. Influence des fibres sur les propriétés du béton à l'état frais**

Les caractéristiques des fibres plastiques peuvent considérablement influencer la facilité de manipulation du béton. Des facteurs tels que la taille, la forme, la texture de surface et la quantité des fibres peuvent entraîner une diminution de la maniabilité. Suite à plusieurs essais expérimentaux en laboratoire portant sur les propriétés à l'état frais et durci du béton, l'utilisation de fibres plastiques de différentes longueurs et volumes a été examinée. Les conclusions suggèrent que leur incorporation affecte la viscosité du mélange tout en maintenant sa consistance. De plus, ces fibres absorbent une part importante de la pâte de ciment en raison de leur surface supérieure par rapport aux composants habituels du béton. Les fibres créent une structure en réseau qui maintient les agrégats fins et grossiers ensemble, ce qui entraîne l'obstruction de l'écoulement du mélange de béton [50].

Al-Hadithi et al. [51] ont étudié l'utilisation de fibres plastique du type de polyéthylène téréphtalate (PET) dans le BAP à différents pourcentages, allant de 0% à 2% en ordre de grandeur 0.25% (tableau 1.3). Les résultats indiquent que tous les mélanges contenant des fibres présentent une maniabilité inférieure à celle du béton de référence. Al-Hadithi et al. [52][53] ont également montré que l'ajout de fibres dans les mélanges de béton en volume réduit la maniabilité du béton à mesure que le dosage des fibres augmente. Cela peut être attribué à la grande surface spécifique de ces fibres [54].

Tableau 1.3: Les propriétés des BAP à l'état frais à base des PET [51].

| Mélange | Étalement (mm) | T <sub>500</sub> (sec) | V-Funnel le temps (sec) | L-box (%) |
|---------|----------------|------------------------|-------------------------|-----------|
| F0      | 780            | 3                      | 9                       | 1.00      |
| F0.25   | 760            | 5                      | 11                      | 0.95      |
| F0.5    | 750            | 6                      | 13                      | 0.90      |
| F0.75   | 740            | 7.5                    | 14                      | 0.88      |
| F1.0    | 720            | 8                      | 16                      | 0.85      |
| F1.25   | 700            | 8.5                    | 18                      | 0.82      |
| F1.5    | 690            | 9.5                    | 20                      | 0.80      |
| F1.75   | 670            | 10                     | 22                      | 0.78      |
| F2.0    | 650            | 12                     | 25                      | 0.75      |
| EFNARC  | 600-750        | 3.5-6.0                | 3-15                    | 0.8-1.0   |

Gencel et al. [55] ont étudié la maniabilité du BAP renforcé par des fibres plastique du type monofilament en polypropylène (PP) à quatre niveaux de dosage 3, 6, 9 et 12 kg/m<sup>3</sup>. Ils ont constaté une diminution de 22,6 % du diamètre de l'écoulement lorsque 12 kg/m<sup>3</sup> de fibres de PP ont été incorporés au BAP conventionnel, quelle que soit la proportion de ciment (figure 1.15).

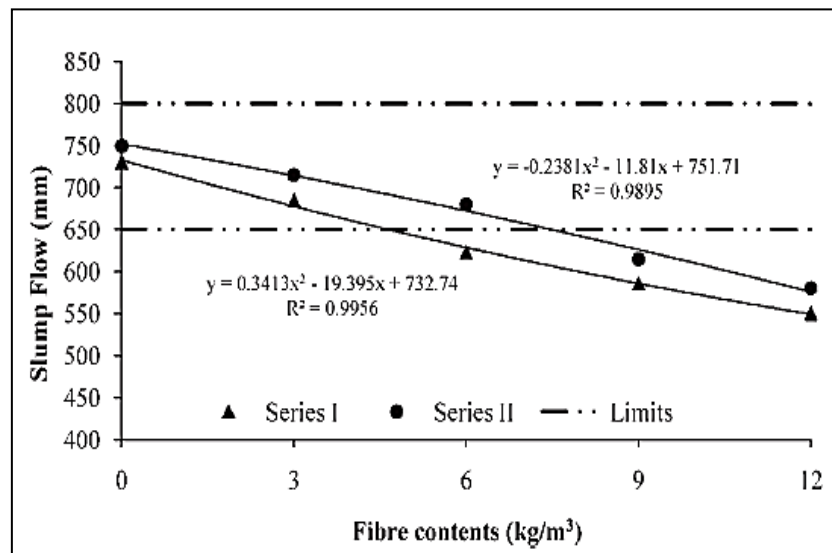


Figure 1.15 : La variation de diamètre étalement du BAP par rapport à la teneur des fibres PP par deux contenus de liant [55].

Vijaya et al.[56]ont entrepris une étude pour évaluer l'impact du rapport E/P (eau/ciment) et des variations de dosage de superplastifiant (SP) sur les propriétés à l'état frais du BAP fabriqué avec différentes quantités de fibres plastiques (0%, 0,25%, 0,5%, 0,75%,

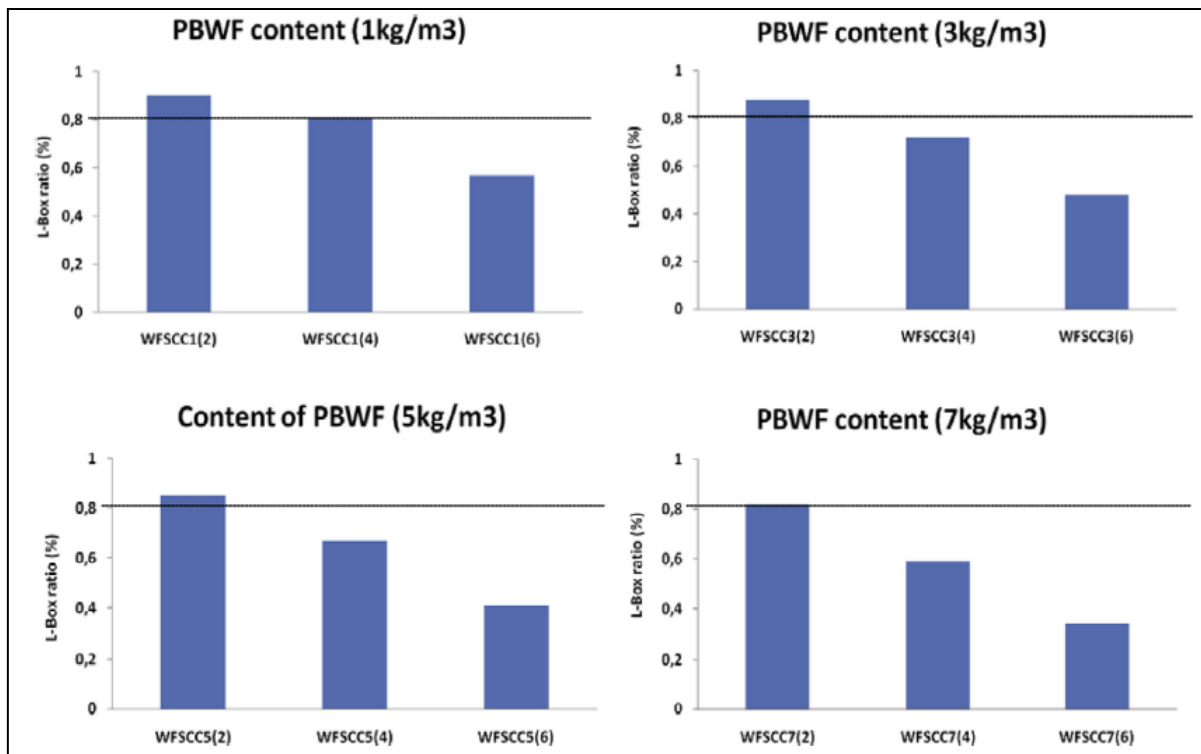
1,00%, 1,10%, 1,20%, 1,30%, 1,40%). Ils ont observé une diminution de l'ouvrabilité des mélanges avec un rapport E/P de 0,35, tandis que l'ajout de 1,1% de fibres plastiques a entraîné une augmentation de l'ouvrabilité avec un rapport E/P de 0,34 par rapport au mélange témoin et au mélange contenant 1,00% de fibres plastiques. En outre, ils ont remarqué que l'augmentation du volume des fibres plastiques entraînait une augmentation du dosage de superplastifiant.

As'ad et al. [57] ont constaté que l'incorporation de fibres plastiques dans les mélanges de béton à des proportions de 0%, 0,5% et 1,00% en volume, avec un rapport E/C (eau/ciment) et un dosage en superplastifiant (SP) fixes à 0,47 et 4 kg/m<sup>3</sup> respectivement. Les résultats ont montré une réduction de la maniabilité avec l'augmentation du dosage de fibres plastiques. Le mélange contenant 1,00% de fibres plastiques présentait la maniabilité la plus faible.

Ghernouti et al. [58] ont examiné l'efficacité de l'incorporation de fibres plastiques de trois longueurs différentes (2 cm, 4 cm et 6 cm) à divers niveaux (1, 3, 5 et 7 kg/m<sup>3</sup>) dans le BAP. Ils ont observé une légère augmentation du diamètre d'écoulement du mélange avec l'augmentation de la teneur en fibres plastiques pour les trois longueurs différentes. Cependant, ils ont remarqué une baisse notable de la capacité d'écoulement du BAP à mesure que la longueur de ces fibres augmentait.

Ils ont aussi noté que des fibres dépassant 4 cm de longueur ont entraîné l'emprisonnement des mélanges de BAP dans un espace confiné. En outre, ils ont constaté que le taux de ségrégation était inférieur à 15 % pour tous les mélanges de BAP contenant des fibres plastiques de 2 et 4 cm de longueur, ce qui témoigne d'une bonne stabilité, comme illustré dans la figure 1.16.

Mohsen Oghabi et al.[59] ont étudié l'impact de la quantité et de la longueur des fibres plastiques sur la facilité de mise en place et les propriétés mécaniques du béton autoplaçant (BAP). Ils ont formulé treize mélanges de béton avec des teneurs en fibre de 100, 250,500, and 1000g/m<sup>3</sup>, en utilisant trois longueurs différentes de fibres (1cm, 2cm, et 3 cm) et un rapport E/C constant de 0.4. Ils ont noté que la fluidité du béton était devenue plus faible que celle du mélange de référence.



**Figure 1.16:** Présente la relation entre la capacité de passage, le dosage et l'élançement des fibres (PBWF)[58].

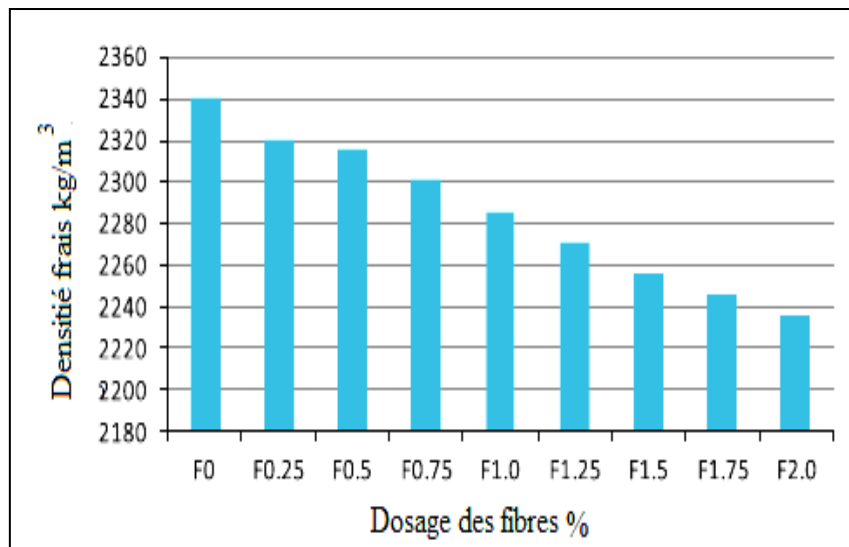
### 1.2.7. Influence des fibres sur les propriétés physiques de béton

#### A. Densité

A partir des études antérieures sur la densité du BAP contenant des fibres plastiques à l'état frais, Al-Hadithi et al. [51] ils ont observé que l'introduction de fibres plastiques entraînait une réduction de la densité du BAP, passant de  $2340 \text{ kg/m}^3$  à  $2235 \text{ kg/m}^3$  avec l'augmentation du volume de fibres plastiques dans le béton (figure 1.17). Dans une étude similaire, Pereira De Oliveira et al [60] ont examiné le comportement physique et mécanique d'un mortier renforcé par des fibres plastiques, en considérant des taux de 0,5 %, 1,0 % et 1,5 % de fibres en volume, révélant également une légère diminution de la densité attribuable à l'ajout de fibres plastiques.

Une autre étude, menée par Gencil et al. [55] a examiné l'influence des fibres de polypropylène sur la facilité de mise en place et les propriétés mécaniques du béton autoplaçant. Deux dosages de ciment différents ( $350$  et  $450 \text{ kg/m}^3$ ) ont été utilisés, tout en maintenant un rapport E/C et un dosage de superplastifiant constants. Les auteurs ont remarqué, à partir des résultats expérimentaux de cette étude, que des concentrations plus élevées de fibres entraînaient une diminution de la densité du béton.





**Figure 1.17:** Présente les densités à l'état frais et durci du BAPF [51].

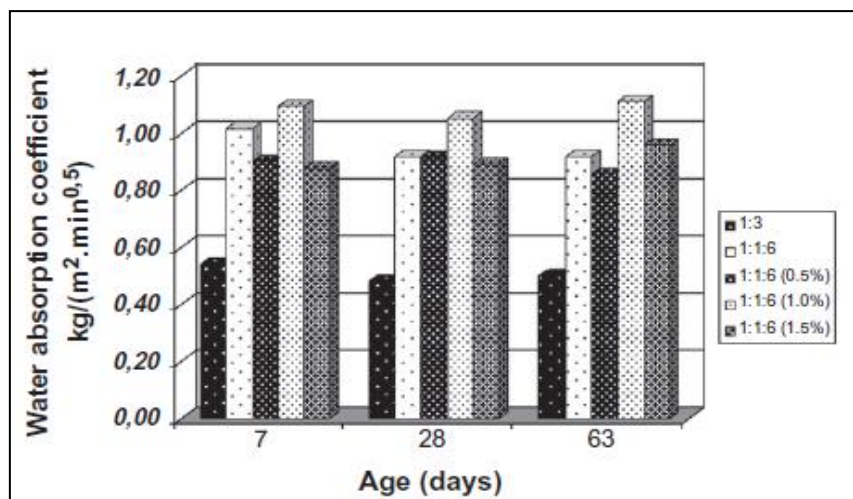
Cette étude a été menée par Hemn U. BOINY et al. [61] sur l'utilisation de bouteilles en plastique recyclées comme fibres dans la fabrication du mortier. Différentes tailles et volumes de fibres ont été utilisés dans ces mortiers (0%,0.5%,1%,1.5%,2%, et 3%). Les résultats ont montré que l'inclusion des fibres a entraîné une légère diminution de la densité, cette réduction n'excédant pas 2,0 % même pour une teneur en fibre de 3,0 %.

### **B. Absorption d'eau et porosité**

L'absorption d'eau peut être définie comme la capacité à absorber l'eau par capillarité. Ce processus est fortement influencé par les vides ou la structure poreuse présente dans la masse durcie. La région de transition entre la pâte hydratée et l'agrégat constitue l'un des principaux sites pour les vides dans le béton.[62]. Une augmentation progressive des pores vides ou interconnectés entraîne la formation de fissures et diminue la perméabilité. Les fibres discrètes de courte longueur interrompent la continuité des vides dans la zone de transition et, en raison de leur adhérence autour des agrégats, contrôlent la formation des vides. Les fibres courtes mais de grande dimension ont également un effet réducteur sur la formation de fissures dans la pâte de ciment hydratée et interrompent la propagation des microfissures. Cela contribue également à une réduction supplémentaire de la perméabilité de la masse durcie.

Luiz et al. [60] ont examiné l'influence de différents pourcentages de fibres plastiques (0.5%, 1% et 1,5%) sur l'absorption capillaire du mortier de ciment à 7, 28 et 63 jours(figure1.18). Les résultats indiquent que le mortier de référence à une diminution du coefficient d'absorption avec le temps. Ils ont noté que le mélange contenant 1.0% de fibres plastiques présentait un coefficient d'absorption plus élevés.

Debieb et al. [63] ont réalisé des tests sur l'absorption capillaire d'eau des bétons incorporant différents taux de fibres plastiques. Leurs résultats indiquent que le coefficient d'absorption d'eau diminue légèrement avec l'augmentation des fibres plastiques. Ces résultats ont enregistré une réduction d'environ 9% de l'absorption d'eau par rapport au béton de référence.



**Figure 1.18:** Le coefficient d'absorption du mortier fibres à différent d'âges [60].

Adil Abed et al. [64] ils ont également analysé le comportement des bétons renforcés par des fibres plastiques lorsqu'ils sont immergés dans l'eau. Les résultats indiquent que l'absorption d'eau augmente avec l'augmentation de la teneur en fibres jusqu'à 1,5%. Cependant, au-delà d'environ 1,5 % de fibres plastiques, le mélange commence à présenter une absorption inférieure à celui du mélange contenant 1,5% de fibres plastiques. Le taux d'augmentation de l'absorption jusqu'à 1,5 % varie entre 16,95 % à 35,37 % par rapport au mélange de référence.

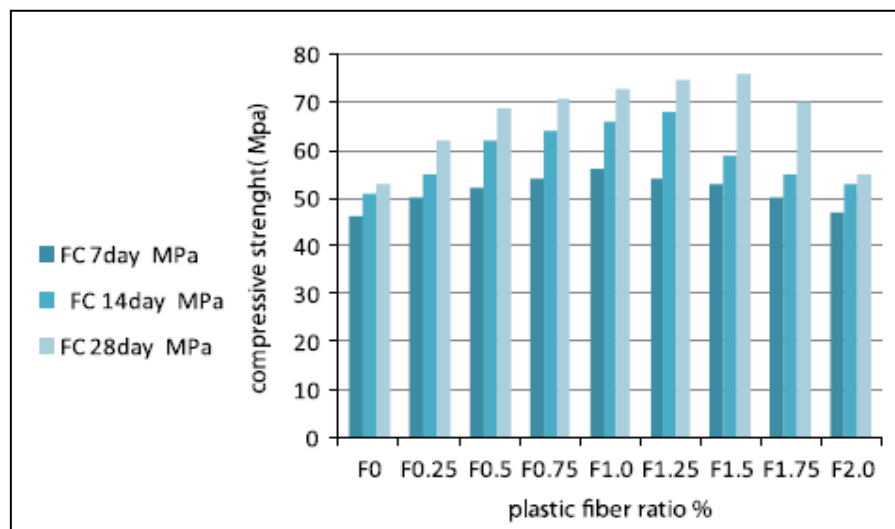
### 1.2.8. Influence des fibres sur les propriétés mécaniques de béton

L'examen des propriétés mécaniques du béton est crucial pour évaluer son rendement et sa conformité aux normes de conception des éléments structuraux. Les fibres jouent un rôle crucial dans la formation des fissures, ce qui impacte directement la rigidité et la ductilité du matériau une fois fissuré.

#### A. Résistance à la compression

Des études supplémentaires ont montré une corrélation positive entre le dosage des fibres PET et la résistance à la compression du BAP. Al-Hadithi et Hilal et al. [51] ils ont constaté une augmentation de la résistance à la compression lorsque le rapport volumique des

fibres PET est compris entre 0,25% et 1,5% (figure1.19). Cette amélioration peut être attribuée à la répartition des fibres à l'intérieur de la microstructure du BAP, ce qui conduit à une diminution des pores dans la matrice du BAP [53]. Ils ont également constaté qu'une diminution de la résistance commence à se manifester lorsque le rapport volumique est compris entre 1,75% et 2%. Cette baisse peut être attribuée à l'augmentation des pourcentages des fibres PET dans le mélange, ce qui entraîne une distribution des fibres moins homogène et une adhérence réduite entre la pâte de ciment et la surface de la fibre, créant ainsi des espaces d'air sous la fibre plastique [52].



**Figure 1.19** : L'évolution de la résistance à la compression du BAP en fonction des fibres de PET [51].

Gencel et al. [55] ont noté que l'incorporation de fibres de PP dans une fourchette de 3 à 12 kg/m<sup>3</sup> confère une résistance à la compression similaire à celle des fibres d'acier présentant un niveau de liant équivalent (figure1.20). Leur étude a également démontré que, tout en préservant contre les risques de corrosion, l'augmentation de la teneur en ciment de 350 à 450 kg/m<sup>3</sup> à un rapport eau/ciment constant entraîne une augmentation significative de la résistance à la compression du BAP. Par ailleurs, Aslani et al. [65] ont observé que l'augmentation de la fraction volumique des fibres de PP de 0,1% à 0,2% entraîne une réduction de la résistance à la compression, passant de 56,58 MPa à 46,76 MPa.

Shahidan et al.[66] ont étudié l'impact de ce type de fibres plastiques sur le comportement mécanique des bétons et ont cherché à déterminer le pourcentage optimal. Pour ce faire, les fibres ont été ajoutées au béton à des taux de 0,5%, 1%, 1,5% et 2,0% respectivement en volume de béton, avec un rapport E/C constant de 0,45. Les résultats ont

indiqué que le béton contenant 1% de fibres de PET présentait une meilleure distribution des fibres par rapport aux autres bétons à différentes concentrations de fibres au cours de l'analyse. L'incorporation de 0,5%, 1,5% et 2% de fibres a entraîné respectivement une réduction de 20%, 20% et 13% par rapport au béton de référence.

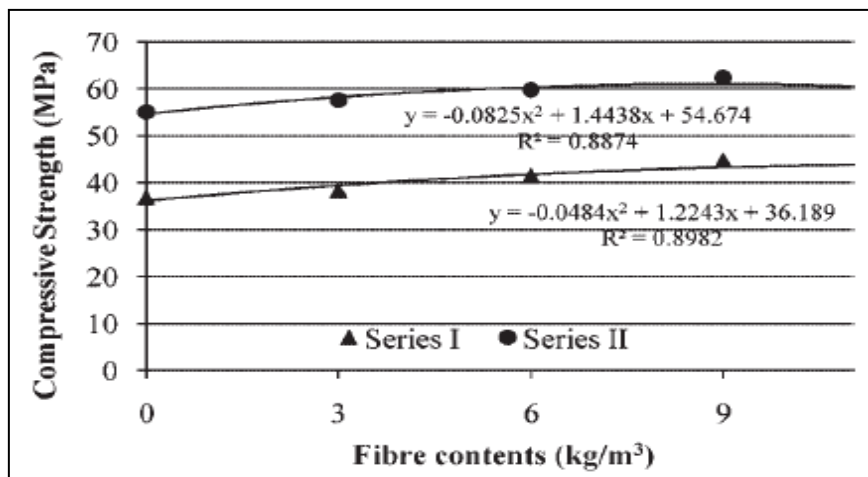


Figure 1.20 : La résistance à la compression des BAPF [55].

Sandeep et al. [67] ont étudié l'évaluation des fibres plastiques sur les propriétés à l'état frais et mécanique du béton. Les fibres ont été intégrées à des proportions de 3%, 6%, 9% et 12% en volume de béton, avec différents rapports d'aspect (RA) de 25 (50 mm / 2 mm), RA de 50 (100 mm / 2 mm) et RA de 75 (150 mm / 2 mm), tout en maintenant un rapport E/C constant de 0,4. Les résultats ont révélé une diminution de la résistance à la compression à mesure que le pourcentage de fibres et les rapports d'aspect augmentaient.

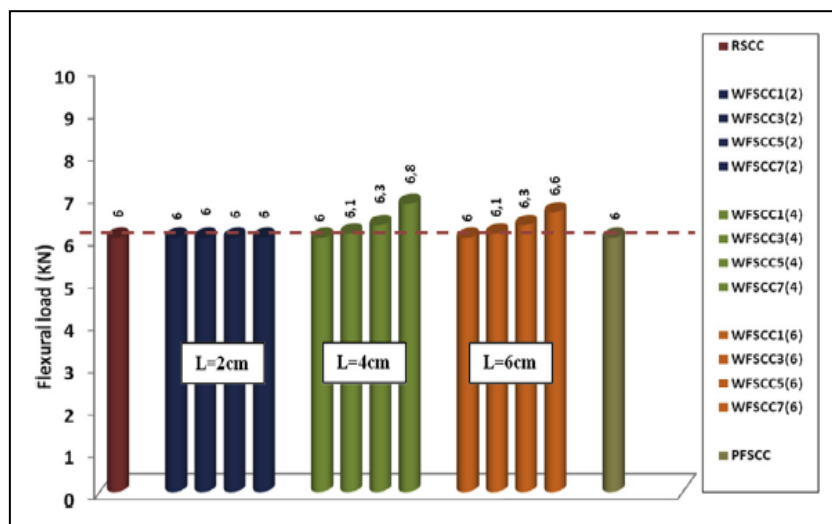
Mohammed Umar et al.[68] ont examiné la résistance et la durabilité du béton renforcé des fibres plastiques avec différentes longueurs de 10mm, 20mm et 30mm, et différents pourcentages de 0.5%,1% et 1.5%. Les résultats de la résistance à la compression après 28 jours ont montré que les fibres d'une longueur de 20 mm affichaient la résistance la plus élevée, atteignant 8,3%. De plus, la résistance optimale a été constatée à une teneur de 0,5%, au-delà de laquelle des diminutions de résistance ont été observées.

### B. Résistance à la traction et flexion

Diverses études ont confirmé que l'ajout de fibres plastiques (FP) dans les BAPF entraîne une augmentation de leur résistance à la traction. Ghernouti et al. [58] ont examiné l'effet de différentes longueurs et doses de fibres PBWF sur la résistance à la traction du BAPF. Leurs résultats ont montré une résistance à la traction supérieure pour le BAPF par rapport au béton témoin, et cette résistance a augmenté avec la quantité de fibres (PBWF). À une dose de

7 kg/m<sup>3</sup>, cette résistance a augmenté respectivement de 67,74% et de 70% avec des longueurs de fibres de 2,4 cm et 6 cm (voir figure 1.21). Cette amélioration était attribuée au fait que les fibres plastiques pouvaient empêcher la propagation rapide des fissures.

Cependant, en ce qui concerne la résistance en flexion, il a été conclu que l'utilisation de ces fibres courtes d'une longueur de 2cm dans le BAP n'avait aucun effet sur sa résistance, quel que soit le dosage de ces fibres (figure 1.21). En revanche, une amélioration de la résistance d'environ 14% à 11% a été observée pour un mélange contenant des fibres d'une longueur de 4 et 6cm avec une quantité de 7kg/m<sup>3</sup>. Cette amélioration s'explique par la forte liaison entre les fibres et la matrice cimentaire, ainsi que par les contraintes locales induites par la présence de ces fibres, qui agissent de manière oblique et verticale contre les microfissures [58].



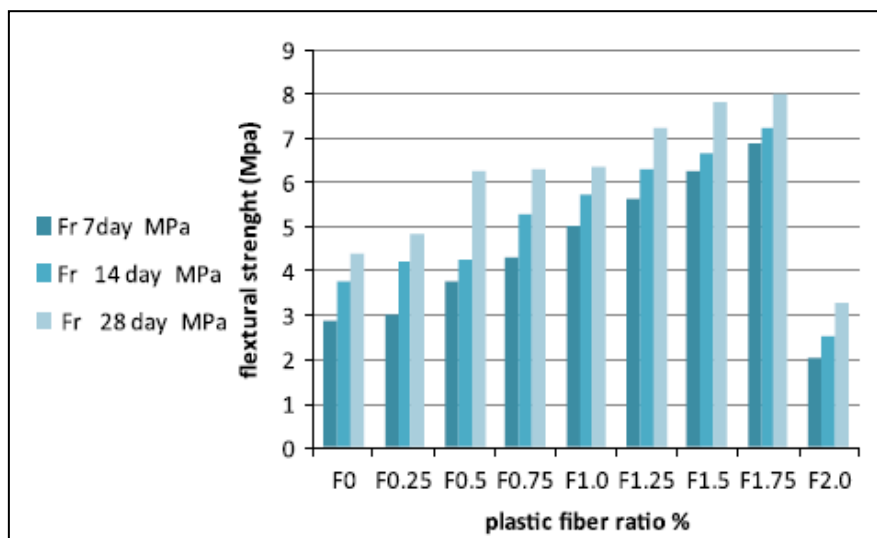
**Figure 1.21:** L'évolution de la résistance à la traction par flexion des BAPF à 28 jours [58].

Corinaldesi et al. [69] ont étudié le comportement mécanique en flexion de bétons sous l'influence de trois types de fibres différentes, à savoir l'acier, le polyalcool vinylique (PVA) et le polypropylène haute ténacité (PPHT). Les quantités utilisées étaient de 50 kg/m<sup>3</sup> pour les fibres d'acier, 5 kg/m<sup>3</sup> pour les fibres PPHT et 10 kg/m<sup>3</sup> pour les fibres PVA dans différents mélanges de BAP. Ils ont montré que les fibres d'acier étaient efficaces pour améliorer le comportement en flexion par rapport aux fibres polymères.

Mohamad et al.[70] ont étudié la résistance à la traction par flexion du béton contenant des fibres PET, à des concentrations variant de 0,5% à 2% en volume de béton. La résistance à la flexion a été évaluée à deux moments différents, soit à 7 et à 28 jours. Leurs résultats ont révélé une amélioration de la résistance à la flexion d'environ 6% à 28 jours avec l'ajout de 0,5% de fibres, tandis que pour des concentrations en fibres de 1%, 1,5% et 2%, une résistance

inférieure à celle du béton témoin a été enregistrée. L'incorporation de 0,5% de fibres a été déterminée comme la teneur optimale pour la résistance.

D'après Al-Hadithi et Hilal et al. [51] il a été démontré que l'augmentation de la quantité de fibres plastiques améliore le comportement en flexion du mélange jusqu'à ce que le volume des fibres atteigne 1,75% (figure 1.22). Par conséquent, l'accroissement de la concentration en fibres dans le Béton Auto-Plaçant (BAP) peut prévenir la formation de microfissures dans la matrice fragile et renforcer la résistance à la traction en flexion grâce à la dispersion des fibres. Cependant, une réduction de la résistance en flexion a été observée lorsque la teneur en fibres atteint 2%. Cette diminution pourrait être due à une insuffisance de matrice autour des fibres pour assurer le transfert adéquat des contraintes du béton vers les fibres par liaison [71].



**Figure 1.22 :** Évolution de la résistance à la traction en flexion des BAPF [51].

Dans leur étude, Namakula Hidayat et al. [72] ont constaté que l'inclusion de 1% de fibres de PET améliore la résistance à la traction du béton à la fois à 7 jours et à 28 jours. Ils ont effectué des mélanges de béton avec différentes proportions de fibres, à savoir 1%, 2% et 3%. Une augmentation progressive de la résistance a été observée au fil du temps. De plus, l'ajout de 1% de fibres de PET dans le mélange a entraîné une augmentation de 7.1% par rapport au béton de référence, tandis que l'incorporation de 2% et 3% de fibres de PET a entraîné une diminution de 3% et 11.2% respectivement.

Vijaya et al. [56] ont étudié l'utilisation des fibres plastiques dans la fabrication de BAP. Ils ont élaboré neuf mélanges de béton contenant des volumes de fibre variant de 0% à 1.4% (figure 1.23). Les résultats ont démontré que la résistance moyenne à la rupture augmente avec l'augmentation du pourcentage de fibres jusqu'à 1,0%. Cependant, après l'ajout de 1,1% de

fibres, la résistance à la rupture du béton semble diminuer. La résistance à la traction maximale observée dans le cadre de cette étude était de 4.59 Mpa

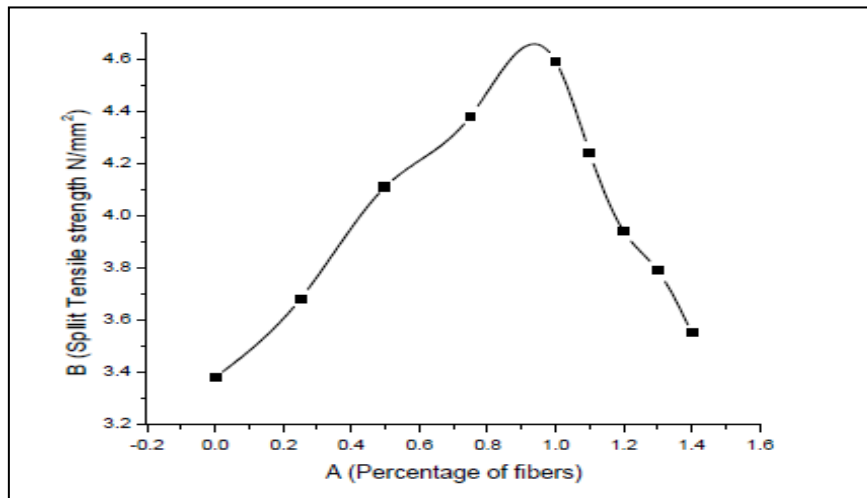


Figure 1.23 : La variation de résistance à la traction des BAPF [56].

### C. Module d'élasticité

Il existe plusieurs études portant sur l'impact des fibres plastiques sur le module d'élasticité (ME) du béton. Al-Hadithi et Hilal et al. [53] ont examiné l'utilisation de différents volumes de fibres plastiques de type PET dans le BAP. Selon cette récente étude, ils ont démontré que l'incorporation des fibres dans le BAP a permis d'améliorer le module d'élasticité de tous les mélanges par rapport au mélange de référence. Les mélanges contenant de 0,25% à 1% de fibres ont montré une augmentation du module d'élasticité d'environ 3% à 4%, tandis que les mélanges contenant plus de 1% ont montré une augmentation moins significative.

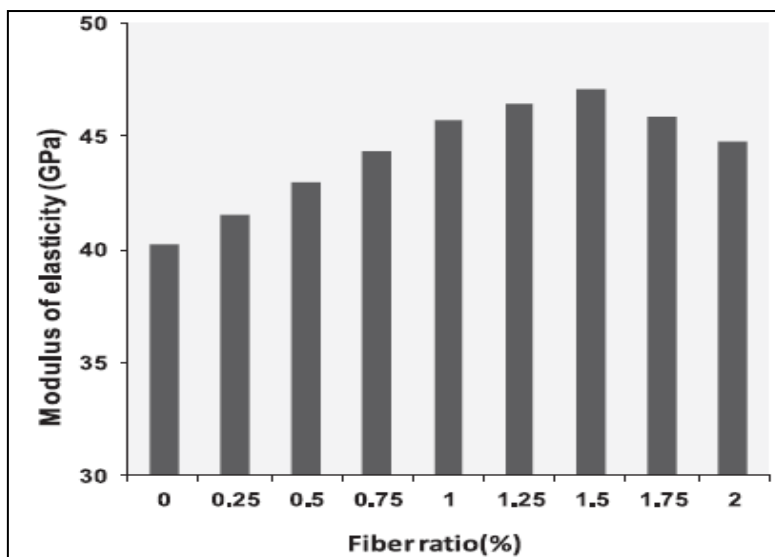


Figure 1.24 : La variation de module d'élasticité des BAPF [53].

Laith et al. [73] ont rapporté les résultats du module d'élasticité à l'âge de 28 jours de durcissement. Ces résultats ont montré une diminution de 27,93 %, 27,1 %, 23,2 % et 7,19 % pour les mélanges de béton avec 0,5 %, 1,0 %, 1,5 % et 2,0 % de fibres plastiques respectivement. Allawi et al. [74] ont évalué le module d'élasticité statique des bétons contenant 0 %, 0,5 %, 1,5% et 2% de fibres plastiques en volume. Les résultats du module d'élasticité ont démontré que le béton contenant 1.5 % de fibres plastiques a subi une réduction significative de 17% à 28 jours.

Lisa Mary Thomas et al. [75] ont examiné l'impact des fibres plastiques sur les propriétés mécaniques du béton. Leurs observations ont révélé que l'ajout de fibres dans le béton a entraîné une amélioration du module d'élasticité. Les valeurs du module d'élasticité, allant de 36,7 à 50,5 GPa, ont été obtenues dans cette étude, avec un maximum de 50,5 GPa pour le béton produit avec une teneur en fibres de 0,4 %. Les résultats indiquent que cette amélioration du module d'élasticité est observée à des taux de fibres plus bas, compris entre 0,2 et 0,4 %.

### 1.2.9. Influence des fibres sur la durabilité des bétons

#### A. Retrait au séchage

Kim et al. [42] ont étudié l'influence de trois types de fibres plastiques à base de PET sur le retrait plastique. Ils ont constaté que le béton présente moins de retrait total à un jeune âge lorsqu'une quantité de 0,25% de fibres par volume est utilisée, par rapport aux mélanges de référence. Ces chercheurs ont évalué la performance de rétrécissement des fibres de PET en la comparant à celle des mélanges de contrôle. Ils ont comparé les performances des fibres de PET à celle du polypropylène (PP) et ont observé un comportement légèrement meilleur pour les composites contenant 0,5% de fibres de PP.

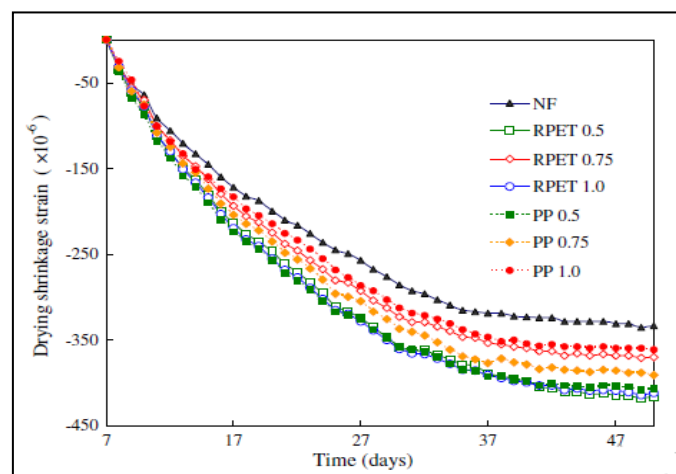


Figure 1.25: Variation du retrait de séchage pour des bétons renforcés de fibres[42].



### B. Résistance à la pénétration aux ions chlorures

L'infiltration de chlorure peut causer la corrosion de la matrice durcie ainsi que des barres d'armature, ce qui entraîne une diminution de la résistance due à la dégradation des agrégats de pâte hydratée. De plus, la pénétration des ions chlorure favorise également la formation de fissures et entraîne une augmentation de la teneur en humidité, ce qui a un effet secondaire sur la masse de béton à l'état durci.

Vijaya et al. [56] ont étudié les propriétés mécaniques et physiques après une immersion totale dans une solution de chlorure de magnésium pendant 30, 60 et 90 jours. Ils ont observé une diminution des résistances à la traction et à la compression. Il a été noté que la réduction de la résistance à la compression diminue à mesure que le pourcentage de fibres augmente.

Krishnamoorthy et al. [76] ont étudié la résistance à la compression du béton après une immersion de 90 jours dans l'acide et le chlorure. Ce béton comprenait des fibres plastiques avec des concentrations de 0,5%, 1% et 1,5% en volume, ainsi que trois rapports d'aspect différents (0,15%, 0,3% et 0,45%). Les résultats indiquent que le béton avec une concentration de fibres plastiques de 1,00% et un rapport d'aspect de 0,45 présentait une meilleure résistance à l'acide et à l'attaque au chlorure. Le taux de perte de résistance pour tous les mélanges se situait entre 10,3% et 15,5%, et une diminution des coefficients de diffusion apparents a été observée avec l'augmentation de la teneur en fibres. Ils ont remarqué que la pénétration se situait entre 1760 et 1789 coulombs (voir la figure 1.26).

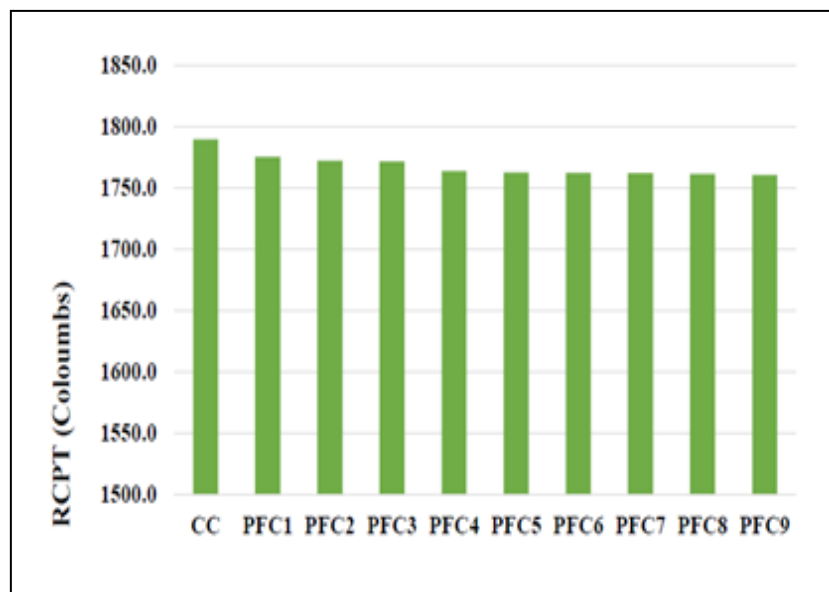


Figure 1.26 : Evolution de la pénétration des ions  $Cl^-$  [76].

Bhogayata et al. [50] ont mis en évidence l'effet de l'ajout de fibres sur la pénétration des ions chlorure à travers des échantillons en forme de disque. Les fibres de courte longueur de type A ont montré une réduction significative de la pénétration des ions chlorure, atteignant jusqu'à 8%, 17%, 5% et 4% pour des doses de 0,5% à 2% respectivement. D'autres variétés de fibres, telles que les types B et C, ont également réduit l'infiltration de chlorure, bien que à un rythme moins élevé.

### **C. Attaque de sulfate et d'acide**

Bhogayata et al. [50] ont étudié le comportement de résistance du béton aux effets du sulfate et de l'acide, en utilisant différents dosages et des fibres de tailles variables. Une diminution de la résistance a été constatée en raison de leur présence. Cette réduction de la résistance était moins significative dans le cas des éprouvettes durcies exposées au sulfate et renforcées par des fibres, par rapport aux éprouvettes en béton durci exposées à l'acide. Cette différence pourrait s'expliquer par le fait que les fibres peuvent limiter l'expansion de la masse durcie en réduisant les fissures qui se forment dans la matrice à cause de l'entrée de sulfate.

