

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université Hassiba Benbouali de Chlef  
Faculté de Génie Civil et d'Architecture  
Département de Génie Civil



# THÈSE

Présentée pour l'obtention du diplôme de

## DOCTORAT

Filière : Travaux Publics

Spécialité : Voies et Ouvrages d'Art

Par

**BENSAHNOUNE Sahnoune**

*Thème*

**Etude expérimentale et numérique des déformations différées  
du béton à base de granulats recyclés du béton bitumineux**

Soutenue le 23/05/2024, devant le jury composé de :

EZZIANE Karim	Professeur	Université Hassiba Benbouali de Chlef	Président
BOUGARA Abdelkader	Professeur	Université Hassiba Benbouali de Chlef	Examineur
ADJOU DJ M'hamed	Professeur	Université Hassiba Benbouali de Chlef	Examineur
TAHENNI Touhami	Professeur	Université Djillali Bounaama de Khemis Miliana	Examineur
BOULEKBACHE Bensaid	Professeur	Université Hassiba Benbouali de Chlef	Rapporteur
BOUZIADI Farid	MCA	Université Hassiba Benbouali de Chlef	Co-rapporteur

## *Dédicace*

---

*A la mémoire de mon père,  
A ma mère,  
A mes frères et mes sœurs,  
A tous ceux qui m'ont encouragé.*

# Remerciements

---

Je remercie "**ALLAH**" le Tout-Puissant de m'avoir donné la force et le courage de finir ce modeste travail, qui est le fruit de mes années de savoir.

Je tiens à remercier tous particulièrement :

Mon directeur de thèse, **M. BOULEKBACHE Bensaid**, Professeur à l'Université Hassiba Benbouali de Chlef, pour avoir dirigé ce travail et de m'avoir donné l'occasion de réaliser cette thèse dans les bonnes conditions. Je tiens également à le remercier pour sa grande disponibilité, son aide et sa sympathie, sa grande gentillesse, de ses encouragements et de la confiance qu'il m'a accordée.

Mon co-directeur de thèse, **M. BOUZIADI Farid**, MCA à l'Université Hassiba Benbouali de Chlef, pour avoir partagé ses connaissances sur le sujet.

**M. EZZIANE Karim**, Professeur à l'Université de Chlef, pour l'honneur qu'il me fait en acceptant de présider ce jury.

**M. BOUGARA Abdelkader**, Professeur à l'Université de Chlef, **M. ADJOUDJ M'hamed**, Professeur à l'Université de de Chlef et **M. TAHHANI Touhami**, Professeur à l'Université de **Khemis Miliana**, pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail en acceptant d'en être les examinateurs.

**M. DJAFAR HENNI Ahmed**, Professeur à l'Université de Chlef pour avoir partagé l'ensemble de ses connaissances durant tous mon parcours universitaire.

**M. HADDI Abdelkader**, HDR à l'Université d'Artois, Béthune qui m'a accueilli dans son laboratoire et m'a donné l'opportunité de réaliser la partie numérique et d'avoir partagé l'ensemble de ses connaissances.

Je tiens à remercier également tous les enseignants du département de génie civil de la Faculté de Génie Civil et d'Architecture de l'UHB Chlef.

Je tiens à remercier l'ingénieur **OUALI Fouad** pour sa disponibilité durant la campagne expérimentale.

Mes remerciements vont aussi, à tous ceux qui m'ont aidé par leur présence ou par leur soutien dans la réalisation de cette thèse, en particulier mes collègues doctorants **MM. Y. NADOUR, O. BELABBAS** et **M<sup>me</sup> I. MAROUF** pour leur inestimable aide lors de la réalisation des essais.

Je tiens à remercier l'équipe du laboratoire LSME pour l'ambiance de travail et avec qui j'ai eu le plaisir de faire cette thèse.

## Résumé

L'objectif de ce travail de recherche est d'étudier les propriétés physico-mécaniques, la durabilité et les déformations différées des bétons préparés avec des graviers recyclés du béton bitumineux (BRAP). Le gravier naturel est partiellement ou totalement remplacé par du gravier recyclé du béton bitumineux (RAP) avec des substitution en volume de 0 %, 25 %, 50 %, 75 %, et 100 %. Plusieurs essais ont été réalisés. Tout d'abord, l'essai d'ouvrabilité et de rhéologie sont effectués pour caractériser les propriétés des bétons à l'état frais. Par la suite, des essais mécaniques (résistance à la compression, résistance à la flexion et le module d'élasticité) sont réalisés pour évaluer leurs propriétés mécaniques. Un test de vitesse des ondes ultrasoniques a été utilisé pour examiner la connectivité des pores dans le béton et sa qualité. La durabilité a été étudiée par des essais d'absorption par immersion, absorption par capillarité, perméabilité à l'eau et pénétration des chlorures. Enfin, des essais de déformation différées tels que le fluage et le retrait sous trois températures de cure 20 °C, 40 °C et 60 °C. De plus, pour prédire le retrait total du BRAP, une analyse par éléments finis utilisant le logiciel ANSYS, basée sur l'approche de la maturité et le modèle à deux phases en série a été réalisée.

Les résultats montrent que l'utilisation de RAP réduit l'ouvrabilité et affecte négativement les propriétés mécaniques du BRAP. De plus, l'absorption et la perméabilité d'eau augmente avec l'augmentation de la quantité de granulats RAP. Par contre, la perméabilité aux ions chlore est plus faible pour les BRAP. En outre, cette étude a révélé que les déformations de retrait et de fluage augmentent avec l'augmentation du taux de remplacement des granulats RAP. Cependant, le retrait total du BRAP diminue à mesure que la température de cure augmente. Les résultats trouvés montrent que le gravier RAP peut être une alternative au gravier naturel, Les résultats numériques du retrait sont en bon accord avec les résultats expérimentaux.