### 1.3. Béton à Base de Granulats Recyclés

Ses performances, ses propriétés et sa polyvalence ont suscité un intérêt croissant. La forte demande de béton a entraîné une exploitation intensive des composants du béton, en particulier les granulats provenant de ressources naturelles. Cela a conduit à l'épuisement de ces ressources et à des problèmes environnementaux. En conséquence, les chercheurs se sont tournés vers le développement de ressources durables au sein de l'industrie de la construction, en explorant de nouvelles applications innovantes et non conventionnelles pour les matériaux recyclés.

En réalité, la production de déchets de construction et de démolition entraîne la génération d'environ 1300 millions de tonnes de déchets chaque année en Europe. Parmi ceux-ci, environ 40%, soit 510 millions de tonnes, proviennent spécifiquement du secteur de la construction et de la démolition. Aux États-Unis, environ 325 millions de tonnes de déchets sont produits, tandis qu'au Japon, ce chiffre s'élève à environ 77 millions de tonnes. Étant donné que la Chine et l'Inde représentent à elles seules 50% de la production mondiale de béton, la situation est encore plus complexe.

#### 1.3.1. Définition et description du granulats recyclé

Le granulats recyclé (GR) est issu du recyclage de débris provenant de la démolition, généralement obtenu en concassant le béton d'anciennes structures civiles. Ce matériau doit être envisagé comme un système composé de deux phases distinctes : le mortier et le granulats d'origine [77]. La quantité de mortier résiduel attachée au granulats d'origine a un impact significatif sur les caractéristiques du granulats recyclé [78], ce qui en fait un aspect crucial pour évaluer sa qualité.

#### 1.3.2. Caractéristique des granulats recyclés

La présence de certaines particules sur les granulats issus du recyclage du béton est responsable des différences de comportement observées entre les granulats de béton recyclés et les granulats naturels. Ceci est dû à la présence d'une couche de mortier ancien qui adhère aux granulats naturels d'origine, altérant ainsi diverses propriétés du granulats. Les caractéristiques examinées dans cette partie comprennent la répartition des tailles de particules, la densité, l'absorption d'eau et la résistance à l'abrasion.

### A. Distribution granulométrique

En général, la distribution granulométrique des granulats recyclés (GR), qui fait référence à la répartition des dimensions, diffère de celle des granulats naturels (GN) [78][79], et cette disparité est évaluée à travers une analyse granulométrique par tamisage. Néanmoins, dans de nombreuses études, les granulats recyclés (GR) sont obtenus par des processus de broyage et de criblage. Ainsi, la taille des GR est généralement déterminée par les limites de granulométrie du broyeur utilisé et est étroitement associée à la qualité initiale du béton. Un béton de plus faible résistance conduit souvent à une teneur en fines plus élevée[80]. Cela implique que les granulats recyclés contiennent plus de particules fines que les granulats naturels. Toutefois, cette différence de taille des particules peut contribuer à une réduction du volume total des vides entre les granulats.

### B. Densité/Masse volumique

Plusieurs études ont signalé que la densité des granulats recyclés (GR) est inférieure à celle des granulats naturels (GN)[80][81], ce qui influe directement sur la densité du béton contenant ce type d'agrégats. La densité relative des granulats recyclés se situe généralement entre 2,4 et 2,5 (2400 kg/m<sup>3</sup> à 2500 kg/m<sup>3</sup>), tandis que celle des granulats naturels avoisine 2,75 (2750 kg/m<sup>3</sup>). Cette diminution relative de la densité est attribuable à la présence de vieux mortiers attachés aux particules d'agrégats recyclés, qui ont une masse volumique plus faible que celle de l'agrégat d'origine. Par conséquent, cela réduit la masse volumique totale du granulat recyclé[80].

### C. Absorption d'eau

La capacité d'absorption d'un granulat est directement liée à sa porosité accessible à l'eau. Les recherches ont révélé que les granulats recyclés (GR) présentent des taux d'absorption d'eau nettement supérieurs à ceux des granulats naturels (GN) [77][80][82], en raison de la présence d'une grande quantité d'ancien mortier collé et de pâte de ciment. Un taux élevé d'absorption d'eau indique la présence d'une quantité importante de mortier résiduel, ce qui a un effet significatif sur les caractéristiques du béton préparé avec ce type de granulat. Les taux d'absorption des granulats recyclés se situent généralement entre 3 et 10 %, tandis que pour les granulats naturels, ils sont souvent inférieurs à 1 %, bien qu'ils puissent atteindre jusqu'à 5 % dans certains cas[83].

Cette caractéristique revêt une importance particulière car elle influe sur la quantité d'eau nécessaire à ajouter au mélange pour obtenir une consistance spécifique. Compte tenu de la plus grande capacité d'absorption du granulats recyclés par rapport au granulats naturels, la quantité d'eau qu'il retient à l'état saturé est considérablement augmentée. Par conséquent, il est essentiel d'ajuster la quantité d'eau ajoutée au mélange afin de maintenir le même rapport E/L.

### **D. Dureté (Résistance à l'abrasion)**

De manière analogue aux granulats naturels (GN), la résistance à l'abrasion des granulats recyclés (GR) peut être évaluée à l'aide de paramètres tels que le coefficient Los Angeles, le coefficient micro-Duval et le coefficient de friabilité (pour la fraction fine). Lorsqu'ils sont soumis à l'abrasion, tout le mortier résiduel attaché au granulats d'origine se détache de celui-ci. La perte de masse résultant de l'abrasion est plus prononcée pour les granulats recyclés (GR) que pour les granulats naturels (GN). Cette différence souligne le lien direct entre la résistance des granulats et la quantité de mortier résiduel[84].

Selon la littérature, ce coefficient serait d'environ 20 à 30 % pour un granulats recyclés. La perte de masse due à l'abrasion pour un granulats recyclés serait d'environ 14 à 22 %, ce qui est généralement inférieur[85]. Cela s'explique principalement par la faible résistance du mortier résiduel[86].

### **E. Porosité**

La porosité des granulats recyclés est considérablement supérieure à celle des granulats naturels, ce qui se traduit par un volume de pores plus élevé et une capacité d'absorption d'eau plus forte [87]. Cette caractéristique est attribuable à la présence importante de pâte de ciment provenant du mortier ancien qui adhère aux granulats recyclés.

Grâce à des analyses microscopiques, Khoshkenari et al. [87] ont démontré que la surface texturée des granulats recyclés (GR) présente un grand nombre de pores par rapport aux granulats naturels (GN). Ces pores sont formés à partir des granulats naturels et de la pâte de ciment, ce qui diminue la résistance du matériau et limite l'utilisation de ces granulats recyclés dans la production de béton. Cela entraîne une porosité significative dans les bétons contenant des granulats recyclés.

### **F. Teneur en mortier résiduel**

La fraction de béton recyclé constituée de mortier résiduel représente la quantité de pâte de ciment ancienne qui reste attachée aux granulats naturels après le concassage du béton

démoli. La proportion de mortier résiduel est un élément crucial pour la qualité des granulats recyclés, car ses caractéristiques sont étroitement liées à celles-ci et influencent les propriétés du béton contenant ces granulats recyclés. Plusieurs chercheurs ont adopté différentes approches pour quantifier la quantité de l'ancien mortier qui entoure les granulats naturels primaires dans les granulats recyclés.

La technique de dissolution dans l'acide nitrique consiste à immerger le granulats recyclés dans une solution diluée d'acide nitrique chauffée pendant deux heures, ce qui entraîne progressivement la dissolution de la matrice cimentaire entourant les granulats. Une concentration de 20% en volume est utilisée pour favoriser la dissolution du mortier [88]. Cette méthode peut entraîner la désagrégation du granulats d'origine ainsi que du mortier, permettant ainsi d'évaluer la quantité de pâte de ciment en fonction de la perte de masse observée.

La méthode de gel/dégel consiste à immerger les granulats dans une solution de sulfate de sodium à une concentration de 20%. Ce processus comprend cinq cycles de gel/dégel par jour, où les granulats sont exposés à des conditions de gel pendant 16 heures à  $-17^{\circ}\text{C}$ , suivies d'une période de dégel de 8 heures dans un four à  $80^{\circ}\text{C}$ . Ensuite, les granulats sont lavés et placés dans une étuve pendant 24 heures à  $105^{\circ}\text{C}$ . Cette méthode combine des attaques chimiques et des contraintes mécaniques résultant du gel, favorisant ainsi le détachement du mortier des granulats [89].

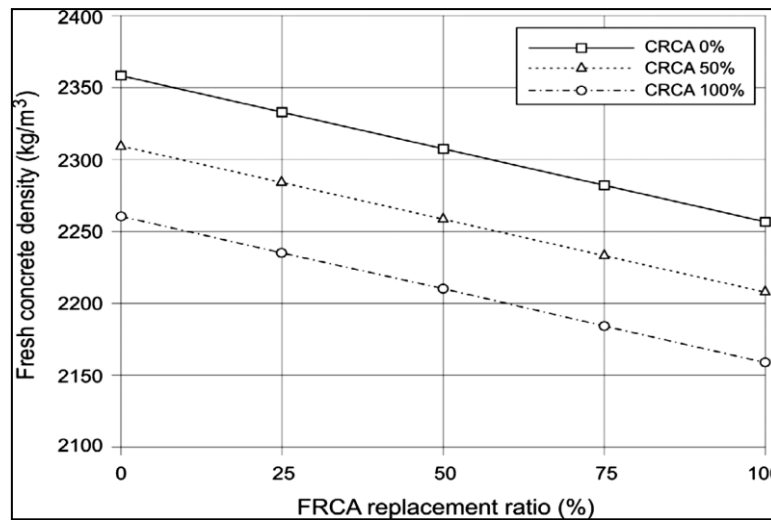
La méthode de l'expansion thermique consiste à soumettre les granulats à des variations brusques de température. Pour ce faire, les granulats sont immergés dans l'eau pendant une période de 24 heures, puis exposés à une température de  $500^{\circ}\text{C}$  dans un four pendant deux heures. Ensuite, ils sont retirés et rapidement plongés dans l'eau froide, ce qui provoque une diminution rapide de leur température. Cette technique repose sur l'utilisation de la chaleur pour induire des changements de température et des contraintes thermiques internes. Une fois refroidi, le mortier devient fragile et peut être facilement détaché [84]. Cette approche semble être la plus efficace pour séparer le mortier des granulats, car près de 100 % du mortier résiduel est détaché du granulats recyclés. [90].

### 1.3.3. Influence des granulats recyclés à l'état frais de béton

#### A. Densité

La densité des mélanges de béton à l'état frais diminue progressivement à mesure que les taux de substitution des granulats recyclés grossiers (GRG) et des granulats recyclés fins (GRF) augmentent. On observe une diminution de la densité d'environ 3,2%, 5,3% et 7,4%

respectivement pour les bétons utilisant des granulats de béton concassé grossier, par rapport au béton de référence constitué à 75% de granulats recyclés fins (GRF). De plus, cette diminution atteint 8,5 % pour les deux taux de substitution de 100 % de granulats recyclés grossiers (GRG) et fins (GRF), par rapport au béton naturel. Cette variation de densité est principalement attribuable à la présence du vieux mortier de ciment adhérent [91].



**Figure 1.27:** Présente l'évolution de la densité des mélanges de béton à l'état frais[91].

En ce qui concerne la densité, Manzi et al. [92] ont rapporté que la densité en vrac frais du béton autoplaçant à base de granulats recyclés était inférieure à celle du béton vibré conventionnel, et également plus basse que la densité en vrac frais du BAP fabriqué avec des granulats naturels. Ils ont obtenu une valeur de  $2,22 \text{ g/cm}^3$  avec une substitution de 100 % des granulats grossiers et une densité de  $2,28 \text{ g/cm}^3$  pour un taux de substitution de 20 à 40 %, en comparaison avec la valeur de  $2,34 \text{ g/cm}^3$  du béton de référence. Ce résultat a été attribué à la faible densité des granulats recyclés, principalement due au mortier qui y est attaché.

### B. Ouvrabilité

Plusieurs études ont montré que la réduction de la fluidité peut être attribuée aux facteurs suivants: teneur plus élevée en matériaux pulvérulents présents dans les granulats recyclés, ce qui augmente la demande en eau dans le mélange [93][94]; la forme et la texture plus angulaires rugueuses des particules, qui contribuent à un emboîtement et à un frottement plus importants entre les grains[95][96]; la plus grande capacité d'absorption d'eau de ces granulats par rapport aux granulats naturels, ce qui diminue la quantité d'eau de ces granulats par rapport aux granulats naturels, ce qui diminue la quantité d'eau libre disponible dans le mélange [97][98][96].

Dans leur étude, Güneyisi et al.[91] ont observé une amélioration de la capacité de passage et de remplissage du mélange avec l'augmentation de la quantité de granulats recyclés fins et grossiers. Ils ont préparé un Béton Autoplaçant (BAP) en utilisant des proportions de 50 % et 100 % de granulats recyclés grossiers (GRG), avec des ajouts de fines recyclées de 25 %, 50 %, 75 % et 100 %. Cela a conduit à une augmentation du diamètre d'étalement, variant entre 70 et 76 cm, ainsi qu'à une diminution du temps d'écoulement T50 en raison de la surface lisse et d'un rapport de remplissage supérieur à 0,8, comme illustré dans la figure 1.28. En opposition à cela, Omrane et al.[77] ont démontré qu'un taux de substitution de 50 % des GR (grosier et fin) dans les mélanges de BAP permet d'atteindre des propriétés rhéologiques similaires à celles du BAP à base de GN.

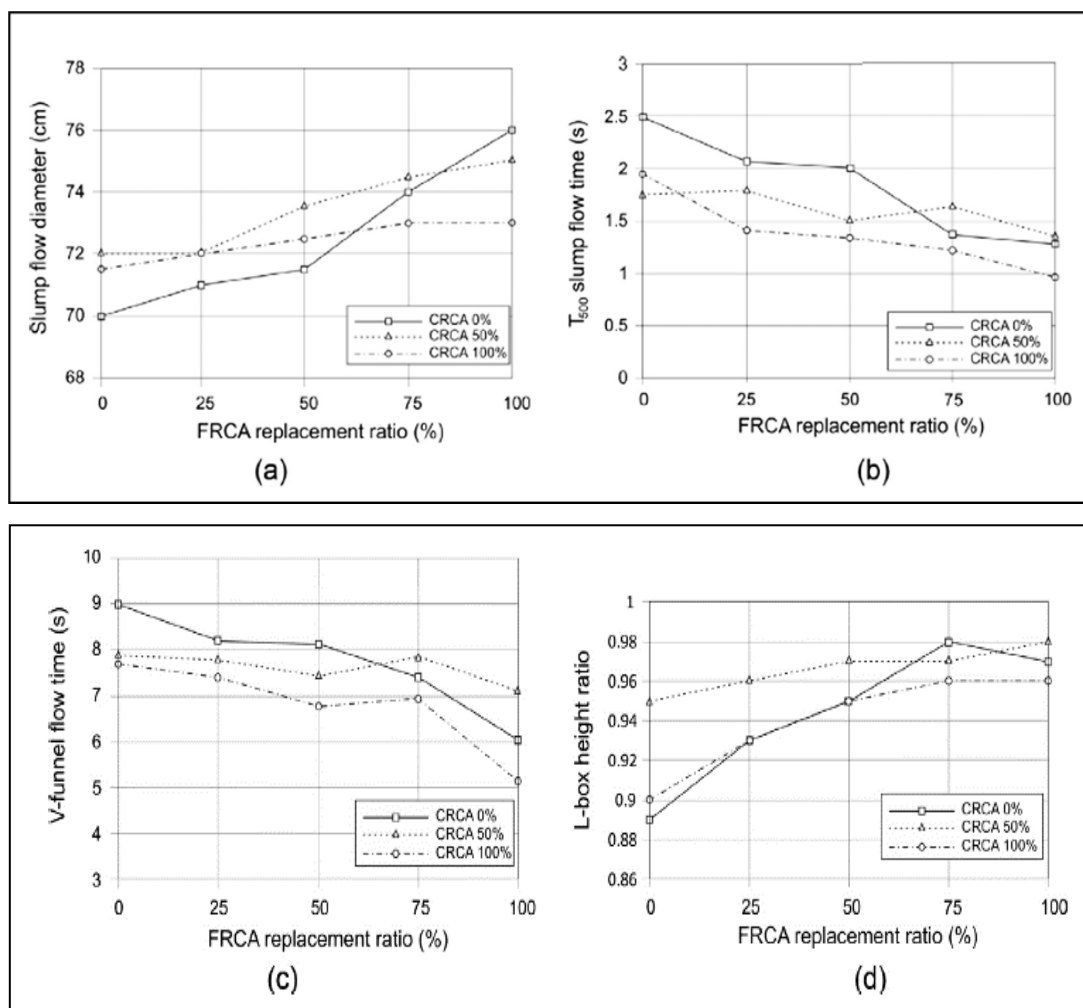


Figure 1.28 : Évolution de la capacité de remplissage et de passage des BAP [91] .

Carro-López et al. [97] ont étudié la diminution de l'aptitude au placement du BAP à différents moments après le malaxage, soit à 15, 45 et 90 minutes. Leur analyse s'est concentrée sur l'utilisation de granulats recyclés fins (GRF) dans ces mélanges, à travers des tests



d'étalement, de la boîte en L et du J Ring. Ils ont observé une réduction du diamètre d'étalement et de la vitesse d'écoulement à mesure que la proportion de GRF augmentait, ceux-ci remplaçant les granulats naturels fins (GNF) à tous les intervalles considérés (voir figure 1.29). Ils ont remarqué que les mélanges avec 0 % et 20 % de substitution présentaient un comportement similaire, tandis que ceux avec 50 % et 100 % de substitution montraient une forte diminution après 45 minutes. Cette perte est due à l'absorption élevée des GRF, qui retirent l'eau de la pâte, entraînant une détérioration progressive de ces deux propriétés pour toutes les proportions de remplacement ainsi que pour le béton de référence.

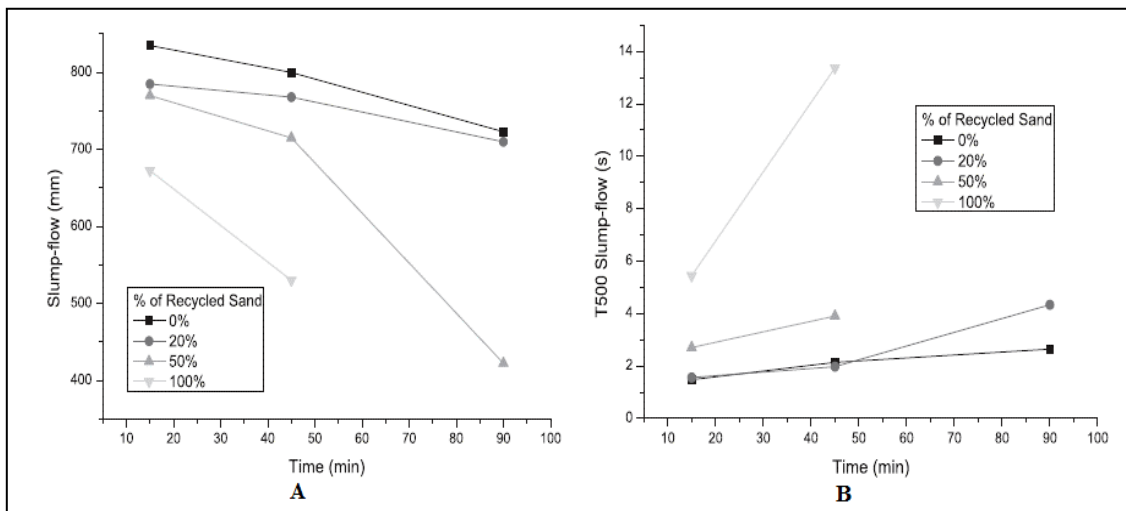


Figure 1.29 : Effet des GRF sur l'étalement (A), temps d'écoulement T50(B) [97].

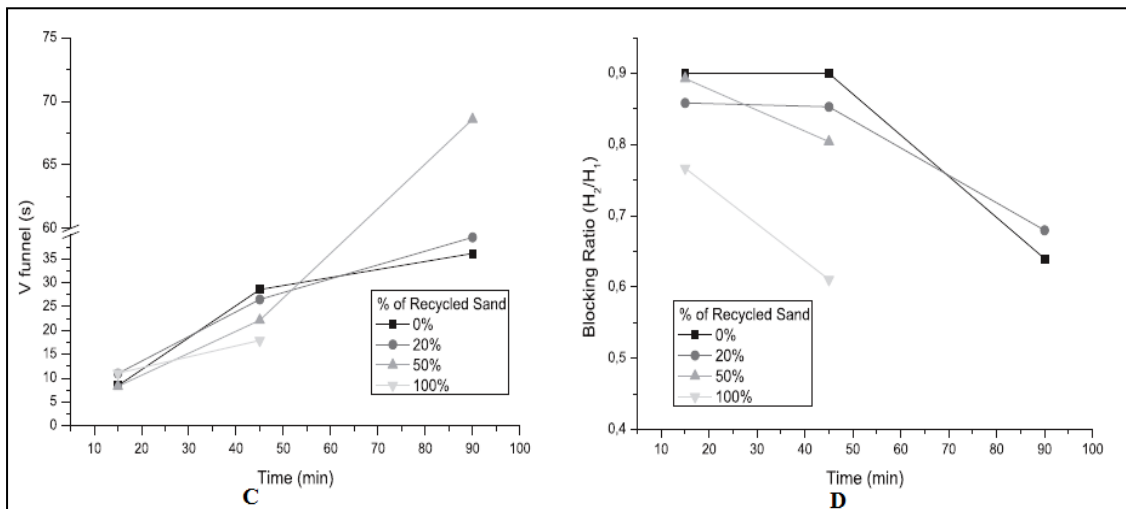


Figure 1.30 : l'effet des GRF sur le temps d'écoulement  $T_{Vf}$ (C) et le rapport d'hauteur L-box (D) des BAP [97].

Campos et al. [99] ont étudié un BAP avec les granulats recyclés grossier et / ou fins dans différentes combinaisons (0 % et 20 %). Ils ont également modifié les quantités de

superplastifiant et les rapports E/C. Leurs résultats ont montré que les bétons autoplaçants utilisant des granulats recyclés présentaient un comportement satisfaisant à l'état frais (voir tableau 1.4). Ils ont constaté que le diamètre d'écoulement appartenait aux classes SF<sub>1</sub> et SF<sub>2</sub>. En ce qui concerne le paramètre T<sub>500</sub>, il a été noté que tous les bétons entraient dans la même classification, VF<sub>1</sub>, selon la norme [17], avec un temps d'écoulement inférieur à 2,0 s. De plus, les résultats étaient conformes en ce qui concerne le temps d'écoulement dans le V-Funnel et la capacité de passage (L-box). En ce qui concerne la ségrégation statique, il a été constaté que tous les mélanges présentaient un bon comportement, avec une ségrégation inférieure à 15 % lors de l'essai de tamis du ségrégation, ce qui les classait dans la catégorie SR2 selon la classification [17].

De plus, les variations constatées dans ces tests peuvent être imputées aux propriétés distinctives des granulats recyclés, telles qu'une proportion plus élevée de fines, une capacité d'absorption d'eau supérieure et des différences dans la morphologie des particules, ce qui a tendance à réduire la fluidité des mélanges. Cependant, cette problématique pourrait être corrigée en augmentant la concentration de superplastifiant et en ajustant le rapport E/C.

**Tableau 1.4 :** Les valeurs de certain propriété des BAPR [99].

|                         | GRG(%) | GRF(%) | E/C  | SP(%) | Daimètre slump flow(mm) | T500(s) slump flow | TV(s) V-Funnel | H2/H1 L-box(%) | Ségrégation (%) |
|-------------------------|--------|--------|------|-------|-------------------------|--------------------|----------------|----------------|-----------------|
| <b>Campos et al[20]</b> | 0      | 0      | 0.45 | 0.47  | 655                     | 1.17               | 3.30           | 0.87           | 9.50            |
|                         | 0      | 20     | 0.48 | 0.55  | 670                     | 1.80               | 3.99           | 0.85           | 4.61            |
|                         | 20     | 0      | 0.46 | 0.60  | 690                     | 1.53               | 3.42           | 0.84           | 12.83           |
|                         | 20     | 20     | 0.49 | 0.70  | 625                     | 0.81               | 3.20           | 0.91           | 12.27           |
|                         |        |        |      |       | SF[660-850]             | [0.8-3.8]          | [5-25]         | ≥0.8           | ≤15             |

González-Taboada et al. [100] ont analysé les différentes situations des GR dans les BAP en utilisant trois méthodes : M1 (agrégat sec avec ajout d'eau), M2 (agrégat pré-trempe) et M3 (agrégat avec une humidité de 3% et ajout d'eau). Ces bétons ont été conçus avec différents pourcentages des granulats grossiers recyclés (20, 50 et 100%). Ils ont conclu que le dosage d'eau supplémentaire ajouté pour compenser l'absorption élevée d'eau des GR n'entraîne pas changements significatifs dans le comportement à l'état frais du BAP (comparativement à 0%) jusqu'à 45 min. Cependant, 90 minutes, il y a une perte d'ouvrabilité

avec un encombrement de 100% des GR, déterminée à l'aide des essais d'étalement, du test L-box et de la résistance à la ségrégation. Par la suite, ils ont mis en évidence que le béton contenant 20% de GR présente des caractéristiques comparables à celles du béton de référence.

L'examen des techniques de mélange M1 et M3 révèle que l'incorporation d'agrégats grossiers recyclés préalablement humidifiés pose le plus de défis en termes de maîtrise de la maniabilité, surtout pour des taux élevés d'utilisation d'agrégats recyclés (50 % et 100 %). En ce qui concerne la méthode M2, bien que les bétons réalisés avec cette méthode tendent à respecter les limites cibles, leur tendance à l'agglutination est évidente pour des pourcentages élevés de remplacement.

Kouider Djelloul et al. [101] ont mené une étude sur l'impact des GR (grossiers et fins) sur les caractéristiques des BAP à l'état frais. Leurs recherches ont révélé une amélioration de la capacité de remplissage lors d'un taux de substitution des granulats recyclés de 25 % et 50 %. Cependant, une diminution de la capacité de remplissage a été observée lorsque la proportion de granulats recyclés est passée à 75% et 100% (au-delà de 50%). Les résultats du rapport L-box des mélanges de béton autoplaçant à base de granulats recyclés se situaient entre 0,80 et 1,00, ce qui indique une capacité de passage satisfaisante selon les recommandations de l'EFNARC[17]. Les résultats des tests de résistance à la ségrégation par tamisage ont démontré que tous les mélanges contenant des granulats recyclés conservaient une stabilité suffisante.

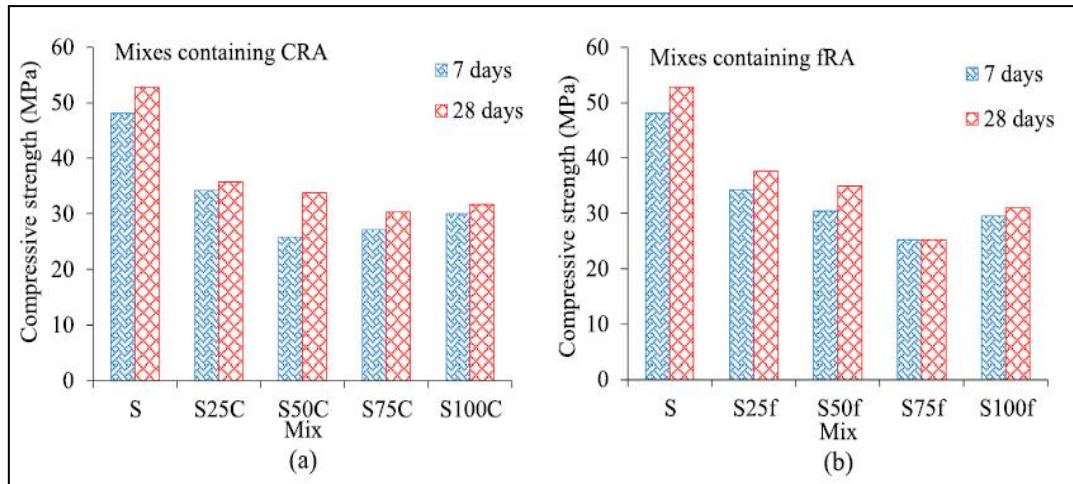
### **1.3.4. Influence des granulats recyclés sur les propriétés mécaniques de béton**

#### **A. La résistance à la compression**

D'après les résultats des essais de résistance à la compression, il est observé que la force de compression des BAP diminue proportionnellement à l'accroissement du taux de remplacement par des GR. Cette diminution peut être attribuée aux caractéristiques intrinsèques défavorables des GR (telle que la résistance du grain, la capacité d'absorption élevée, et la structure poreuse) en comparaison avec les GN.

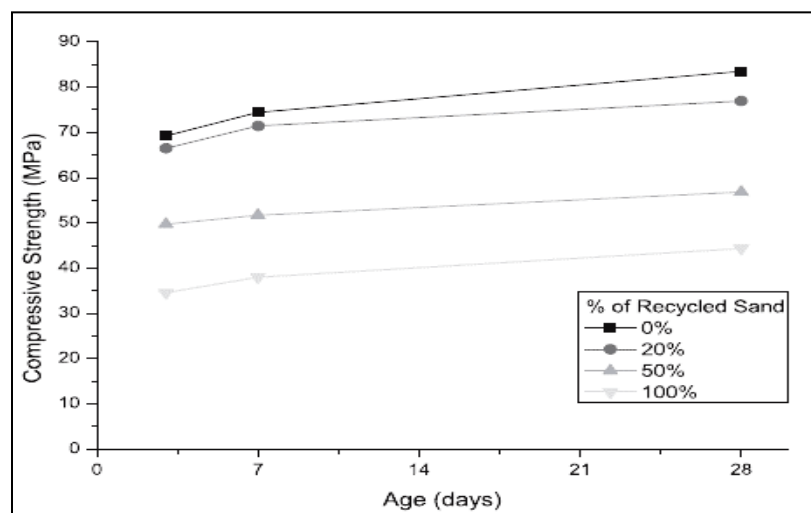
Sasanipour et al.[102] ont démontré qu'un remplacement de 25 % des granulats recyclés grossiers (GRG) entraînait une diminution de 32 % de la résistance à la compression à 28 jours, cette baisse atteignant 43 % pour un mélange contenant 75 % des GRG (voir figure 1.31.a). Cette diminution de la résistance pourrait être attribuée à la grande porosité des granulats recyclés (GR) ainsi qu'à une mauvaise adhérence de la matrice de mortier. Par la suite, cette réduction pourrait être liée à la zone d'interface de transition (ITZ) de ces mélanges. En effet, cette zone s'avère être la plus faible dans le béton, et l'épaisseur de l'ITZ pour le mélange

RCA/pâte (ancienne) présente une résistance inférieure à celle de la zone de transition entre les agrégats naturels et la nouvelle pâte[103]. Par conséquent, cela a entraîné une augmentation du nombre de couches d'interface de transition (ITZ) dans le béton. En outre, une diminution de 52 % a été constatée après le remplacement de 75 % des granulats recyclés fins (GRF), comme illustré dans la figure 1.31.



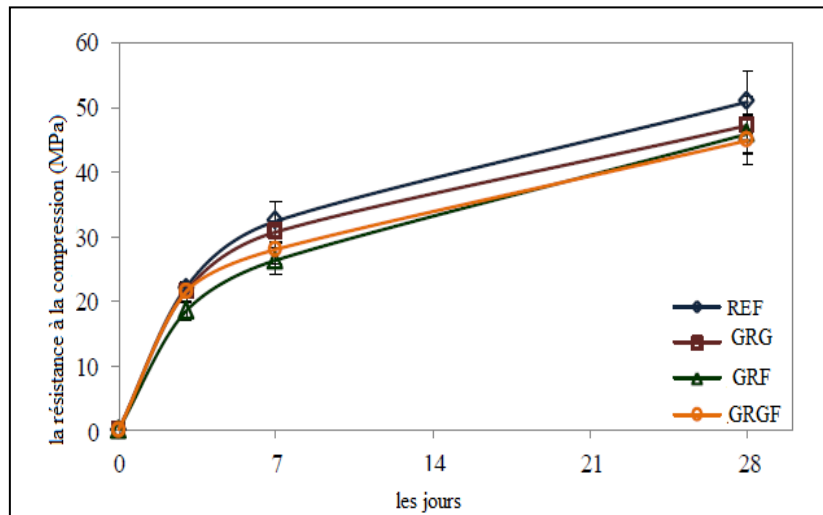
**Figure 1.31 :** Evaluation de la résistance à la compression : a) béton continue des grossiers GRG , b) béton continue des fines GRF [102].

Carro-López et al. [97] ont observé une légère diminution de la résistance à la compression avec un taux de substitution de 20 % de granulats recyclés fins (GRF) par rapport à l'absence de GRF. À des taux de substitution plus élevés en GRF, la réduction de la résistance était significative. Par exemple, lorsque le mélange contenait 100 % de sable recyclé, la résistance à la compression était réduite de moitié par rapport au béton de référence.



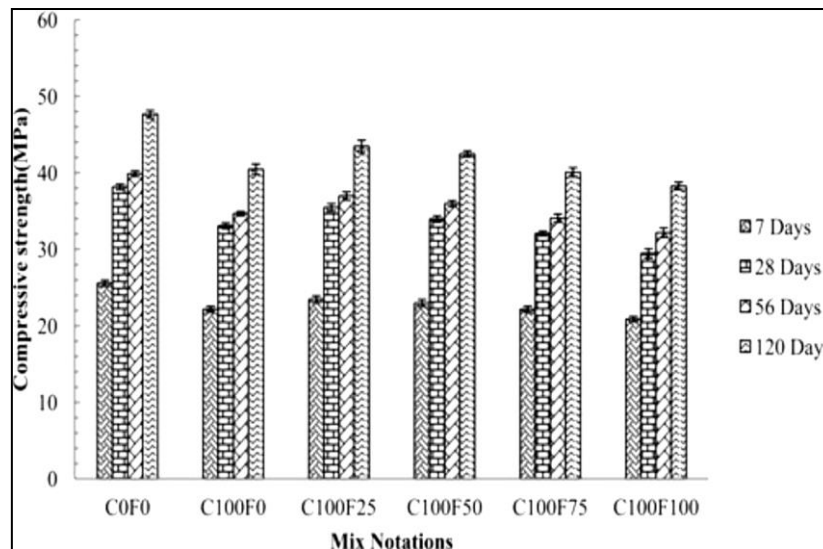
**Figure 1.32:** Variation de la résistance à la compression dans les BAP [97].

Campos et al.[99] ont observé que dans tous les cas, les BAP fabriqués avec des granulats recyclés présentait une résistance à la compression plus faible que le mélange de référence à tous les stades de durcissement. À 3 jours, la résistance à la compression du béton contenant des GRF a diminué de 16,64% par rapport au mélange de référence. À 7 jours, une diminution plus marquée de la résistance à la compression a été constatée pour les mélanges contenant à la fois des GRF et GRG, respectivement de 18,72% et 13,54% par rapport au mélange de référence. En général, la littérature signale une diminution de la résistance à la compression des BAP fabriqués avec des agrégats recyclés (voir figure 1.33). SILVA et al.[94] ont observé une diminution de la résistance à la compression variant entre 15% et 29% lorsque les granulats grossiers naturels étaient substitués par des granulats grossiers recyclés, à des taux de substitution allant de 25% à 100%.



**Figure 1.33 :** Variation de la résistance à la compression du BAP avec un taux de substitution de 20% des GR.[99]

La diminution de la résistance à la compression des bétons incorporant des granulats recyclés est imputée aux caractéristiques inhérentes de ces agrégats, telles qu'une capacité d'absorption d'eau plus élevée, une densité plus faible et une résistance mécanique moindre par rapport aux agrégats naturels. Ces propriétés découlent des fissures présentes dans les granulats recyclés, formées pendant leur processus de fabrication, ainsi que de l'adhérence de la pâte de ciment poreuse à leurs particules. Selon SILVA et al. [94], les propriétés de la zone de transition entre les granulats recyclés et la matrice cimentaire (ITZ) influent directement sur le comportement mécanique du béton fabriqué avec ces granulats. En effet, des concentrations de contraintes plus élevées peuvent se manifester à ces points lorsque le matériau est soumis à des charges, ce qui entraîne des défaillances au niveau de cette région.



**Figure 1.34:**Développement de résistance à la compression du BAP [104].

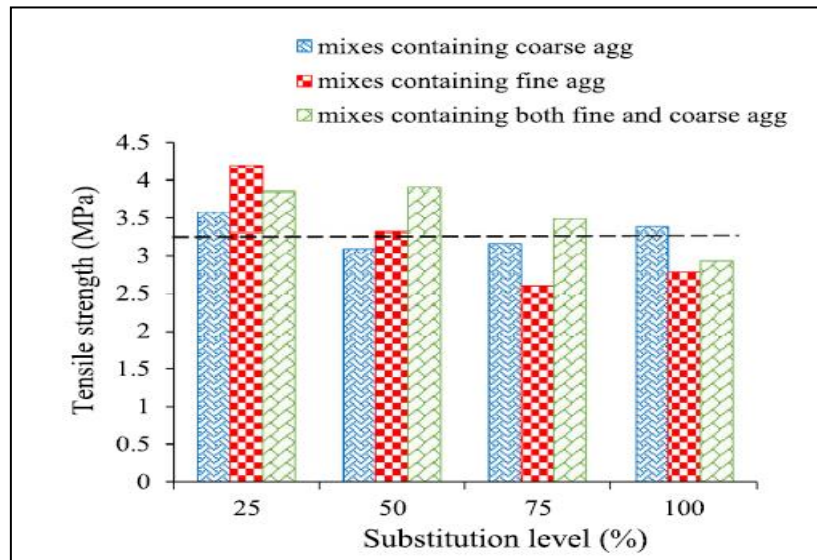
Selon la figure 1.34, Kapoor et al. [104] ont représenté la variation de la résistance à la compression en fonction du remplacement des GN par des GR dans le mélange du BAP. Ils ont observé une réduction de la résistance, allant de 13,1 % à 15,1 % à travers les différentes phases de durcissement, lorsque tous les GN ont été remplacés par les GRG. Cette diminution est attribuée à la présence d'une couche résiduelle de mortier sur les particules de GRG, ce qui pourrait compromettre leur adhérence avec le nouveau mortier dans la matrice du béton. En outre, le remplacement des GRF par des GN dans le mélange du BAP comportant 100 % de GRG entraîne une baisse de la résistance, variant de 7 % à 15 %. Une réduction maximale de la résistance d'environ 20% est observée lorsque tous les GN sont remplacés par des GR (100GRG et 100 GRF).

Kouider Djelloul et al. [101] ont observé que l'augmentation de la proportion de GR dans les mélanges de BAP conduit à une réduction de la résistance à la compression à toutes les étapes de durcissement. Cette diminution peut être attribuée à la mauvaise qualité du mortier adhérent aux granulats recyclés, ce qui affaiblit la zone de transition (ITZ). Selon Kong et ses collègues (2010), ils ont souligné que la quantité d'eau absorbée par les GR entraîne une teneur élevée en eau dans la nouvelle zone ITZ. Cela favorise la cristallisation de gros cristaux d'hydroxyde de calcium, affaiblissant ainsi la structure.

### B. Résistance à la traction

Les observations sur la résistance à la traction par fendage ont révélé une variabilité potentielle en fonction du taux de substitution des GR, comme illustré dans la figure 1.35. Lorsque 25 % des GR ont été remplacés, une augmentation de la résistance à la traction allant

de 10 % à 29 % par rapport au mélange de référence a été constatée. Le remplacement des GRG de 50 à 100 % n'a pas entraîné de diminution significative de la résistance à la traction. En revanche, le remplacement des granulats fins recyclés à hauteur de 50 %, ainsi que le remplacement simultané des granulats fins et grossiers recyclés, ont conduit à une amélioration de la résistance à la traction, comme indiqué par Sasanipour et al [102].



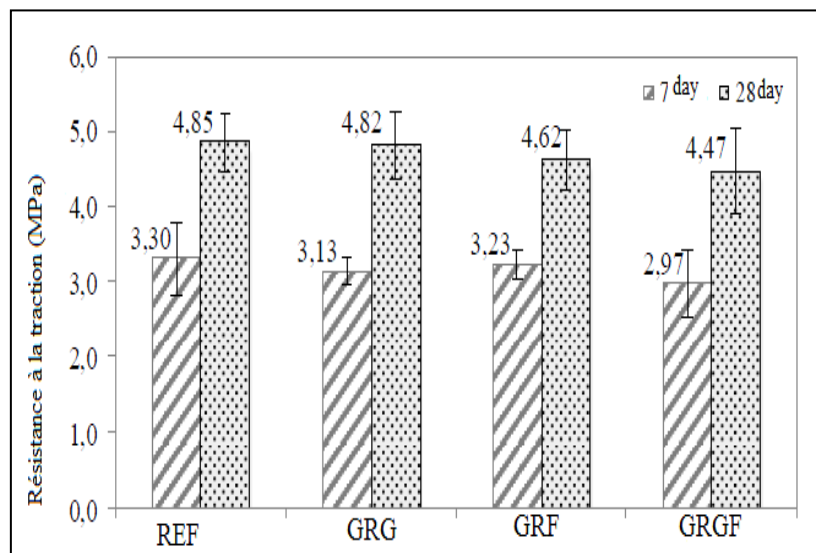
**Figure 1.35 :** Variation de la résistance à la traction du BAP avec substitution de GR (la résistance du mélange de référence est de 3.26 MPa) [102].

D'après Mehta et Monteiro [25], il existe une forte corrélation entre les résistances à la compression et à la traction. Lorsque la résistance à la compression augmente, la résistance à la traction augmente également, mais cette relation présente un taux de croissance décroissant. Les auteurs indiquent également que la relation entre la résistance à la traction et la résistance à la compression devrait se situer entre 7% et 11%. Dans cette perspective, le rapport entre la résistance à la traction et la résistance à la compression a varié entre 9,55% et 10,21% dans les bétons examinés à 28 jours.

De manière générale, l'incorporation de GR dans les mélanges semble avoir eu un impact moindre sur la résistance à la traction du béton sous compression, avec une réduction relativement faible de cette propriété. Des conclusions similaires ont été rapportées par Señas et al. [105], qui ont observé une diminution de 2,27 % de la résistance à la traction dans un BAP avec un taux de substitution de 50 % des GN par des GR. Dans une autre configuration utilisant 50 % de GRG et 20 % de GRF, les mêmes chercheurs ont constaté une réduction de 11,36 % de la résistance à la traction.

Selon les résultats de Baharmi et al. [106] l'utilisation de granulats recyclés fins et grossiers dans le béton, avec des taux de substitution variant de 25 % à 100 %, a entraîné une diminution de la résistance à la traction et de la résistance à la flexion. Toutefois, le remplacement total des granulats recyclés fins et grossiers a conduit à une baisse respective de 30,7 % et de 31,9 % de la résistance à la traction, ainsi qu'à une diminution de 28,2 % et de 28,7 % de la résistance à la flexion par rapport au mélange de référence.

Campos et al. [99] ont observé une diminution de la résistance à la traction pour tous les BAPR par rapport au béton de référence. Après une semaine, la diminution moyenne de la résistance à la traction oscillait entre 2,16 % et 10,09 %, tandis qu'à 28 jours, une baisse encore plus marginale était constatée, variant de 0,76 % à 7,78 %. Cette diminution de la résistance à la traction peut également être attribuée aux propriétés intrinsèques des granulats recyclés.



**Figure 1.36 :** Évolution de la résistance à la traction du BAP contenant des GR à 7 et 28 jours [99].

Dans leur étude sur l'impact de la substitution des granulats recyclés au gravier sur les propriétés des bétons autoplaçants, Mahakavi et al.[107] ont observé une diminution de la résistance à la flexion des mélanges de BAP lorsque les GN ont été remplacés par des GRG. Les taux de réduction de la résistance à la flexion à 28 jours pour les mélanges R25, R50, R75 et R100 sont respectivement de 6,7 %, 16,5 %, 22,8 % et 30,7 %. Cette diminution s'explique principalement par la réduction de la teneur en eau libre dans le mélange de BAP, conséquence de l'absorption élevée d'eau des GRG. On observe une tendance similaire en ce qui concerne la résistance à la compression et à la rupture.



Dimitriou et al.[108] ont constaté que l'augmentation des pourcentages de granulats recyclés entraînait une diminution de la résistance à la flexion. Les résultats indiquent qu'en remplaçant la totalité des granulats naturels par des granulats recyclés grossiers, on observe une réduction de 19,6 %, 23,7 % et 16,7 % respectivement pour les mélanges RL100, RF100 et RT100. Le mélange RT100 présentait la plus faible perte de résistance par rapport au mélange de référence. Cette variation s'explique par les différences dans les propriétés mécaniques et physiques des agrégats.

### C. Module d'élasticité

Revillaa et al.[109] ont mis en évidence que le béton contenant une importante proportion de granulats recyclés fins présentait des valeurs de module d'élasticité plus basses à toutes les étapes de durcissement. A 28 jours, le mélange contenant 100 % de granulats fins recyclés affichait un module d'élasticité de 18,8 GPa, ce qui représente une réduction de 54 % par rapport au béton de référence (40,6 GPa). L'incorporation de 100 % des granulats recyclés fins et grossiers dans cette étude ont entraîné une réduction encore plus marquée du module d'élasticité par rapport au cas où cette même lorsque quantité de granulats recyclés fins serait ajoutée à un béton sans granulats recyclés grossiers, avec une diminution d'environ 24 %.

Wang et al.[110] ont étudié l'influence des granulats recyclés de béton sur les propriétés mécaniques, notamment le module d'élasticité, des bétons élaborés avec des granulats recyclés fins et grossiers. Cette étude a pris en compte deux catégories de granulats recyclés fins. Ils ont observé que les bétons contenant des granulats recyclés présentaient une légère diminution du module d'élasticité à 28 jours par rapport au béton de référence. En particulier, l'incorporation totale des granulats recyclés grossiers a entraîné une réduction du module d'élasticité de 18,9 à 23,6 %. En revanche, le remplacement complet du sable naturel par des granulats recyclés fins a entraîné une diminution du module d'élasticité allant de 2,1 à 16,0 % (voir figure 1.37).

Behera et al. [111] ont rapporté une diminution du module d'élasticité statique des bétons contenant des granulats recyclés, utilisés à des taux de substitution de 50 % et 100 % pour les granulats grossiers, et à un taux de 40 % pour les granulats fins. Le béton de référence présentait le module d'élasticité (ME) le plus élevé, atteignant 46,63 GPa, tandis que le mélange BG100F40, comportant une proportion plus importante de granulats fins et une substitution complète des granulats grossiers par des granulats recyclés, affichait le ME le plus bas, à 25,19 GPa. Il a été remarqué une diminution graduelle du ME à mesure que le taux de substitution

des granulats recyclés fins augmentait. Le ME a été réduit de 19,4 % et de 32,2 % respectivement pour les mélanges BG50 et BG100.

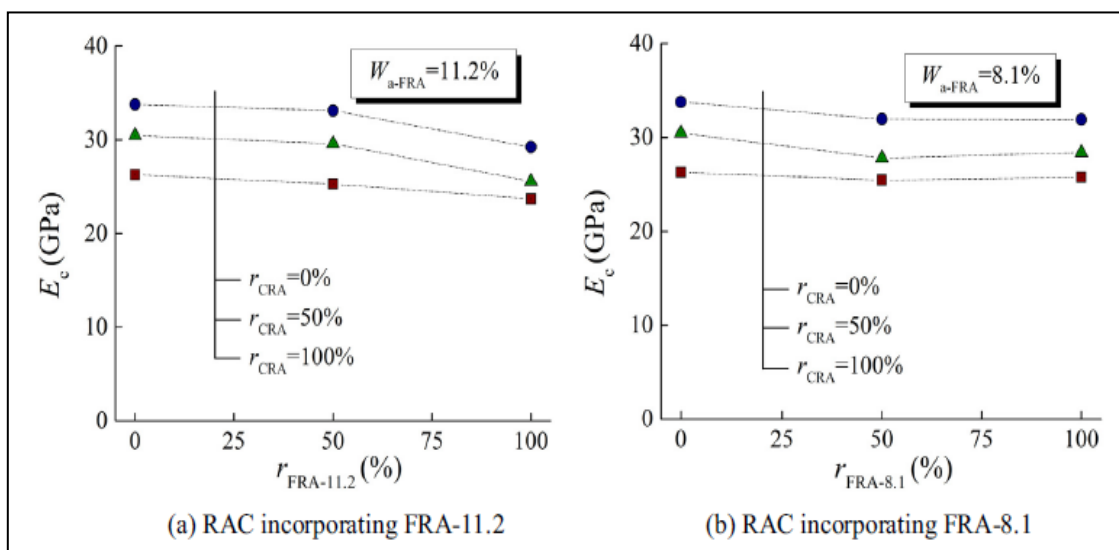


Figure 1.37 : Module d'élasticité du béton à base de GRG et GRF [110].

### 1.3.5. Influence des granulats recyclés sur les propriétés physiques de béton

#### A. Retrait

##### ➤ Le retrait de séchage

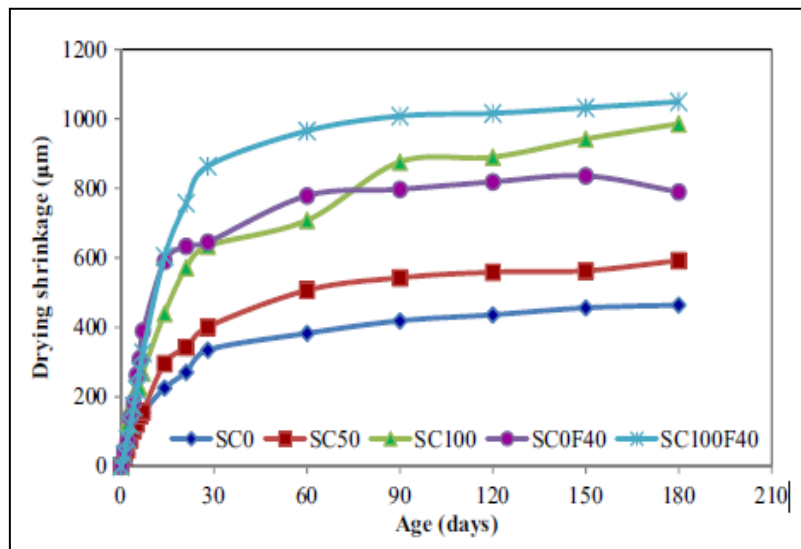
Plusieurs chercheurs ont conduit des recherches sur le retrait de séchage, notant qu'il est significativement plus élevé dans les bétons contenant des granulats recyclés que dans ceux à base de granulats naturels. Cette augmentation est attribuable à la présence de mortier ancien résiduel à la surface des granulats, à l'augmentation de la teneur en eau du béton, ainsi qu'au faible module d'élasticité des granulats recyclés.

Manzi et al. [92][112] ont mené une analyse expérimentale afin d'obtenir les propriétés de retrait de séchage à long terme (sur une période d'environ 2 ans) du BAP contenant des granulats recyclés. Ils ont constaté une similarité de comportement pour tous les mélanges, cependant ils ont constaté une augmentation rapide de rétrécissement au cours des trois premiers mois, suivi d'un ralentissement progressif au fil du temps, devenant presque constant après environ dix mois.

Le faible niveau de retrait de ce mélange BAPR ne semble pas être particulièrement influencé par la présence et la concentration de granulats recyclés. Cela peut être attribué à la considérable réduction du rapport eau/ciment (E/C) (de 0,48 pour le béton traditionnel à environ 0,31 pour le BAP).

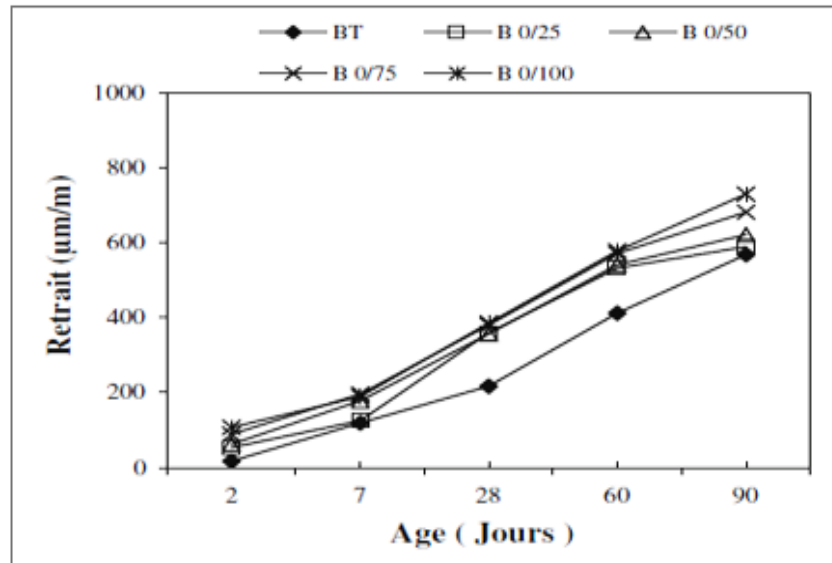
Koo et al. [113] ont constaté que le retrait de séchage des BAP contenant des granulats recyclés augmentait proportionnellement à la quantité croissante de fins recyclés. Cette observation peut être attribuée à l'adhérence du mortier aux granulats fins recyclés, ce qui a contribué à l'augmentation du volume de la pâte (ancienne + nouvelle). Toutefois, ce phénomène peut être maîtrisé en utilisant un faible rapport eau/liant (E/L).

Les conclusions de Behera et al. [111] illustrées dans la figure 1.38, mettent en évidence que le retrait de séchage est plus marqué dans les bétons contenant des granulats recyclés (BAPR) par rapport à ceux utilisant des granulats naturels. De plus, l'ajout de granulats recyclés fins (GRF) a amplifié ce phénomène, attribuable au degré d'absorption d'eau du mortier adhérent et à la surface spécifique élevée de ces granulats. Ils ont observé un retrait significatif à 180 jours, presque deux fois supérieur à celui du béton de contrôle.



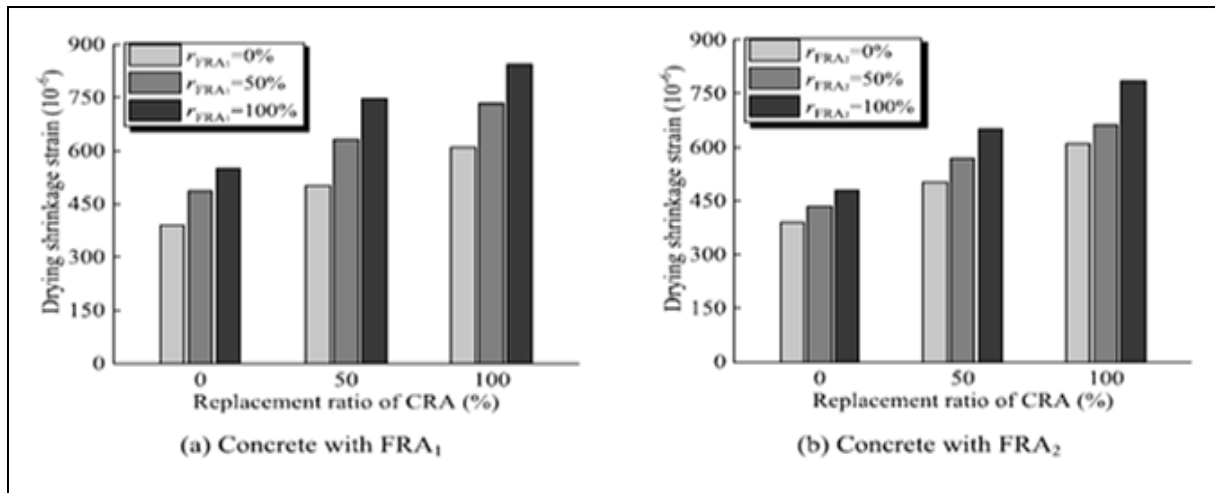
**Figure 1.38 :** Variation du retrait des BAPR avec l'incorporation de granulats fins recyclés[111].

Kenai et Debieb. [82] ont constaté que le remplacement des granulats fins par des granulats recyclés fins (GRF) entraînait une augmentation d'environ 25 % du retrait dès le jeune âge (à 2 jours) et pouvait atteindre une augmentation de 40% à 90 jours (voir figure 1.39) pour ce type de béton. Cette augmentation du retrait peut vraisemblablement être attribuée à la porosité élevée des granulats recyclés ainsi qu'au degré significatif d'absorption d'eau du mortier provenant du béton précédent qui recouvre ces granulats. Ils ont remarqué qu'un retrait significatif se manifeste au-delà d'une certaine période de temps ; initialement, il demeure d'une intensité limitée.



**Figure 1.39 :** Variation du retrait des bétons recyclés contenant des granulats fins provenant de bétons concassés [82].

Zhang et al. [114] ont mené une étude expérimentale portant sur l'évolution du retrait de séchage dans le béton incorporant des granulats recyclés de béton (GRG et GRF), avec des taux de remplacement variant entre 0%, 50% et 100% pour deux types de granulats fins recyclés. Ils ont constaté que le développement du retrait lors du séchage est rapide au début, puis ralentit avec le temps. Cette augmentation est attribuée à l'évaporation d'eau supplémentaire. Lorsque des granulats recyclés sont incorporés, la contrainte est renforcée par la présence de l'ancienne pâte de ciment sur les GRG et GRF, ce qui entraîne une diminution du volume. Le module élastique de la vieille pâte de ciment est plus bas que celui de l'agrégat, ce qui conduit à un module élastique du composite ciment-pâte ancienne plus agrégat inférieur à celui de l'agrégat vierge seul. Les substituts des fins recyclées de type GRF1 par des fins naturelles induisent des contraintes de retrait plus élevées en raison d'un taux d'absorption d'eau plus élevé (11,2 % par rapport à 8,1 %) et d'une densité plus faible (2222 kg/m<sup>3</sup> par rapport à 2326 kg/m<sup>3</sup>).



**Figure 1.40:** Retrait de séchage pour un béton avec différents contenus de GRG et GRF [114].

### 1.3.6. Influence des granulats recyclés sur la durabilité de béton

#### A. Porosité et absorption d'eau des bétons

En raison de la présence de mortier résiduel adhérent aux granulats recyclés (GR), il y a un effet négatif sur l'absorption d'eau du béton fabriqué [115]. Cet effet est attribué au ciment non hydraté présent dans le mortier adhérent, ce qui augmente le taux d'absorption d'eau dans le béton fabriqué avec des GR.

Fiol et al. [116] ont noté une tendance similaire dans les mélanges de BAP. Ils ont remarqué que la porosité et le taux d'absorption d'eau des mélanges augmentaient à mesure que le taux de remplacement des granulats recyclés grossiers et le rapport E/C augmentaient. L'augmentation du rapport E/C amplifiait l'influence des granulats recyclés sur le coefficient d'absorption d'eau, tandis que cette influence diminuait lorsque le rapport E/C était faible. Il est à noter que la porosité et la capacité d'absorption d'eau du béton contenant 50% et 100% de granulats recyclés grossiers sont supérieures à celles du béton avec 20% de granulats recyclés.

Salesa et al. [117] ont mené une étude sur la possibilité d'un recyclage multiple du béton préfabriqué sous forme de granulats grossiers dans le BAP. Dans le cadre de cette étude, l'ensemble des granulats grossiers naturels a été remplacé par des granulats recyclés, et ce processus a été répété pour trois cycles de recyclage. Les résultats démontrent une augmentation de l'absorption d'eau en corrélation avec le nombre de cycles de recyclage. La figure 1.41 illustre une augmentation de 11,6 % pour le premier cycle de recyclage (RC1), de 17 % pour le deuxième cycle (RC2) et de 20,3 % pour le troisième (RC3). Cette augmentation est attribuée à la présence de mortier adhérent aux granulats recyclés.

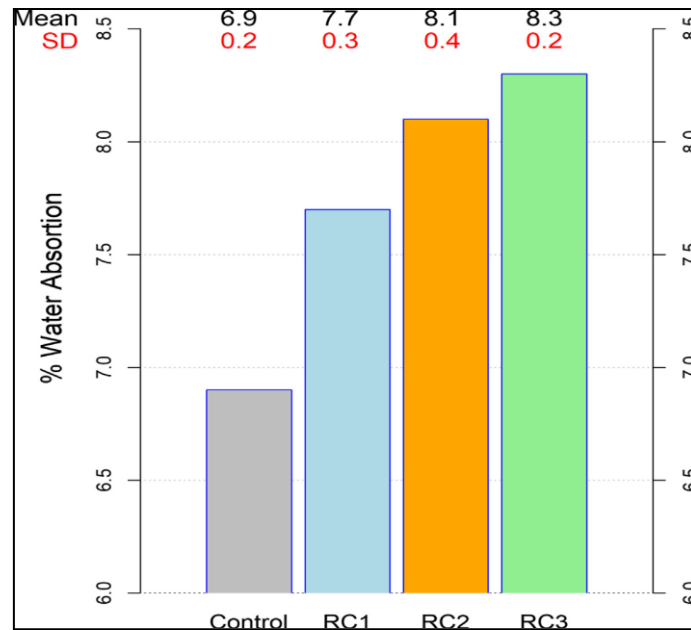


Figure 1.41 : Absorption d'eau du BAPR [117].

Santos et al. [118] ont étudié l'absorption d'eau à travers deux méthodes, l'immersion totale et la capillarité, dans des mélanges de BAP contenant des granulats grossiers et fins, GRG et GRF, à différentes durées (28, 91 et 182 jours). Ils ont observé une absorption d'eau significativement plus élevée dans les BAP avec substitution totale des granulats par des granulats recyclés fins. De plus, ils ont remarqué que les BAP constitués de 100% de granulats recyclés grossiers présentaient des niveaux d'absorption d'eau plus bas que ceux avec un mélange de 50% de granulats recyclés fins et grossiers. Cette observation est due au fait que les GRG ont des valeurs d'absorption d'eau considérablement plus faibles que les GRF, ce qui influe sur cette propriété.

Sasanipour et al. [119] ont rapporté une augmentation du pourcentage d'absorption d'eau dans les BAP à mesure que la proportion de granulats recyclés augmentait. Cette augmentation du pourcentage d'absorption d'eau s'est élevée à environ 14,7%, 64,7% et 66,2% avec l'incorporation de granulats grossiers recyclés. De plus, elle a connu une augmentation significative lorsque les granulats fins recyclés ont été substitués, avec des augmentations allant de 41% à 193% selon le niveau de remplacement. Certains auteurs, tels que Modani 2014 [86], ont attribué cette augmentation à la porosité élevée des granulats recyclés et à leur forte capacité d'absorption d'eau, ce qui contribue à accroître le taux d'absorption d'eau dans le béton.

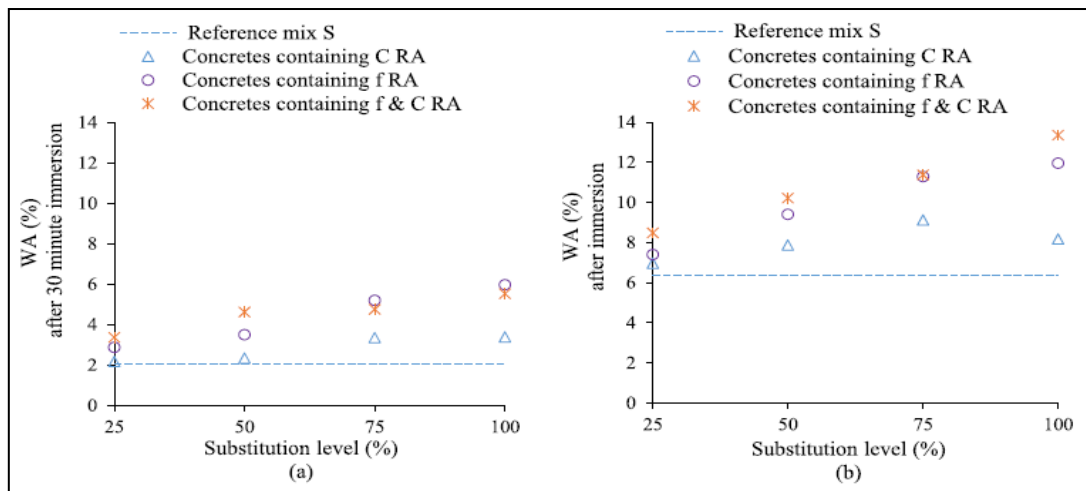
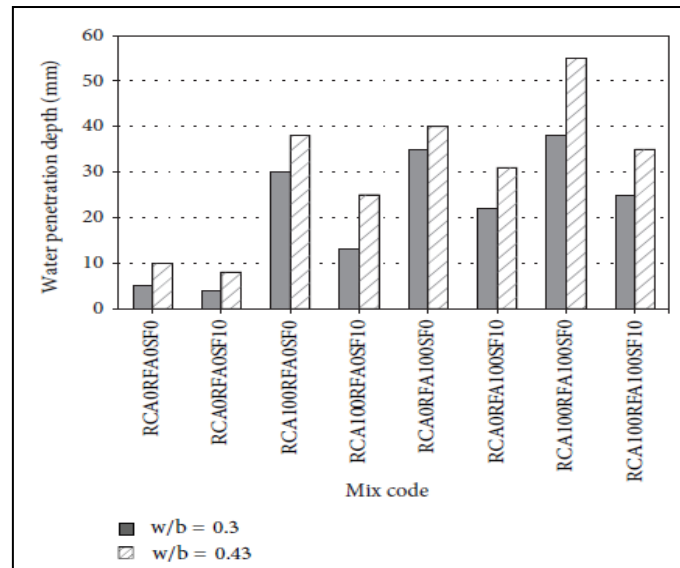


Figure 1.42: Coefficient d'absorption d'eau du béton recyclé après 30 minutes.

## B. Perméabilité à l'eau

Pereira et al. [120] ont mis en évidence que la profondeur de pénétration de l'eau dans ce béton devient plus courte lorsque les pourcentages d'incorporation des granulats recyclés dans le béton sont élevés, jusqu'à 40 %. Les résultats ont montré une légère augmentation de la profondeur dans un mélange de BAP contenant 20 % de granulats recyclés. Ensuite, une diminution d'environ 30 % et 25 % a été observée respectivement pour les BAP composés de 40 % et 100 % de granulats recyclés. Ces résultats révèlent que l'ajout de granulats recyclés dans les mélanges de BAP entrave la pénétration de l'eau dans le béton.

Les résultats de Gesoglu et al. [121] ont mis en évidence que l'emploi de granulats recyclés accroissait la perméabilité à l'eau des BAP, sans distinction de la taille des granulats recyclés. De surcroît, ils ont noté que cet effet était plus prononcé avec l'augmentation du rapport E/C. ils ont constaté qu'une profondeur de pénétration maximale a été obtenue pour un mélange de la série IV(0.43RCA100RFA100SF0), atteignant 55 mm, tandis que la profondeur de pénétration minimale a été enregistrée pour un mélange de la série I(0.3RCA0RFA0SF10), avec seulement 4 mm (figure 1.43).



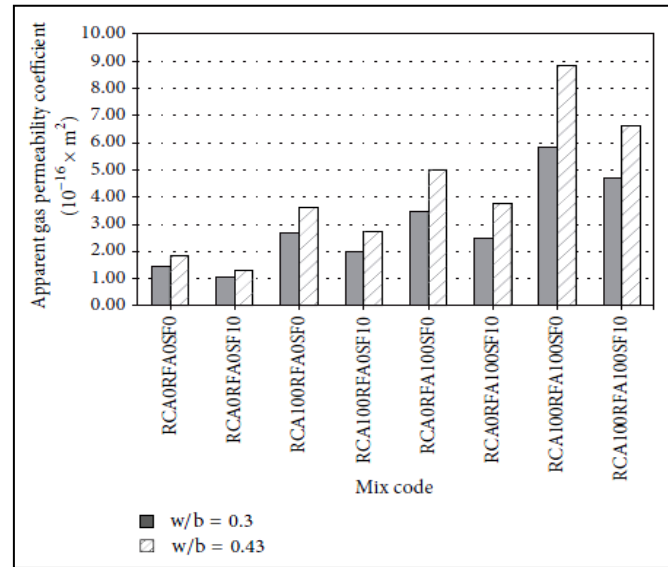
**Figure 1.43:** Profondeur de pénétration de l'eau dans les BAP après 56 jours [121].

### C. Perméabilité a gaz

Gesoglu et al. [121] ont observé une augmentation du coefficient de perméabilité aux gaz avec l'introduction de granulats recyclés dans les mélanges de béton, ainsi qu'avec différents rapports E/C. A l'âge de 65 jours, le coefficient de perméabilité a varié de  $1.04$  à  $1.82 \cdot 10^{-16} \text{m}^2$  pour le béton témoin. Pour les mélanges de béton recyclés (série IV), ces coefficients étaient de 3 à 4 fois supérieurs à ceux des mélanges témoins, indépendamment du rapport E/C et de l'incorporation de SF. Ainsi, le mélange  $0,43\text{RCA}100\text{RFA}100\text{SF}0$  a enregistré le coefficient de perméabilité aux gaz le plus élevé à la fin de la période de durcissement, atteignant  $8,82 \times 10^{-16} \text{m}^2$ . De plus, le coefficient de perméabilité aux gaz du béton avec des GRG (série II) était inférieur à celui du béton avec des GRF (série III) d'environ 1,5 fois. L'augmentation de la perméabilité aux gaz du béton peut être expliquée par l'élargissement de la structure interstitielle du béton provoqué par l'introduction de granulats recyclés.

Santos et al.[118] ont constaté que la perméabilité à l'oxygène augmente avec la substitution des granulats recyclés en raison du vieux mortier adhérent aux GR. A l'âge de 28 jours, la perméabilité à l'oxygène est très élevée, environ  $31,5 \cdot 10^{-16} \text{m}^2$  dans la famille PC 45 et  $3,2 \cdot 10^{-16} \text{m}^2$  dans la série PC 65, une substitution complète de GRF a été réalisée. Pour les mélanges contenant 50% de GR, des augmentations ont été observées, passant à  $17,3 \times 10^{-16} \text{m}^2$  pour PC 45 et à  $2,21 \times 10^{-16} \text{m}^2$  pour PC 45. Par ailleurs, Zong et al. [122] ont enregistré une augmentation de 225 % pour le béton conventionnel avec un taux d'incorporation de granulats recyclés similaire.





**Figure 1.44:** Évolution des coefficients de perméabilité apparente aux gaz des BAP à 56 jours [121].

#### D. Résistance à la pénétration aux ions chlorure

D'après les conclusions illustrées dans la figure 1.45, issues de l'étude menée par Santos et al. [118] il est observé une augmentation significative de la résistance à la pénétration des ions  $Cl^-$  au fil du temps, suivie d'une diminution due à l'incorporation des fins recyclés. La plus forte pénétration de chlorure se produit dans les mélanges à 100 % de fins recyclés, avec une augmentation de 69 % (PC 65) et de 42 % (PC 45) par rapport au béton avec granulats naturels. Cette observation s'explique par la qualité médiocre du mortier dans les mélanges BAPR (due au remplacement du sable par les fins recyclés). Dans leur étude, Tuyan et al. [93] ont également relevé une tendance similaire, où la résistance à la pénétration des ions chlorures diminuait à mesure que la proportion de GRG et le rapport E/C augmentaient. En d'autres termes, la pénétration des ions chlorures augmentait avec la proportion de GRG et le rapport E/C dans le BAP, comme le montre la figure 1.46.

#### E. Attaque de sulfate

Boudali et al. [123] ont étudié les performances des BAP en intégrant des granulats fins et grossiers recyclés dans divers environnements contenant des sulfates. Leurs conclusions ont montré que les mélanges intégrant des granulats recyclés ainsi que des fins recyclées de béton ont présenté une meilleure performance que les mélanges utilisant des agrégats naturels et des pouzzolanes, notamment dans des conditions environnementales cycliques combinées à l'exposition au sulfate de sodium.

Omrane et al. [77] ils ont démontré que la perte de masse du béton contenant 50 % de granulats recyclés (gros et fins) dans une solution de sulfate est réduite de moins de 23 % par rapport au Béton Autoplaçant. En outre, après une analyse minéralogique par diffraction des rayons X (DRX), ils ont constaté une présence abondante de gypse dans tous les bétons exposés à l'attaque acide, ce qui explique la détérioration de la surface.

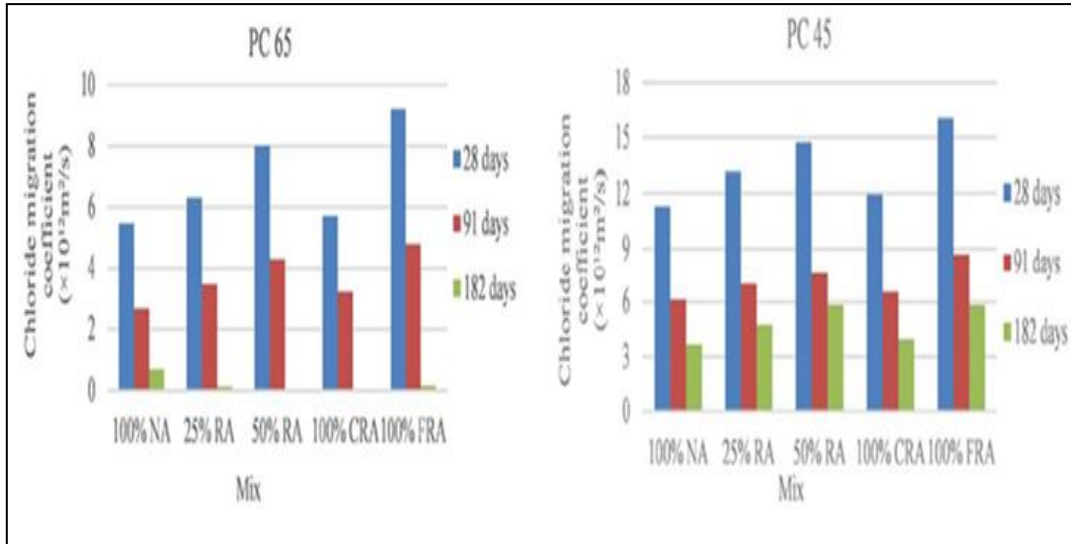


Figure 1.45 : Variation de la pénétration des ions chlorures en fonction des GR[118].

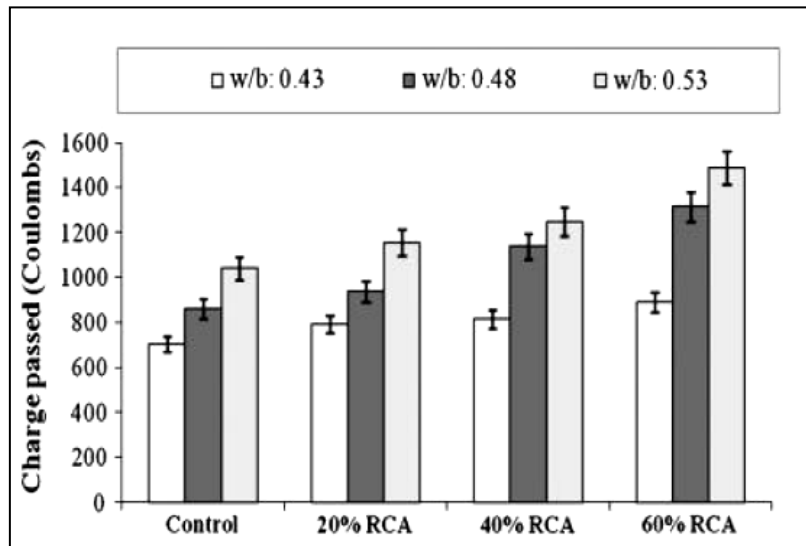
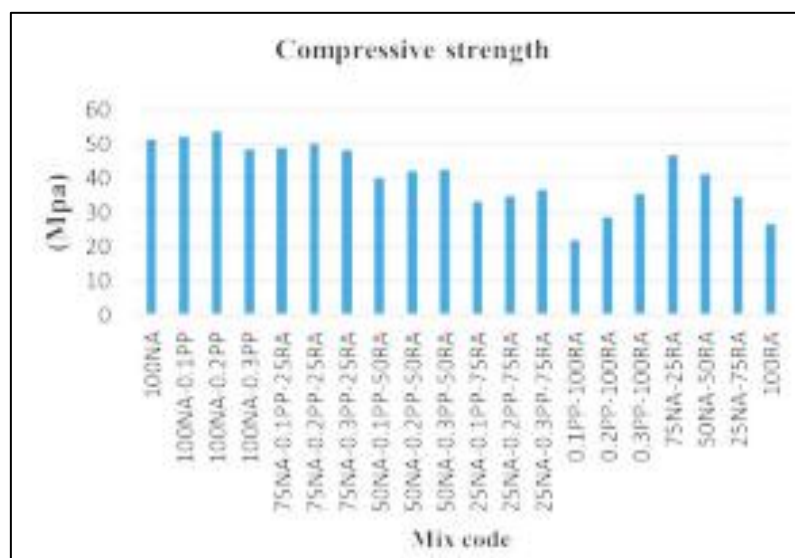


Figure 1.46: Résistance à la pénétration des ions chlorures dans les BAP [93].

### 1.3.7. Propriétés du béton fibré à base de granulats recyclé

A partir des résultats de recherche ci-dessus, on peut constater que l'ajout de granulats recyclés dans le béton entraînera une dégradation de ses performances. Par conséquent, les

chercheurs ont proposé que l'incorporation d'une certaine quantité de fibres peut améliorer les performances mécaniques du béton recyclé. A titre exemple, l'incorporation de fibres métalliques peut considérablement augmenter la résistance à la compression de béton recyclés[124]. D'autres types de fibres ont été largement adoptés en raison de leur résistance relativement élevée, notamment les fibres de basalte et les fibres de polyéthylène téréphtalate (PET) [125], [126] . Cette résistance élevée dépend en effet du rapport d'aspect des fibres adopté. Dans une étude antérieure, il a été démontré qu'une proportion de 0,2 % de fibres de polyéthylène téréphtalate a conduit à une amélioration de la résistance à la compression des bétons recyclés. Cependant, une augmentation de la concentration en fibres de polyéthylène téréphtalate dans les BAP a été associée à une hausse de la résistance des échantillons, comme illustré dans la Figure 1.47 [127] .Cela est dû au fait que de nombreuses fibres nuisent à l'efficacité et à l'écoulement du BAP, ce qui augmente la quantité d'air restant dans le béton. Cette raison réduira donc la résistance du béton.



**Figure 1.47** : l'effet de différent fibres et granulats recyclés dans le BAP[127].

Contrairement à l'étude précédente, Dong et al. [128] l'incorporation de fibres plastiques recyclées (FPR) dans le mélange de béton à base d'agrégats recyclés a été associée à une augmentation de la résistance à la compression. Cette amélioration est principalement attribuée à l'efficacité des FPR dans le confinement interne du béton.

L'incorporation de 1 % de FPR a entraîné la plus importante augmentation de la résistance à la compression. Cette amélioration est principalement attribuée à la répartition uniforme des FPR à l'intérieur de la structure du béton, favorisant ainsi son homogénéité et

réduisant les vides internes. Cette dynamique renforce la résistance à la compression des mélanges de béton utilisant des agrégats recyclés (BAPR).

En outre, la capacité des fibres à répartir les contraintes et à retarder la propagation des fissures a également contribué à l'amélioration de la résistance à la compression. Enfin, les FPR peuvent facilement former une structure en réseau, réduisant ainsi la concentration de contraintes à l'extrémité des fissures dans le béton, ce qui renforce davantage sa résistance à la compression.

L'introduction de fibres plastiques recyclées (FPR) a considérablement amélioré la résistance à la flexion des mélanges de béton contenant des agrégats recyclés (BAPR), quelle que soit la quantité de FPR ajoutée. De plus, la résistance à la flexion a augmenté en proportion de la quantité de FPR incorporée, avec des améliorations allant de 0,41 % à 59,96 % en fonction de la quantité de FPR.

Il convient également de souligner que l'incorporation de FPR est plus bénéfique pour renforcer la résistance à la flexion par rapport à la résistance à la compression. Autrement dit, l'augmentation de la résistance à la flexion est plus significative que celle de la résistance à la compression. Cette différence s'explique principalement par les contraintes locales engendrées par le renforcement des FPR, qui ont la capacité de contrôler le développement des fissures avant l'apparition de fissures macroscopiques visibles, renforçant ainsi la résistance à la flexion du béton.

La Figure 1.48 présente la section transversale fracturée d'une poutre constituée de mélanges de béton utilisant des agrégats grossiers recyclés (GR-BAP) renforcés avec des fibres plastiques recyclées (FPR), qui a été soumise à des essais. Il est clair d'après la Figure 1.48 que les agrégats naturels, les agrégats recyclés grossiers et les FPR sont répartis de manière aléatoire et uniforme sur toute la section transversale de la poutre.

En outre, il est possible de remarquer l'incorporation de fibres plastiques recyclées (FPR) dans la masse durcie du béton, et des FPR cassées sont visibles, ce qui indique une adhérence efficace des FPR dans le béton. Cette adhérence contribue à renforcer la résistance à la propagation des fissures et à la traction, ce qui améliore la résistance à la flexion et la ductilité des échantillons de poutre. Les mélanges de GR-BAP contenant des FPR ont présenté une ductilité accrue par rapport à ceux sans FPR, ce qui suggère que les FPR ont été efficaces pour confiner le béton.



**Figure 1.48** : Perspectives des surfaces fracturées des poutres en béton autoplaçant (BAP) renforcées par des fibres plastiques recyclées (FPR) avec des agrégats recyclés (AR).

### 1.3.8. Conclusion

Cette revue bibliographique a été menée d'une part pour approfondir les connaissances concernant les bétons autoplaçant (BAP) et d'autre part, pour explorer l'application des fibres de polyéthylène téréphtalate (PET) et des déchets, ainsi que leur influence sur les caractéristiques et les performances des bétons. Cette revue vise à établir une base solide pour entreprendre des recherches futures dans ce domaine.

Dans cette partie de la synthèse bibliographique, notre attention se tourne vers l'intérêt d'incorporer des granulats recyclés (GR) et des fibres polyéthylène téréphtalate (PET) pour améliorer les propriétés mécaniques du béton. D'après littérature, il existe un manque d'études portant sur la durabilité du béton recyclé renforcé par des fibres. En outre, cette recherche examine les effets de la synergie entre ces deux matériaux sur les propriétés physiques, mécaniques et la résistance à long terme du BAP.

Le BAP est un matériau béton très fluide, uniforme et stable, présentant diverses caractéristiques principales telles que sa capacité à s'écouler facilement, sa résistance à la ségrégation et son aptitude à remplir efficacement même des formes complexes, en comblant entièrement tous les espaces sous son propre poids. Lorsque ces trois critères sont respectés, on peut obtenir un BAP.

L'intégration de matériaux recyclés comme les déchets de démolition et/ou de construction dans le béton en tant que matériau de construction peut contribuer à atténuer les problèmes environnementaux et économiques, tout en limitant la consommation des ressources naturelles non renouvelables.

Diverses recherches ont indiqué que remplacer les granulats naturels par des granulats recyclés dans les mélanges de béton a un impact défavorable sur plusieurs aspects, notamment l'ouvrabilité, les propriétés mécaniques telles que la résistance à la compression et à la flexion, ainsi que sur la durabilité en termes de perméabilité et d'absorption, entre autres.

L'utilisation de fibres de polyéthylène téréphtalate (PET) dans le béton qui permet d'améliorer les performances mécaniques et physiques de cette substance en stoppant la propagation des fissures et en restreignant la formation de fissures supplémentaires. De plus, une bonne répartition des fibres dans le matériau cimentaire a une influence significative sur les performances mécaniques et la durabilité des composites.