**Mots clés :** Gravier RAP ; Gravier naturel ; Température ; Résistance ; Durabilité ; Retrait ; Fluage ; logiciel ANSYS.

## **Abstract**

The objectives of this research are to study the physical and mechanical properties, durability and delayed deformations of concrete prepared with gravel recycled from bituminous concrete (CRAP). Natural gravel is partially or completely replaced by recycled asphalt concrete gravel (RAP) with volume substitutions of 0%, 25%, 50%, 75%, and 100%. Several tests were carried out. First, the workability and rheology tests are carried out to characterize the properties of concrete in the fresh state. Subsequently, mechanical tests (compressive strength, flexural strength and modulus of elasticity) are carried out to evaluate their mechanical properties. An ultrasonic wave velocity test was used to examine the connectivity of pores in concrete and its quality. Durability was studied by absorption by immersion, absorption by capillarity, and permeability to water and chloride penetration. Finally, delayed deformation tests such as creep and shrinkage under three curing temperatures 20 °C, 40 °C and 60 °C. Furthermore, to predict the total CRAP shrinkage, finite element analysis using ANSYS software, based on the maturity approach and the two-phase serial model was carried out.

The results show that the use of RAP reduces the workability and negatively affects the mechanical properties of the CRAP. In addition, water absorption and permeability increase with the increase in the quantity of RAP aggregates. On the other hand, the chloride penetration is lower for CRAP. Furthermore, this study found that shrinkage and creep strains increase with increasing replacement rate of RAP aggregates. However, the total shrinkage of BRAP decreases as the curing temperature increases. The results found show that the RAP gravel can be an alternative to natural gravel. The numerical results of shrinkage are in good agreement with the experimental results.

**Keywords:** RAP gravel ; Natural gravel ; Temperature ; Strength ; Durability ; Shrinkage ; Creep ; ANSYS software.

الهدف من هذا العمل البحثي هي دراسة الخواص الفيزيائية والميكانيكية الاديمومة والتشوهات المتأخرة للخرسانة المحضرة بالحصى المعاد تدويره من الخرسانة الإسفلتية BRAP. يتم استبدال الحصى الطبيعي جزئيا أو كليا بحصى الخرسانة الإسفلتية المعاد تدويره (RAP) مع بدائل حجمية تبلغ 0٪، و25٪، و50٪، و75٪، و100٪. تم إجراء العديد من الاختبارات. أولا، يتم إجراء اختبار قابلية التشغيل والانسيابية لتوصيف خصائص الخرسانة في الحالة الطازجة. بعد ذلك، يتم إجراء الاختبارات الميكانيكية (قوة الضغط، قوة الانحناء ومعامل المرونة) لتقييم خواصها الميكانيكية. تم استخدام اختبار سرعة الموجات فوق الصوتية لفحص اتصال المسام في الخرسانة وجودتها. تمت دراسة الاديمومة عن طريق اختبارات الامتصاص عن طريق الغمر، والامتصاص عن طريق العمل الشعري، ونفاذية الماء وأيونات الكلور. وأخيرا، اختبارات التشوه المتأخر مثل الزحف والانكماش تحت ثلاث درجات حرارة للمعالجة 20 درجة مئوية، 40 درجة مئوية و60 درجة مئوية. علاوة على ذلك، للتنبؤ بالانكماش الكلي لـ BRAP، تم إجراء تحليل العناصر المحدودة باستخدام برنامج ANSYS، بناء على نهج النضج والنموذج التسلسلي ثنائي المرحلتين.

أظهرت النتائج أن استخدام RAP يقلل من قابلية التشغيل ويؤثر سلبا على الخواص الميكانيكية لـ BRAP. بالإضافة إلى ذلك، يزداد امتصاص الماء ونفاذيته مع زيادة كمية الحصى RAP. من ناحية أخرى، فإن نفاذية أيونات الكلور أقل بالنسبة للخرسانة المجمعة RAP. علاوة على ذلك، وجدت هذه الدراسة أن سلالات الانكماش والزحف تزداد مع زيادة معدل استبدال ركام RAP. ومع ذلك، فإن الانكماش الإجمالي لـ BRAP يتناقص مع زيادة درجة حرارة المعالجة. أظهرت النتائج أن حصى RAP يمكن أن يكون بديلا للحصى الطبيعي. النتائج العددية الانكماش تتفق بشكل جيد مع النتائج التجريبية.

**الكلمات المفتاحية:** الحصى RAP ؛ الحصى الطبيعي درجة حرارة ؛ مقاومة ؛ الاديمومة ؛ انكماش ؛ زحف ؛ برنامج ANSYS.

# Table des matières

Résumé.....	iv
Abstract.....	v
ملخص .....	vi
Liste des figures .....	xi
Liste des tableaux.....	xiii
Liste des symboles.....	xiv
<b>Introduction générale.....</b>	<b>2</b>
<b>Chapitre 1 : Revue bibliographique .....</b>	<b>6</b>
1.1. Introduction .....	6
1.2. Dégradations de la chaussée .....	7
1.3. Chiffres mondiaux.....	8
1.4. Utilisation du RAP .....	10
1.4.1. Utilisation du RAP dans les chaussées souples.....	10
1.4.2. Utilisation du RAP dans la chaussée rigide.....	12
1.4.3. Utilisation du RAP en Algérie.....	15
1.5. Avantages du recyclage des granulats RAP .....	15
1.5.1. Préservation des ressources naturelles .....	15
1.5.2. Economie d'énergie.....	16
1.5.3. Préservation de l'environnement .....	16
1.6. Classification et processus de fabrication du RAP .....	17
1.7. Propriétés physico-mécaniques des granulats RAP .....	19
1.7.1. Densité .....	20
1.7.2. Granulométrie.....	20
1.7.3. Absorption d'eau .....	22
1.7.4. Résistance à l'abrasion.....	23
1.7.5. Epaisseur du film d'asphalte .....	24
1.7.6. Teneur en bitume des RAP.....	24
1.7.7. Point de ramollissement du RAP.....	25
1.8. Effet du RAP sur les propriétés du béton frais .....	26
1.8.1. Ouvrabilité .....	26
1.8.2. Teneur optimale en humidité.....	27
1.8.3. Masse volumique.....	28