## **CHAPITRE 2**

### **MATERIAUX ET ESSAIS**

---

### 2.1. Introduction

Dans la première section de ce chapitre, nous présentons les différents matériaux utilisés dans la composition des bétons examinés, ainsi que les nombreux essais réalisés en laboratoire sur ces bétons à l'état frais et à l'état durci. En conclusion du chapitre, nous aborderons les différentes combinaisons de béton qui ont été testées dans le cadre de cette étude.

### 2.2. Caractéristiques des matériaux utilisés

#### 2.2.1. Ciment

Le ciment choisi pour cette étude est un ciment Portland composé de type CEM II/B 42.5N, fabriqué par l'usine Lafarge à M'sila, en Algérie. Il se distingue par une densité de 3,08 kg/m<sup>3</sup> et une surface spécifique de 3900 cm<sup>2</sup>/g. Ce ciment spécifique présente une résistance minimale à la compression de 42,5 MPa après 28 jours. Les principales caractéristiques chimiques et minéralogiques de ce ciment sont répertoriées dans le tableau 2.1.

**Tableau 2.1 :** Composition chimiques et minéralogiques du ciment.

| Composition chimique (%)      |                  |                                |                                |                  |                 |                   |                  |
|-------------------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------|-----------------|-------------------|------------------|
| CaO                           | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | MgO              | SO <sub>3</sub> | Na <sub>2</sub> O | K <sub>2</sub> O |
| 62.17                         | 15.96            | 3.75                           | 2.15                           | 1.33             | 2.30            | 0.12              | 0.52             |
| Composition minéralogique (%) |                  |                                |                                |                  |                 |                   |                  |
| C <sub>3</sub> S              |                  | C <sub>2</sub> S               |                                | C <sub>3</sub> A |                 | C <sub>4</sub> AF |                  |
| 67.85                         |                  | 12.29                          |                                | 7.33             |                 | 8.67              |                  |

#### 2.2.2. Granulats

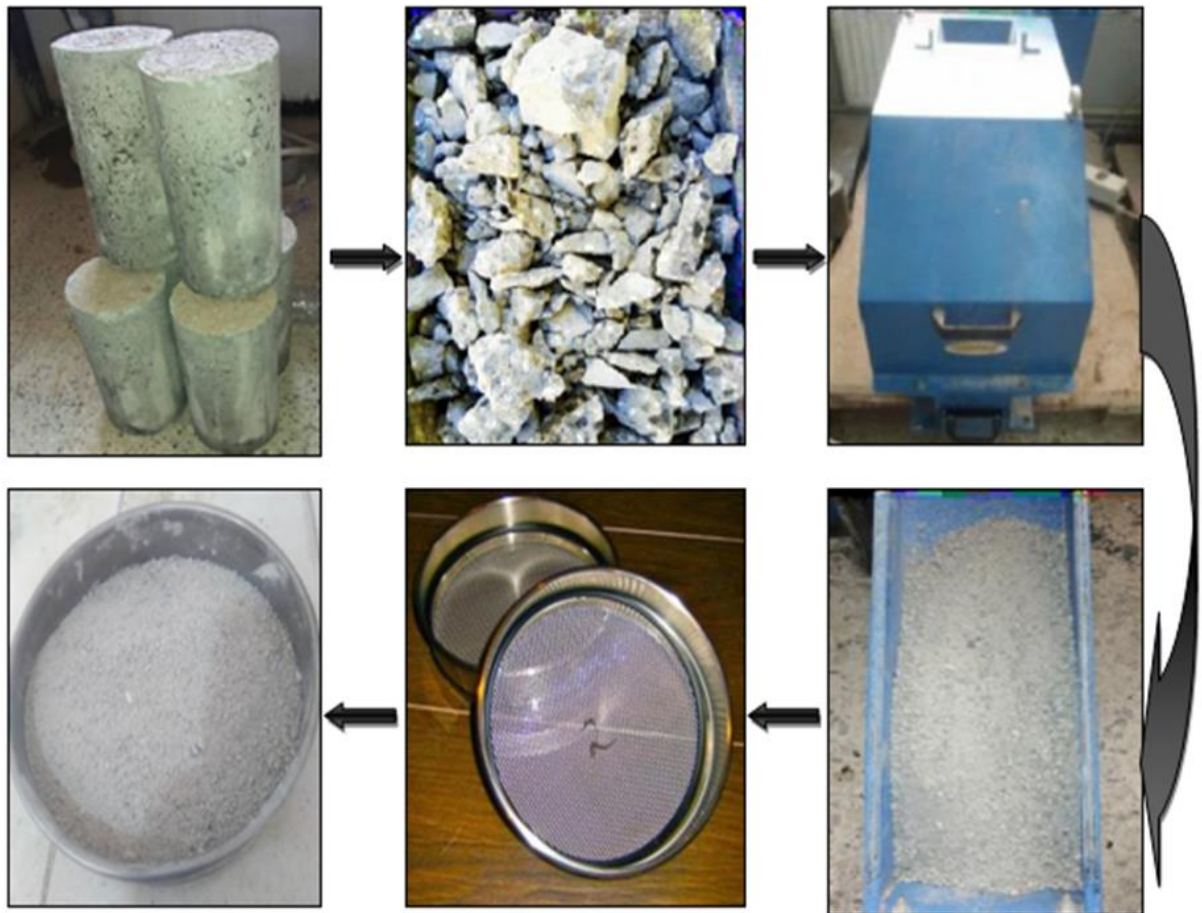
Quatre types de granulats, à la fois naturels et recyclés, ont été employés pour la conception des bétons analysés (tableau 2.2). Les granulats naturels (GN) consistent en un sable naturel et en des gravillons concassés, tandis que les granulats recyclés (GR) ont été utilisés sous forme de sable.

Le sable utilisé dans cette étude est un sable naturel extrait des dunes, avec une granulométrie uniforme de 0/4 mm. Il provient de la région d'Oued Souf.

Les granulats recyclés, également connus sous le nom de sable recyclé, ont été obtenus en recyclant les déchets d'éprouvettes de béton ordinaire qui ont été produites au laboratoire à



partir de granulats naturels (GN) présentant une résistance à la compression supérieure à 25MPa. Les éprouvettes ont été réduits en fragments manuellement pour les adapter à l'ouverture du mini concasseur. Ensuite, ces morceaux de béton ont été broyés à l'aide d'un mini concasseur à doubles mâchoires. Enfin, les matériaux concassés ont été tamisés pour obtenir les différentes fractions de granulats recyclés, comme représenté dans la figure 2.1.



**Figure 2.1 :** Processus de concassage des déchets des bétons.

Dans le but d'examiner la morphologie de ces sables et de procéder à une analyse chimique, une observation au microscope électronique à balayage (MEB) a été effectuée. Les images obtenues sont présentées sur le tableau 2.2, où l'on peut remarquer la forme angulaire des grains. De plus, les figures 2.3 et 2.4 représentent les résultats obtenus par la spectroscopie de rayons X à dispersion d'énergie (EDX).

Tableau 2.2. Granulats naturels et recyclés.





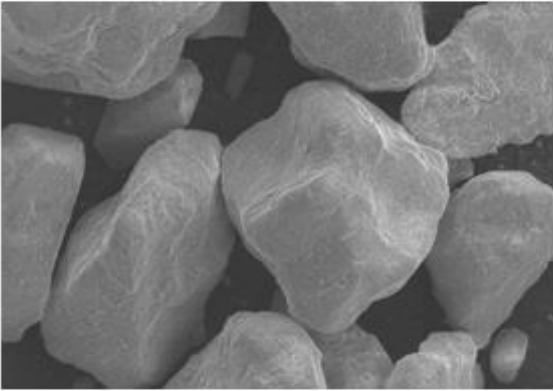
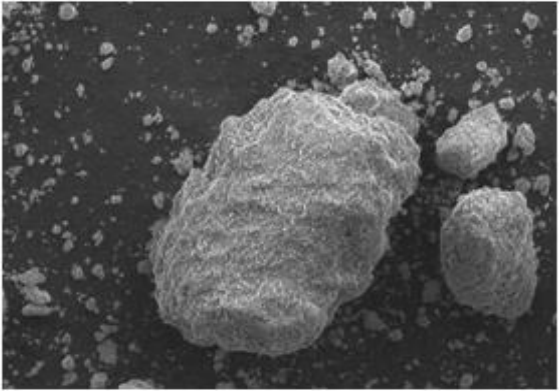
| Sable naturel 0/4   | Sable recyclés 0/4   |
|---|--|
|    |    |
| Gravier naturel 3/8   | Gravier naturel 8/15   |
|   |   |
|  |  |
| (a)   | (b)  |

Figure 2.2. Représentation de l'analyse morphologique des grains de sable, montrant (a) le sable naturel et (b) le sable recyclé.

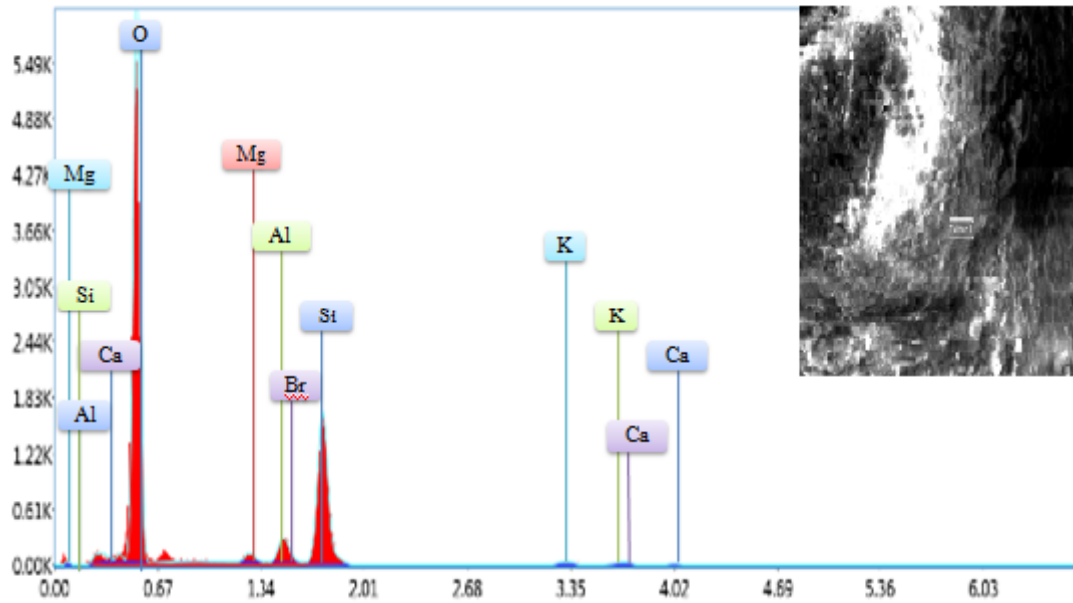


Figure 2.3. Spectre de l'analyse chimique du sable naturel.

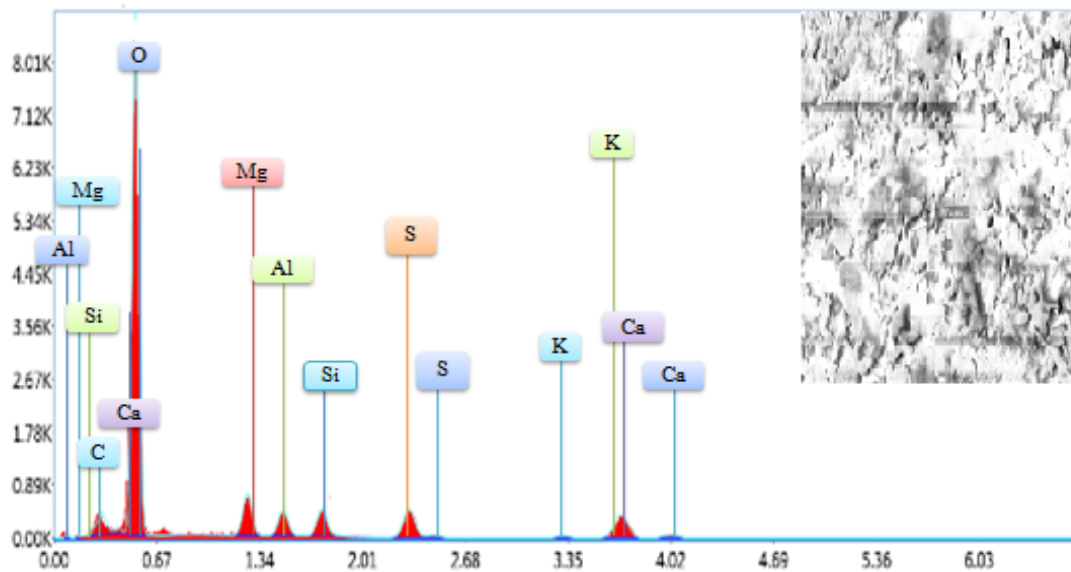


Figure 2.4. Spectre de l'analyse chimique du sable recyclés.

Deux variétés de gravillons, issues du concassage de roches calcaires extraites de la carrière de Sétif, ont été employées. Ils sont répartis en deux catégories granulométriques : la classe 3/8 et la classe 8/15. Les caractéristiques physiques des granulats (sable et gravillons) utilisés sont également répertoriées dans le tableau 2.3.

Tableau 2.3 : Caractérisation physique des granulats utilisés.

| Caractéristiques                               | Granulats Fin |                | Granulats Grossier |              |
|--|---------------|----------------|--------------------|--------------|
|  | Sable naturel | Sable recyclés | Gravier 3/8        | Gravier 8/15 |
| Provenance                                     | Oued Souf     | /              | Sétif              | Sétif        |
| Classe granulaire                              | 0/4           | 0/4            | 3/8                | 8/15         |
| Masse volumique apparente (g/cm <sup>3</sup> ) | 1.592         | 1.359          | 1.500              | 1.52         |
| Taux d'absorption d'eau (%)                    | 0.65          | 8.5            | 0.79               | 0.59         |
| Masse volumique absolue (g/cm <sup>3</sup> )   | 2.65          | 2.40           | 2.63               | 2.61         |
| Module de finesse                              | 2.24          | 3.01           | *                  | *            |
| Équivalent de sable (%)                        | 84.49         | 78.57          | *                  | *            |
| LA (%)   | *             | *              | 27.5               | 26.5         |

Les courbes granulométriques des granulats utilisés dans cette étude sont illustrées dans la Figure 2.5.

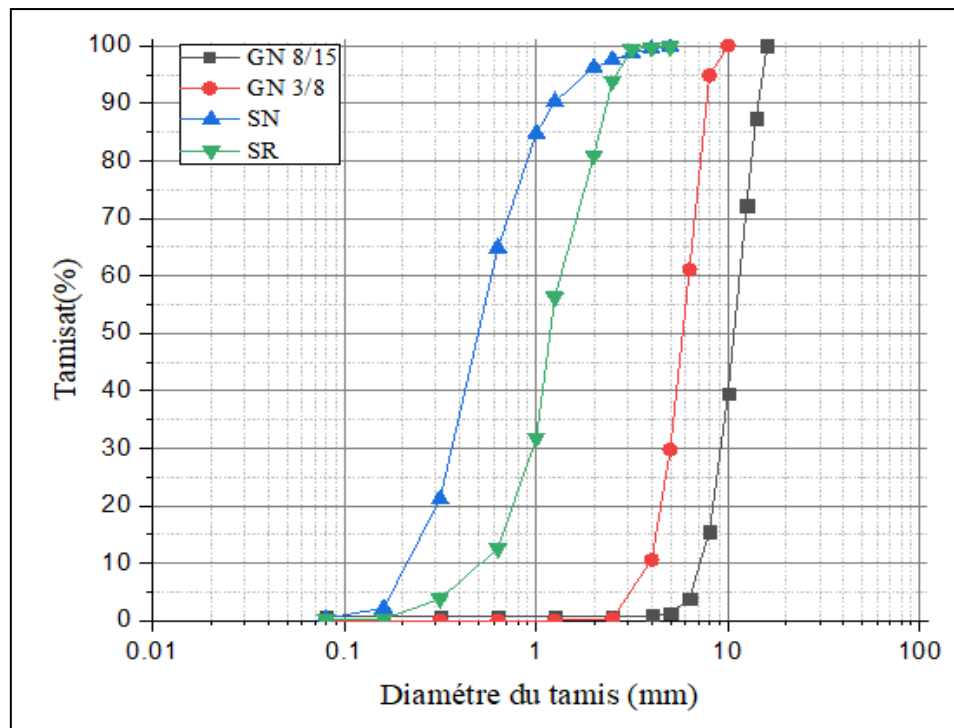
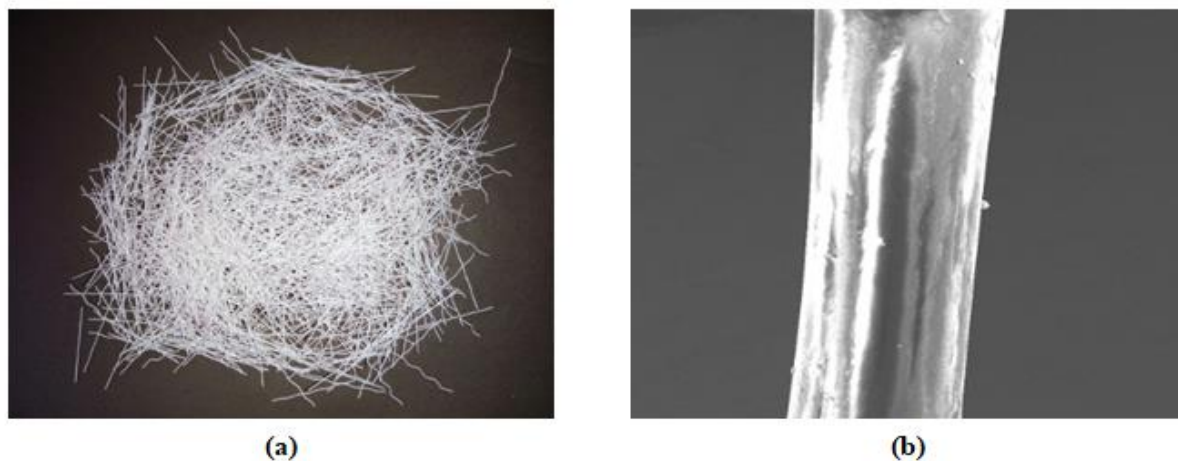


Figure 2.5: Distribution granulométrique des granulats employés.

### 2.2.3. Fibres de plastiques

Les fibres employées sont des fibres ondulées d'un diamètre de 0,44 mm, obtenues par le recyclage de déchets plastiques en polyéthylène téréphtalate (PET). Dans cette étude, les fibres ont été coupées à une longueur de 3 cm (figure 2.6). L'incorporation de ces fibres est réalisée en fonction du volume du béton. Leurs caractéristiques physiques et mécaniques sont représentées dans le tableau 2.4.



**Figure 2.6 :** Fibres plastiques de type PET : (a) photographie de la fibre (b) image MEB de la fibre.

**Tableau. 2.4.** Propriétés physico-mécaniques des fibres plastiques utilisées.

| Longueur (mm) | Largeur (mm) | Densité (g/cm <sup>3</sup> ) | Résistance à la traction (MPa) | Module d'élasticité (GPa) |
|---------------|--------------|------------------------------|--------------------------------|---------------------------|
| 30            | 0.44         | 0.690                        | 383                            | 7.17                      |

### 2.2.4. Superplastifiant

L'adjuvant superplastifiant (SP) employé dans cette recherche est un produit hautement efficace pour la réduction d'eau, fabriqué par la société Granitex-NP et commercialisé sous le nom de Medaflo 30. Il est disponible sous forme liquide, avec une plage de dosage recommandée de 0,5% à 2% en masse de poudre. Son pH est de 6 et sa densité est de 1,07. Il contient 30% d'extraits secs.

## 2.3. Formulation

Il existe plusieurs formulations de béton qui permettent d'obtenir un béton possédant les propriétés désirées en déterminant les quantités nécessaires de chaque matériau dans le

mélange. Nous avons opté pour la méthode japonaise d'Okamora dans notre étude, laquelle se concentre sur l'optimisation du mortier[1,2]. Cette approche se base sur le rapport entre l'eau et le liant (E/L), le rapport entre le sable et le mortier (S/M) et la quantité de superplastifiant (SP), dans le but de créer un mortier autoplaçant uniforme et stable, qui servira de base pour formuler notre BAP.

### 2.3.1. Formulation du mortier autoplaçant MAP

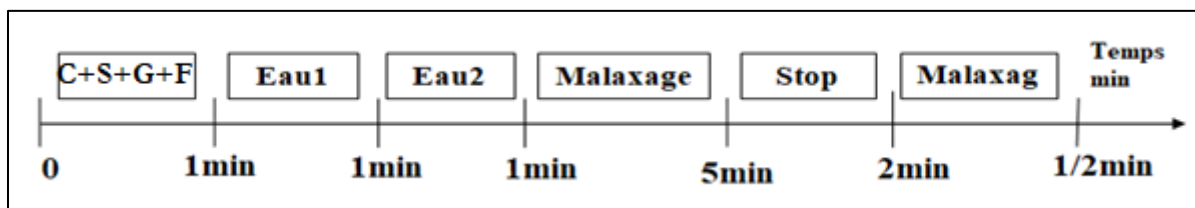
L'élaboration du mortier autoplaçant (MAP) représente une étape essentielle avant de passer à la préparation du BAP. Cette démarche vise à ajuster précisément la quantité de superplastifiant (SP) pour optimiser les caractéristiques du mortier à l'état frais, en vue d'atteindre les propriétés désirées. Dans cette étude, nous avons maintenu les rapports S/M et E/C constants, et nous avons déterminé expérimentalement le dosage du SP à partir d'essais sur le mortier frais. L'objectif était d'obtenir un étalement compris entre 270 à 330 mm pour tous les MAP, ainsi qu'un temps d'écoulement du V-funnel situé entre 2 et 10 secondes [129]. Dans nos essais, nous avons choisi de suivre la méthodologie proposée par Domone et Jin[129], qui se structure autour des étapes :

- Agiter à sec le ciment et le sable pendant environ 1 minute afin d'assurer l'uniformité du mélange (un malaxeur à mortier d'une capacité de 5 litres a été utilisé) ;
- Incorporer la première partie de l'eau (Eau1 = 70 % du volume total d'eau) pendant 1 minute ;
- Intégrer le reste de l'eau de gâchage (Eau2 = 30 % du volume total d'eau) préalablement mélangée avec le superplastifiant pendant 1 minute ;
- Poursuivre le malaxage du mélange pendant 3 minutes supplémentaires.

### 2.3.2. Formulation du béton autoplaçant BAP

L'objectif de formuler le Béton Autoplaçant (BAP) est de trouver la meilleure composition de mélange, en ajustant les quantités des divers granulats, du ciment, de l'eau et de l'adjuvant, afin d'atteindre un équilibre entre deux aspects essentiels : la fluidité et la stabilité, en garantissant une résistance adéquate à la ségrégation et au ressuage. Ainsi, les BAP doivent être soumis à plusieurs tests pour évaluer leurs principales caractéristiques à l'état frais, notamment la mobilité en milieu confiné, la mobilité en milieu non confiné et la stabilité.

- Mixer le sable, le ciment, les fibres et les graviers (de tailles 3/8 et 8/15) pendant une minute afin d'assurer une homogénéisation du mélange ;
- Incorporer la première partie de l'eau (Eau1 = 70% du volume total) au mélange pendant une minute ;
- Incorporer le superplastifiant dilué dans le reste de l'eau de gâchage (Eau2 = 30% du volume total) au mélange pendant une minute ;
- Poursuivre le malaxage du mélange pendant cinq minutes.
- Éteindre le malaxeur et laisser le mélange reposer pendant deux minutes.
- Mélanger pendant 30 secondes.
- Effectuer une vérification visuelle du ressuage.



**Figure 2.7:** Séquence de malaxage du BAP.

## 2.4. Essais sur MAP à l'état frais

### 2.4.1. Essais au Mini-Cône

L'essai d'étalement est réalisé pour évaluer la maniabilité du MAP en mesurant la moyenne des deux diamètres perpendiculaires ( $D_1$  et  $D_2$ ). Cet essai consiste à remplir un mini cône qui est placé au centre d'une plaque horizontale légèrement humidifiée. Une fois que le cône est soulevé, le mortier s'étale sur la plaque sous l'effet de son propre poids afin de former une galette circulaire. La Figure 2.8 présente le dispositif utilisé pour l'essai d'étalement des mortiers.

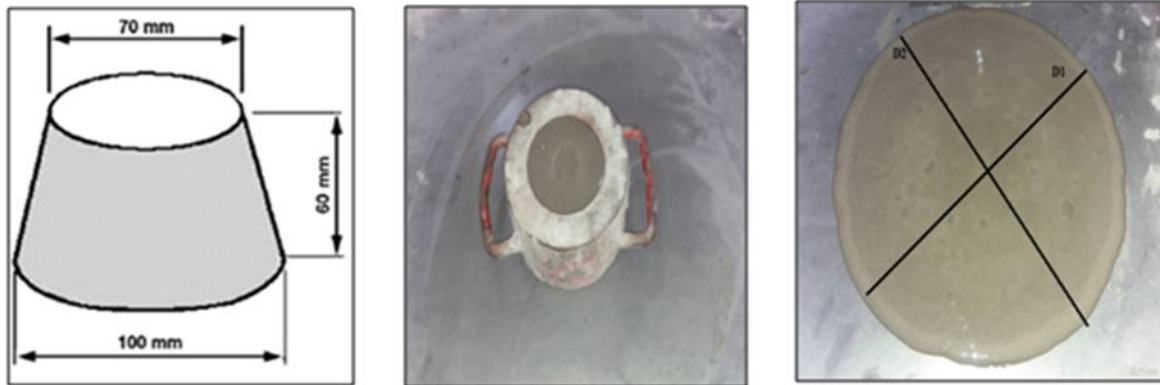


Figure 2.8 : Dispositif d'essai d'étalement pour mortier.

### 2.4.2. Essai à l'entonnoir en V (V-Funnel test)

Cet essai permet de calculer le temps d'écoulement  $T_{VF}$ , qui correspond au laps de temps entre l'ouverture de l'orifice du mini-entonnoir et l'apparition de la première lueur visible depuis son sommet. Ce temps d'écoulement est obtenu en remplissant l'entonnoir avec un volume de 1.1 litres de mortier.

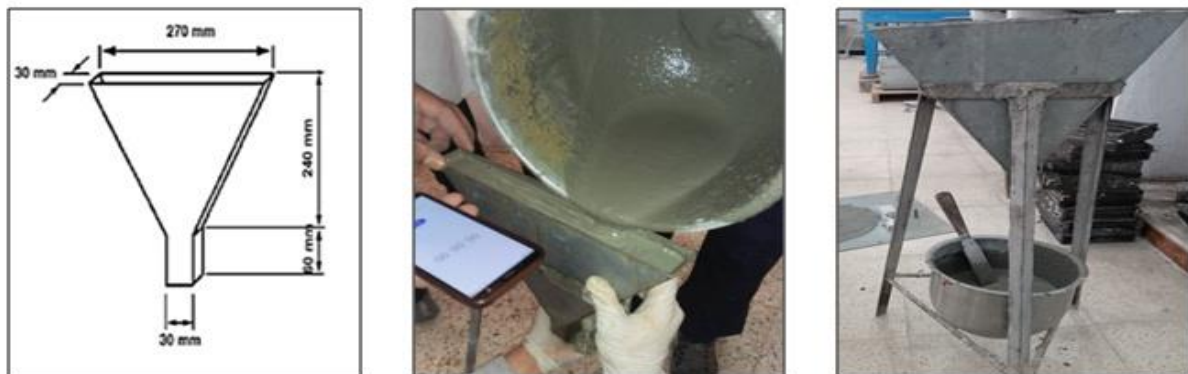


Figure 2.9 : Test de l'entonnoir en V pour le mortier.

## 2.5. Essais sur BAP à l'état frais

### 2.5.1. Essai d'étalement au cône d'Abrams (Flow test) et $T_{50}$

Cet essai vise à évaluer l'écoulement et la fluidité du BAP dans un environnement non confiné conformément à la norme européenne (EN 12350-8) [130]. Il vise à obtenir un étalement de l'ordre 550 à 850mm et un temps d'écoulement  $T_{50}$ , classé selon deux types :  $V_{S1}$  ( $T_{50} < 2s$ ) et  $V_{S2}$  ( $T_{50} > 2s$ ). L'essai implique le remplissage du cône d'Abrams positionné sur une plaque horizontale en acier préalablement humidifiée. Ensuite, le cône est soulevé verticalement, et le chronomètre est enclenché dès le soulèvement du cône jusqu'à ce que le



béton atteint le cercle de 50 cm gradué sur la plaque. Cette mesure correspond au T50. Une fois le cône soulevé, on mesure le diamètre moyen de l'étendue de la galette en prenant en compte les deux diamètres perpendiculaires. Ce diamètre (l'étalement au cône d'Abrams) peut être divisé en trois classes. Le tableau 2.5 définit ces trois classes en fonction du domaine d'utilisation du BAP.



**Figure 2.10** : Essai d'étalements au cône d'Abrams.

**Tableau 2.5** : Classification des BAP selon domaine d'utilisation [130].

| Classe     | Etalement (en mm) | Domaine d'utilisation de BAP   |
|------------|-------------------|--|
| <b>SF1</b> | 550 - 650         | <ul style="list-style-type: none"><li>• Structures nom ou peu ferraillées. Béton coulé à partir du haut (ex. les dalles).</li><li>• Coulage par système de pompage du BAP (ex. tunnels).</li><li>• Petites sections (ex. les piles et les fondations profondes).</li></ul> |
| <b>SF2</b> | 650 - 750         | <ul style="list-style-type: none"><li>• La majorité des applications.</li></ul>  |
| <b>SF3</b> | 750-850           | <ul style="list-style-type: none"><li>• Applications verticales.</li><li>• Structures trop ferraillées.</li><li>• Coulage à partir du dessous du coffrage.</li><li>• Structures de forme complexe.</li></ul>   |

### 2.5.2. Essai d'entonnoir en V (V-funnel)

Cet essai consiste à mesurer le temps d'écoulement à travers un entonnoir, ce qui sert de critère pour évaluer la viscosité du BAP. Il est défini selon la norme EN 12350-9 [130] et est classé en deux catégories en fonction de ce temps :

- $V_{S1}/V_{F1}$  est attribué lorsque le temps d'écoulement,  $t$ , est inférieur à 8 secondes. Cette classification est associée à un  $T_{50} < 2$  secondes.
- La classification  $V_{S2}/V_{F2}$  est assignée lorsque le temps d'écoulement se situe entre 9 et 25 secondes. Cela correspond à un  $T_{50} > 2$  secondes.

Avant de démarrer l'essai, il est crucial de placer le V-Funnel sur une surface stable et de vérifier que le clapet de fermeture à la base est bien fermé. Par la suite, nous avons versé du béton dans l'entonnoir jusqu'à ce que la première lueur soit visible à travers l'orifice.



**Figure 2.11:** Méthodologie de l'essai à l'entonnoir en (V-Funnel).

### 2.5.3. Essai de La Boîte En L (L-Box)

Cet essai vise à évaluer la capacité du BAP à se déplacer dans un espace confiné et à vérifier qu'aucun blocage de granulats n'entravera le coulage du béton. Il est effectué à l'aide d'une boîte en forme de L. La procédure implique de remplir la section verticale de la boîte avec du BAP et de laisser le béton reposer pendant une minute. Ensuite, la trappe est soulevée pour permettre au béton de s'écouler dans la partie horizontale à travers des armatures. Une fois que le béton s'est écoulé, la différence de hauteur entre la partie verticale ( $H1$  du côté de la trappe) et horizontale ( $H2$ ) est mesurée, et le résultat est exprimé en tant que rapport de remplissage  $H2/H1$ , selon les exigences de la norme européenne EN 12350-10[131].



**Figure 2.12 :** Méthodologie de l'essai de la boîte en forme de L (L-Box).

### 2.5.4. Essai de stabilité au tamis

Cet essai vise à évaluer la stabilité et l'uniformité de la composition du BAP. Il implique de peser le fond du tamis ainsi que le tamis vide, puis de placer le tamis sur le fond sur une balance et de réaliser la tare. Après un temps de repos de 15 minutes, une quantité de béton de 4,8 kg ± 0,2 kg est versée sur un tamis de 5 mm de hauteur de chute, selon les spécifications de la norme NF EN 12350-11[132]. Le poids de l'échantillon est enregistré, puis après une attente de 2 minutes, une tare est effectuée. Ensuite, le fond avec la laitance est pesé, et le pourcentage de laitance est calculé en utilisant l'équation suivante :

$$SI(\%) = \frac{P_{\text{Laitance}}}{P_{\text{Echantillon}}} \times 100 \quad 2.1$$



**Figure 2.13:** Protocole de l'essai de stabilité au tamis.

### 2.6. Essais sur BAP à l'état durci

#### 2.6.1. Résistance à la compression

La résistance à la compression a été évaluée à 28 et 90 jours en utilisant trois éprouvettes cubiques de dimensions (10×10×10 cm) qui ont été soumises à un écrasement uni-axial jusqu'à la rupture à l'aide d'une presse hydraulique de capacité 3000 kN. Cette méthode est conforme à la norme EN 12390-3 [133].



**Figure 2.14:** Test de résistance à la compression.

#### 2.6.2. Essai de résistance à la traction par fendage

Les résistances à la traction des bétons ont été évaluées à l'aide d'une presse hydraulique, en accord avec la norme NF EN 12390-6 [134]. L'essai consiste à charger une éprouvette cylindrique en béton (10×20 cm). L'éprouvette est positionnée horizontalement dans un dispositif métallique conçu pour maintenir l'équilibre de l'éprouvette entre les deux plateaux de la presse pendant le chargement (Figure 2.15).



**Figure 2.15 :** Test de résistance à la traction par fendage.

La résistance finale à la traction ( $f_{ctm,sp}$ ) est calculée en se basant sur la charge maximale (F) au point de rupture du béton, comme indiqué dans la formule suivante :

$$f_{ctm,sp} = \frac{2F}{\pi DL} \quad 2.2$$

Où :

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

### 2.6.3. Résistance à la traction par flexion

L'essai de résistance à la traction par flexion a été effectué en utilisant la méthode en trois points, conformément à la norme EN 12390-5 [ [135]. Cet essai a été effectué sur des éprouvettes prismatiques (7×7×28cm) à l'âge de 28 et 90 jours, en l'utilisant une presse hydraulique d'une capacité maximale de 150 kN.



**Figure 2.16 :** Essai de résistance à la flexion de trois points.

### 2.6.4. Module d'élasticité

Le module d'élasticité a été évalué selon les spécifications de la norme ASTM C469-02 [136] . Les tests ont été effectués sur des échantillons cylindriques de dimensions (10×20cm) à des âges de 90 jours. En utilisant un extensomètre mécanique à un seul capteur pour mesurer les déformations longitudinales de l'échantillon sous des charges croissantes, les échantillons ont été soumis à une contrainte maximale équivalente à 60 % de la résistance à la compression à 90 jours. Les résultats ont été obtenus en prenant la moyenne de trois essais.



**Figure 2.17 :** Essai de module d'élasticité.

### 2.6.5. Essai de Vitesse d'auscultation sonore (VAS)

L'essai de vitesse d'auscultation sonore (ultrason) vise à évaluer la vitesse de propagation des ondes longitudinales à travers une éprouvette cubique en béton (10×10×10 cm). Cet essai a été réalisé conformément à la norme ASTM C597-16[137]. Cette méthode implique l'émission d'une impulsion électrique dans l'éprouvette à partir d'un transducteur émetteur appliqué sur une surface plane lubrifiée avec de la vaseline. L'impulsion est captée par un transducteur récepteur, également appliqué sur une surface plane, en opposition et parallèle au premier. Lorsque l'impulsion est captée par le récepteur, le temps écoulé pour la propagation à travers l'éprouvette est affiché sur l'instrument, à partir d'une longueur connue (d). Par la suite, la vitesse de propagation des ondes longitudinales peut être déterminée en utilisant la formule suivante :

$$v = \frac{\text{Distance}(d)}{\text{Temp}(t)} \quad 2.3$$



**Figure 2.18:** Mesure de la vitesse d'auscultation sonore.

### 2.6.6. Essai de Porosité

L'essai de porosité accessible à l'eau est réalisé après 90 jours conformément à la norme NF P18-459 [138]. Cet essai implique la découpe de trois disques mesurant  $100 \times 50$  mm à partir d'éprouvettes cylindriques ayant un diamètre de 100 mm et une hauteur de 200 mm. Les disques sont maintenus dans des étuves jusqu'à ce que deux pesées successives ne diffèrent pas de plus de 0,1 %, et la masse résultante est enregistrée sous la dénomination  $M_{sec}$  (masse sèche). Ensuite, l'échantillon est soumis à une imbibition sous vide à l'aide d'une pompe pendant 4 heures dans un dessiccateur. Après cela, les échantillons sont immergés complètement dans l'eau pendant  $18 \pm 2$  heures. Les éprouvettes sont ensuite sorties de l'eau et pesées dans l'eau ( $M_{eau}$ ) et dans l'air ( $M_{air}$ ). Le calcul de la porosité accessible à l'eau est exprimé par l'équation suivante :

$$\text{Porosité (\%)} = \frac{M_{air} - M_{sec}}{M_{air} - M_{eau}} \times 100 \quad 2.4$$

Où :

$M_{air}$ ,  $M_{sec}$  et  $M_{eau}$  : sont les masses d'éprouvette imbibée pesée dans l'air, sèche et dans l'eau.



**Figure 2.19:** Essai de porosité.

### 2.6.7. Absorption d'eau par immersion totale

Cet essai implique de sécher un disque de béton ( $200 \times 50$  mm) dans une étuve à une température de  $105 \pm 5^\circ\text{C}$  jusqu'à ce que deux pesées successives ne présentent pas une différence de plus de 0,5 % selon la norme ASTM C642-97 [139]. Ensuite, les échantillons sont retirés et laissés refroidir, puis ils sont pesés, ce qui donne la masse  $M_1$ .

Par la suite, les éprouvettes sont immergées complètement dans l'eau à  $21^\circ\text{C}$  pendant 72 heures. Après cette période, les éprouvettes sont retirées, puis après avoir tamponné leurs

surfaces avec une serviette, elles sont pesées de nouveau, ce qui donne la masse  $M_2$ . Le taux d'absorption est calculé comme suit :

$$Ab (\%) = \frac{M_2 - M_1}{M_1} \times 100 \quad 2.5$$

Où

- $Ab$  : le taux d'absorption en % ;
- $M_1$  : masse de l'éprouvette à l'état saturé en kg ;
- $M_2$  : masse de l'éprouvette à l'état sec en kg.

### 2.6.8. Essai de Perméabilité à l'eau

Les tests de perméabilité à l'eau visent à évaluer la profondeur de pénétration de l'eau sous une pression de 5 bars appliquée sur la surface inférieure au centre d'éprouvette cubique de 150 mm de dimension pendant une période de  $72h \pm 2h$ . Ces essais ont été effectués conformément à la norme NF EN 12390-8 [140]. Après 72 heures sous pression, les échantillons sont subdivisés en deux parties à l'aide de l'essai de traction par fendage (essai Brésilien). Ensuite, en utilisant un pied à coulisse, la profondeur de pénétration de l'eau en hauteur est mesurée (voir Figure 2.20). Les valeurs d'échelle de classification pour l'essai de perméabilité à l'eau sont présentées.

- Faible perméabilité si le  $P_f < 30\text{mm}$ ,
- Moyen perméabilité si  $30 \leq P_f \leq 60\text{mm}$ ,
- Perméabilité élevée si  $P_f > 60\text{mm}$ .



Figure 2.20 : Essai de perméabilité a l'eau.



### 2.6.9. Essai de Perméabilité aux ions chlorure

L'essai consiste à mesurer l'intensité du courant à travers un disque de béton (100×50mm) placé entre deux compartiments d'une cellule de diffusion. Le courant est produit par une tension constante de 60 volts maintenue pendant 6 heures, conformément à la norme ASTM 1202-12[141]. L'un des compartiments de la cellule contient une solution de Na Cl dosée à 30 g/l (compartiment amont : cathode), tandis que l'autre compartiments contient une solution de NaOH 0.3N (compartiment aval : anode). Avant chaque essai, les échantillons sont soumis à une saturation en eau après avoir été vidés de toute air à l'intérieur des échantillons à l'aide d'une pompe à vide. Le tableau 2.6 illustre la classification de l'évaluation de la performance du béton en fonction de sa perméabilité aux ions chlorure.

**Tableau 2.6 :** Classification du béton selon la perméabilité aux ions chlorure [141].

| Charge totale passée | Qualité du béton |
|----------------------|------------------|
| >4000                | Elever           |
| 2000-4000            | Modérée          |
| 1000-2000            | Faible           |
| 100-1000             | Très faible      |
| <100                 | Négligeable      |

### 2.6.10. Essai de Perméabilité à gaz

La mesure de la perméabilité au gaz a été effectuée en utilisant une perméamétrie à charge constante de type CEMBUREAU, conforme à la norme NF XP P18-463 [142]. Les spécimens utilisés pour cette épreuve sont des cylindres d'une dimension de 15 centimètres de diamètre et de 5 centimètres de hauteur. Cet essai implique de placer ces spécimens dans une étuve ventilée à une température maintenue à  $105 \pm 5^\circ\text{C}$  jusqu'à ce que leur masse se stabilise. Ensuite, elles sont confinées latéralement et verticalement pour assurer un écoulement radial unidirectionnel de gaz. Essai de perméabilité apparente au gaz consiste à soumettre le disque à trois pressions différentielles (1.5, 2.5 et 3.5 bars). À chaque pression, le coefficient de perméabilité apparente  $K_{app}$  est déterminé en utilisant l'équation suivante :

$$K_{app} (\%) = \frac{2\mu QL P_{atm}}{A(P_1^2 - P_{atm}^2)} \quad 2.6$$

Où

- L: L'épaisseur de l'éprouvette;
- A: L'aire de la section transversale de l'échantillon;
- Q: Le flux de gaz ( $m^3/s$ ).
- $\mu$ : est le coefficient de viscosité dynamique de l'azote gazeux ( $17,5 \times 10^{-6}$  Pa.s);
- $P_i, P_{atm}$ : est la pression d'entrée et atmosphérique respectivement.



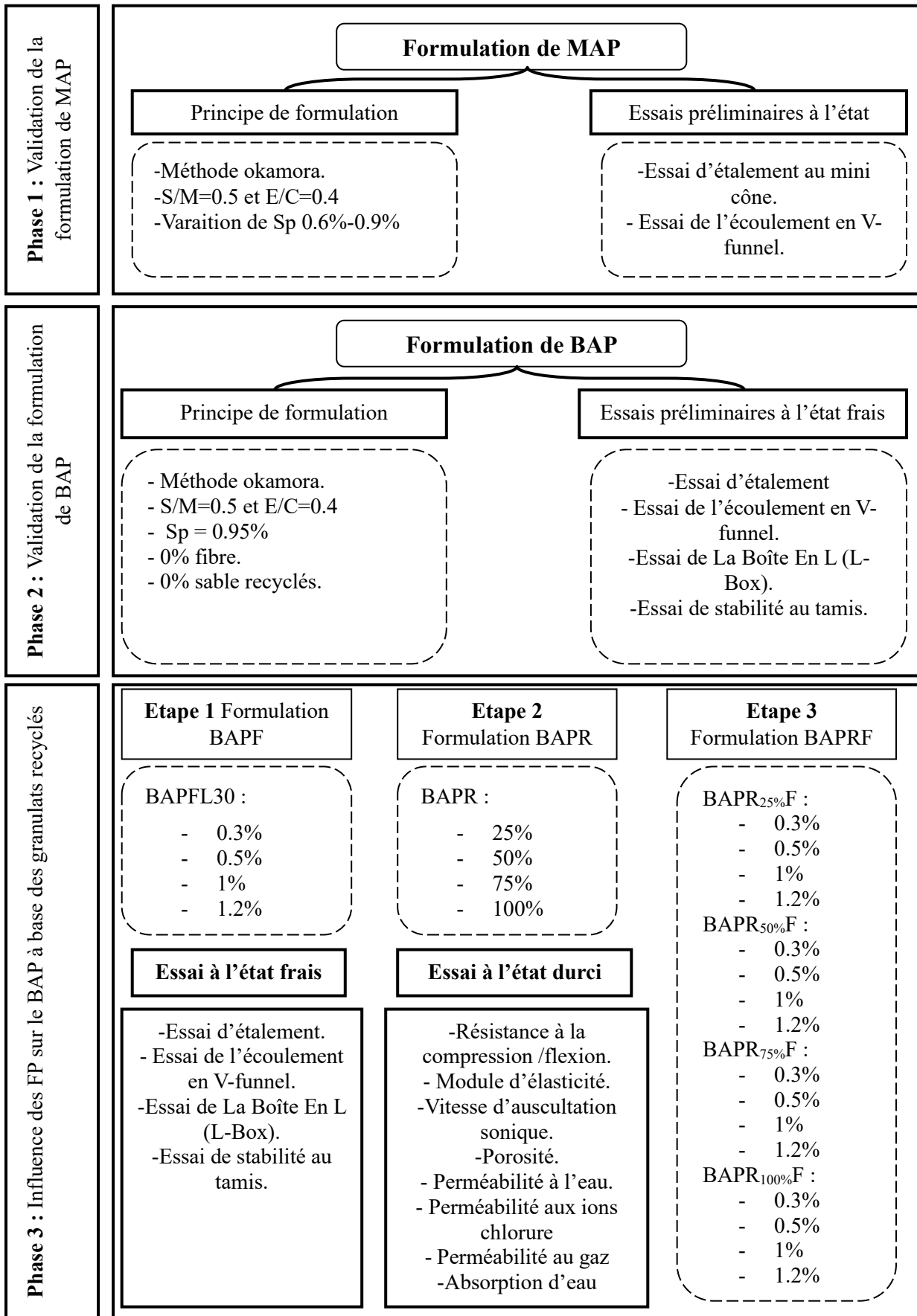
**Figure 2.21.** Dispositif de l'essai de perméabilité au gaz.

### 2.7. Conclusion

Cette recherche se concentre sur l'impact des fibres de polyéthylène téréphtalate dans le béton autoplaçant (BAP) contenant des granulats fins recyclés de béton sur son aptitude au gâchage, ainsi que sur ses propriétés physiques, mécaniques et sa durabilité. Pour atteindre cet objectif, nous avons tout d'abord validé la formulation du béton témoins sans fibres en utilisant des granulats naturels et en évaluant leurs caractéristiques. Dans cette optique, 12 mélanges de mortier autoplaçant (MAP) ont été formulés en utilisant la méthode d'Okamura, et ces mélanges ont été soumis à des essais à l'état frais (Mini-Cône et d'entonnoir en V (V-funnel)) en vue de parvenir à la formulation du BAP.

Le choix de la formulation optimale a été déterminé à partir de ces essais, visant à fixer les dosages en superplastifiant et en sable. Cette partie de l'étude a abordé successivement les aspects suivants :

- Les expérimentations menées dans le cadre de cette étude avaient pour objectif d'évaluer les propriétés rhéologiques des BAP en utilisant diverses méthodes d'essais, dont le test d'étalement, le test d'écoulement à travers un entonnoir en forme de V et le test de stabilité sur tamis.
- Des expériences ont été réalisées à l'état durci afin d'examiner l'influence des fibres de polyéthylène téréphtalate et des granulats recyclés de béton sur des aspects tels que la résistance à la compression, la flexion, la traction par fendage, la vitesse d'auscultation et le module d'élasticité.
- Pour conclure, des épreuves de durabilité sont menées pour évaluer les performances des diverses compositions en matière de transfert, à travers des tests de porosité, de perméabilité aux gaz, à l'eau et aux ions chlorure.



## **CHAPITRE 3**

# **INFLUENCE DES FIBRES PLASTIQUES DE TYPE PET SUR UN BAP A BASE DE SABLE RECYCLES**

---

### 3. INFLUENCE DES FIBRES PLASTIQUES DE TYPE PET SUR UN BAP A BASE DE SABLE RECYCLES

#### 3.1. Introduction

Ce chapitre se concentre sur la réalisation d'essais sur le mortier dans le but d'optimiser le rapport entre le sable et le mortier (S/M) ainsi que le rapport entre le superplastifiant et le liant (SP/L). Ces résultats seront ultérieurement intégrés dans la formulation du BAP. Par la suite, nous avons examiné l'influence des fibres sur la maniabilité des bétons autoplaçants recyclés (BAPR), en plus d'analyser les caractéristiques mécaniques et les propriétés de durabilité du béton.

#### 3.2. Études des MAP

##### 3.2.1. Optimisation des rapports S/M et SP/L

La formulation du mortier autoplaçant est réalisée en utilisant la méthode japonaise. Cette méthode implique la réalisation de plusieurs essais pour obtenir un mortier de grande fluidité avec un étalement compris entre 270 et 330 mm ont été sélectionnés pour obtenir une viscosité adéquate, avec des temps d'écoulement compris entre 2 et 10 secondes, tout en évitant les effets de ségrégation et de ressuage. L'objectif est d'optimiser les rapports SP/L et S/M. Trouver les dosages optimaux de ces paramètres vise à simplifier la formulation du béton et à assurer des performances optimales du BAP à la fois à l'état frais et durci.

Nous avons modifié le pourcentage de superplastifiant (SP) de 0,6 % à 0,9 % par incréments de 0,1 %. Les rapports sable/mortier (S/M) ont été maintenus constants à 0,45 et 0,5, ainsi que le rapport eau/ciment (E/C) à 0,40 [143]. Les résultats des essais d'étalement au mini-cône et des temps d'écoulement au mini-V funnel pour déterminer le SP optimal et le rapport S/M sont résumés dans le tableau 3.1.

D'après le tableau ci-dessus, nous pouvons observer qu'à mesure que le pourcentage de superplastifiant (SP) augmente, l'étalement du mortier augmente également. Cette augmentation est attribuable à l'action du superplastifiant qui disperse les particules de ciment, favorisant ainsi la fluidification du mélange. Nous avons observé que les mortiers préparés avec un dosage de 0,6 % de SP et un rapport S/M de 0,45 et 0,5 ont produit un étalement inférieur à la limite recommandée. En revanche, les dosages de 0,8% et 0,9% avec un rapport S/M de 0,5 ont permis d'obtenir un mortier autoplaçant présentant une bonne fluidité sans ségrégation, avec

## CHAPITRE 3 : INFLUENCE DES FIBRES PLASTIQUES DE TYPE PET SUR UN BAP A BASE DE SABLE RECYCLES

un diamètre de 301 et 317 mm respectivement. Il est important de noter que l'intervalle recommandée pour l'étalement se situe entre 270 et 330 mm.

De plus, les observations visuelles pour le mélange avec un dosage de 1% révèlent des signes de ressuage, caractérisés par une couche de laitance en périphérie de la galette de mortier et une accumulation de sable au centre de celle – ci. Ainsi, un dosage en SP de 0,9% associé à un rapport S/M de 0.5 offre un mortier homogène avec un étalement considérable, sans risque de ressuage ni de ségrégation. Cette étape préliminaire nous a permis de fixer le dosage optimal de SP à 0.9% et un rapport S/M de 0.5.

**Tableau 3.1.** Résultats d'étalement sur MAPT pour différents % de SP et S/M.

| MAPT formulés          |          |               |                  |                  |                    |
|------------------------|----------|---------------|------------------|------------------|--------------------|
| Mélanges               |          | MAP1          | MAP2             | MAP3             | MAP4               |
| Sp(%)                  |          | 0.6           | 0.7              | 0.8              | 0.9                |
| Étalement (mm)         | S/M=0.45 | 256<270       | 292>270          | 326<330          | 347>330            |
|                        | S/M=0.5  | 219.5<270     | 276.5>270        | 301<330          | 317<330            |
| Temps d'écoulement (s) | S/M=0.45 | 5.03<10       | 4.06<10          | 3.81>2           | 3.16>2             |
|                        | S/M=0.5  | 15.58>10      | 7.99<10          | 6.33<10          | 6.17<10            |
| Observation (0.45)     |          | Mélange ferme | Mélange homogène | Mélange homogène | Risque de Ressuage |
| Observation (0.5)      |          | Mélange ferme | Mélange homogène | Mélange homogène | Mélange homogène   |

### 3.3. Études des BAP

Dans cette partie, nous avons étudié l'effet de la substitution des granulats naturels (GN) ainsi que du dosage en fibres sur les performances du BAP à travers une série d'essais conformément aux normes Européens pour les BAP [14]. Dans la phase initiale, nous avons développé une composition de BAP en utilisant des GN, en se basant sur les conclusions d'optimisation tirées du mortier. Ensuite, nous avons maintenu le rapport S/M à 0,5, le rapport E/C à 0,4, et la proportion SP/L variable pour toutes les compositions de béton utilisées dans cette étude.

### CHAPITRE 3 : INFLUENCE DES FIBRES PLASTIQUES DE TYPE PET SUR UN BAPA BASE DE SABLE RECYCLES

Dans la phase suivante, nous avons conçu cinq mélanges de béton en substituant progressivement le sable naturel (SN) par du sable recyclé (SR) à des proportions de 0 %, 25 %, 50 %, 75 % et 100 % en poids. De plus, nous avons appliqué différents dosages en fibres (0.3%,0.5%,1%, et 1.2% en volume) pour chaque composition. Les spécificités de ces compositions sont répertoriées dans le tableau 3.2.

L'évaluation de l'état frais de cette étude a été réalisée à travers divers essais, notamment la mesure de la densité, l'essai d'étalement (avec la prise en compte du diamètre et du T500), l'essai de l'entonnoir en V (incluant la mesure du temps d'écoulement), l'essai de la boîte en L, ainsi que l'essai de la résistance à la ségrégation par tamisage. Tous ces essais ont été réalisés conformément aux directives européennes pour les BAP [17].

**Tableau 3.2.** Composition des différentes BAP étudié par kg dans un 1 m<sup>3</sup>.

|                   | Mélanges     | Ciment | SN     | SR     | GN     |        | FPET | SP   | E/C |
|-------------------|--------------|--------|--------|--------|--------|--------|------|------|-----|
|                   |              |        |        |        | 3/8    | 8/15   |      |      |     |
| <b>Series I</b>   | 0SR+0FPET    | 483.69 | 922.43 | -      | 249.68 | 500.36 | -    | 4.60 | 0.4 |
|                   | 0SR+0.3FPET  | 483.69 | 922.43 | -      | 249.68 | 500.36 | 2.07 | 4.69 | 0.4 |
|                   | 0SR+0.5FPET  | 483.69 | 922.43 | -      | 249.68 | 500.36 | 3.45 | 4.69 | 0.4 |
|                   | 0SR+1FPET    | 483.69 | 922.43 | -      | 249.68 | 500.36 | 6.9  | 4.84 | 0.4 |
|                   | 0SR+1.2FPET  | 483.69 | 922.43 | -      | 249.68 | 500.36 | 8.28 | 4.84 | 0.4 |
| <b>Series II</b>  | 25SR+0FPET   | 483.69 | 691.82 | 230.60 | 249.68 | 500.36 | -    | 4.60 | 0.4 |
|                   | 25SR+0.3FPET | 483.69 | 691.82 | 230.60 | 249.68 | 500.36 | 2.07 | 4.69 | 0.4 |
|                   | 25SR+0.5FPET | 483.69 | 691.82 | 230.60 | 249.68 | 500.36 | 3.45 | 4.69 | 0.4 |
|                   | 25SR+1FPET   | 483.69 | 691.82 | 230.60 | 249.68 | 500.36 | 6.9  | 4.84 | 0.4 |
|                   | 25SR+1.2FPET | 483.69 | 691.82 | 230.60 | 249.68 | 500.36 | 8.28 | 4.84 | 0.4 |
| <b>Series III</b> | 50SR+0FPET   | 483.69 | 461.21 | 461.21 | 249.68 | 500.36 | -    | 4.60 | 0.4 |
|                   | 50SR+0.3FPET | 483.69 | 461.21 | 461.21 | 249.68 | 500.36 | 2.07 | 4.69 | 0.4 |
|                   | 50SR+0.5FPET | 483.69 | 461.21 | 461.21 | 249.68 | 500.36 | 3.45 | 4.69 | 0.4 |
|                   | 50SR+1FPET   | 483.69 | 461.21 | 461.21 | 249.68 | 500.36 | 6.9  | 4.84 | 0.4 |
|                   | 50SR+1.2FPET | 483.69 | 461.21 | 461.21 | 249.68 | 500.36 | 8.28 | 4.84 | 0.4 |
| <b>Series IV</b>  | 75SR+0FPET   | 483.69 | 230.60 | 691.82 | 249.68 | 500.36 | -    | 4.60 | 0.4 |
|                   | 75SR+0.3FPET | 483.69 | 230.60 | 691.82 | 249.68 | 500.36 | 2.07 | 4.69 | 0.4 |
|                   | 75SR+0.5FPET | 483.69 | 230.60 | 691.82 | 249.68 | 500.36 | 3.45 | 4.69 | 0.4 |
|                   | 75SR+1FPET   | 483.69 | 230.60 | 691.82 | 249.68 | 500.36 | 6.9  | 4.84 | 0.4 |



### CHAPITRE 3 : INFLUENCE DES FIBRES PLASTIQUES DE TYPE PET SUR UN BAP A BASE DE SABLE RECYCLES

|                 |               |        |        |        |        |        |      |      |     |
|-----------------|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|------|------|-----|
|                 | 75SR+1.2FPET  | 483.69 | 230.60 | 691.82 | 249.68 | 500.36 | 8.28 | 4.84 | 0.4 |
|                 | 100SR+0FPET   | 483.69 | -      | 922.43 | 249.68 | 500.36 | -    | 4.60 | 0.4 |
|                 | 100SR+0.3FPET | 483.69 | -      | 922.43 | 249.68 | 500.36 | 2.07 | 4.69 | 0.4 |
| <b>Series V</b> | 100SR+0.5FPET | 483.69 | -      | 922.43 | 249.68 | 500.36 | 3.45 | 4.69 | 0.4 |
|                 | 100SR+1FPET   | 483.69 | -      | 922.43 | 249.68 | 500.36 | 6.9  | 4.84 | 0.4 |
|                 | 100SR+1.2FPET | 483.69 | -      | 922.43 | 249.68 | 500.36 | 8.28 | 4.84 | 0.4 |

#### 3.4. Etude l'effet du SR et les fibres PET sur le comportement des BAP à l'état frais

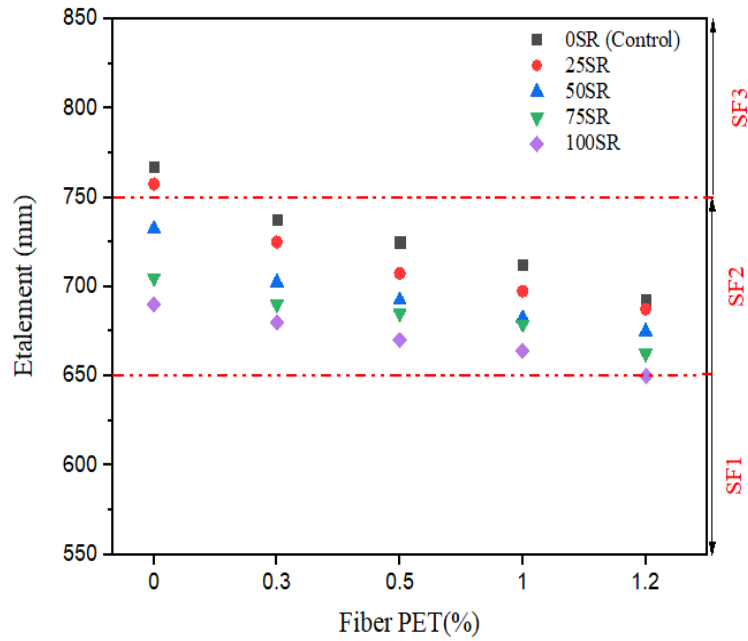
La maniabilité du béton à l'état frais est une caractéristique essentielle qui peut être évaluée à l'aide de l'essai d'étalement au cône d'Abrams. Les données recueillies révèlent que le diamètre d'étalement et le temps d'écoulement T500 du béton de référence sont respectivement de 767,5 mm et 0,86 seconde. De plus, le rapport  $H_2/H_1$  est supérieur à 0,8, ce qui satisfait aux exigences de l'EFNARC [17].

##### 3.4.1. Étalement et temps T50 au cône d'Abrams

Les résultats d'étalement et de temps d'écoulement T500 pour les diverses compositions de BAP en fonction du dosage en fibres sont illustrés dans les figures 3.1 et 3.2. Les valeurs d'étalement obtenues se situent entre 650 et 800 mm.

D'après la figure 3.1, nous observons que le diamètre d'écoulement diminue à mesure que le pourcentage des sables recyclés (SR) augmente. Les formulations avec 75 % et 100 % de sable recyclé montrent une baisse de 8,15 % et 10,09 % respectivement par rapport au béton de référence en termes de fluidité. Cette réduction de la maniabilité est due à la surface spécifique plus élevée des SR ainsi qu'à leur capacité d'absorption d'eau supérieure par rapport aux agrégats naturels [97], [144].

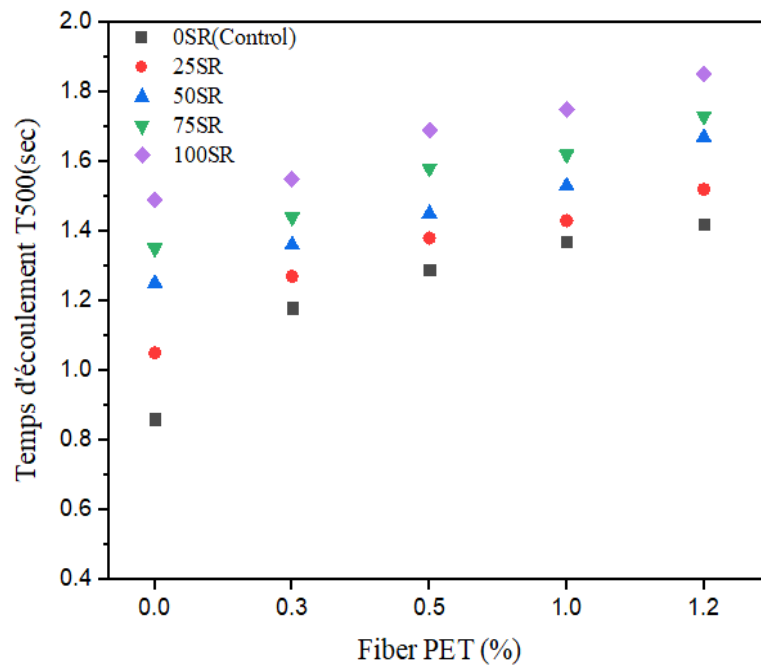
L'analyse des résultats révèle également que l'utilisation des fibres polyéthylène téréphtalate (FPET) entraîne une légère diminution de l'étalement pour tous les mélanges de BAPR contenant 0,3% et 0,5% de FPET par rapport à ceux contenant 1 % et de 1,2 % de FPET. Cette variation peut être attribuée aux différences dans le dosage de superplastifiant, ainsi qu'à la surface spécifique plus élevée de ces fibres [51].



**Figure 3.1.** Étalement en fonction de SR et FPET pour les différents BAP.

La figure 3.2 présente de manière évidente les résultats du temps d'écoulement en fonction de SR et FPET. Les valeurs du temps d'écoulement T500 varient entre 0.5 et 2 secondes, ce qui diffère des valeurs proposées par campos et al [99]. Nous avons noté que la variation du T500 augmente proportionnellement à l'augmentation de la substitution partielle du sable naturel par le sable recyclé. Les mélanges avec une substitution complète de 100 % affichent la valeur la plus élevée de T500.

En outre, la Figure 3.2 illustre également les valeurs T500 obtenues pour les mélanges contenant du SR et des dosages différents en fibres, qui sont inférieures à celles obtenues pour les mélanges avec substitution de SN par le SR seul. La valeur maximale enregistrée est observée pour le mélange contenant 100% de sable recyclé et 1,2% de fibres de PET. On a attribué cette réduction de la maniabilité du béton à la configuration des fibres, qui a restreint le déplacement des matériaux dans le mélange en raison de leurs extrémités acérées et de leur longueur par rapport aux granulats [145].

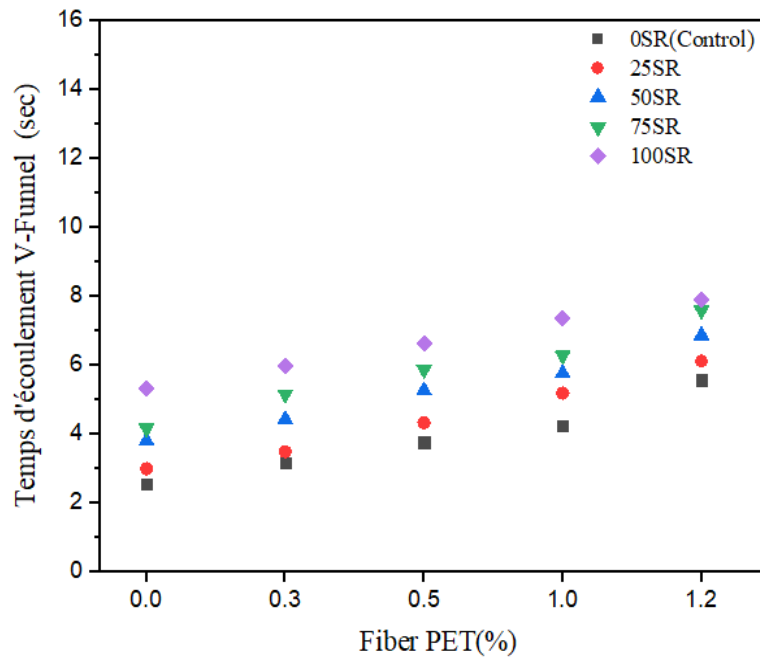


**Figure 3.2.** Évolution du temps d'écoulement  $T_{500}$  en fonction de SR et FPET pour les différents BAP.

### 3.4.2. Temps d'écoulement par l'essai d'entonnoir en V (V-Funnel)

Les résultats relatifs à la fluctuation du temps d'écoulement lors de l'essai d'entonnoir (V-Funnel) pour tous les mélanges de BAP sont illustrées dans la figure 3.3. D'après ces résultats, il est notable que toutes les valeurs de temps d'écoulement des mélanges de BAP respectent les normes de l'EFNARC et sont catégorisées dans les classes (VF1-VF2) [17]. Il est notable que la substitution du SN par SR entraîne une augmentation du temps d'écoulement des BAP par rapport au BAPT, se situant dans la plage de 2 à 6 secondes. Le mélange contenant 100 % de SR présente une viscosité plastique élevée qui pourrait induire une perte de la propriété de capacité d'écoulement, ce qui est dû à la teneur en poudre et à l'augmentation de la surface spécifique du SR [106]. Cette observation est cohérente avec celle mentionnée dans [146].

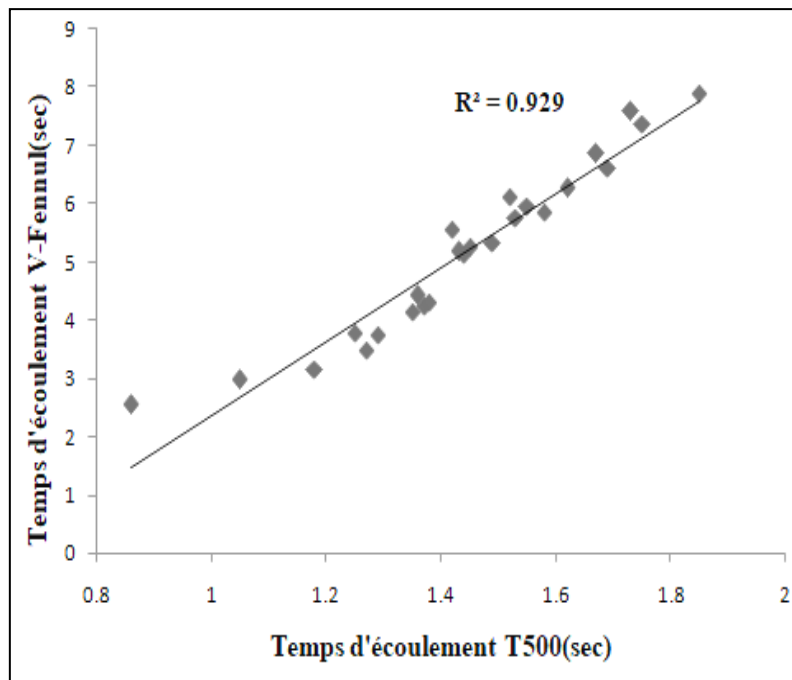
Mahakavi et al. [147] ont signalé que des temps d'écoulement plus longs dans le test V-Funnel indiquent une viscosité plus élevée du mélange, ce qui peut entraîner une maniabilité inférieure. Cette observation pourrait être associée à la texture rugueuse et à la forme angulaire des particules de sable recyclé, ce qui accroît la friction entre ces granulats recyclés et la pâte de ciment.



**Figure 3.3.** Variation du temps d'écoulement en fonction du taux de SR et des fibres de PET pour les divers BAP.

Selon la figure 3.3, nous pouvons remarquer que l'ajout de FPET augmente le temps d'écoulement (V-Funnel) des BAPR par rapport au BAPT. Cependant, les temps d'écoulement enregistrés restent conformes aux propriétés des BAP grâce à l'augmentation du dosage en SP, avec des valeurs variantes entre 2 et 8 secondes. Cette augmentation résulte de la diminution de l'épaisseur de la couche de pâte de ciment entourant les granulats, ainsi que de la friction élevée entre les fibres et les granulats, ce qui diminue la vitesse d'écoulement et accroît la viscosité du mélange[9,10] .

La figure 3.4 présente la relation linéaire établie pour confirmer une corrélation étroite entre le temps d'écoulement au V-Funnel ( $T_{Vf}$ ) et le temps d'écoulement  $T_{500}$  ( $R^2=0,96$ ).

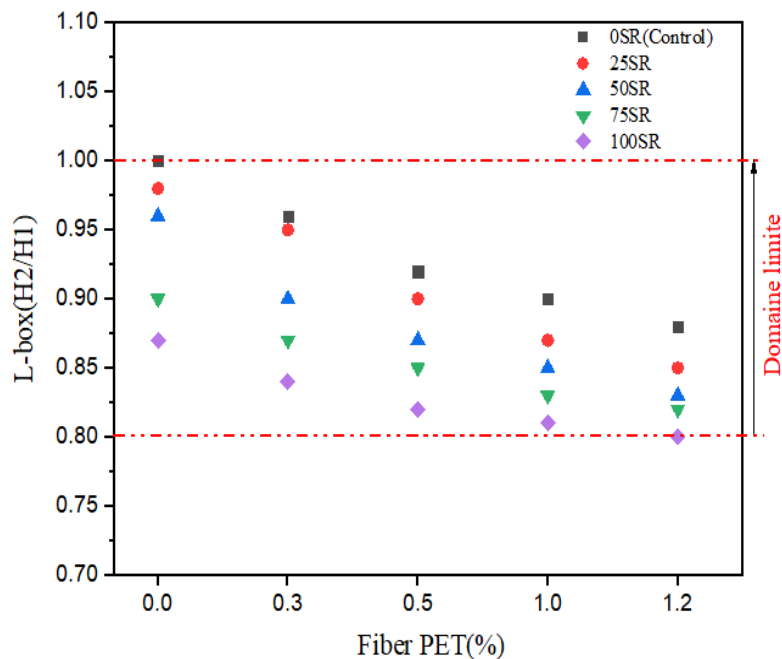


**Figure 3.4.** Relation entre le temps d'écoulement T500 et TV-F.

### 3.4.3. Essai de la Boîte en L (L-Box)

Le rapport H2/H1 dans l'essai de la boîte en L peut être interprété comme un indicateur de la capacité de passage du BAP. Selon les recommandations de l'EFNARC [17], ce rapport ne doit pas être inférieur à 0,8 pour garantir une capacité de passage adéquate du BAP. La substitution des SN par des SR a entraîné une réduction du rapport H2/H1 mesuré dans cette étude. La diminution du taux s'est située entre environ 2 % pour une substitution de 25 % de SR et 13 % pour une substitution de 100 % de SR. Les taux de réduction du rapport H2/H1 ont augmenté en fonction de l'accroissement du taux de substitution de SR, comme illustré dans la figure 3.5.

On remarque également que la présence des FPET dans les mélanges des BAPR donne lieu à faible réduction du rapport H2/H1 entre les deux niveaux de dosage des fibres (environ 0,1% à 0,2%). Les mélanges contenant 100% SR+1.2% FPET ont montré une réduction significative de la capacité de passage. Al-Hadithi et Hilal et al. [53] ont remarqué que l'intégration d'un volume significatif de fibres plastiques n'est pas adaptée à la fabrication de béton autoplaçant. Les fibres PET perturbent la fluidité des mélanges de béton en agissant comme un obstacle à l'écoulement du béton dans une direction donnée.



**Figure 3.5.** Rapport H2/H1 en fonction de SR et FPET pour les différents BAP.

Mohsen Oghabi. [59] examiné l'effet des fibres plastiques sur les propriétés des BAP et a constaté une diminution notable de la capacité de remplissage de la boîte en L avec l'augmentation du contenu et de la longueur des fibres. De manière similaire, Khaled and Mazin. [148] ont préparé un BAP avec des fibres plastique et ont constaté une diminution du rapport H2/H1 avec l'augmentation du dosage en fibres.

#### 3.4.4. Stabilité au Tamis

La figure 3.6 présente la fluctuation de la stabilité en relation avec la concentration en fibres et le taux de remplacement des SN par des SR. Les résultats des essais de stabilité au tamis révèlent que les formulations de BAP intégrant exclusivement des SR se situent entre 6% et 13 %, tandis que ces pourcentages diminuent pour les séries de BAP incorporant à la fois des SR et des FPET, surtout avec des taux de substitution de 100 %. Le remplacement de SR par des SN entraîne une diminution des valeurs du pourcentage de laitance. Cette observation peut être attribuée à la présence d'une quantité importante de fines particules dans les granulats SR, ainsi qu'à leur taux d'absorption plus élevé [149].

Fiol et al. [116] ont déduit que tous les mélanges de BAP contenant des granulats recyclés ont atteint une fluidité stable grâce à la réduction du rapport E/C, qui est compensée par l'utilisation de superplastifiants dans le mélange. Cette approche permet de contrer le coefficient d'absorption d'eau plus élevé des granulats recyclés.

### CHAPITRE 3 : INFLUENCE DES FIBRES PLASTIQUES DE TYPE PET SUR UN BAP A BASE DE SABLE RECYCLES

Par ailleurs, on peut également observer que les bétons sont affectés à la fois par la concentration en fibres et le taux de substitution des SR. Une augmentation de la concentration en fibres et en SR entraîne une diminution plus marquée du pourcentage de laitance. Cependant, les valeurs obtenues restent acceptables conformément aux recommandations.

Zeyad et al. [150] ont examiné l'effet de quatre types de fibres sur la stabilité au tamis du BAP et ont observé que les fibres plastiques réduisaient la stabilité du béton de 75% par rapport au béton de référence. Cette diminution peut être attribuée à la grande surface de ces fibres qui entrave le passage facile du béton à travers le tamis. Ces résultats corroborent les conclusions des chercheurs précédents.

Ozawa et al.[9]ont employé l'essai V-funnel pour évaluer le temps d'écoulement et extrapoler la tendance à la ségrégation. La résistance à la ségrégation est étroitement liée à la viscosité du BAP, et l'ajout d'agrégats grossiers a eu un impact significatif sur la viscosité du BAP. Pour des durées d'écoulement très courtes (inférieures à 2 secondes), la caractéristique du béton à se ségréger est très élevée, ce qui suggère que les mélanges à faible viscosité sont facilement sujet à la ségrégation [151].

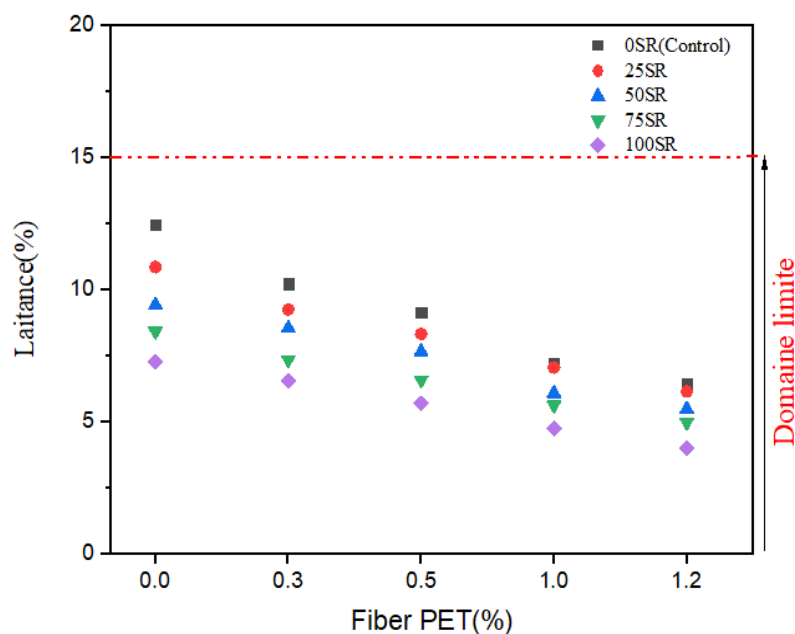


Figure 3.6. Indice de ségrégation en fonction de SR et FPET pour les différents BAP.

### 3.5. Etude l'effet du SR et les fibres PET sur le comportement mécanique du BAP

#### 3.5.1. Résistance à la compression

La figure 3.7 démontre l'impact des fibres plastiques de type PET et des SR sur la résistance à la compression des diverses formulations de BAP après 28 et 90 jours. Les données de la figure indiquent une augmentation de la résistance à la compression avec le temps pour les échantillons de béton, mais elle indique également une réduction de la résistance avec l'augmentation du pourcentage de SR.

D'après ces résultats, nous constatons qu'avec des substitutions de 50% ,75% et 100% en SR, une diminution significative de la résistance est observée à tous les âges de durcissement par rapport à une substitution de 25% en SR. A 28 jours, le BAP témoin (0SR+0FPET) présente une résistance de 48.11 MPa. En outre, le remplacement des SN par des SR entraîne une diminution de la résistance, avec des baisses mesurées à environ 2 %,4 %, 7 % et 9 % pour les mélanges contenant respectivement 25 %, 50 %, 75 % et 100 % de SR par rapport au béton de référence.

En revanche, après 90 jours, l'évolution de la résistance varie parmi les divers mélanges de BAP utilisant GR. Les bétons contenant des SR affichent des résistances à la compression inférieures à celles des bétons à base de SN, atteignant respectivement 52MPa, 51MPa, 49MPa et 47MPa pour les mélanges contenant 25 %, 50 %, 75 % et 100 % de SR. La diminution de la résistance observée lorsque des granulats recyclés sont utilisés dans le BAP peut être attribuée à deux facteurs principaux. Premièrement, la présence d'un ancien mortier à la surface des granulats entraîne une adhérence insuffisante entre la pâte de ciment et les granulats recyclés[152]. Deuxièmement, les granulats recyclés présentent une capacité d'absorption plus élevée. Ces conclusions sont cohérentes avec d'autres recherches documentées, qui ont également montré que le remplacement de granulats naturels par des granulats recyclés entraîne une diminution de la résistance à la compression, comme illustré dans d'autres études [105],[153],[154].



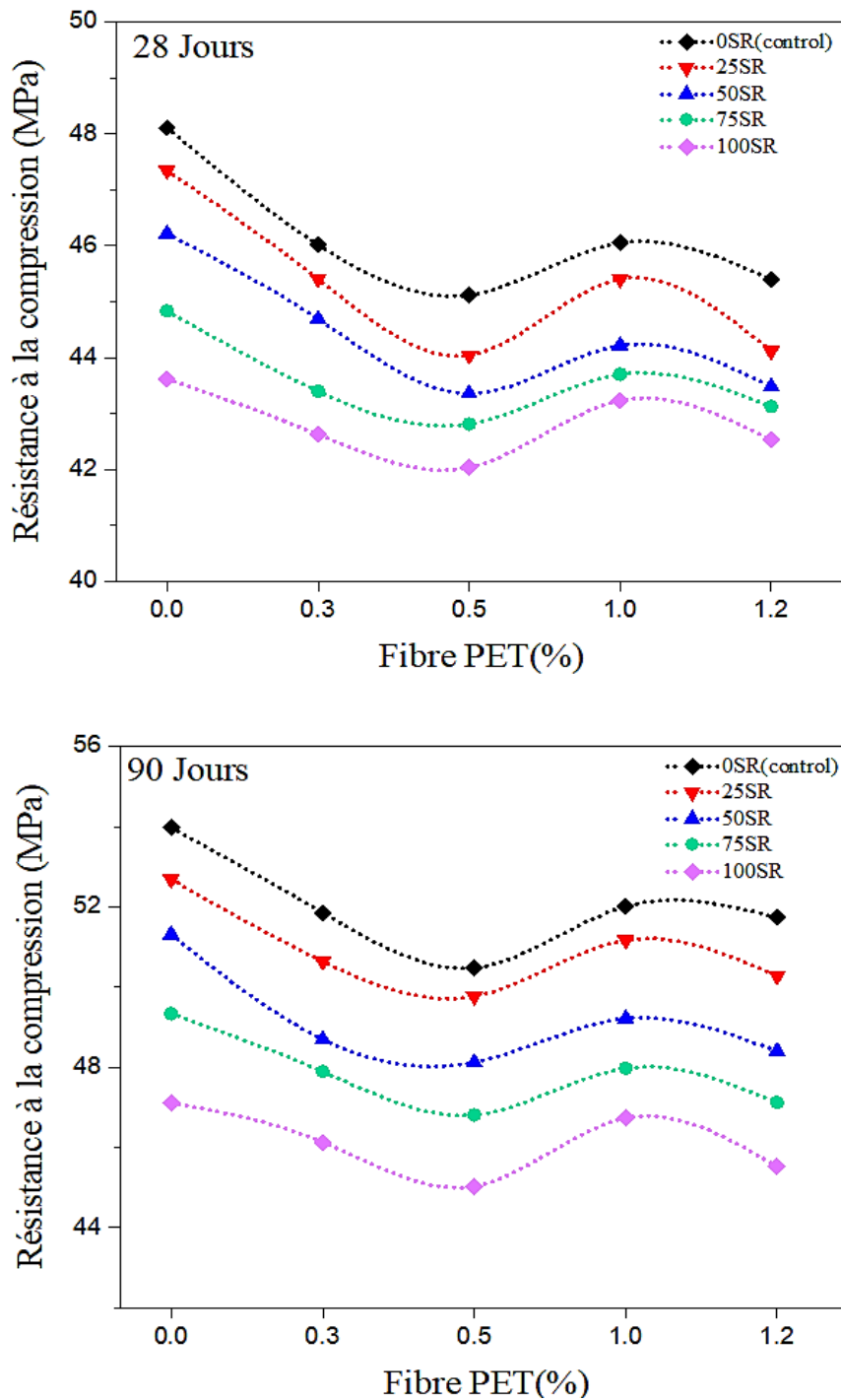


Figure 3.7. Résistance à la compression en fonction de SR et FPET pour les différents BAP.

En ce qui concerne l'effet des FPET sur la résistance du BAP, les données illustrées dans la Figure 3.7 indiquent une baisse de la résistance à la compression à 28 jours, se situant autour de 3%, 6%, 4%, et 5% pour les mélanges intégrant respectivement 0.3%, 0.5%, 1%, et 1.2% de FPET. Cependant, le mélange contenant 1% de FPET a montré la meilleure distribution de fibres parmi les autres bétons fibres pendant le processus d'analyse. Des conclusions similaires ont été obtenues Shahidan et al.[70] qui ont observé qu'une incorporation de 1% de

fibres de polyéthylène téréphtalate (PET) entraînant une résistance à la compression plus élevée que celle mesurée dans d'autres types de bétons à fibres [66].