1.9. Effet du RAP sur les propriétés mécaniques.....	29
1.9.1. Résistance à la compression.....	29
1.9.2. Résistance à la flexion.....	31
1.9.3. Module d'élasticité.....	34
1.9.4. Ténacité.....	35
1.9.5. Microstructure.....	36
1.9.6. Porosité.....	37
1.9.7. Effet de l'âge du RAP.....	37
1.10. Effet du RAP sur la durabilité.....	38
1.10.1. Absorption d'eau.....	38
1.10.2. Perméabilité à l'eau.....	39
1.10.3. Pénétration des ions chlore.....	39
1.10.4. Carbonatation.....	40
1.10.5. Attaque par les acides les sulfates.....	40
1.10.6. Résistance au gel/dégel.....	41
1.11. Effet du RAP sur le retrait.....	42
1.12. Fluage.....	42
1.12.1. Origine physico-chimique du fluage.....	43
1.12.2. Effet du RAP sur le fluage.....	44
1.13. Conclusion de la revue bibliographique.....	44
<b>Chapitre 2 : Matériaux et matériel d'essai.....</b>	<b>47</b>
2.1. Introduction.....	47
2.2. Matériaux utilisés.....	47
2.2.1. Ciment.....	47
2.2.2. Sable.....	48
2.2.3. Gravier naturel.....	48
2.2.4. Gravier RAP.....	48
2.2.5. Teneur en bitume des granulats RAP.....	49
2.3. Formulation des bétons.....	51
2.4. Gâchage et malaxage.....	51
2.5. Essais sur béton frais.....	53
2.5.1. Masse volumique.....	53
2.5.2. Affaissement au cône d'Abrams.....	53
2.5.3. Rhéologie des bétons.....	54
2.6. Propriétés mécaniques du béton durci.....	55

2.6.1. Résistance à la compression .....	55
2.6.2. Résistance à la traction par flexion.....	56
2.6.3. Module d'élasticité .....	57
2.6.4. Auscultation dynamique.....	58
2.7. Microstructure .....	59
2.8. Durabilité .....	60
2.8.1. Absorption capillaire.....	60
2.8.2. Absorption par immersion.....	61
2.8.3. Perméabilité à l'eau.....	62
2.8.4. Perméabilité aux ions chlore .....	63
2.9. Déformations différées .....	64
2.9.1. Retrait.....	64
2.9.2. Fluage.....	66
2.10. Conclusion.....	70
<b>Chapitre 03 : Analyse des résultats expérimentaux .....</b>	<b>72</b>
3.1. Introduction .....	72
3.2. Influence du RAP sur les propriétés du béton frais.....	72
3.2.1. Influence du RAP sur la masse volumique du béton frais .....	72
3.2.2. Influence du RAP sur l'affaissement du béton .....	73
3.2.3. Influence du RAP sur la rhéologie des bétons.....	74
3.3. Influence du RAP sur les propriétés du béton durci .....	75
3.3.1. Influence du RAP sur la résistance à la compression.....	75
3.3.2. Courbes contraintes-déformations.....	76
3.3.3. Influence du RAP sur la résistance à la flexion .....	77
3.3.4. Influence du RAP sur le module d'élasticité.....	78
3.3.5. Influence du RAP sur les auscultations dynamiques .....	79
3.4. Microstructure de la matrice BRAP .....	80
3.5. Essai de durabilité .....	83
3.5.1. Absorption capillaire.....	83
3.5.2. Absorption par immersion.....	85
4.5.3. Perméabilité à l'eau.....	86
3.5.4. Perméabilité aux ions chlore .....	87
3.6. Essais de déformations différées .....	88
3.6.1. Influence du RAP sur le retrait total.....	88
3.6.2. Influence de la température de cure sur le retrait total du BRAP .....	89

3.6.3. Influence du RAP sur le fluage .....	91
3.6.3.1. Influence du RAP sur le fluage en compression .....	91
3.6.3.2. Influence du RAP sur le fluage en traction .....	92
3.6.3.3. Comparaison entre le fluage en compression et en traction.....	93
3.6.3.4. Coefficient de fluage .....	93
3.6.3.5. Flèche .....	94
3.7. Conclusion .....	95
<b>Chapitre 4 : Etude numérique du retrait.....</b>	<b>97</b>
4.1. Introduction .....	97
4.2. Méthode de maturité .....	97
4.2.1. Degré d'hydratation.....	98
4.2.2. Demi-âge de retrait.....	98
4.2.3. Energie d'activation .....	99
4.2.4. Age équivalent.....	99
4.2.5. Caractéristiques thermiques du béton.....	101
4.2.6. Caractéristiques mécaniques du béton.....	102
4.3. Analyse numérique .....	103
4.3.1. Analyse non linéaire par éléments finis.....	103
4.3.2. Validation de l'analyse EF.....	104
4.4. Conclusion .....	108
<b>Conclusion générale .....</b>	<b>110</b>
<b>Bibliographie .....</b>	<b>114</b>

## Liste des figures

Figure 1. 1. Dégradation des chaussées souples.....	7
Figure 1. 2. Entretien des routes (fraisage). ....	8
Figure 1. 3. Stockage des déchets de RAP. ....	8
Figure 1. 4. Quantité de RAP dans les pays européens [7]. ....	9
Figure 1. 5. Utilisation du RAP dans les pays européens [7]. ....	9
Figure 1. 6. Recyclage du RAP à froid à l'usine [3]. ....	11
Figure 1. 7. Fraisage contrôlé par fraiseuse.....	18
Figure 1. 8. Fraisage incontrôlé (scarification) par bulldozer. ....	18
Figure 1. 9. Type de RAP [69]. ....	19
Figure 1. 10. Distribution granulométrique des granulats RAP-G [69]. ....	21
Figure 1. 11. Composition du RAP. ....	24
Figure 1. 12. Point de ramollissement du bitume dans le RAP [95]. ....	25
Figure 1. 13. Résistance à la compression des BRAP [104]. ....	30
Figure 1. 14. Propagation de la fissure [24] (a) béton ordinaire (b) béton avec RAP. ....	36
Figure 1. 15. Porosité du béton à base de granulats RAP [117]. ....	37
Figure 1. 16. Décomposition des déformations de fluage [129]. ....	43
Figure 1. 17. Migration de l'eau adsorbée [130, 131]. ....	44
Figure 1. 18. Mécanisme de glissement des feuillets C-S-H [130]. ....	44
Figure 2. 1. Granulats utilisés (GN et RAP).....	48
Figure 2. 2. Analyse granulométrique des granulats. ....	49
Figure 2. 3. Essai Kumagawa. ....	50
Figure 2. 4. Vibration des éprouvettes. ....	52
Figure 2. 5. Conservation des éprouvettes. ....	52
Figure 2. 6. Essais affaissement au cône d'Abrams. ....	53
Figure 2. 7. Rhéomètre ICAR. ....	54
Figure 2. 8. Essai de résistance à la compression.....	55
Figure 2. 9. Essai de traction par flexion trois points. ....	56
Figure 2. 10. Essai de mesure du module d'élasticité. ....	57
Figure 2. 11. Surfaçage des éprouvettes cylindriques. ....	58
Figure 2. 12. Appareil de mesure de la vitesse d'impulsion. ....	59
Figure 2. 13. Essai de microscope électronique à balayage (MEB). ....	60
Figure 2. 14. Essai d'absorption capillaire. ....	61
Figure 2. 15. Essai de perméabilité à l'eau.....	63
Figure 2. 16. Essai de perméabilité aux ions chlore.....	64
Figure 2. 17. Mesure du retrait.....	65
Figure 2. 18. Chronologie de mesure du retrait.....	66
Figure 2. 19. Ferrailage des poutres. ....	67
Figure 2. 20. Coffrage des poutres. ....	67
Figure 2. 21. Poutres chargées. ....	68
Figure 2. 22. Mesure des déformations du fluage et de la flèche.....	68

Figure 3. 1. Masse volumique des bétons frais. ....	72
Figure 3. 2. Affaissement des différents bétons. ....	73
Figure 3. 3. Seuil de cisaillement des bétons. ....	74
Figure 3. 4. Viscosité plastique des bétons. ....	74
Figure 3. 5. Résistance à la compression des bétons. ....	76
Figure 3. 6. Courbes contraintes-déformations en compression à 28 jours. ....	76
Figure 3. 7. Résistance à la flexion des bétons. ....	77
Figure 3. 8. Résultats du module d'élasticité. ....	78
Figure 3. 9. Vitesse d'impulsion ultrasonique des bétons. ....	79
Figure 3. 10. Module d'élasticité dynamique des bétons à 28 jours. ....	80
Figure 3. 11. Faciès d'une éprouvette BRAP-100 après essai de flexion. ....	81
Figure 3. 12. MEB du BGN et BRAP-100. ....	82
Figure 3. 13. Analyse MEB et DRX (a) BGN (b) BRAP-100. ....	83
Figure 3. 14. Résultat de l'essai d'absorption capillaire. ....	84
Figure 3. 15. Effet des RAP sur la sorptivité des bétons à 28 et 90 jours. ....	85
Figure 3. 16. Résultats de l'essai d'absorption par immersion. ....	86
Figure 3. 17. Résultat de la perméabilité à l'eau. ....	86
Figure 3. 18. Résultats de la perméabilité aux ions chlore. ....	87
Figure 3. 19. Evolution du retrait total des bétons. ....	89
Figure 3. 20. Effet de la température de cure sur le retrait total du BRAP. ....	90
Figure 3. 21. Fluage en compression. ....	91
Figure 3. 22. Fluage en traction. ....	93
Figure 3. 23. Coefficient de fluage. ....	94
Figure 3. 24. Flèche des différents bétons testés. ....	95
Figure 4. 1. Retrait en fonction de l'âge équivalent à différentes températures. ....	100
Figure 4. 2. Modèle à deux phases en série [173]. ....	101
Figure 4. 3. Retrait expérimental et numérique à différentes températures de durcissement. ....	105