Cette baisse de la résistance peut s'expliquer par une surutilisation des fibres dans le béton due à l'emploi de taux élevés de fibres, ce qui semble avoir un effet négatif sur la répartition et l'orientation des fibres dans le béton. Selon les travaux Hidaya et al.[72] , une utilisation importante de fibres (de 1 à 3%) entraîne une baisse notable de la résistance à la compression du béton. Ils ont avancé que cette diminution est due à l'agglomération des fibres pendant le malaxage et le moulage, Cela pourrait entraîner un contact entre les surfaces des fibres, favorisant la formation de bulles d'air dans la zone interfaciale entre les fibres et la pâte de ciment.[72],[70]

En outre, il est également observé sur la figure 3.7 que l'incorporation de FPET a conduit à une diminution de la résistance à la compression des BAPR. À 90 jours, la résistance à la compression des BAPR contenant des fibres PET a diminué de 2 %, 4 %, 1 % et 3 % pour les mélanges 0,3 % FPET + 100 % SR, 0,5 % FPET + 100 % SR, 1 % FPET + 100 % SR et 1,2 % FPET + 100 % SR.

D'après des études antérieures, l'ajout de fibres est associé à une augmentation de la résistance[74],[55]. D'autres recherches ont indiqué que l'augmentation de la résistance à la compression du béton dépend principalement de la résistance de la pâte de ciment et de la zone de transition interfaciale, tandis que l'impact des fibres sur la résistance à la compression est relativement limité [155].

#### **3.5.2. Résistance à la traction par fendage**

Les résultats de la résistance à la traction des différents BAP à 28 et 90 jours sont visualisés sur la figure 3.8. Selon les données présentées sur ces graphiques, une diminution de la résistance à la traction des BAP est observée avec l'incorporation de SR dans les mélanges, en particulier avec des taux élevés de remplacement (75% et 100%). La diminution de la résistance à la traction du BAP due aux SR pourrait être expliquée par la fragilité des granulats recyclés utilisés par rapport aux granulats naturels correspondants, car ils contiennent un vieux mortier sur surface[156]. Les recherches antérieures ont relevé l'impact des granulats recyclés sur la résistance à la traction du béton [110][97]. D'après les recherches Dimitriou et al. [108] remplacer intégralement (à 100%) le sable par des granulats recyclés dans la composition du béton entraîne une baisse de 25% de sa résistance à la traction. Ils ont mis en évidence que l'impact négatif des granulats recyclés sur la résistance à la traction pourrait être attribué à la

### CHAPITRE 3 : INFLUENCE DES FIBRES PLASTIQUES DE TYPE PET SUR UN BAP A BASE DE SABLE RECYCLES

présence de porosité et de mortier adhérent à la surface de ces granulats recyclés. En outre, la qualité de la surface et la solidité des agrégats sont des facteurs essentiels qui jouent un rôle crucial dans la résistance à la traction du béton[157].

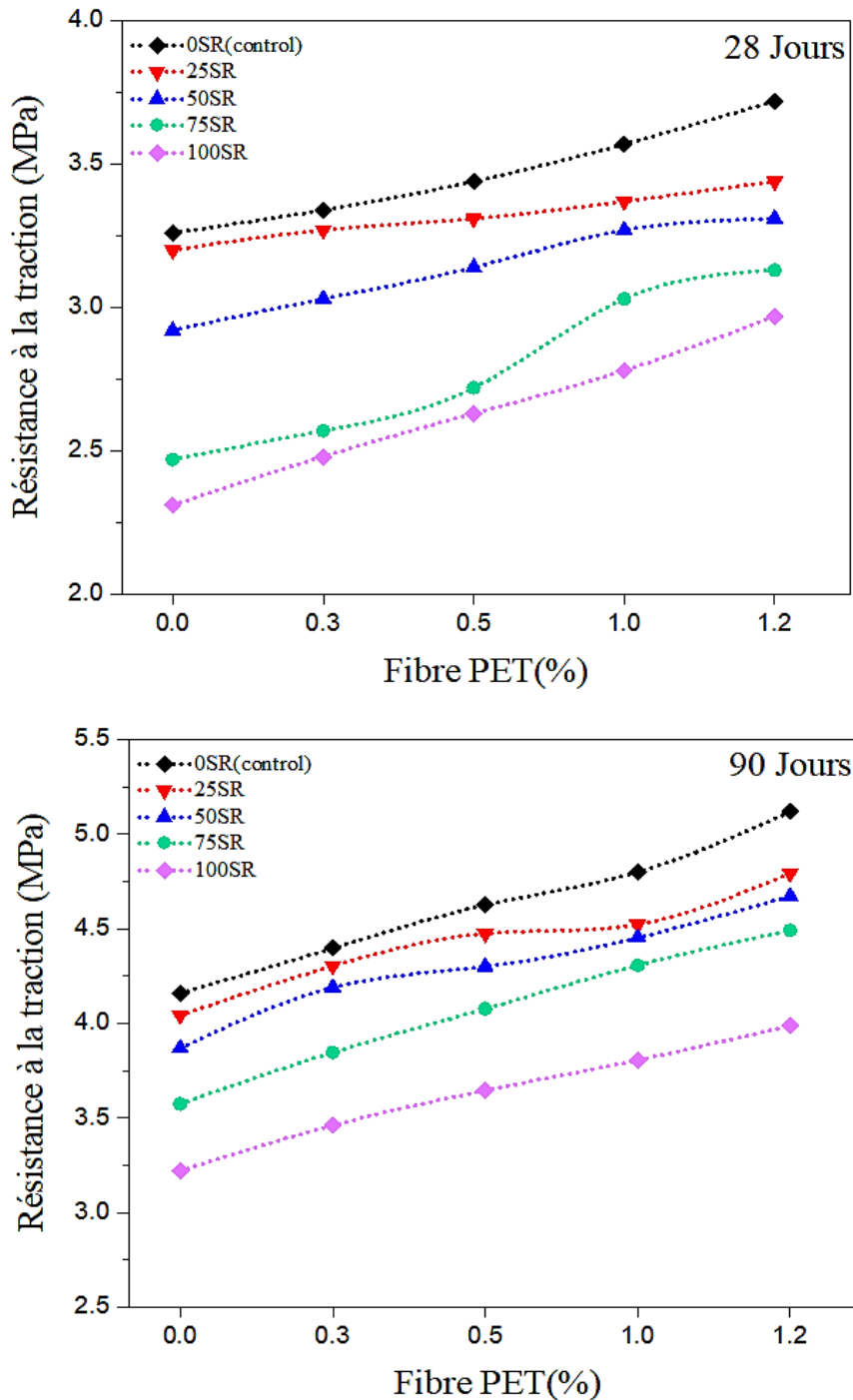


Figure 3.8. Résistance à la traction en fonction de SR et FPET pour les différents BAP.

En revanche, l'ajout des fibres PET a permis d'améliorer la résistance à la traction, et cette propriété a été encore renforcée lorsque la teneur en fibres a été augmentée. Vijaya et al.

[56] ont étudié l'effet des fibres PET sur les propriétés mécaniques du béton. Ils ont argumenté que l'amélioration principale de la résistance à la traction par l'ajout de fibres découle du rôle de pont qu'elles jouent et de leur module élastique plus élevé par rapport à la matrice de béton. Cela renforce la résistance à la traction de la matrice et réduit la largeur des fissures[158]. Des recherches précédentes ont également démontré qu'une augmentation de la concentration en fibres dans le béton améliorerait la résistance à l'adhérence en renforçant la liaison entre les fibres et la matrice, ce qui constitue une autre raison d'améliorer la résistance à la traction [159][160]. De ce fait, l'intégration de seulement 0,3 %, 0,5 %, 1 % et 2 % de FPET a entraîné une augmentation de la résistance à la traction du béton d'environ 2 %, 6 %, 10 % et 14 % respectivement. En outre, l'emploi combiné de 100 % de SR avec des proportions de 0,3 %, 0,5 %, 1 % et 2 % de FPET a considérablement renforcé la résistance à la traction, augmentant respectivement de près de 7 %, 14 %, 20 % et 29 %.

### 3.5.3. Résistance à la flexion

Cette section examine l'influence des fibres de PET et du SR sur la résistance à la flexion du béton à 28 et 90 jours après le durcissement, comme illustré dans la figure 3.9. Une tendance similaire à celle de la résistance à la compression et à la traction a été remarquée en ce qui concerne l'évolution de la résistance à la flexion, où une diminution de celle-ci a été constatée pour tous les mélanges contenant des SR. Par conséquent, la résistance à la flexion a été réduite de 4%, 11%, 16% et 20% lorsque 25%, 50%, 75% et 100% de SR ont été utilisés pour remplacer les SN. Ismail et al.[161] ont affirmé que la force d'adhésion entre les granulats recyclés et la pâte de ciment est un facteur crucial influençant la résistance à la flexion. Cette diminution peut être attribuée à divers facteurs, notamment à la faible résistance du mortier collé et à sa faible adhérence aux granulats recyclés, comme mentionné par Ghorbel et al.[162] en outre, la résistance moindre des granulats recyclés par rapport à celle des granulats naturels est une autre explication de la diminution de la résistance à la flexion du béton contenant des granulats recyclés.

En revanche, la figure 3.9 illustre une amélioration de la résistance à la flexion des mélanges avec l'incorporation de fibres de PET. Cette augmentation est attribuée à l'effet des fibres qui maintiennent les particules ensemble dans la matrice de béton, réduisant ainsi la largeur des fissures. Ainsi, l'incorporation de 0,3%, 0,5%, 1% et 1,2% de FPET a entraîné une amélioration respective d'environ 3%, 7%, 13% et 16% de la résistance à la flexion après 28 jours. De plus, l'utilisation de fibres de PET permet d'améliorer la ductilité du béton, car,

### CHAPITRE 3 : INFLUENCE DES FIBRES PLASTIQUES DE TYPE PET SUR UN BAPA BASE DE SABLE RECYCLES

contrairement aux échantillons de béton fibré qui prennent plus de temps pour se rompre en deux après l'essai, les échantillons de béton classique (sans fibres)[72][163].

La figure 3.9 révèle que malgré une baisse de la résistance à la flexion avec l'utilisation de SR, l'adjonction de 1,2 % de FPET avec 25 %, 50 %, 75 % et 100 % de SR a entraîné une amélioration respective de cette caractéristique de 16 %, 14 %, 9 % et 8 % par rapport au béton de référence.

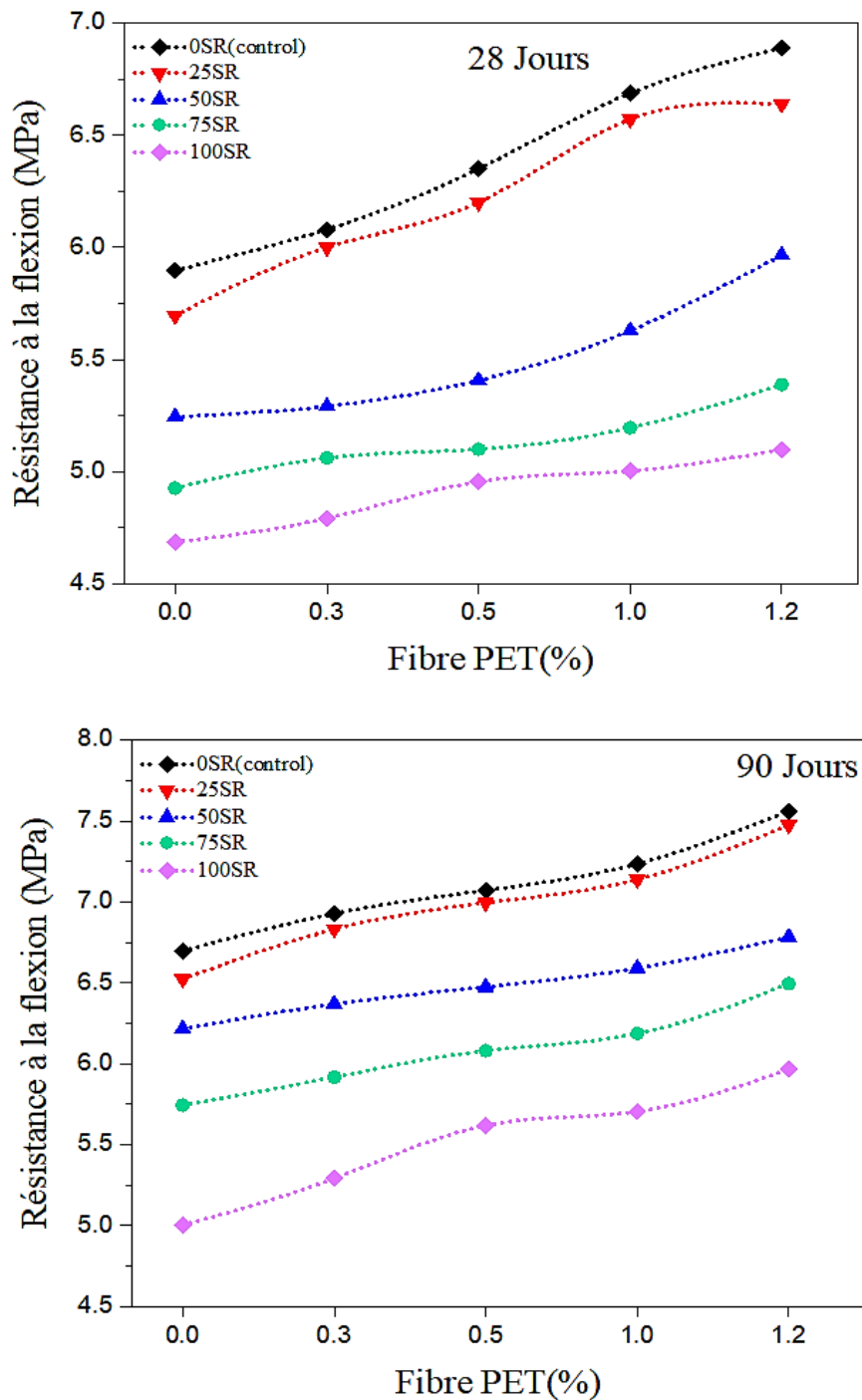
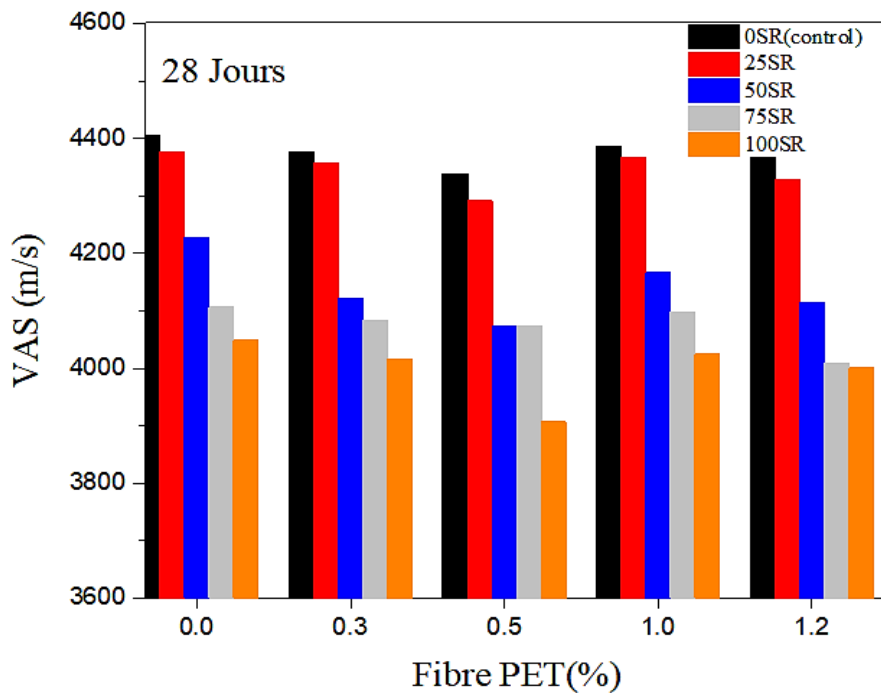
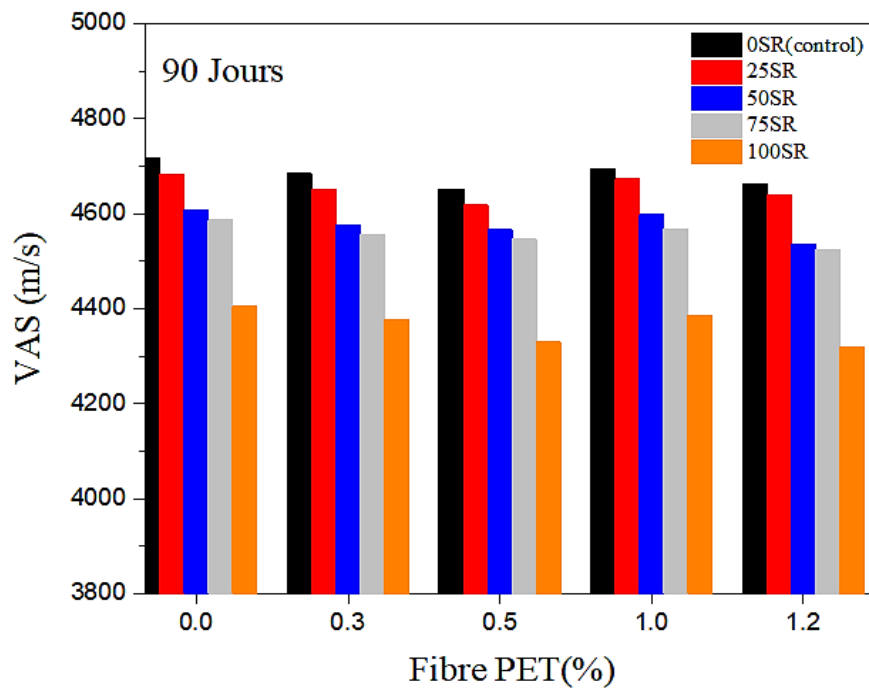


Figure 3.9. Résistance à la flexion en fonction de SR et FPET pour les différents BAP.

**3.5.4. Vitesse d'auscultation sonore**

La figure 3.10 expose l'évolution de la vitesse d'auscultation sonore (VAS) des échantillons de BAP incorporant des SR et des FPET après 28 et 90 jours de durcissement. Les résultats obtenus indiquent une baisse des valeurs de VAS à mesure que le pourcentage de contenu en SR augmente, et cette diminution a été encore accentuée lorsque le contenu en fibres PET a également été augmenté. On observe une réduction de 1%,4%,6% et 8% suite à la substitution des SR à hauteur de 25%,50%,75% et 100%. En général, la vitesse d'auscultation diminue avec l'augmentation de la porosité. Puisque les valeurs de VAS sont également affectées par l'auréole de transition (ZTI) et la densité du béton [93],[164], il semble que le facteur de réduction de la vitesse d'impulsion dans le béton contenant des agrégats recyclés soit également associé à la porosité de ces granulats ainsi qu'à la mince couche limite à la jonction entre les granulats et la pâte de ciment. Des résultats similaires ont été observés dans d'autres études, lesquelles ont montré une diminution de la VSA lors du remplacement par des granulats recyclés [165],[166].





**Figure 3.10.** VAS en fonction de SR et FPET pour les différents BAP.

En revanche, dans la figure 3.10, nous avons observé que les valeurs de VSA des mélanges incorporant uniquement des fibres PET sont inférieures à celles du BAPT traditionnel de 4376 m/s, 4338m/s ,4385m/s et 4366 m/s pour les mélanges contenant respectivement 0.3%, 0.5%, 1% et 1.2% de fibres. Cette observation peut être expliquée par le fait que la valeur de la Vitesse de Son d'Impulsion (VSA) est influencée par la densité du matériau ainsi que par la présence de pores à l'intérieur de celui-ci. Un excès d'insertion de fibres PET occasionne une augmentation de l'espace au sein du BAP, aboutissant à une diminution de la VSA. Cela se produit car l'onde ultrasonique devra traverser plusieurs couches constituées d'un mélange de béton, de fibres plastiques et de vides d'air qui se forment autour des fibres[51].

En ce qui concerne la combinaison de SR et de fibres PET dans les mélanges de BAP, Nous avons également remarqué une diminution concomitante de la VSA du BAP contenant 100 % de SR, d'environ 1 %, 3 %, 1 % et 2 % lors de l'incorporation de fibres à hauteur de 0,3 %, 0,5 %, 1 % et 1,2 % respectivement, par rapport au BAPR.

### 3.5.5. Module d'élasticité

La figure 3.11 met en évidence l'impact des SR et des fibres PET sur le module d'élasticité de tous les mélanges de BAP. Ces résultats montrent que le module d'élasticité a décré à mesure que la teneur en SR augmentait. Ainsi, dans les échantillons sans fibres PET, le module d'élasticité a diminué de 5,01%, 7,41%, 14,10% et 19,30% lorsque 25%, 50%, 75% et 100% de SR ont été utilisés en remplacement des SN, respectivement. Une réduction similaire

### CHAPITRE 3 : INFLUENCE DES FIBRES PLASTIQUES DE TYPE PET SUR UN BAPA BASE DE SABLE RECYCLÉS

du module élasticité a été observée dans des études antérieures avec des pourcentages de granulats recyclés [109][110]. Behera et al.[111]ont signalé que le module élastique du béton contenant 50 %, 100 % et 40 % de granulats recyclés en tant que grossiers et fins. Il a également été noté que le mélange SC100F40, présentant une plus grande proportion de granulats fins recyclés, affichait le module d'élasticité le plus bas par rapport aux autres mélanges. La baisse de ce module avec l'utilisation de granulats recyclés pourrait principalement être due à la zone de transition interfaciale avec l'inclusion de granulats recyclés ou à la microstructure poreuse, toutes ces raisons étant liées à la pâte cimentaire adhérant à la surface des granulats recyclés. En ce qui concerne les résultats du module élasticité des granulats recyclés, de nombreuses recherches ont été rapportées dans la littérature, montrant que le remplacement des granulats recyclés (fins) affecte principalement le module élasticité du béton [167],[168].

Cependant, ce test a été optimisé avec l'ajout de FPET, et le module élasticité a été encore amélioré avec une augmentation de la teneur en FPET. Par ailleurs, une valeur de module d'élasticité plus élevée a été observée pour tous les échantillons contenant 1,2 % de FPET. Par conséquent, l'ajout de 0,3%, 0,5%, 1% et 1,2% de FPET avec 100% de granulats recyclés a respectivement amélioré le module élasticité de 11,40%, 13,29%, 17,21% et 24,87% par rapport à l'échantillon de référence contenant 100% de SR.

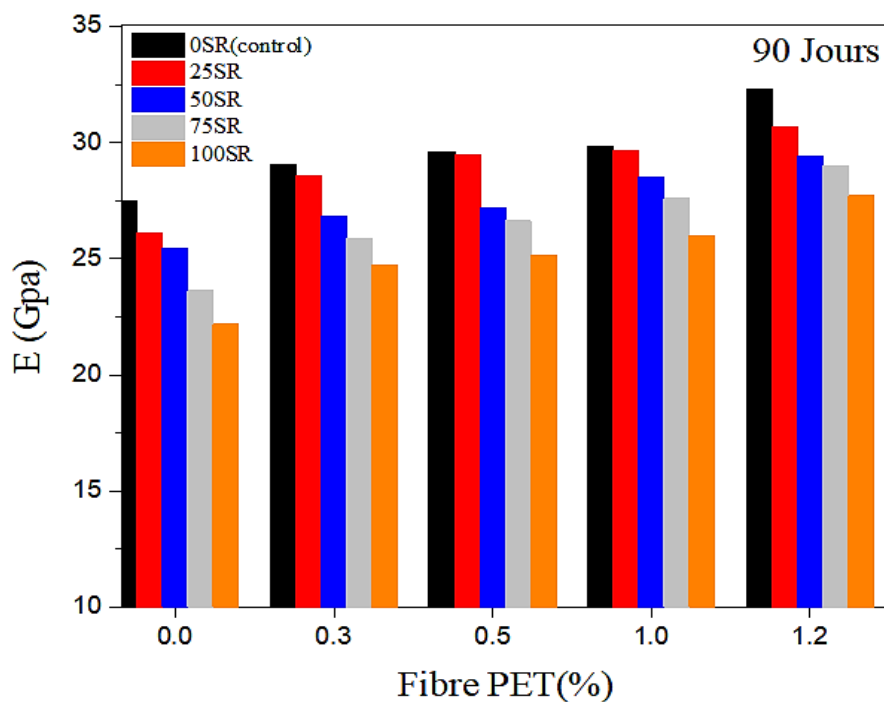


Figure 3.11. Module d'élasticité en fonction de SR et FPET pour les différents BAP.



### 3.6. Etude l'effet du SR et les fibres PET sur la durabilité du BAP

#### 3.6.1. Porosité

La Figure 3.12 présente les résultats de la porosité à l'eau pour les différentes combinaisons de mélanges de BAP. Selon cette analyse, le remplacement du sable naturel par des sables recyclés a engendré une augmentation de la porosité, cette augmentation étant significative en comparaison avec le béton de référence. Par conséquent, le volume de vide du BAPT est de 9.14%, tandis qu'il augmente à 11%, 22%, 42% et 68% pour les mélanges de béton préparés avec 25% ,50%, 75% et 100% de SR respectivement. Dans cette section, nous pouvons expliquer que l'augmentation du volume des vides pour les mélanges contenant des SR se produit en raison du nombre de pores et de microfissures présents dans les granulats recyclés, qui se forment pendant la production. En outre, la présence d'ancien mortier à la surface des granulats entraîne une faible adhérence entre la pâte de ciment et les granulats recyclés, ce qui contribue à accroître la porosité [169].

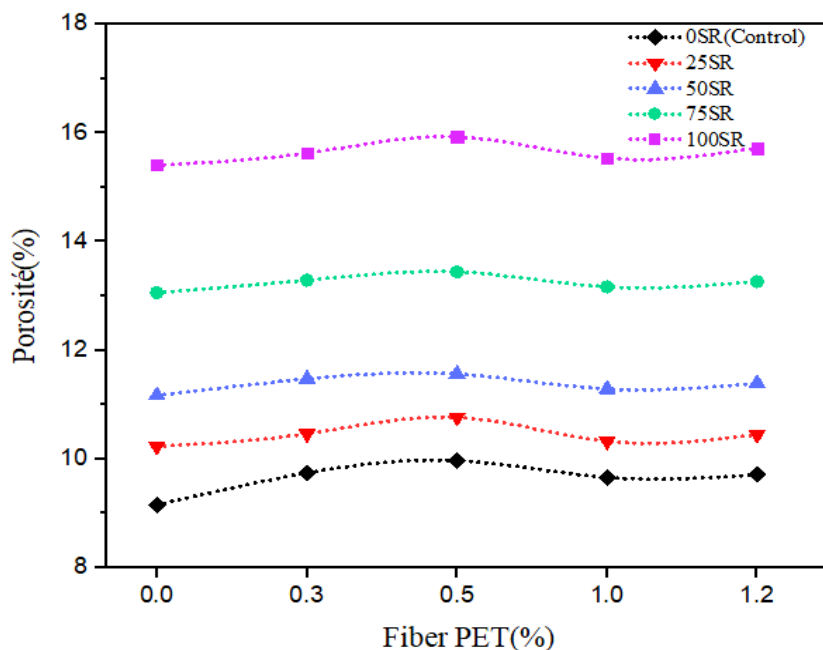


Figure 3.12. Porosité accessible à l'eau en fonction de SR et FPET pour les différents BAP.

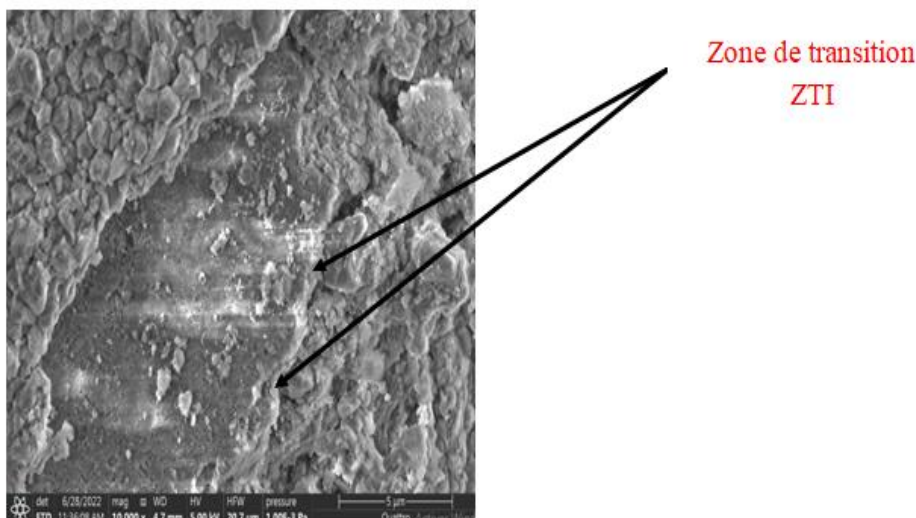
En revanche, les résultats de la porosité pour les bétons intégrant des fibres PET sont quasiment similaires ; cependant, elle augmente légèrement avec l'augmentation du dosage en fibres. Selon les données de la figure 3.12, l'introduction de 0,3 %, 0,5 %, 1 % et 1,2 % de FPET dans le mélange de BAP entraîne une augmentation du volume des vides de 6,45 %, 8,93 %, 5,59 % et 6,08 % respectivement, par rapport au mélange témoin. Cette augmentation est causée

### CHAPITRE 3 : INFLUENCE DES FIBRES PLASTIQUES DE TYPE PET SUR UN BAP A BASE DE SABLE RECYCLES

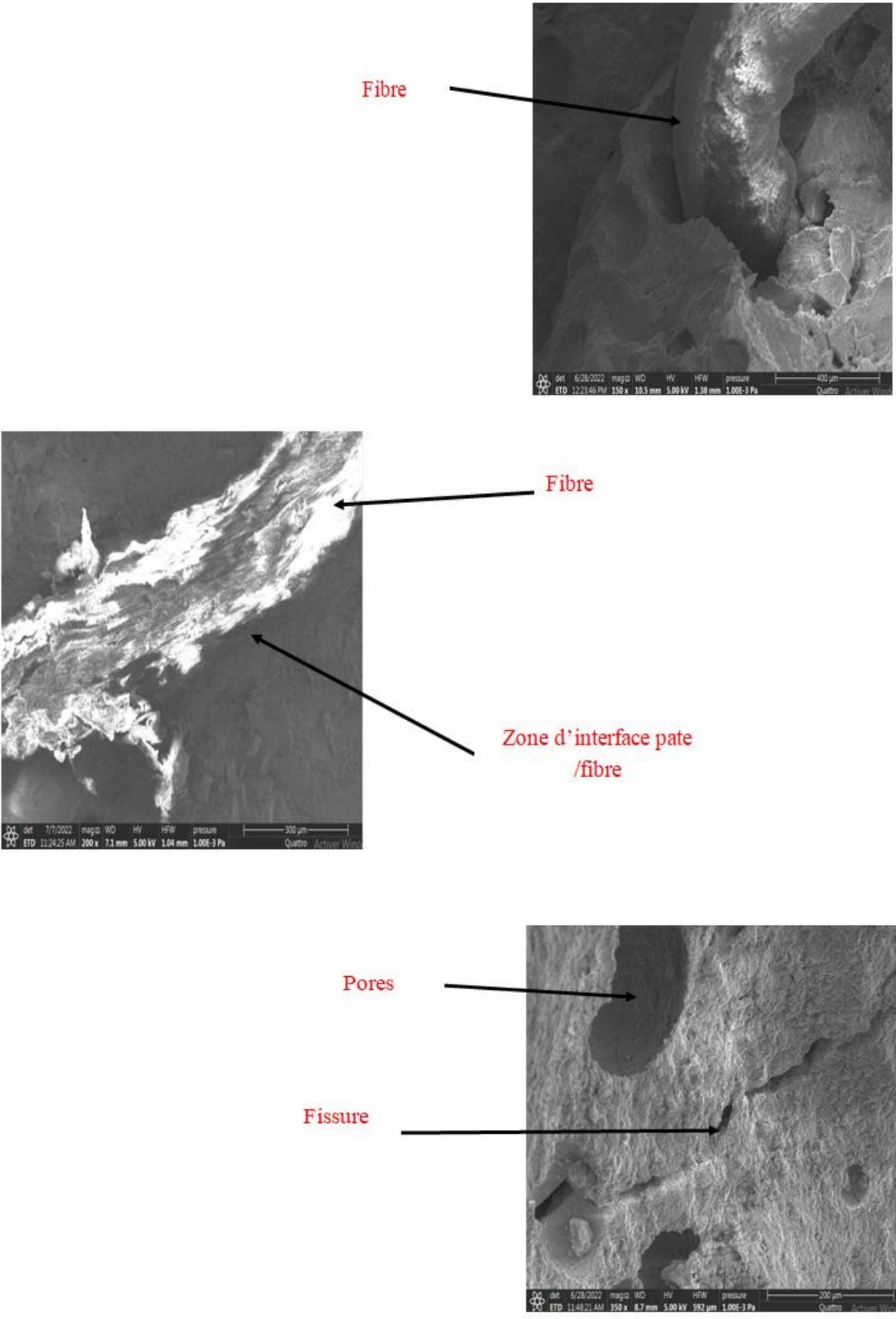
par la formation de bulles d'air suite à l'introduction des fibres, ce qui augmente la zone d'interface entre pâte et les fibres ainsi que les microfissurations [170].

Également, dans le mélange de BAP comportant 100% de SR et 0.5% de FPET, une porosité supérieure a été constatée par rapport au béton de référence, s'élevant à environ 74,08 %. Cette augmentation de porosité s'explique par le pourcentage élevé de granulats recyclés et l'incorporation des fibres, ce qui conduit à une zone d'interface plus importante et donc à une porosité plus élevée [125]. Pour vérifier cette augmentation de la porosité, des spécimens de béton ont été scrutés au microscope électronique à balayage (MEB), et les images résultantes sont affichées sur la Figure 3.13. A partir de ces images, on peut remarquer que la taille et le nombre des pores augmentent avec la substituions des SR allant de 25% à 100%. Cependant, les mélanges avec des granulats recyclés ont montré une zone d'interface pâte /agrégat relativement lâche, avec une distinction claire entre la matrice et la zone agrégée à travers cette interface, comme rapporté par d'autres chercheurs [171]. Cela pourrait être dû à l'absorption élevée d'eau par les SR, ce qui entraîne un saignement d'eau à proximité de la surface de l'agrégat. Ainsi, l'eau s'accumule près de cette zone d'interface, s'évapore ou est utilisée dans le processus d'hydratation, laissant cet espace.

A différents niveaux d'ajout de fibres, une concentration importante de pores apparait dans la zone d'interface entre la pâte et les fibres, ce phénomène peut être expliqué par une faible adhérence entre les fibres et la pâte. Cette situation peut être attribuée à l'évaporation des bulles d'air formées dans le béton lors du processus de séchage d'une part, et d'autre part, à la surface non homogènes des fibres (multi-filament) qui crée des vides entre la pâte et la fibre elle-même.



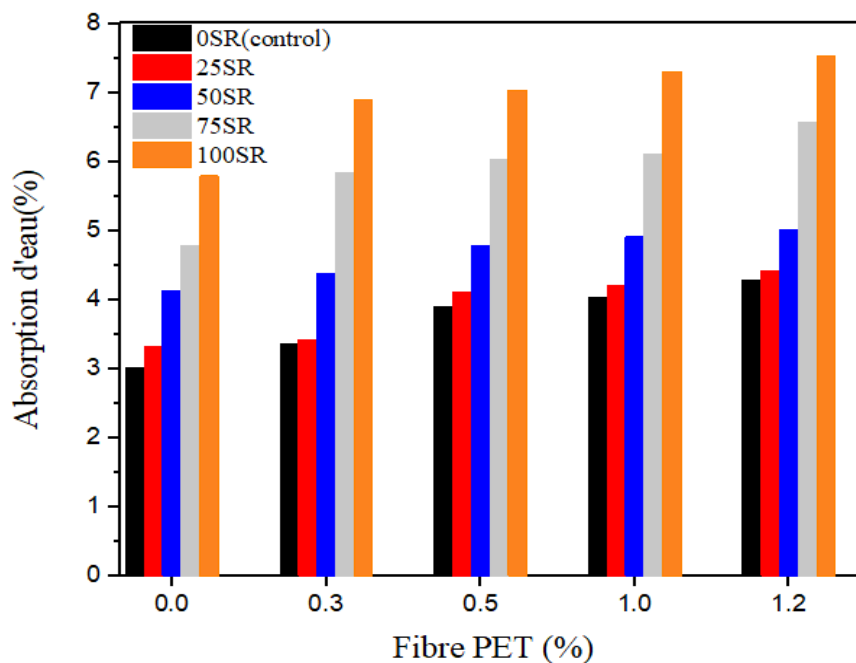
**CHAPITRE 3 : INFLUENCE DES FIBRES PLASTIQUES DE TYPE PET SUR UN BAP A BASE DE SABLE RECYCLES**



**Figure 3.13.** Image au MEB pour le BAP à base SR et FPET.

### 3.6.2. Absorption d'eau

Les résultats de l'essai d'absorption d'eau pour tous les échantillons sont présentés dans la figure 3.14. Les essais d'absorption d'eau sont réalisés pour évaluer la durabilité du béton, car ils permettent de déterminer la capacité de l'échantillon à adsorber de l'eau, ce qui pourrait contenir des substances nocives. Cet essai fournit également une indication globale de la connectivité des pores dans la microstructure de l'échantillon. Comme anticipé, l'absorption d'eau a augmenté à mesure que le pourcentage de substitution des sables recyclés (SR) et des fibres de PET augmentait. En raison de la nature de la surface des fibres et du remplacement des SR, l'absorption d'eau a augmenté de 10,70 %, 37,42 %, 58,98 % et 92,66 % pour des niveaux de substitution de 25 %, 50 %, 75 % et 100 % des SR, respectivement. Ces valeurs d'absorption d'eau sont liées à la caractéristique des granulats recyclés, qui se caractérisent par un coefficient d'absorption plus élevé et une porosité accrue.



**Figure 3.14.** Absorption d'eau en fonction de SR et FPET pour les différents BAP.

Job Thomas et al.[172] ont mené une étude sur l'absorption d'eau par immersion des bétons fabriqués à partir de granulats recyclés. Leur recherche a révélé une augmentation de l'absorption d'eau avec l'utilisation de granulats recyclés, car ces granulats avaient un ancien mortier à la surface et une faible densité. Leur porosité pouvait être élevée, ce qui facilite le transport du fluide dans l'échantillon.

Selon les résultats de la figure 3.14, on observe également une augmentation de la capacité d'absorption d'eau avec l'ajout de fibre PET. Les valeurs d'absorption d'eau varient

### CHAPITRE 3 : INFLUENCE DES FIBRES PLASTIQUES DE TYPE PET SUR UN BAP A BASE DE SABLE RECYCLES

---

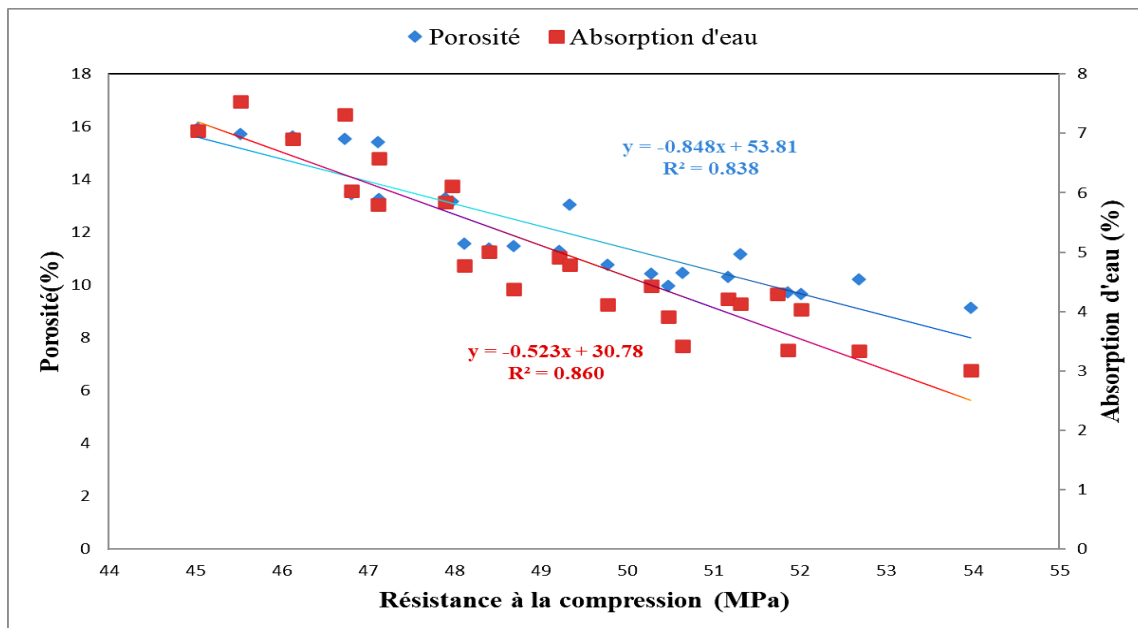
entre 3.01% et 4.28% dans la série des BAP avec 0.3%,0.5%,1% et 1.2% de FPET. Cela s'explique par le fait que la connectivité des pores à l'intérieur de la structure du béton influe sur le volume des vides perméables à l'intérieur du matériau. Ces résultats mettent en évidence que l'intégration de fibres a renforcé la liaison entre les pores et les micro canaux, entraînant ainsi une augmentation de l'absorption [173].

Selon la figure 3.14, on constate que le mélange de référence (BAPT) présente le coefficient d'absorption le plus bas, tandis que les autres mélanges ont des coefficients d'absorption plus élevés, qui augmente à mesure que la teneur en SR et en FPET et augmente. Les résultats montrent une augmentation significative de l'absorption d'eau, en particulier lorsque le pourcentage de SR atteint 100%. Cette augmentation s'établit à environ 19.18%, 21.49%, 26.16% et 29.86% respectivement pour les mélanges contenant 0.3% FPET + 100% SR, 0.5% FPET + 100% SR, 1% FPET + 100% SR et 1.2% FPET + 100% SR respectivement.

Selon les travaux de recherches menés par Namakula Hidayat en 2017.[72] il a été observé que le coefficient d'absorption dans les bétons témoin est supérieur en moyenne de 23.5% par rapport au béton contenant 3% de fibre. Ils ont établi que l'introduction de fibres provoque la création de plus de pores en raison d'un compactage insuffisant, ce qui entraîne une faible adhérence en raison de la texture des fibres.