## Liste des tableaux

Tableau 1. 1. Proportions du mélange dans le RAP inclus dans le mélange de béton ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ).....	14
Tableau 1. 2. Résumé des valeurs de la densité des granulats grossiers naturels et RAP. ....	20
Tableau 1. 3. Résumé des valeurs de l'absorption d'eau des graviers naturels et RAP (%). ....	23
Tableau 1. 4. Résultats de l'essai d'abrasion des GN et RAP obtenus par différents chercheurs. ....	24
Tableau 1. 5. Comparaison des propriétés des RAP par rapport aux GN. ....	26
Tableau 1. 6. Taux de diminution de la résistance à la compression des BRAP à 28 jours. ....	31
Tableau 1. 7. Taux de diminution de la résistance à la flexion des BRAP à 28 jours. ....	33
Tableau 1. 8. Résumé de la littérature sur l'effet du RAP sur les propriétés mécaniques. ....	35
Tableau 2. 1. Composition chimique et minéralogique du ciment utilisé. ....	47
Tableau 2. 2. Caractérisation physique et mécanique des granulats. ....	49
Tableau 2. 3. Composition des bétons testés ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ). ....	51
Tableau 2. 4. Echelle pour l'essai de perméabilité à l'eau [144]. ....	62
Tableau 2. 5. Echelle pour l'essai de perméabilité aux ions chlore [145]. ....	64
Tableau 2. 6. Paramètres d'études. ....	65
Tableau 2. 7. Chargement appliqué à chaque poutre. ....	68
Tableau 4. 1. Demi-âge des mélanges de béton pour différentes températures de cure.....	98
Tableau 4. 2. Energie d'activation des différents bétons. ....	99
Tableau 4. 3. Propriétés des bétons utilisés pour le modèle EF. ....	104
Tableau 4. 4. Erreurs résiduelles pour les différents mélanges. ....	106
Tableau 4. 5. Comparaison des valeurs numériques et expérimentales du retrait total.....	107

## Liste des symboles

BGN	Béton à base de granulats naturels
BRAP	Béton à base de granulats RAP
CH	Portlandite
CSH	Calcium de silicates hydratés
E/C	Rapport Eau/Ciment
GN	Granulat naturel
ITZ	Zone de transition interfaciale
RAP	Frisât du béton bitumineux (Reclaimed Asphalt Pavement)
RAP-F	Frisât de béton bitumineux fin
RAP-G	Frisât de béton bitumineux grossier
RAP-C	Frisât de béton bitumineux combiné (grossier et fin)

---

# Introduction générale

---

## Introduction générale

Le développement durable est un sujet contemporain dans le domaine des chaussées souples (béton bitumineux) et rigides (béton de ciment), car la construction routière est une grande consommatrice de granulats. De plus, l'entretien des chaussées souples dégradées nécessite inévitablement le fraisage des anciennes couches du béton bitumineux, ce qui conduit à la production ou la récupération d'une importante quantité de déchets de matériaux bitumineux nommés RAP. Ces déchets sont souvent déposés dans des décharges et restent pour la plupart du temps inutilisés. Il est essentiel de trouver un moyen de réutiliser les granulats RAP afin de réduire la quantité inutilisés.

Parmi les différentes utilisations des granulats RAP récupérés, figure leur remplacement partiel ou total des granulats naturels dans le béton.

Le recyclage du RAP représente une initiative de développement durable qui valorise les déchets existants et diminue la demande de nouveaux matériaux, contribuant ainsi à la préservation des ressources naturelles en granulats.

Les diverses applications de cette politique à différents endroits dans le monde ont confirmé leur intérêt économique et leur valeur ajoutée technique. Aux États-Unis, la production du bitume est le produit le plus recyclé, toutes catégories de matériaux confondus. Environ 25 % des enrobés à chaud produits contiennent de l'asphalte recyclé. En France, le taux de réutilisation du RAP est de l'ordre de 20 %. En Algérie, les fraisats de bitume sont actuellement considérés comme des déchets sans valeur. Ils sont quelques fois utilisés pour le remblai des accotements ou pour le compactage des routes.

L'utilisation de la technique de fraisage des enrobés bitumineux en vue de leur réutilisation dans les projets routiers peut entraîner une réduction significative du coût total d'un projet. D'un point de vue environnemental, le recyclage des RAP contribue à limiter l'utilisation des ressources naturelles non renouvelables dans la construction des infrastructures, et de réduire la quantité de résidus stockés dans les lieux d'entreposage.

Le recyclage de l'ancien béton bitumineux présente de nombreux avantages sur le plan environnemental, en particulier lorsqu'il est utilisé dans la fabrication du béton. Ces avantages comprennent des économies de granulats naturels, une forte réduction du trafic de poids lourds transportant ces matériaux, ainsi qu'une économie significative d'énergie.

Au cours des dernières années, des chercheurs ont étudié l'utilisation possible des revêtements bitumineux récupérés dans le béton structurel. La plupart des études se sont focalisées sur les propriétés mécaniques des bétons à base de granulats RAP (BRAP), et de nombreuses recherches confirment la même influence des RAP sur la résistance à la compression, la résistance à la flexion, la densité, l'ouvrabilité, et la perméabilité des bétons. Cependant, peu d'études se sont concentrées sur des paramètres qui influencent les performances des BRAP à long-terme, tels que le retrait et le fluage.

Les objectifs de cette recherche sont doubles. Dans un premier temps, nous visons à étudier les principales propriétés physico-mécaniques des granulats RAP utilisés pour la confection des bétons. Deuxièmement, l'influence des granulats RAP sur les propriétés physico-mécaniques et la durabilité du béton à l'état durci, ainsi que leur effet sur le retrait sous différentes températures de cure et sur le fluage.

Les travaux ont été réalisés au niveau du laboratoire des sciences des matériaux et environnement (LSME) de l'Université Hassiba Benbouali de Chlef.

La thèse est composée de deux parties distinctes, une synthèse bibliographique et un travail expérimental.

La première partie est une synthèse bibliographique composée d'un seul chapitre. Elle est consacrée à une revue sur la valorisation des RAP à travers les pays du monde, ainsi que l'étude des caractéristiques des granulats RAP et leur effet sur les propriétés des bétons de ciment.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons les matériaux utilisés dans notre étude pour confectionner des bétons à base de granulats RAP. Une étude complète des caractéristiques des granulats RAP est exposée. L'étude expérimentale comprend la formulation des différents types de mélanges des bétons à base des granulats recyclés obtenus par le fraisage des chaussées souples, ainsi que leurs caractéristiques mécaniques et leurs comportements rhéologiques. Les déformations différées (retrait et fluage) des bétons formulés seront également examinées.

Le troisième chapitre est dédié à l'interprétation et la discussion des résultats expérimentaux, à savoir l'influence des RAP sur les propriétés physico-mécaniques et sur la durabilité des bétons. On s'intéresse à l'étude de la compression, la traction par flexion, le module d'élasticité, le retrait, l'absorption, la pénétration des ions chlore, le retrait et le fluage.

Le quatrième chapitre est consacré à une étude numérique du retrait des bétons testés, réalisée par la méthode des éléments finis à l'aide du logiciel ANSYS. Une comparaison des résultats obtenus avec ceux issus des expérimentations sera également présentée.

Nous terminerons la thèse par les principales conclusions des résultats obtenus et des perspectives aux travaux futurs.

---

# **Chapitre 1 :**

# **Revue bibliographique**

---

## **Chapitre 1 : Revue bibliographique**

### **1.1. Introduction**

Au cours des dernières décennies, l'utilisation excessive de granulats naturels pour diverses activités de construction a entraîné une pénurie de l'offre. En conséquence, les autorités gouvernementales ont imposé une interdiction des activités d'extraction afin de préserver les granulats naturels.

L'utilisation de revêtements d'asphalte récupérés (Reclaimed Asphalt Pavement - RAP) en remplacement des granulats naturels a considérablement augmenté au cours des dernières décennies. Le RAP est le matériau obtenu après le fraisage ou l'enlèvement de la chaussée en asphalte existante pour l'entretien et la réhabilitation des routes.

La génération de tels déchets en quantités énormes a sans doute un impact sur les décharges et augmente les stocks de RAP. Ces déchets, s'ils ne sont pas correctement gérés et réutilisés, conduiraient à une augmentation de la production de déchets à un niveau sans précédent, causant plusieurs préoccupations liées à l'environnement.

Bien que le RAP soit recyclé dans les chaussées en bitume, l'excès de RAP reste souvent inexploité. Par conséquent, son utilisation dans le béton a considérablement augmenté au cours des dernières années.

La majorité des pays ont axé leurs efforts sur l'utilisation du RAP dans le béton, alors qu'en Algérie peu de travaux ont été entrepris pour son incorporation dans le béton. De plus, l'entretien et la réhabilitation des routes prennent de l'ampleur en Algérie, ce qui entraîne l'accumulation d'une quantité considérable de déchets RAP. Ainsi, la réutilisation et le recyclage des revêtements d'asphalte récupérés en Algérie constituent un domaine émergent, mais leur utilisation demeure faible par comparaison avec les États-Unis, l'Europe et le Japon.

L'objectif de ce chapitre est de présenter une synthèse des études de littérature et de fournir des informations sur l'utilisation du RAP dans le béton. Cela contribuera éventuellement à créer un système équilibré visant à résoudre la rareté environnementale et matérielle, à promouvoir les avantages économiques, et par conséquent, à transformer l'industrie de la construction vers la durabilité et l'éco-conivialité.

## 1.2. Dégradations de la chaussée

Avec l'augmentation de la population, la demande pour le réseau routier a considérablement augmenté. La chaussée, au cours de sa durée de vie, est soumise à diverses sollicitations telles que le trafic lourd qu'elle supporte, ainsi que des contraintes environnementales et les conditions climatiques liées à la nature et à l'épaisseur des matériaux utilisés, ainsi qu'à leurs conditions de fabrication et de mise en œuvre. Cela engendre des déformations qui génèrent des dégradations structurelles et/ou surfaciques de la chaussée (voir Figure 1.1). Ces dégradations rendent nécessaire un entretien ou une réhabilitation afin d'améliorer, renforcer ou réparer les chaussées défectueuses existantes, permettant ainsi de maintenir leur utilité grâce à un entretien régulier.



Figure 1. 1. Dégradation des chaussées souples.

L'entretien et la réhabilitation des routes conduisent à l'accumulation d'une importante quantité de déchet nommée fraisât d'enrobés RAP (Figures 1.2 et 1.3). Le RAP désigne les matériaux concassés, broyés et enlevés de la chaussée. Il existe plusieurs méthodes pour la production du RAP en fonction des conditions du site et des applications [1, 2]. A l'échelle internationale, une quantité relativement importante de RAP n'est pas recyclée et est donc stockée dans la nature [3].

La qualité et les propriétés du RAP varient d'une chaussée à l'autre et dépendent de plusieurs facteurs, notamment [3] :

- La nature des matériaux et du liant d'asphalte.
- Le nombre de fois que la chaussée est réparée.
- La source de l'asphalte.
- Le taux des vides.



Figure 1. 2. Entretien des routes (fraisage).



Figure 1. 3. Stockage des déchets de RAP.

### 1.3. Chiffres mondiaux

Chaque année, le secteur de l'industrie aux USA produit plus de 100 millions de tonnes de RAP dans le cadre de la réhabilitation des routes. La majeure partie du RAP est réutilisée dans l'industrie du revêtement d'asphalte (chaussée souple), tandis que le reste est directement envoyé à la décharge publique ou utilisé dans d'autres secteurs. Seulement 5 % de ces déchets sont employés dans des applications de génie civil [4, 5].

En 2020, la quantité totale d'asphalte récupéré RAP disponibles dans les pays de l'Union européenne était de 46.4 millions de tonnes. Les principaux pays sont l'Allemagne (11.6 Mt, soit 25 % du total), l'Italie (9.5 Mt, soit 20 %), la France (6.0 Mt, soit 13 %) et la Grande-Bretagne (5.0 Mt, soit 11%). Les autres pays ne représentaient ensemble que 31 % du total (Figure 1.4) [6, 7].