De nombreux chercheurs concordent sur l'existence d'une corrélation entre la résistance à la compression, la porosité et l'absorption d'eau, tous liés à la structure des pores du béton. Ziad et al.[174] ont rapporté que le même modèle est approprié aux bétons élaborés avec des fibres de polypropylène et granulats recyclés. La figure 3.15 présente la corrélation entre la résistance à la compression et les caractéristiques de porosité et d'absorption d'eau des mélanges de BAP incluant des FPET et du SR.

Les graphiques présentés dans cette figure illustrent une relation cohérente. Pour la résistance à la compression et la porosité, l'équation linéaire obtenue est  $Y = -0.848X + 53.81$ , avec un coefficient de détermination  $R^2$  de 0.83. Quant à la résistance à la compression et au coefficient d'absorption d'eau, l'équation linéaire est  $Y = 0.523X + 30.78$ , avec un coefficient de détermination  $R^2$  de 0.86. Néanmoins, on constate que la porosité et le coefficient d'absorption ont tendance à augmenter lorsque la résistance à la compression diminue.



**Figure 3.15.** Relation entre la résistance à la compression, la porosité et le coefficient d'absorption.

### 3.6.3. Perméabilité à l'eau

Les fluctuations de la profondeur de pénétration de l'eau pour toutes les compositions de BAP à 90 jours sont représentées dans la figure 3.16 sous une pression constante. Les résultats des tests montrent que l'utilisation des SR rend les mélanges plus perméables à l'eau par rapport au béton de référence, quel que soit le pourcentage de substitution du sable. La profondeur de pénétration la plus élevée a été mesurée pour le mélange avec 100% de SR, atteignant 54mm.

Le comportement du béton recyclé peut être attribué à la structure poreuse de ces granulats, qui permet à l'eau de pénétrer facilement dans et à travers les granulats sous pression. Par conséquent, l'eau s'infiltre plus profondément dans les mélanges comportant des granulats recyclés (fins) que dans ceux utilisant des granulats naturels. De plus, l'augmentation de la porosité peut favoriser une meilleure interconnexion des pores dans le béton. De plus, les particules de granulats recyclés sont composées d'anciens et de nouveaux liants cimentaires, et leur liaison est affaiblie, ce qui conduit à la formation de davantage de capillaires, permettant ainsi une pénétration accrue de l'eau. Cela peut être important en raison de l'utilisation d'agrégats non traités [175].

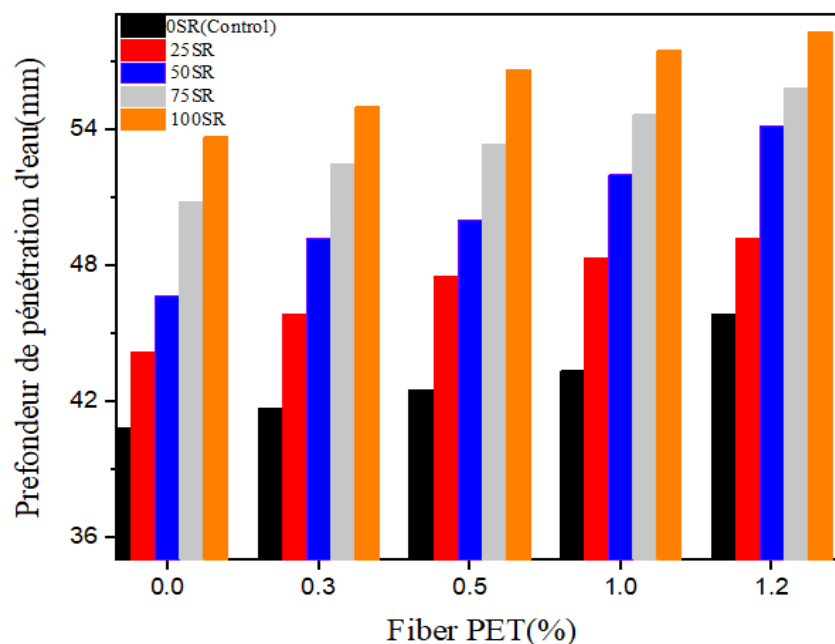
Ces conclusions concordent avec celles de Gesoglu et al.[121] qui ont constaté qu'en incorporant des granulats recyclés grossiers et fins, la pénétration de l'eau augmentait

### CHAPITRE 3 : INFLUENCE DES FIBRES PLASTIQUES DE TYPE PET SUR UN BAP A BASE DE SABLE RECYCLES

considérablement, allant de 4,5 à 7,6 fois par rapport aux mélanges de contrôle utilisant des granulats naturels.

Toutefois, l'addition de FPET a entraîné une augmentation de la profondeur de pénétration de l'eau par rapport au béton de référence. La valeur maximale (46 mm) a été observée avec un taux de 1,2% de FPET, dépassant ainsi celle du béton de référence (sans SR). Ces résultats sont similaires à ceux rapportés par Jain et al.[176] où ils ont remarqué une augmentation de la profondeur de pénétration de l'eau avec l'incorporation de déchets plastiques. D'autres chercheurs, comme Islam et al.[177] ont également mentionné qu'avec une quantité de fibres dépassant 0,25 % dans le béton, la profondeur de pénétration de l'eau augmente.

Ces observations suggèrent que l'augmentation de la profondeur de pénétration, causée par la présence de fibres, peut être expliquée par la présence d'un grand nombre de vides et une zone de transition interfaciale (ZTI) réduite dans la structure en béton. Ceci est dû à la forme irrégulière des fibres et à leur faible adhérence à la matrice de ciment. En outre, il est évident sur le graphique que l'ajout de FPET à des taux de 0.3%, 0.5%, 1% et 1.2% entraîne une augmentation de la profondeur de pénétration de l'eau dans le BAPR (100%) à 55, 56, 57 et 58 mm respectivement.



**Figure 3.16.** Perméabilité à l'eau en fonction de SR et FPET pour les différents BAP.

La figure 3.17 illustre comment la porosité évolue en fonction du coefficient d'absorption et de la profondeur de pénétration pour les divers mélanges de BAP. Selon ces

### CHAPITRE 3 : INFLUENCE DES FIBRES PLASTIQUES DE TYPE PET SUR UN BAPA BASE DE SABLE RECYCLES

données, des coefficients de corrélation acceptable ont été obtenus, variant entre 0,79 et 0,87, pour la porosité, le coefficient d'absorption et la profondeur de pénétration ont tendance à augmenter avec l'augmentation de la porosité.

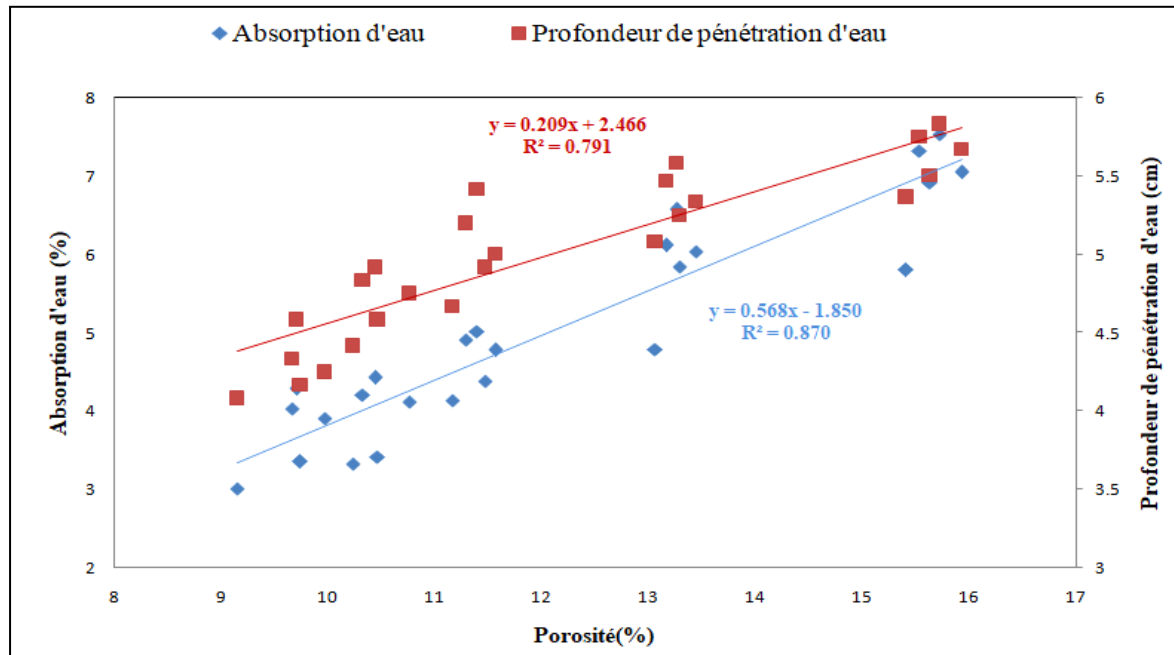


Figure 3.17. Présente la relation entre la porosité et le coefficient d'absorption d'eau ainsi que la profondeur de pénétration d'eau.

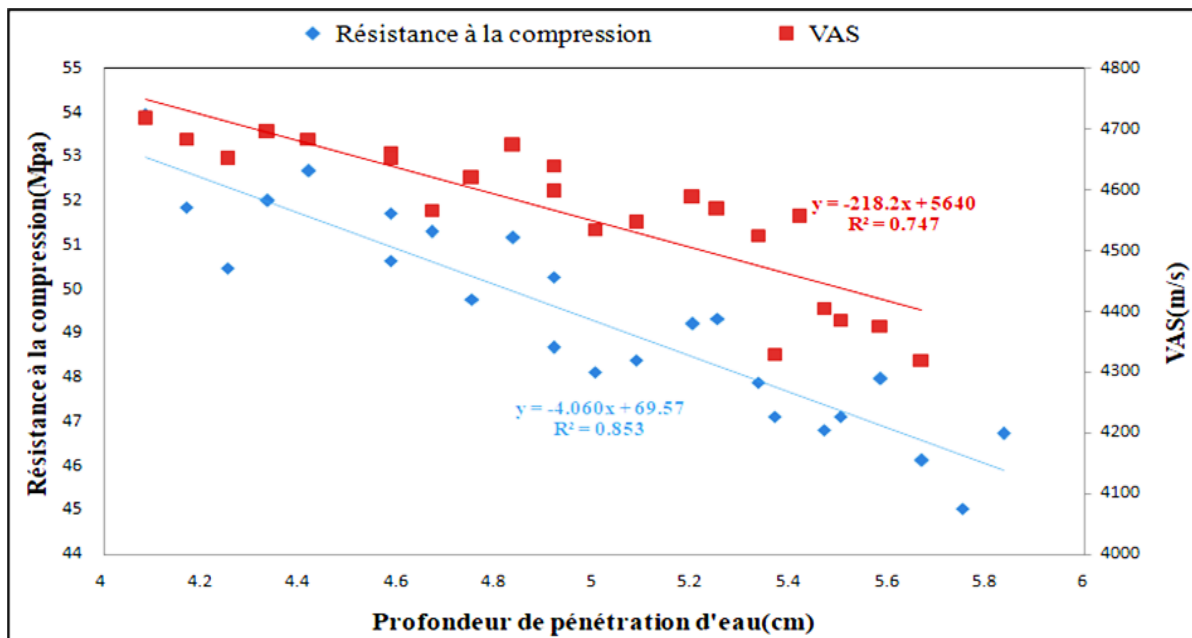


Figure 3.18. Présente la relation établie entre la profondeur de pénétration d'eau et à la fois la résistance à la compression et la VAS.



La Figure 3.18 expose la corrélation entre la profondeur de pénétration de l'eau, la résistance à la compression et la vitesse d'auscultation sonique de tous les échantillons de BAP intégrant des fibres PET et du SR à 90 jours. En étudiant cette courbe de corrélation, on constate que l'accroissement de la profondeur de pénétration est associé à une réduction de la VAS ainsi que de la résistance à la compression. Une corrélation notable a été observée entre la résistance à la compression et la VAS, ainsi qu'avec leur profondeur de pénétration d'eau, présentant des coefficients de corrélation respectifs de 0,85 et 0,74.

### 3.6.4. Perméabilité aux Gaz

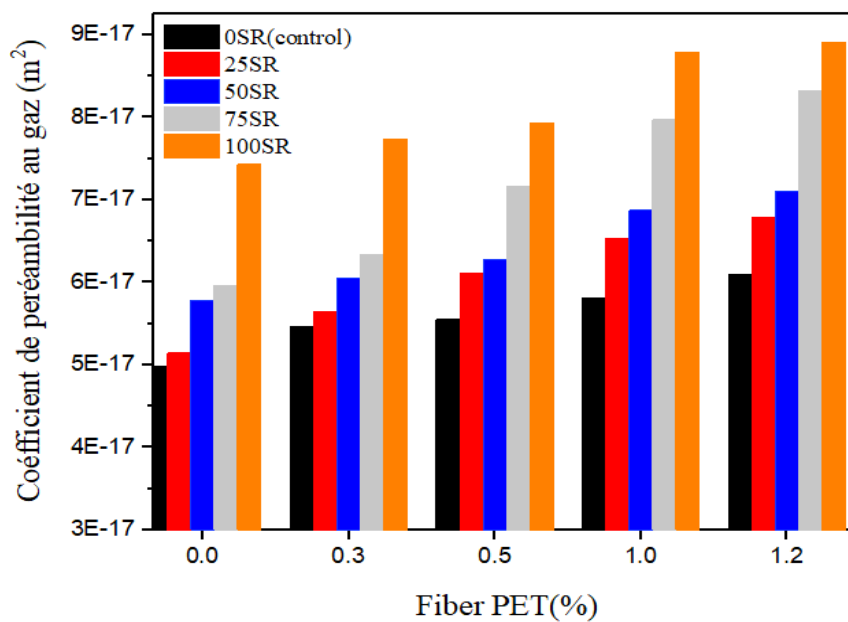
Les données sur la perméabilité aux gaz, illustrées dans la figure 3.19, résument l'influence des SR et des FPET à différents taux dans le BAP. Il est constaté que le béton contenant des granulats recyclés est plus perméable aux gaz que le béton de référence, mais le comportement varie en fonction du pourcentage de substitution du SN par un faible taux de SR à 25% par rapport à un taux élevé de 100%. Les coefficients de perméabilité aux gaz pour tous les mélanges du BAP se situent entre  $4.98 \times 10^{-17} \text{m}^2$  et  $8.91 \times 10^{-17} \text{m}^2$ . Ces variations peuvent être expliquées par les caractéristiques de porosité des bétons.

Le coefficient de perméabilité au gaz croît en fonction de l'accroissement du pourcentage de SR. Une valeur maximale de  $7.43 \times 10^{-17} \text{m}^2$  a été enregistré à 100% de substitution partielle, Cela pourrait être dû à l'accroissement de la structure poreuse du béton. En outre, comme évoqué précédemment, la problématique liée aux granulats recyclés réside dans la zone d'interface entre la pâte de ciment nouvellement formée et/ou ancienne, et les granulats (zone de transition), qui résulte de la présence de pâte de ciment hydratée restante attachée à la surface des agrégats, entraînant une porosité accrue [121].

Ces résultats sont similaires avec ceux de Lan Zong. [122] qui ont constaté qu'en ajoutant des granulats fins recyclés en substitution du sable naturel, Une augmentation notable du coefficient de perméabilité au gaz a été observée par rapport au béton de référence, avec une multiplication d'environ trois fois. Cependant, le mélange contenant 30% de GR a montré une augmentation que les autres mélanges.

La figure 3.19 illustre l'incorporation des FPET. Elle montre que le coefficient de perméabilité au gaz du béton de référence sans SR ni FPET était de  $4.98 \times 10^{-17} \text{m}^2$ . En comparaison, la valeur du coefficient de perméabilité au gaz pour l'échantillon contenant 25% de SR était de  $5.14 \times 10^{-17} \text{m}^2$ . De plus, le coefficient de perméabilité pour un mélange comprenant 50% de SR avec des taux de FPET de 0.3%, 0.5%, 1%, et 1.2% à respectivement

augmenté pour atteindre  $5.78 \times 10^{-17} \text{m}^2$ ,  $6.05 \times 10^{-17} \text{m}^2$ ,  $6.27 \times 10^{-17} \text{m}^2$ ,  $6.87 \times 10^{-17} \text{m}^2$  et  $7.10 \times 10^{-17} \text{m}^2$ . Conformément aux résultats expérimentaux antérieurs, différents types de fibres ont des impacts variés sur la perméabilité à l'air du béton [178]. La perméabilité au gaz peut être corrélée avec la longueur, le dosage et le diamètre des fibres [179]. Cela indique que l'ajout de fibres peut améliorer la résistance à la perméabilité au gaz. Selon la référence (Baroghel-Bouny, 2007), tous les échantillons ayant un coefficient de perméabilité compris entre  $10^{17}$  et  $10^{16} \text{m}^2$  présentent une meilleure résistance à la perméabilité.



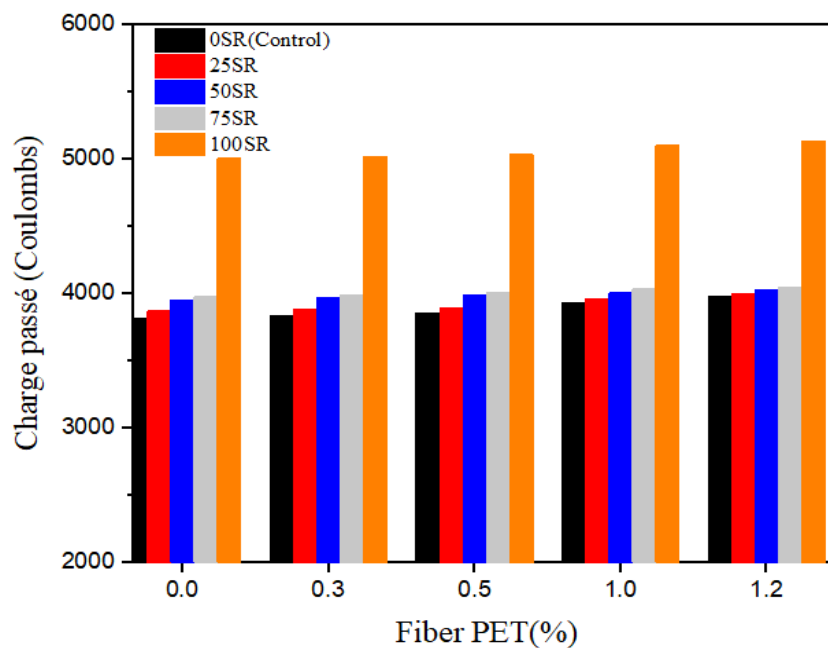
**Figure 3.19.** Perméabilité à gaz en fonction de SR et FPET pour les différents BAP.

### 3.6.5. Pénétration aux ions chlorures

Les essais de résistance à la pénétration des ions chlorure des mélanges de BAP ont été réalisés conformément à la norme ASTM C1202 [141] après 90 jours, comme indiqué dans la figure 3.20. Dans la première série, les résultats de la substitution du SR révèlent une augmentation de la charge électrique à travers les éprouvettes de béton. Le remplacement de 25 %, 50 %, 75 % et 100 % de SR a entraîné des augmentations de la charge de pénétration de 1,33 %, 3,50 %, 4,16 % et 31,09 % respectivement par rapport au béton de référence. Il est aussi à noter que le mélange avec 100 % de SR présente un effet notable sur la pénétration des chlorures par rapport au BAPT. L'augmentation de la pénétration des chlorures dans le mélange BAP, lorsque le SR est remplacé à 100 %, est causée par la porosité accrue de ce béton, résultant de la structure poreuse de la couche de mortier résiduel entourant les particules caractéristiques

de GR. On suppose que ces pores permettent une diffusion facile des ions chlorures dans le béton, ce qui finalement augmente la profondeur de pénétration des chlorures [180][102].

Cependant, Tiago Barroqueiro et al.[181] ont constaté une augmentation de la pénétration des ions chlorure à mesure que l'utilisation des granulats recyclés augmentait, comparativement au béton de référence. Leur étude a mentionné qu'un remplacement partiel de 100% du sable naturel par des granulats fins recyclés entraîne une augmentation importante de l'ordre de 58%.



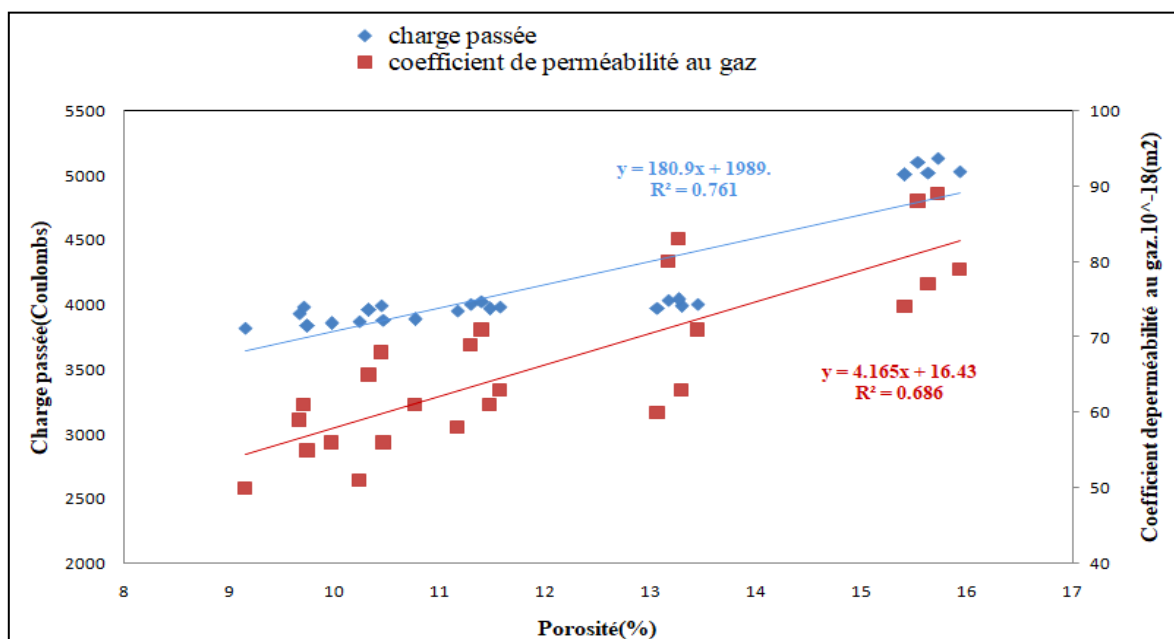
**Figure 3.20.** Pénétration aux ions chlorures en fonction de SR et FPET pour les différents BAP.

En ce qui concerne la deuxième série des résultats concernant l'ajout de FPET, présentée dans la figure 3.20, une légère augmentation de la charge électrique a été observée en raison de l'augmentation du pourcentage de fibres. Les mélanges contenant 0.3%, 0.5%, 1% et 1.2% de FPET ont enregistré une augmentation de 0.49%, 1.02%, 3.06% et 4.29% respectivement par rapport au béton de référence. En outre, une diminution graduelle de la résistance à l'infiltration des chlorures a été observée à mesure que la teneur en FPET augmentait dans les mélanges. Les bétons incorporant des proportions de 0.3% à 1.2% de FPET, en association avec une substitution complète de 100% de SR, ont présenté des augmentations significatives de la pénétration des chlorures, pouvant atteindre jusqu'à 5000C, ce qui peut s'expliquer par la porosité élevée du béton contenant une quantité élevée de fibres.

### CHAPITRE 3 : INFLUENCE DES FIBRES PLASTIQUES DE TYPE PET SUR UN BAP A BASE DE SABLE RECYCLES

Bui et al.[1] ont remarqué une tendance similaire, affirmant que la résistance à la pénétration des ions chlorure était moindre pour les GR que pour les GN. Ils ont également constaté qu'introduire une modeste proportion de fibres plastiques recyclées (0,25 %) aux granulats recyclés (GR) entraînait une légère amélioration de la résistance à la pénétration des ions chlorure. Cette observation pourrait être due à la haute résistivité électrique des fibres plastiques. Toutefois, la résistance à l'infiltration des chlorures a été réduite à mesure que la quantité de fibres augmentait dans les granulats recyclés.

La figure 3.21 illustre la corrélation entre la porosité, la charge électrique et le coefficient de perméabilité au gaz des mélanges de BAP composés de fibres PET et de SR. On remarque que l'augmentation de la porosité entraîne également une augmentation de la variation de la charge électrique et du coefficient de perméabilité au gaz. D'après ces données, les coefficients de corrélation ( $R^2=0.76-0.86$ ) pour les deux séries indiquent une corrélation moyenne entre la porosité, la charge électrique et le coefficient de perméabilité. Cependant, le faible coefficient de corrélation pour les deux séries n'est pas uniquement lié à la porosité, mais également à des facteurs tels que la tortuosité, la surface spécifique, la connectivité des pores, et leur distribution granulométrique au sein de la matrice.

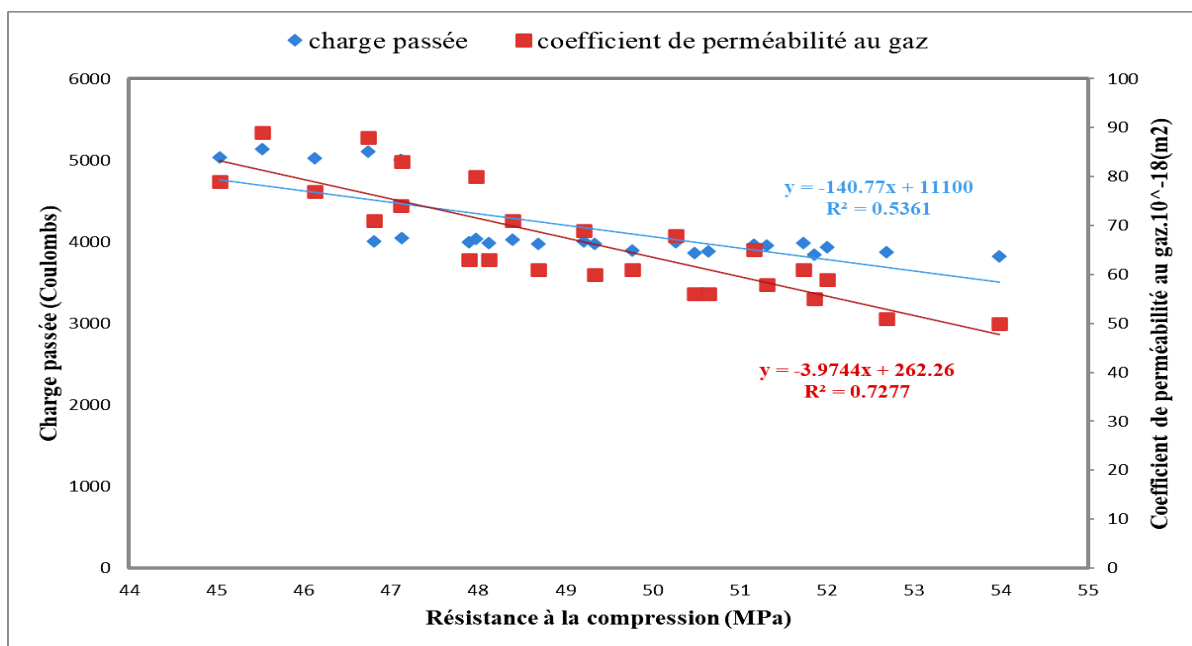


**Figure 3.21.** Relation entre la porosité, la charge électrique traversée, et le coefficient de perméabilité au gaz.

La Figure 3.22 met en évidence la corrélation entre la résistance à la compression, le coefficient de perméabilité au gaz et la charge électrique totale passée à travers les éprouvettes

## CHAPITRE 3 : INFLUENCE DES FIBRES PLASTIQUES DE TYPE PET SUR UN BAP A BASE DE SABLE RECYCLES

de BAP comprenant des fibres PET et des granulats recyclés (fins). Selon les données de cette figure, une baisse de la résistance à la compression est constatée en corrélation avec une augmentation de la charge électrique totale traversante et du coefficient de perméabilité au gaz. Une bonne corrélation linéaire est observée pour la série de coefficient de perméabilité avec un coefficient de détermination  $R^2=0.72$ , tandis que la série de la charge passée présente un coefficient de corrélation moyen ( $R^2=0.53$ ). Cette observation pourrait être due aux variations de la microstructure du béton, qui sont influencées par l'utilisation de différentes sortes de matériaux et par les paramètres de conception du mélange.



**Figure 3.22.** Relation entre la résistance à la compression, la charge passée et le coefficient de perméabilité au gaz.

### 3.7. Conclusion

Ce chapitre résume les formulations du BAP témoin ainsi que du béton fibré à base des granulats recyclés, et présente leur caractéristique à l'état frais (étalement et temps T500 au cône d'Abrams, temps d'écoulement, capacité de passage et résistance à la ségrégation) ainsi qu'à l'état durci (porosité, perméabilité, vitesse ultrasonique, résistances mécaniques et module d'élasticité statique).

Cette étude a mis en évidence que l'intégration de fibres de PET et le remplacement de SN par des GR dans le BAP ont des répercussions sur diverses propriétés du matériau, que ce soit à l'état frais ou durci. Les principales conclusions établies sont les suivantes :

### **CHAPITRE 3 : INFLUENCE DES FIBRES PLASTIQUES DE TYPE PET SUR UN BAP A BASE DE SABLE RECYCLES**

---

- L'introduction des différents teneurs en fibres PET et en SR entraîne une perte d'ouvrabilité, mais leur caractéristique à l'état frais sont satisfaisantes et respectent les recommandations pour la fabrication des BAP, grâce à l'introduction du dosage d'adjuvant superplastifiant qui améliore ces caractéristiques.
- Dans l'ensemble, l'introduction de granulats recyclés dans le béton entraîne une diminution des propriétés mécaniques telles que la résistance à la compression, la résistance à la flexion, la résistance à la traction et la vitesse d'auscultation sonore. La présence de résidus de mortier sur la surface des granulats explique cette situation. En revanche, l'ajout de fibres de PET dans le BAP se traduit par une amélioration des performances en termes de résistance à la traction, de flexion et de module d'élasticité.
- En ce qui concerne la durabilité, l'incorporation de fibres de PET et la présence de SR dans le BAP entraînent une légère augmentation des résultats d'absorption d'eau, de porosité, ainsi que de perméabilité aux gaz et aux ions chlorures.

**CONCLUSION GENERALE ET  
PERSPECTIVES**

---

### CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Cette étude expérimentale s'est penchée sur les impacts des fibres de PET sur les caractéristiques rhéologiques, physico-mécaniques et la durabilité des BAP utilisant du sable recyclé comme matériau de base. Il a été observé que l'ajout de fibres de PET avait un impact positif sur la résistance mécanique du BAP à base de sable recyclés, Cependant, cela a conduit à une légère diminution de la résistance à la compression. Il existe un potentiel d'ingénierie pour renforcer les granulats recyclés avec des fibres de PET pourrait contribuer à résoudre les problèmes environnementaux actuels. En se basant sur les résultats expérimentaux, on peut conclure ce qui suit :

- Le remplacement des SN par du SR et l'incorporation de fibres de PET entraînent une diminution de la fluidité du BAP, mais cette diminution peut être améliorée en utilisant une faible dose d'adjuvant de SP. La forte absorption d'eau des GR et la grande surface spécifique des fibres de PET sont les principales causes de cette réduction de la fluidité. En conséquence, l'incorporation de granulats recyclés et de fibres de PET a un impact négatif sur les propriétés rhéologiques du BAP.
- L'intégration progressive de fibres de PET dans le BAPR a engendré une diminution de la résistance à la compression et de la VSA (vitesse ultrasonique) à mesure que la quantité de fibres augmentait. La résistance à la compression a diminué de près de 0,88% à 6,82%, tandis que la VSA a diminué d'environ 0,43% à 2,19%. Cette réduction de la résistance peut être imputée à la présence de mortier ancien dans les granulats recyclés. La présence de ce mortier ancien altère la résistance globale ainsi que les performances du mélange de béton.
- Les fibres de PET ont joué un rôle dans l'amélioration de la résistance à la traction par fendage et à la flexion du BAPR. L'ajout de fibres de PET a conduit à une augmentation de la résistance à la traction par fendage du BAPR, allant d'environ 2,18% à 28,57% par rapport au BAPR sans fibres. Cette amélioration peut être expliquée par une meilleure adhérence entre les fibres et la pâte de béton. Les fibres, en traversant les fissures, ont renforcé la ductilité du béton, ce qui a contribué à accroître sa résistance à la traction par fendage.



- L'incorporation de fibres de PET dans le BAPR a induit une augmentation de la porosité. Les niveaux de porosité ont présenté une corrélation significative tant avec la résistance à la compression qu'avec les mesures de VSA, illustrée par les coefficients de corrélation élevés.
- Les résultats du test de perméabilité aux ions chlorure ont révélé que l'intégration de fibres de PET dans le BAP entraînant une augmentation de la perméabilité aux ions chlorure. Cette augmentation pourrait être expliquée par la porosité accrue du béton due à l'incorporation de fibres.
- En ce qui concerne la profondeur de pénétration des gaz et de l'eau, l'ajout de fibres de PET dans les mélanges de BAPR a été constaté pour augmenter le coefficient de perméabilité par rapport au mélange de BAPR témoin, sans l'ajout de fibres.
- L'utilisation de 100% de SR en combinaison avec 1,2% de FPET a montré une amélioration significative de la résistance en flexion et du module d'élasticité du béton, pouvant atteindre respectivement 9% et 24%. Cependant, l'introduction de BAPRF a conduit à une augmentation de la porosité, de la perméabilité aux ions chlorure, de la perméabilité à l'eau et de la perméabilité aux gaz, augmentant ainsi le risque de corrosion des armatures dans les structures en béton armé et précontraint.

Les recherches menées dans le cadre de cette thèse se sont concentrées sur l'étude de l'effet du SR et des fibres PET sur l'ouvrabilité, les propriétés mécaniques et la durabilité du BAP. D'autres aspects demeurent toutefois à explorer. Par conséquent, nous recommandons les pistes suivantes pour de futures études :

- Etude de l'influence des ajouts cimentaire sur le BAP fibré à base des granulats recyclés ;
- Etude et élaboration d'un BAP fibré avec d'autres types de fibres et autres granulats recyclés ;
- Etude de l'influence de la dispersion des fibres sur le BAP fibré à base des granulats recyclés ;
- Etude d'autres indicateurs de durabilité telles que la carbonatation et l'attaque aux agents agressifs sur le BAP fibré à base des granulats recyclés ;
- Prévoir une modélisation des résultats trouvés permettant les prévisions des caractéristiques de ce genre de béton.

## **REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

---

## REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] N. K. Bui, T. Satomi, and H. Takahashi, “Recycling woven plastic sack waste and PET bottle waste as fiber in recycled aggregate concrete: An experimental study,” *Waste Management.*, vol. 78, pp. 79–93, 2018, doi: 10.1016/j.wasman.2018.05.035.
- [2] H. Okamura and M. Ouchi, “Self-Compacting Concrete,” vol. 1, no. 1, pp. 5–15, 2003.
- [3] H. Okamura and M. Ouchi, “Self-compacting concrete. Development, present use and future,” in *Self-Compacting Concrete: Proceedings of the First International RILEM Symposium, 1999*, pp. 3–14.
- [4] M. Okamura, H; Ouchi, “Self Compacting Concrete - research paper,” *Journal of Advanced Concrete Technology*, vol. 1, no. 1. pp. 5–15, 2003.
- [5] I. Repository, “Development of self-compacting concrete,” *Proceedings of the Institution of Civil Engineers.*, vol. 156 (4), pp. 405–414, 2003.
- [6] P. Turcry, “Retrait et fissuration des bétons autoplaçants: Influence de la formulation.” , *Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Nantes, France* ,2003.
- [7] C. Shi, Z. Wu, K. Lv, and L. Wu, “A review on mixture design methods for self-compacting concrete,” *Construction and Building Materials.*, vol. 84, pp. 387–398, 2015. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.03.079
- [8] H. Okamura and K. Ozawa, “Mix design for self-compacting concrete,” *Concr. Libr. JSCE*, vol. 25, no. 6, pp. 107–120, 1995.
- [9] H. Okamura and K. Ozawa, “Self-compacting high performance concrete,” *Structural Engineering International. J. Int. Assoc. Bridg. Struct. Eng.*, vol. 6, no. 4, pp. 269–270, 1996, doi: 10.2749/101686696780496292.
- [10] N.chibani ' formulation et proprietes des bétons autoplaçants (BAP) à base de granulats recycles : Cas des fines de marbre'. *Mémoire de Magister .Université Larbi Ben M'Hidi - Oum-El-Bouaghi, Algerie* ,2013.
- [11] P. L. Domone, “Self-compacting concrete: An analysis of 11 years of case studies,” *Cement and Concrete Composites.*, vol. 28, no. 2, pp. 197–208, 2006, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2005.10.003.

- [12] S. Girish, R. V. Ranganath, and J. Vengala, “Influence of powder and paste on flow properties of SCC,” *Construction and Building Materials*, vol. 24, no. 12, pp. 2481–2488, 2010, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2010.06.008.
- [13] E. Nicolas, “Compatibilités et incompatibilités liants cimentaires / superplastifiants' Thèse de Doctorat , Université Henri Poincaré , 2010.
- [14] T. Shindoh and Y. Matsuoka, “Development of Combination-Type Self-Compacting Concrete and Evaluation Test Methods,” *Journal of Advanced Concrete Technology*., vol. 1, no. 1, pp. 26–36, 2003, doi: 10.3151/jact.1.26.
- [15] S. E. Bensebti and H. Houari, “Formulation et propriétés des autoplaçants à base de matériaux locaux,” , Thèse de Doctorat, Université Mentouri, Constantine. Algérie. 2008.
- [16] H. Rasekh, A. Joshaghani, S. Jahandari, F. Aslani, and M. Ghodrati, *Rheology and workability of SCC*. Elsevier Inc., 2020. doi: 10.1016/b978-0-12-817369-5.00002-7.
- [17] P. and U. EFNARC The European Guidelines for Self-Compacting Concrete: Specification, “The European Guidelines for Self-Compacting Concrete: Specification, Production and Use,” *Eur. Guidel. Self Compact. Concr.*, no. May, p. 68, 2005.
- [18] M, El barrak “ A l'étude de l'aptitude à l'écoulement des bétons autoplaçants à l'état frais ' ,Thèse de doctorat , Université toulouse III– paul sabatier contribution,” 2005.
- [19] I. B. Topçu and T. Uygunoğlu, “Effect of aggregate type on properties of hardened self-consolidating lightweight concrete (SCLC),” *Construction and Building Materials*., vol. 24, no. 7, pp. 1286–1295, 2010, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2009.12.007.
- [20] M. Valcuende and C. Parra, “Bond behaviour of reinforcement in self-compacting concretes,” *Construction and Building Materials*., vol. 23, no. 1, pp. 162–170, 2009, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2008.01.007.
- [21] V. Bonavetti, H. Donza, V. Rahhal, and E. Irassar, “Influence of initial curing on the properties of concrete containing limestone blended cement,” *Cement and Concrete Research*., vol. 30, no. 5, pp. 703–708, 2000, doi: 10.1016/S0008-8846(00)00217-9.
- [22] J. Péra, S. Husson, and B. Guilhot, “Influence of finely ground limestone on cement hydration,” *Cement and Concrete Composites*., vol. 21, no. 2, pp. 99–105, 1999, doi: 10.1016/S0958-9465(98)00020-1.

- [23] A. Bradu and N. Cazacu, “Mechanical Properties of Self-Compacting Concrete 2 . General Features of Scc,” pp. 2–5, 1986.
- [24] S. Assié, G. Escadeillas, and V. Waller, “Estimates of self-compacting concrete ‘potential’ durability,” *Construction and Building Materials.*, vol. 21, no. 10, pp. 1909–1917, 2007, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2006.06.034.
- [25] R. F. Zollo, “Fiber-reinforced concrete: An overview after 30 years of development,” *Cement and Concrete Composites.*, vol. 19, no. 2, pp. 107–122, 1997, doi: 10.1016/s0958-9465(96)00046-7.
- [26] K. Holschemacher, T. Mueller, and Y. Ribakov, “Effect of steel fibres on mechanical properties of high-strength concrete,” *Materials & Design.*, vol. 31, no. 5, pp. 2604–2615, 2010, doi: 10.1016/j.matdes.2009.11.025.
- [27] E. M. Adel and B. Adel, “Etude expérimentale du comportement de poutres en béton armé et non armé renforcés de fibres métalliques ondulées soumises à la traction par flexion,” *Mémoire de Master , Université Badji-Mokhtar -Annaba ,2019.*
- [28] J. Chakraborty, S. Banerjee, and H. Dhulagarh, “Self Compacting Fibre Reinforced Concrete -,” *International Journal of Civil Engineering ( SSRG – IJCE )* vol. 3, no. 8, pp. 43–45, 2016, doi:10.14445/23488352/IJCE-V3I8P111.
- [29] V. R. Sivakumar, O. R. Kavitha, G. Prince Arulraj, and V. G. Srisanthi, “An experimental study on combined effects of glass fiber and Metakaolin on the rheological, mechanical, and durability properties of self-compacting concrete,” *Applied Clay Science.*, vol. 147, no. January, pp. 123–127, 2017, doi: 10.1016/j.clay.2017.07.015.
- [30] E. Frank, F. Hermanutz, and M. R. Buchmeiser, “Carbon fibers: Precursors, manufacturing, and properties,” *Macromolecular Materials and Engineering.*, vol. 297, no. 6, pp. 493–501, 2012, doi: 10.1002/mame.201100406.
- [31] “product\_Carbon-Fiber-Chopped-Strands-for-Concrete-Structure Reinforcement\_uroogeyoy.”
- [32] X. Huang, “Fabrication and properties of carbon fibers,” *Materials (Basel).*, vol. 2, no. 4, pp. 2369–2403, 2009, doi: 10.3390/ma2042369.
- [33] “fibre-aramide-73673.”