Dans le monde entier, une quantité relativement importante de RAP n'est pas recyclée et est donc stockée. En 2017, en Europe, 68 % de l'asphalte récupéré est réutilisé dans les enrobés, 19 % sont utilisés comme matériaux granulaires dans des couches non liées, 2 % est utilisé dans d'autres projets de génie civil et 11 % finissent dans des décharges publiques (Figure 1.5) [7].

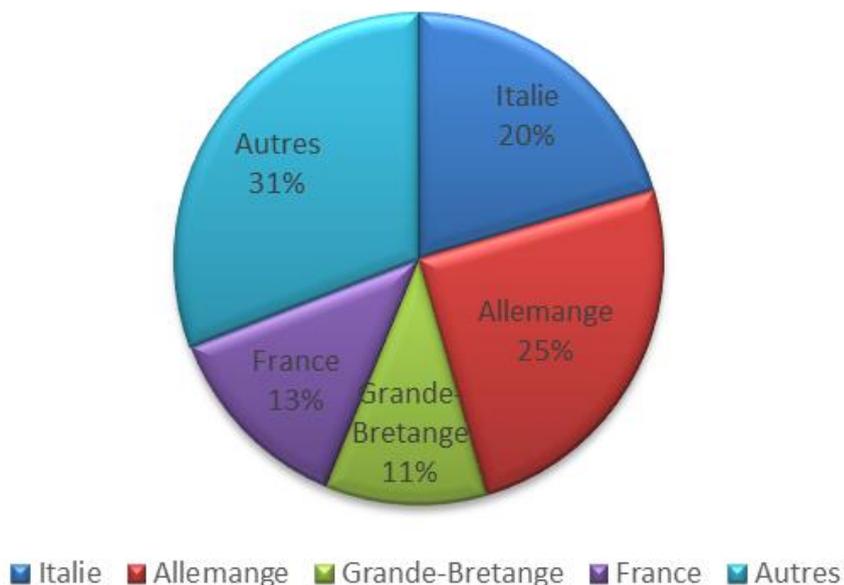


Figure 1. 4. Quantité de RAP dans les pays européens [7].

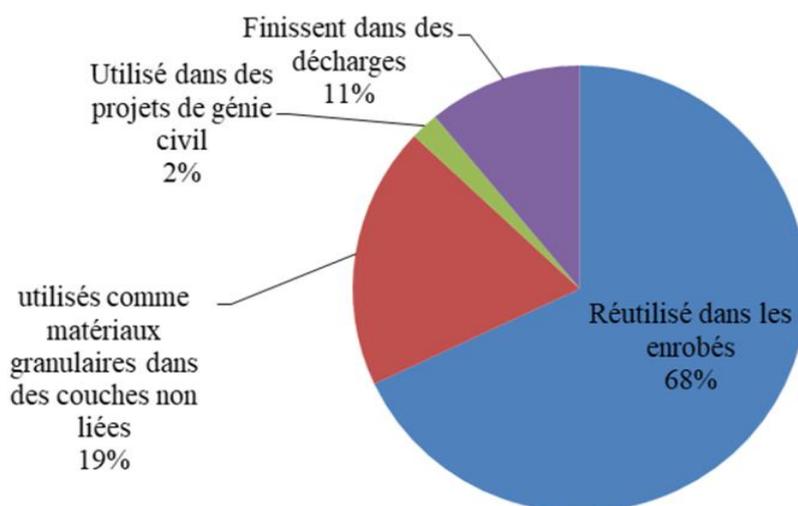


Figure 1. 5. Utilisation du RAP dans les pays européens [7].

## 1.4. Utilisation du RAP

L'histoire des applications du RAP remonte à l'année 1915. A la fin des années 1970, la popularité du recyclage du RAP a considérablement augmenté, principalement en raison de la hausse des prix de l'asphalte [8]. A l'époque, le recyclage des anciennes chaussées était plus coûteux que la mise en place d'un nouvel enrobé à chaud [9]. L'invention des fraiseuses a amélioré la rentabilité du recyclage de l'asphalte par rapport aux nouvelles constructions [10].

Le recyclage du RAP est aujourd'hui une pratique courante. Bien que le RAP soit réutilisé dans les chaussées souples en bitume ou les chaussées rigides en béton, il ne peut pas être recyclé en totalité. En 2015, environ 88 % (près de 85.1 millions de tonnes) d'excédents de RAP ont été signalés aux USA [11].

Par conséquent, une bonne gestion des déchets et/ou une utilisation efficace des RAP dans les chaussées en béton sont souvent recommandés. Singh et al. [12] ont observé que le RAP pouvait être utilisé pour les deux types de chaussée (souple et rigide). Cependant, la proportion optimale doit être étudiée en fonction du comportement à l'état frais et à l'état durci du mélange cible.

### 1.4.1. Utilisation du RAP dans les chaussées souples

D'après la littérature, la plupart des chercheurs ont utilisé les frisâtes des bétons bitumineux dans les couches des chaussées souples, notamment la couche de roulement et la couche de base. Ils sont généralement utilisés en remplacement d'une partie des granulats naturels.

Le RAP a été largement utilisé dans les chaussées souples depuis les années 1970 aux États-Unis. Les anciennes chaussées en bitume peuvent être réutilisées et recyclées dans les usines, notamment le recyclage à froid et à chaud (Figure 1.6), ainsi que le recyclage à froid et à chaud sur place [3].

L'enquête de la Federal Highway Administration (USA) a révélé qu'en 2009, la plupart des agences de transport utilisaient un taux de RAP de 10 à 20 %, et environ 50 % du RAP étaient employés dans les couches de surface des chaussées souples. Cependant, en 2018, plus de 21 % étaient utilisés [13].