- [34] A. Abrishambaf, J. A. O. Barros, and V. M. C. F. Cunha, "Relation between fibre distribution and post-cracking behaviour in steel fibre reinforced self-compacting concrete panels," *Cement and Concrete Research.*, vol. 51, pp. 57–66, 2013, doi: 10.1016/j.cemconres.2013.04.009.
- [35] "FIBRE POLYPROPYLENE."
- [36] W. Laifa et al., "Caractérisation d'un béton autoplaçant avec addition de laitier cristallisé et renforcé par des fibres de polypropylène et de diss," *S Synthèse: Revue des Sciences et de la Technologie.*, vol. 29, no. 1, pp. 100–110, 2014.
- [37] F. Pacheco-Torgal and S. Jalali, "Cementitious building materials reinforced with vegetable fibres: A review," *Construction and Building Materials.*, vol. 25, no. 2, pp. 575–581, 2011, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2010.07.024.
- [38] A. Jute, "Fiche matériau : FIBRES VEGETALES," 2019.
- [39] R. D. Toledo Filho, K. Ghavami, M. A. Sanjuán, and G. L. England, "Free, restrained and drying shrinkage of cement mortar composites reinforced with vegetable fibres," *Cement and Concrete Composites.*, vol. 27, no. 5, pp. 537–546, 2005, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2004.09.005.
- [40] M. N. Soutsos, T. T. Le, and A. P. Lampropoulos, "Flexural performance of fibre reinforced concrete made with steel and synthetic fibres," *Construction and Building Materials.*, vol. 36, pp. 704–710, 2012, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.06.042.
- [41] J. H. J. Kim, C. G. Park, S. W. Lee, S. W. Lee, and J. P. Won, "Effects of the geometry of recycled PET fiber reinforcement on shrinkage cracking of cement-based composites," *Composites Part B: Engineering.*, vol. 39, no. 3, pp. 442–450, 2008, doi: 10.1016/j.compositesb.2007.05.001.
- [42] S. B. Kim, N. H. Yi, H. Y. Kim, J. H. J. Kim, and Y. C. Song, "Material and structural performance evaluation of recycled PET fiber reinforced concrete," *Cement and Concrete Composites.*, vol. 32, no. 3, pp. 232–240, 2010, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2009.11.002.
- [43] P. Rossi, P. Acker, and Y. Malier, "Effect of steel fibres at two different stages: The material and the structure," *Materials and Structures.*, vol. 20, no. 6, pp. 436–439, 1987, doi: 10.1007/BF02472494.

- [44] Z. Deng and J. Li, "Tension and impact behaviors of new type fiber reinforced concrete," *Computers and Concrete.*, vol. 4, no. 1, pp. 19–32, 2007, doi:10.12989/cac.2007.4.1.019
- [45] H. L. Cox, "The elasticity and strength of paper and other fibrous materials," *British Journal of Applied Physics.*, vol. 3, no. 3, p. 72, doi /10.1088/0508-3443/3/3/302, 1952.
- [46] R. Zerbino, J. M. Tobes, M. E. Bossio, and G. Giaccio, "On the orientation of fibres in structural members fabricated with self compacting fibre reinforced concrete," *Cement and Concrete Composites.*, vol. 34, no. 2, pp. 191–200, 2012, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2011.09.005.
- [47] A. Kawamata, H. Mihashi, and H. Fukuyama, "Properties of Hybrid Fiber Reinforced Cement - based Composites," *Journal of Advanced Concrete Technology.*, vol. 1, no. 3, pp. 283–290, 2003, doi: 10.3151/jact.1.283.
- [48] B. V. C. Li and C. K. Y. Leung, "P ( 8 ) = -mldf ( 1 - y W," vol. 118, no. 2500, pp. 2246–2264, 1993.
- [49] I. Şanal and N. Özyurt Zihnioglu, "To what extent does the fiber orientation affect mechanical performance?," *Construction and Building Materials.*, vol. 44, pp. 671–681, 2013, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.03.079.
- [50] A. C. Bhogayata and N. K. Arora, "Impact strength , permeability and chemical resistance of concrete reinforced with metalized plastic waste fibers," *Construction and Building Materials.*, vol. 161, pp. 254–266, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.11.135.
- [51] A. I. Al-Hadithi and N. N. Hilal, "The possibility of enhancing some properties of self-compacting concrete by adding waste plastic fibers," *Journal of Building Engineering.*, vol. 8, pp. 20–28, 2016, doi: 10.1016/j.job.2016.06.011.
- [52] A. I. Al-hadithi and W. K. M. Frhaan, "The Effects of Adding Waste Plastic Fibers (WPFs) on Some Properties of Self Compacting Concrete using Iraqi local Materials," *Iraqi Journal of Mechanical and Material Engineering*, vol. 11, no. 1, pp. 1–20, 2017.
- [53] A. I. Al-hadithi, A. Tareq, and W. Khairi, "Mechanical properties and impact behavior of PET fi ber reinforced self- compacting concrete ( SCC )," *Composite Structures.*, vol. 224, no. May, p. 111021, 2019, doi: 10.1016/j.compstruct.2019.111021.
- [54] Dr. Ghalib. M. Habeeb Hajer Almusawee "Effect of Using Fibers on Some Mechanical

- Properties of Self ' Iraqi Journal of Mechanical and Material Engineering, vol. 12, no. 4, pp.616-629, 2012.
- [55] O. Gencil, C. Ozel, W. Brostow, and G. Martínez-Barrera, “Mechanical properties of self-compacting concrete reinforced with polypropylene fibres,” *Materials Research Innovations.*, vol. 15, no. 3, pp. 216–225, 2011, doi: 10.1179/143307511X13018917925900.
- [56] G. S. Vijaya, V. G. Ghorpade, and H. Sudarsana Rao, “The Behaviour of Self Compacting Concrete with Waste Plastic Fibers When Subjected to Chloride Attack.,” *About the journal Materials Today: Proceedings.*, vol. 5, no. 1, pp. 1501–1508, 2018, doi: 10.1016/j.matpr.2017.11.239.
- [57] S. As’ad, P. Gunawan, and M. S. Alaydrus, “Fresh state behavior of self compacting concrete containing Waste Material Fibres,” *Procedia Engineering*, vol. 14, pp. 797–804, 2011, doi: 10.1016/j.proeng.2011.07.101.
- [58] Y. Ghernouti, B. Rabehi, T. Bouziani, H. Ghezraoui, and A. Makhloufi, “Fresh and hardened properties of self-compacting concrete containing plastic bag waste fibers (WFSCC),” *Construction and Building Materials.*, vol. 82, pp. 89–100, 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.02.059.
- [59] M. Oghabi and M. Khoshvatan, “The Laboratory Experiment of the Effect of Quantity and Length of Plastic Fiber on Compressive Strength and Tensile Resistance of Self-Compacting Concrete,” *KSCE Journal of Civil Engineering.*, vol. 24, no. 8, pp. 2477–2484, 2020, doi: 10.1007/s12205-020-1578-9.
- [60] L. A. P. De Oliveira and J. P. Castro-gomes, ‘ Physical and mechanical behaviour of recycled PET fibre reinforced mortar”, *Construction and Building Materials*, vol 25, pp 1712-1717, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2010.11.044.
- [61] Y. Alshkane, H. U. Boiny, Y. M. Alshkane, and S. Kh RAFIQ, “Mechanical Properties of Cement Mortar By Using Polyethylene Terephthalate Fibers,” vol. 00964, no. 0, pp. 1–10, 2016, International conference on modern materials and structures in civil engineering.
- [62] R. P. Borg, O. Baldacchino, and L. Ferrara, “Early age performance and mechanical characteristics of recycled PET fibre reinforced concrete,” *Construction and Building Materials.*, vol. 108, pp. 29–47, 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.01.029.



- [63] B. Samir and B. Mohamed, “Valorisation et Recyclage des Déchets Plastiques dans le Béton,” vol. 33, pp. 5–8, 2014, International Congress on Materials & Structural Stability, doi:10.1051/mateconf/20141101033.
- [64] A. Abed, A. Al-Hadithi, and A. S. Mohammed, “The effects of adding waste plastic fibers on some properties of roller compacted concrete,” MATEC Web of Conferences., vol. 162, pp. 3–6, 2018, doi: 10.1051/mateconf/201816202008.
- [65] F. Aslani, Y. Liu, and Y. Wang, “The effect of NiTi shape memory alloy , polypropylene and steel fibres on the fresh and mechanical properties of self-compacting concrete,” Construction and Building Materials., vol. 215, pp. 644–659, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.04.207.
- [66] S. Shahidan, N. A. Ranle, S. S. M. Zuki, F. S. Khalid, A. R. M. Ridzuan, and F. M. Nazri, “Concrete incorporated with optimum percentages of recycled polyethylene terephthalate (PET) bottle fiber,” International Journal of Integrated Engineering., vol. 10, no. 1, pp. 1–8, 2018, doi: 10.30880/ijie.2018.10.01.001.
- [67] S. Salhotra, R. K. Khitoliya, and S. Kumar, “Comparative study of uncoated and coated waste PET fiber for sustainable concrete,” Materials Today: Proceedings., vol.80 ,no,3. pp. 1701–3916, 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2021.06.060.
- [68] M. U. Usmani and A. S. M. A. Awal, “Physical, mechanical and durable characteristics of concrete incorporating polyethylene terephthalate fiber from bottle waste,” Journal of Critical Reviews, vol. 7, no. 5, pp. 908–916, 2020, doi: 10.31838/jcr.07.05.187.
- [69] V. Corinaldesi and G. Moriconi, “Characterization of self-compacting concretes prepared with different fibers and mineral additions,” Cement and Concrete Composites., vol. 33, no. 5, pp. 596–601, 2011, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2011.03.007.
- [70] M. A. Samsudin et al., “Investigation on Polyethylene Terephthalate ( PET ) Waste Fiber Performances in Concrete Material,” Civil Engineering and Built Environment. vol. 2, no. 1, pp. 682–690, 2021. doi : 10.30880/rtcebe.2021.02.01.074
- [71] B. K. Rao, “Steel Fiber Reinforced Self-Compacting Concrete Incorporating Class F Fly Ash,” International Journal of Engineering Science and Technology., vol. 2, no. 9, pp. 4936–4943, 2010.
- [72] N. Hidayat, R. N. Mutuku, and J. N. Mwero, “Physical and Mechanical Experimental

- Investigation of Concrete incorporated with Polyethylene Terephthalate (PET) Fibers,” *European International Journal of Science and Technology.*, vol. 6, no. 8, pp. 2304–9693, 2017.
- [73] L. S. Rasheed, A. M. Shaban, and A. T. Abdulrasool, “Mechanical and Structural Characteristics of PET Fiber Reinforced Concrete Plates,” *Smart Science.*, vol. 00, no. 00, pp. 1–15, 2021, doi: 10.1080/23080477.2021.1997136.
- [74] A. H. Allawi, A. I. Al-hadithi, and A. S. Mohmoud, “Iraqi Journal of Civil Engineering Effects of Waste Plastic PET Fibers on The Fresh and Hardened of Normal Concrete,” *Iraqi Journal of Civil Engineering* , 2021.
- [75] L. M. Thomas and S. A. Moosvi, “Hardened properties of binary cement concrete with recycled PET bottle fiber: An experimental study,” *Materials Today: Proceedings.*, vol. 32, no. 4, pp. 632–637, 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2020.03.025.
- [76] M. Krishnamoorthy, D. Tensing, M. Sivaraja, and A. R. Krishnaraja, “Durability studies on polyethylene terephthalate ( pet ) fibre reinforced concrete,” vol. 8, no. 10, pp. 634–640, 2017.
- [77] M. Omrane, S. Kenai, E. H. Kadri, and A. Aït-Mokhtar, “Performance and durability of self compacting concrete using recycled concrete aggregates and natural pozzolan,” *Journal of Cleaner Production.*, vol. 165, pp. 415–430, 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.07.139.
- [78] V. Corinaldesi and G. Moriconi, “Influence of mineral additions on the performance of 100% recycled aggregate concrete,” *Construction and Building Materials.*, vol. 23, no. 8, pp. 2869–2876, 2009, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2009.02.004.
- [79] L. Evangelista and J. de Brito, “Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates,” *Cement and Concrete Composites.*, vol. 29, no. 5, pp. 397–401, 2007, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2006.12.004.
- [80] M. Chakradhara Rao, S. K. Bhattacharyya, and S. V. Barai, “Influence of field recycled coarse aggregate on properties of concrete,” *Materials and Structures.*, vol. 44, no. 1, pp. 205–220, 2011, doi: 10.1617/s11527-010-9620-x.
- [81] A. K. Padmini, K. Ramamurthy, and M. S. Mathews, “Influence of parent concrete on the properties of recycled aggregate concrete,” *Construction and Building Materials*, vol.

- 23, no. 2, pp. 829–836, 2009, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2008.03.006.
- [82] S. Kenai and F. Debieb, “Caractérisation de la durabilité des bétons recyclés à base de gros et fins granulats de briques et de béton concassés,” *Materials and Structures.*, vol. 44, no. 4, pp. 815–824, 2011, doi: 10.1617/s11527-010-9668-7.
- [83] V. W. Y. Tam, X. F. Gao, C. M. Tam, and C. H. Chan, “New approach in measuring water absorption of recycled aggregates,” *Construction and Building Materials.*, vol. 22, no. 3, pp. 364–369, 2008, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2006.08.009.
- [84] C. Thomas, J. Setién, J. A. Polanco, and A. I. Cimentada, “Permeabilidad de hormigón reciclado estructural,” *Rehabend*, pp. 1172–1179, 2014.
- [85] M. Safiuddin, U. J. Alengaram, M. M. Rahman, M. A. Salam, and M. Z. Jumaat, “Use of recycled concrete aggregate in concrete: A review,” *Journal of Civil Engineering and Management.*, vol. 19, no. 6, pp. 796–810, 2013, doi: 10.3846/13923730.2013.799093.
- [86] C. Medina, W. Zhu, T. Howind, M. I. Sánchez De Rojas, and M. Frías, “Influence of mixed recycled aggregate on the physical-mechanical properties of recycled concrete,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 68, pp. 216–225, 2014, doi: 10.1016/j.jclepro.2014.01.002.
- [87] A. G. Khoshkenari, P. Shafigh, M. Moghimi, and H. Bin Mahmud, “The role of 0-2mm fine recycled concrete aggregate on the compressive and splitting tensile strengths of recycled concrete aggregate concrete,” *Materials & Design.*, vol. 64, pp. 345–354, 2014, doi: 10.1016/j.matdes.2014.07.048.
- [88] R. Movassaghi, “Durability of Reinforced Concrete Incorporating Recycled Concrete as Aggregate (RCA),” *Mémoire de Master*, Université Waterloo, p. 146, 2006.
- [89] A. Abbas, G. Fathifazl, O. B. Isgor, A. G. Razaqpur, B. Fournier, and S. Foo, “Proposed method for determining the residual mortar content of recycled concrete aggregates,” *Journal of ASTM International.*, vol. 5, no. 1, pp. 1–12, 2007, doi: 10.1520/JAI101087
- [90] L. Butler, J. S. West, and S. L. Tighe, “The effect of recycled concrete aggregate properties on the bond strength between RCA concrete and steel reinforcement,” *Cement and Concrete Research.*, vol. 41, no. 10, pp. 1037–1049, 2011, doi: 10.1016/j.cemconres.2011.06.004.
- [91] E. Güneysi, M. Gesoglu, Z. Algin, and H. Yazici, “Rheological and fresh properties of

- self-compacting concretes containing coarse and fine recycled concrete aggregates,” *Construction and Building Materials*, vol. 113, pp. 622–630, 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.03.073.
- [92] S. Manzi, C. Mazzotti, and M. C. Bignozzi, “Self-compacting concrete with recycled concrete aggregate: Study of the long-term properties,” *Construction and Building Materials*, vol. 157, no. 2017, pp. 582–590, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.09.129.
- [93] K. Ramyar and J. Brit, “Freeze – thaw resistance , mechanical and transport properties of self- consolidating concrete incorporating coarse ” *Materials & Design*, vol. 53, pp. 983-991,2014, doi.org/10.1016/j.matdes.2013.07.100.
- [94] Y. F. Silva, R. A. Robayo, P. E. Matthey, and S. Delvasto, “Properties of self-compacting concrete on fresh and hardened with residue of masonry and recycled concrete,” *Construction and Building Materials*, vol. 124, pp. 639–644, 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.07.057.
- [95] M. D. Safiuddin, M. A. Salam, and M. Z. Jumaat, “Effects of recycled concrete aggregate on the fresh properties of self-consolidating concrete,” *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, vol. 11, no. 4, pp. 1023–1041, 2011, doi: 10.1016/s1644-9665(12)60093-4.
- [96] P. Revathi, R. S. Selvi, and S. S. Velin, “Investigations on Fresh and Hardened Properties of Recycled Aggregate Self Compacting Concrete,” *Journal of The Institution of Engineers (India): Series A*, vol. 94, no. 3, pp. 179–185, 2013, doi: 10.1007/s40030-014-0051-5.
- [97] D. Carro-López, B. González-Fonteboa, J. De Brito, F. Martínez-Abella, I. González-Taboada, and P. Silva, “Study of the rheology of self-compacting concrete with fine recycled concrete aggregates,” *Construction and Building Materials*, vol. 96, pp. 491–501, 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.08.091.
- [98] J. Castro-gomes, “Permeability properties of self-Compacting concrete with coarse recycled aggregates”, *Construction and Building Materials*,vol.51, pp 113-120|, doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.061
- [99] R. S. Campos, M. P. Barbosa, L. L. Pimentel, and G. de F. Maciel, “Influence of recycled aggregates on rheological and mechanical properties of self-compacting concrete” *Rev.*

Mater., vol. 23, no. 1, 2018, doi: 10.1590/s1517-707620170001.0300.

- [100] I. González-Taboada, B. González-Fonteboa, J. Eiras-López, and G. Rojo-López, “Tools for the study of self-compacting recycled concrete fresh behaviour: Workability and rheology,” *Journal of Cleaner Production.*, vol. 156, pp. 1–18, 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.04.045.
- [101] O. K. Djelloul, B. Menadi, G. Wardeh, and S. Kenai, “Performance of self-compacting concrete made with coarse and fine recycled concrete aggregates and ground granulated blast-furnace slag,” *Advances in Concrete Construction.*, vol. 6, no. 2, pp. 103–121, 2018, doi: 10.12989/acc.2018.6.2.103.
- [102] H. Sasanipour and F. Aslani, “Durability properties evaluation of self-compacting concrete prepared with waste fine and coarse recycled concrete aggregates,” *Construction and Building Materials.*, vol. 236, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117540.
- [103] J. Xiao, W. Li, Z. Sun, D. A. Lange, and S. P. Shah, “Properties of interfacial transition zones in recycled aggregate concrete tested by nanoindentation,” *Cement and Concrete Composites.*, vol. 37, no. 1, pp. 276–292, 2013, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2013.01.006.
- [104] K. Kapoor, S. P. Singh, and B. Singh, “Evaluating the durability properties of self compacting concrete made with coarse and fine recycled concrete aggregates,” *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, vol. 24, no. 14, pp. 2383–2399, 2020, doi: 10.1080/19648189.2018.1506825.
- [105] L. Señas, C. Priano, and S. Marfil, “Influence of recycled aggregates on properties of self-consolidating concretes,” *Construction and Building Materials.*, vol. 113, pp. 498–505, 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.03.079.
- [106] N. Bahrami, M. Zohrabi, S. A. Mahmoudy, and M. Akbari, “Optimum recycled concrete aggregate and micro-silica content in self-compacting concrete: Rheological, mechanical and microstructural properties,” *Journal of Building Engineering.*, vol. 31, no. February, p. 101361, 2020, doi: 10.1016/j.jobe.2020.101361.
- [107] P. Mahakavi and R. Chithra, “Effect of recycled coarse aggregate and manufactured sand in self compacting concrete,” *Australian Journal of Structural Engineering.*, vol. 00, no. 00, pp. 1–11, 2019, doi: 10.1080/13287982.2019.1636519.

- [108] G. Dimitriou, P. Savva, and M. F. Petrou, “Enhancing mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete,” *Construction and Building Materials.*, vol. 158, pp. 228–235, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.09.137.
- [109] V. Revilla-cuesta, V. Ortega-lópez, M. Skaf, and J. Manuel, “Effect of fine recycled concrete aggregate on the mechanical behavior of self-compacting concrete,” *Construction and Building Materials.*, vol. 263, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120671.
- [110] Y. Wang, H. Zhang, Y. Geng, Q. Wang, and S. Zhang, “Prediction of the elastic modulus and the splitting tensile strength of concrete incorporating both fine and coarse recycled aggregate,” *Construction and Building Materials.*, vol. 215, pp. 332–346, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.04.212.
- [111] M. Behera, A. K. Minocha, and S. K. Bhattacharyya, “Flow behavior, microstructure, strength and shrinkage properties of self-compacting concrete incorporating recycled fine aggregate,” *Construction and Building Materials*, vol. 228, p. 116819, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.116819.
- [112] S. Manzi, C. Mazzotti, and M. C. Bignozzi, “Preliminary Studies on the Effect of C&DW on the Long-Term Properties of Sustainable Self-Compacting Concrete,” *CONCREEP 2015 Mech. Phys. Creep, Shrinkage, Durab. Concr. Concr. Struct. - Proc. 10th Int. Conf. Mech. Phys. Creep, Shrinkage, Durab. Concr. Concr. Struct.*, pp. 1554–1560, 2015, doi: 10.1061/9780784479346.181.
- [113] S. C. Kou and C. S. Poon, “Cement & Concrete Composites Properties of self-compacting concrete prepared with coarse and fine recycled concrete aggregates,” *Cement and Concrete Composites.*, vol. 31, no. 9, pp. 622–627, 2009, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2009.06.005.
- [114] H. Zhang, Y. Wang, D. E. Lehman, Y. Geng, and K. Kuder, “Time-dependent drying shrinkage model for concrete with coarse and fine recycled aggregate,” *Cement and Concrete Composites.*, vol. 105, no. August 2019, p. 103426, 2020, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2019.103426.
- [115] K. P. Verian, W. Ashraf, and Y. Cao, “Properties of recycled concrete aggregate and their influence in new concrete production,” *Resources, Conservation and Recycling.*, vol. 133, no. February, pp. 30–49, 2018, doi: 10.1016/j.resconrec.2018.02.005.

- [116] F. Fiol, C. Thomas, C. Muñoz, V. Ortega-López, and J. M. Manso, “The influence of recycled aggregates from precast elements on the mechanical properties of structural self-compacting concrete,” *Construction and Building Materials.*, vol. 182, pp. 309–323, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.06.132.
- [117] Á. Salesa, J. Á. Pérez-Benedicto, L. M. Esteban, R. Vicente-Vas, and M. Orna-Carmona, “Physico-mechanical properties of multi-recycled self-compacting concrete prepared with precast concrete rejects,” *Construction and Building Materials.*, vol. 153, pp. 364–373, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.07.087.
- [118] S. A. Santos, P. R. Da Silva, and J. De Brito, “Durability evaluation of self-compacting concrete with recycled aggregates from the precast industry,” *Magazine of Concrete Research.*, vol. 71, no. 24, pp. 1265–1282, 2019, doi: 10.1680/jmacr.18.00225.
- [119] H. Sasanipour, F. Aslani, and J. Taherinezhad, “Effect of silica fume on durability of self-compacting concrete made with waste recycled concrete aggregates,” *Construction and Building Materials.*, vol. 227, p. 116598, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.07.324.
- [120] L. A. Pereira-De-Oliveira, M. C. S. Nepomuceno, J. P. Castro-Gomes, and M. F. C. Vila, “Permeability properties of self-Compacting concrete with coarse recycled aggregates,” *Construction and Building Materials.*, vol. 51, pp. 113–120, 2014, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.10.061.
- [121] M. Gesoglu, E. Güneyisi, H. Ö. Öz, M. T. Yasemin, and I. Taha, “Durability and Shrinkage Characteristics of Self-Compacting Concretes Containing Recycled Coarse and/or Fine Aggregates,” *Advances in Materials Science and Engineering.*, vol. 2015, 2015, doi: 10.1155/2015/278296.
- [122] L. Zong, Z. Fei, and S. Zhang, “Author ’ s personal copy Permeability of recycled aggregate concrete containing fly ash and clay brick waste” *Journal of Cleaner Production* ,vol 70, pp. 175-182,2014, doi:0.1016/j.jclepro.2014.02.040.
- [123] S. Boudali, D. E. Kerdal, K. Ayed, B. Abdulsalam, and A. M. Soliman, “Performance of self-compacting concrete incorporating recycled concrete fines and aggregate exposed to sulphate attack,” *Construction and Building Materials.*, vol. 124, pp. 705–713, 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.06.058.
- [124] W. He, X. Kong, Y. Fu, C. Zhou, and Z. Zheng, “Experimental investigation on the

- mechanical properties and microstructure of hybrid fiber reinforced recycled aggregate concrete,” *Construction and Building Materials.*, vol. 261, p. 120488, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120488.
- [125] A. Toghroli, P. Mehrabi, M. Shariati, N. T. Trung, S. Jahandari, and H. Rasekh, “Evaluating the use of recycled concrete aggregate and pozzolanic additives in fiber-reinforced pervious concrete with industrial and recycled fibers,” *Construction and Building Materials.*, vol. 252, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118997.
- [126] X. F. Chen, S. C. Kou, and F. Xing, “Mechanical and durable properties of chopped basalt fiber reinforced recycled aggregate concrete and the mathematical modeling,” *Construction and Building Materials.*, vol. 298, p. 123901, 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123901.
- [127] M. Hajmohammadian Baghba, S. A. H. Hashemi, K. Kalbasi Anaraki, and E. S. Hashemi, “Influence of polypropylene-fiber on the mechanical properties of self-compacting-concrete with recycled aggregates,” *Magazine of Civil Engineering.*, vol. 99, no. 7, 2020, doi: 10.18720/MCE.99.5.
- [128] C. Dong et al., “Fresh and hardened properties of recycled plastic fiber reinforced self-compacting concrete made with recycled concrete aggregate and fly ash, slag, silica fume,” *Journal of Building Engineering*, vol. 62, no. September, p. 105384, 2022, doi: 10.1016/j.jobe.2022.105384.
- [129] P. J. Domone and J. JIN, “Properties of mortar for self-compacting concrete,” in *Self-compacting concrete (Stockholm, 13-14 September 1999)*, 1999, pp. 109–120.
- [130] EN 12350-8, 2014, Essai pour béton frais - Partie 8 : Béton auto-plaçant - Essai d'étalement au cône d'Abrams.
- [131] EN 12350-10, 2014, Essai pour béton frais - Partie 10 : Béton auto-plaçant - Essai à la boîte en
- [132] EN 12350-11, 2014, Essai pour béton frais - Partie 11 : Béton auto-plaçant - Essai de stabilité au tamis.
- [133] EN, 12390-3: 2009, Testing hardened concrete. Compressive strength of test specimens (2009) 12390-5.
- [134] EN 12390-6:2019, “BSI Standards Publication Tensile splitting strength of test



- specimens,” 2019.
- [135] EN 12390-5:2009 Testing hardened concrete — Part 5: Flexural strength of test specimens, 2009.
- [136] ASTM C469/C469M, “Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson’s Ratio of Concrete in Compression,” 2014,
- [137] ASTM C597-16, “Standard Specification for Pulse Velocity Through Concrete,” 2009,
- [138] P. NF, P 18-459, Béton-Essai pour béton durci-Essai de porosité et de masse volumique, Mars (2010).
- [139] C. ASTM, 642, Standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete, Annual book of ASTM standards 4 (2006) 02.
- [140] EN 12390-8, Essais pour béton durci - Partie 8 : profondeur de pénétration d'eau sous pression, Avril (2012)
- [141] C. ASTM, 1202, Rapid Chloride Permeability (1997).
- [142] X. P18-463, Testing gas permeability on hardened concrete. , 2011.
- [143] O. Boukendakdji, “Etude de l’influence des paramètres de formulation sur les propriétés d’un béton autoplaçant.”, Thèse de Doctorat, Département de Génie Civil, Université de Saad Dahleb, Blida ,Algérie.2010.
- [144] N. Bahrami, M. Zohrabi, S. A. Mahmoudy, and M. Akbari, “Optimum recycled concrete aggregate and micro-silica content in self-compacting concrete: Rheological, mechanical and microstructural properties,” *Journal of Building Engineering.*, vol. 31, no. March, p. 101361, 2020, doi: 10.1016/j.job.2020.101361.
- [145] A. I. Al-Hadithi and M. A. Abbas, “Innovative technique of using carbon fibre reinforced polymer strips for shear reinforcement of reinforced concrete beams with waste plastic fibres,” *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, vol. 25, no. 3, pp. 516–537, 2021. doi.org/10.1080/19648189.2018.1532820
- [146] H. Amini, J. Ahmadi, B. Saeedi, and M. Babaei, “Effect of Partial Replacement of Crushed Aggregate with Natural Sand on Mechanical and Rheological Properties of Self-Compacting Concrete,” vol. 11, no. 1, 2021.
- [147] P. Mahakavi and R. Chithra, “Effect of RCA, foundry sand on strength and toughness of

- fibre reinforced self-compacting concrete,” *Materials Today: Proceedings.*, vol. 47, no. , pp. 6976–6981, 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2021.05.253.
- [148] M. Burhan and A. A. Rahman, “Response of Hybrid Waste Fiber-Self Compacted Reinforced Concrete Slabs Under Static Loading,” *Engineering and Technology Journal* , vol.34 ,pp. 232–245, 2016. doi: 10.30684/etj.34.9A.17
- [149] Z. J. Grdic, G. A. Toplicic-Curcic, I. M. Despotovic, and N. S. Ristic, “Properties of self-compacting concrete prepared with coarse recycled concrete aggregate,” *Construction and Building Materials.*, vol. 24, no. 7, pp. 1129–1133, 2010, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2009.12.029.
- [150] A. M. Zeyad, “Effect of fibers types on fresh properties and flexural toughness of self-compacting concrete,” *Journal of Materials Research and Technology.*, vol. 9, no. 3, pp. 4147–4158, 2020, doi: 10.1016/j.jmrt.2020.02.042.
- [151] M. I. Safawi, I. Iwaki, and T. Miura, “A study on the applicability of vibration in fresh high fluidity concrete,” *Cement and Concrete Research.*, vol. 35, no. 9, pp. 1834–1845, 2005, doi: 10.1016/j.cemconres.2004.10.031.
- [152] F. Butt, A. Ahmad, K. Ullah, O. Zaid, H. A. Shah, and T. Kamal, “Mechanical performance of fiber-reinforced concrete and functionally graded concrete with natural and recycled aggregates,” *Ain Shams Engineering Journal.*, vol.14, pp. 102121, 2023.doi: 10.1016/j.asej.2023.102121
- [153] H. Sasanipour and F. Aslani, “Durability properties evaluation of self-compacting concrete prepared with waste fine and coarse recycled concrete aggregates,” *Construction and Building Materials.*, vol. 236, p. 117540, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117540.
- [154] T. Ozbakkaloglu, A. Gholampour, and T. Xie, “Mechanical and Durability Properties of Recycled Aggregate Concrete: Effect of Recycled Aggregate Properties and Content,” *Journal of Materials in Civil Engineering.*, vol. 30, no. 2, p. 04017275, 2018, doi: 10.1061/(asce)mt.1943-5533.0002142.
- [155] M. Ahmadi, S. Farzin, A. Hassani, and M. Motamedi, “Mechanical properties of the concrete containing recycled fibers and aggregates,” *Construction and Building Materials.*, vol. 144, pp. 392–398, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.03.215.

- [156] M. Bravo, J. de Brito, L. Evangelista, and J. Pacheco, "Superplasticizer's efficiency on the mechanical properties of recycled aggregates concrete: Influence of recycled aggregates composition and incorporation ratio," *Construction and Building Materials.*, vol. 153, pp. 129–138, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.07.103.
- [157] N. K. Bui, T. Satomi, and H. Takahashi, "Improvement of mechanical properties of recycled aggregate concrete basing on a new combination method between recycled aggregate and natural aggregate," *Construction and Building Materials.*, vol. 148, pp. 376–385, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.05.084.
- [158] Y. Li, M. Guan, G. Wang, and Z. Zhou, "Mechanical properties of fully recycled coarse aggregate concrete with manufactured sand," *Shenzhen Daxue Xuebao (Ligong Ban)/ Journal of Shenzhen University Science & Engineering.*, vol. 41, no. 3, pp. 367–376, 2024, doi: 10.3724/SP.J.1249.2024.03367.
- [159] A. A. Mohammed and A. A. F. Rahim, "Experimental behavior and analysis of high strength concrete beams reinforced with PET waste fiber," *Construction and Building Materials.*, vol. 244, p. 118350, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118350.
- [160] M. Alharthai, T. Ali, M. Z. Qureshi, and H. Ahmed, "The enhancement of engineering characteristics in recycled aggregates concrete combined effect of fly ash, silica fume and PP fiber," *Alexandria Engineering Journal.*, vol. 95, no. April, pp. 363–375, 2024, doi: 10.1016/j.aej.2024.03.084.
- [161] S. Ismail, W. H. Kwan, and M. Ramli, "Mechanical strength and durability properties of concrete containing treated recycled concrete aggregates under different curing conditions," *Construction and Building Materials.*, vol. 155, pp. 296–306, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.08.076.
- [162] E. Ghorbel and G. Wardeh, "Influence of recycled coarse aggregates incorporation on the fracture properties of concrete," *Construction and Building Materials.*, vol. 154, pp. 51–60, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.07.183.
- [163] M. Hichem, A. Kada, B. Karim, A. Mohammed, E. Mohammed, and N. Leklou, "Performance of Self-Compacting Concrete Containing Recycled Aggregates and Recycled Steel Fibers," *International Journal of Engineering Research in Africa*, vol. 68, pp. 51–66, 2024. <https://doi.org/10.4028/p-GamA0s>
- [164] A. Jain, A. Kathuria, A. Kumar, and Y. Verma, "Combined Use of Non-Destructive

- Tests for Assessment of Strength of Concrete in Structure,” *Procedia Engineering*, vol. 54, pp. 241–251, 2013, doi: 10.1016/j.proeng.2013.03.022.
- [165] H. Sasanipour, F. Aslani, and J. Taherinezhad, “Effect of silica fume on durability of self-compacting concrete made with waste recycled concrete aggregates,” *Construction and Building Materials*, vol. 227, p. 116598, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.07.324.
- [166] W. H. Kwan, M. Ramli, K. J. Kam, and M. Z. Sulieman, “Influence of the amount of recycled coarse aggregate in concrete design and durability properties,” *Construction and Building Materials*, vol. 26, no. 1, pp. 565–573, 2012, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.06.059.
- [167] A. Princigallo, “Effective Water in Concrete with Recycled Aggregate,” *ACI Materials Journal*, vol. 115, no. 6, 2018. doi: 10.14359/51706842
- [168] D. Pedro, J. de Brito, and L. Evangelista, “Structural concrete with simultaneous incorporation of fine and coarse recycled concrete aggregates: Mechanical, durability and long-term properties,” *Construction and Building Materials*, vol. 154, pp. 294–309, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.07.215.
- [169] H. El-Hassan, P. Kianmehr, and S. Zouaoui, “Properties of pervious concrete incorporating recycled concrete aggregates and slag,” *Construction and Building Materials*, vol. 212, pp. 164–175, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.03.325.
- [170] M. Mastali and A. Dalvand, “Use of silica fume and recycled steel fibers in self-compacting concrete (SCC),” *Construction and Building Materials*, vol. 125, pp. 196–209, 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.08.046.
- [171] L. Evangelista, M. Guedes, J. De Brito, A. C. Ferro, and M. F. Pereira, “Physical , chemical and mineralogical properties of fine recycled aggregates made from concrete waste,” *Construction and Building Materials*, vol. 86, pp. 178–188, 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.03.112.
- [172] J. Thomas, N. N. Thaickavil, and P. M. Wilson, “Strength and durability of concrete containing recycled concrete aggregates,” *Journal of Building Engineering*, vol. 19, pp. 349–365, 2018, doi: 10.1016/j.job.2018.05.007.
- [173] M. Koushkbaghi, M. J. Kazemi, H. Mosavi, and E. Mohseni, “Acid resistance and

- durability properties of steel fiber-reinforced concrete incorporating rice husk ash and recycled aggregate,” *Construction and Building Materials*., vol. 202, pp. 266–275, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.12.224.
- [174] Z. Bayasi, “Properties of Polypropylene Fiber Reinforced Concrete,” *ACI Materials Journal*, vol. 90, no. 6, 1993, doi: 10.14359/4439.
- [175] Z. Guo, T. Jiang, J. Zhang, X. Kong, C. Chen, and D. E. Lehman, “Mechanical and durability properties of sustainable self-compacting concrete with recycled concrete aggregate and fly ash, slag and silica fume,” *Construction and Building Materials*., vol. 231, p. 117115, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117115.
- [176] A. Jain, S. Siddique, T. Gupta, S. Jain, R. K. Sharma, and S. Chaudhary, “Fresh, Strength, Durability and Microstructural Properties of Shredded Waste Plastic Concrete,” *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*., vol. 43, pp. 455–465, 2019, doi: 10.1007/s40996-018-0178-0.
- [177] G. M. Sadiquul Islam and S. Das Gupta, “Evaluating plastic shrinkage and permeability of polypropylene fiber reinforced concrete,” *International Journal of Sustainable Built Environment*., vol. 5, no. 2, pp. 345–354, 2016, doi: 10.1016/j.ijbsbe.2016.05.007.
- [178] T. Plagué, C. Desmettre, and J. P. Charron, “Influence of fiber type and fiber orientation on cracking and permeability of reinforced concrete under tensile loading,” *Cement and Concrete Research*., vol. 94, pp. 59–70, 2017, doi: 10.1016/j.cemconres.2017.01.004.
- [179] Y. Li, Y. Zhang, E. H. Yang, and K. H. Tan, “Effects of geometry and fraction of polypropylene fibers on permeability of ultra-high performance concrete after heat exposure,” *Cement and Concrete Research*., vol. 116, no. March 2018, pp. 168–178, 2019, doi: 10.1016/j.cemconres.2018.11.009.
- [180] K. K. M. E, S. P. S. P. D, and B. S. P. D, “Durability of self-compacting concrete made with Recycled Concrete Aggregates and mineral admixtures,” *Construction and Building Materials*., vol. 128, pp. 67–76, 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.10.026.
- [181] T. Barroqueiro, P. R. da Silva, and J. de Brito, “High-performance self-compacting concrete with recycled aggregates from the precast industry: Durability assessment,” *Buildings*, vol. 10, no. 6, pp. 1–22, 2020, doi: 10.3390/BUILDINGS10060113.

# **ANNEXE**

---

## Annexe A : Exemple de calcul de la composition du béton

### ❖ Les données

Pour un volume de béton de volume  $V=33$  litres.

#### A. Masses volumiques

➤ Masse volumique apparente du gravier (on prend l'exemple du gravier roulé) :

$$\rho_G = 1.500 \text{ kg/cm}^3$$

➤ Masse volumique absolue du gravier :  $\rho_{AG} = 2.63 \text{ kg/cm}^3$

➤ Masse volumique absolue du sable :  $\rho_S = 2.65 \text{ kg/cm}^3$

➤ Masse volumique absolue du ciment :  $\rho_C = 3080 \text{ kg/m}^3$

#### B. Coefficients d'absorption

➤ Coefficient d'absorption du sable :  $A_{bS} = 0.65$  ;

➤ Coefficient d'absorption du gravier :  $A_{bG} = 0.79$  ;

➤ Le rapport Sable/Mortier :  $S/M = 0.5$  ;

➤ Le pourcentage du gravier est de 50% de sa densité apparente donc son dosage sera de :

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

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

➤ Le rapport Eau/Ciment est de  $E/C_{\text{volume}}=1.26$  par unité de volume de ciment et  $E/C_{\text{poids}} = E/C_{\text{volume}} / \rho_C = 0.40$  par unité de poids de ciment ;

➤ Le pourcentage de superplastifiant (MEDAFLOW30) :  $\%Sp = 0.95\%$  du poids de ciment, le MEDAFLOW30 ;

### ❖ Calcul d'humidité

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

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

- L'humidité du sable :  $\mu_S = \frac{M_1 - M_2}{M_2} \times 100$
- L'humidité du gravier :  $\mu_G = \frac{M'_1 - M'_2}{M'_2} \times 100$

### ❖ Calcul des différents composants

#### A. Gravier

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

$$G(\text{kg}) = \frac{G(\text{kg}/\text{m}^3) \times V - M_2}{1000} \left[ 1 + \frac{\mu_{G-A_bG}}{100} \right]$$

#### B. Sable

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

- Le pourcentage du gravier dans le béton :

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

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

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

- Le pourcentage du sable dans le béton :

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



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

$$S(kg) = \frac{S(\%) \times \rho_{AS} \times V}{1000} \left[ 1 + \frac{\mu_{S-ABS}}{100} \right]$$

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

### C. Ciment

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

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

- Pourcentage de ciment dans le béton (%C) :

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

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

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

### D. Superplastifiant

- Le dosage en superplastifiant par mètre cube de béton Sp (kg/m<sup>3</sup>)

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

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

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

**E. Eau**

L'eau ajoutée au béton (E) est divisée en deux parties : la première partie (E1) est de 70% de (E) elle est ajoutée durant la première minute de malaxage et la deuxième partie (E2), elle de 30% de (E) est ajoutée au superplastifiant est l'ensemble est ajouté au mélange du béton durant la deuxième minute de malaxage.

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

$$E(\%) = \frac{\frac{E}{C_{volum\grave{e}}}}{1 + \frac{E}{C_{volum\grave{e}}}} \times P(\%)$$

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

- L'eau contenue dans le sable : e<sub>1</sub>

$$e_1(kg) = \frac{S(\%) \times \rho_{AS} \times V}{1000} \left[ \frac{\mu_{S-AbS}}{100} \right]$$

- L'eau contenue dans le sable : e<sub>2</sub>

$$e_2(kg) = \frac{G(\frac{kg}{m^3}) \times V}{1000} \left[ \frac{\mu_{G-AbG}}{100} \right]$$

- L'eau contenue dans le superplastifiant : e<sub>3</sub>

$$e_3(kg) = \frac{Sp(kg) \times 70}{100}$$

- L'eau à extraire : e

$$e = e_1 + e_2 + e_3$$

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

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