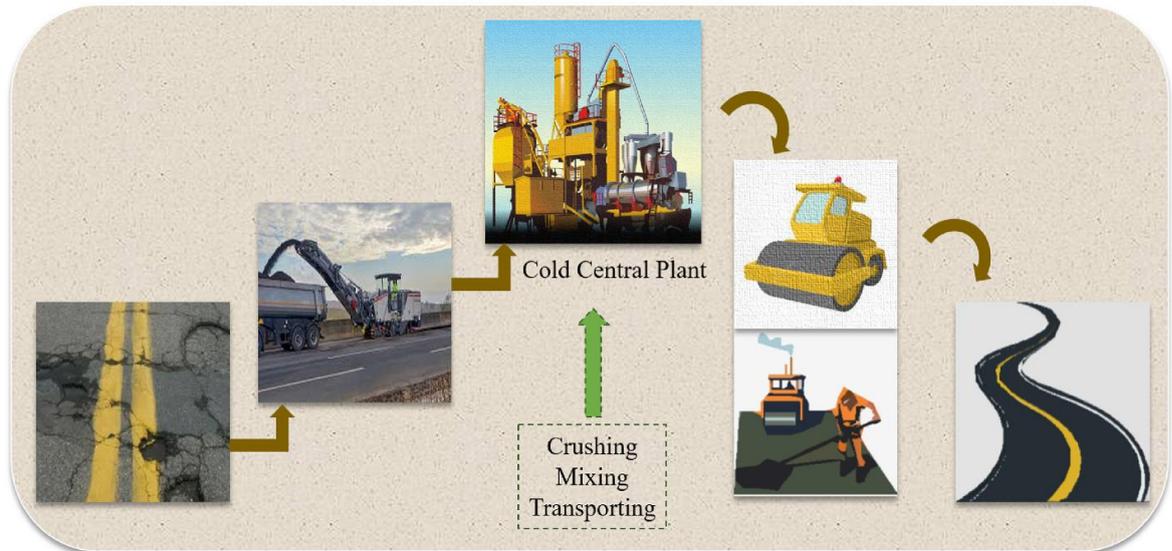


Figure 1. 6. Recyclage du RAP à froid à l'usine [3].

L'Europe est connue pour ses pratiques de recyclage des déchets, et le taux de recyclage de bitume varie de 10 à 90 % [14]. Certains pays, tels que la Belgique et la Finlande, adoptent une technologie de recyclage à chaud sur place, permettant une teneur en RAP jusqu'à 90 % dans les couches de surface. Olard et al. [15] ont observé une augmentation de l'utilisation du RAP en France, passant d'une teneur de 12.7 % en 2003 à 61.9 % en 2012.

Certains chercheurs autorisent une teneur en RAP inférieure à 15 %, tandis que d'autres permettent une teneur supérieure à 15 %, nécessitant des modifications dans la conception du mélange et la sélection du liant [16]. Cependant des pratiques de recyclage à une teneur d'environ 20 à 50 % [17] et même plus de 50 % de RAP peuvent également être observées [16]. Une étude portant sur une teneur en RAP de 0 à 40 % a conclu que jusqu'à 20 % présentaient de meilleurs résultats en termes de résistance à la traction, impliquant ainsi une meilleure performance de résistance à la rupture [18].

Mcdaniel et Kowalski [19] ont étudié l'utilisation du RAP dans la couche de roulement et ont conclu que le mélange d'asphalte contenant du RAP devrait être utilisé en petite proportion dans les mélanges de surface, et la teneur en RAP ne devrait pas dépasser 30 %. De même, Olard et al. [15] ont trouvé que 20 % de RAP n'influe pas la mesure du frottement. Selon la norme routière italienne, une teneur en RAP de 20 % est autorisée avec une épaisseur moyenne de 60 mm [20].

Babu et al. [21] ont étudié des mélanges recyclés avec des teneurs en RAP variant de 35 % à 50 %. Les résultats ont montré que les teneurs de 40 % de RAP se sont révélés être optimaux pour le mélange de bitume et ont donné des résultats satisfaisants par rapport au

mélange témoin. D'autre part, Mcgarrah [22] a utilisé le RAP dans la couche de base et a constaté que le CBR (Indice de portance Californien) a diminué de manière significative lorsque la proportion de RAP dépasse 20 %.

#### **1.4.2. Utilisation du RAP dans la chaussée rigide**

Le béton est l'un des principaux matériaux de construction. Pour un béton fraîchement préparé, la maniabilité doit être suffisamment bonne avec une faible perte d'homogénéité, car elle régit la résistance aux chocs globale, la qualité, l'apparence et même le coût de la main-d'œuvre, pour les opérations de mise en place et de finition. Ainsi, un béton avec une bonne maniabilité réunit de nombreuses dimensions en équilibre qui se traduisent par une longue durée de vie.

En raison des meilleures performances et de la durabilité des chaussées rigides par rapport aux chaussées souples, bien que le coût initial soit énorme, les chercheurs ont préféré les chaussées en béton comme mode de chaussée de premier choix et l'utilisation du RAP dans les chaussées rigides semble être la meilleure alternative pour une chaussée durable.

Malgré les réductions de résistances mécaniques, l'utilisation de RAP dans le béton présente plusieurs avantages, tels que l'amélioration de la ductilité et de la résistance à la fissuration par rapport au béton conventionnel [23-25].

Des milliards de tonnes de déchets de construction et de démolition sont générés chaque année dans le monde, et finalement, ceux-ci sont mis en décharge. Ainsi, un nouveau concept émergent l'incorporation du RAP dans le mélange de béton vise à réduire la dépendance des granulats naturels. Cependant, la principale préoccupation réside dans la présence de liants vieillissants, ce qui peut considérablement réduire la résistance et la performance du béton [26].

D'après la littérature, la plupart des chercheurs recommandent que le RAP puisse être utilisé dans tous les types de béton, y compris le béton armé, le béton précontraint et le béton autoplaçant. Généralement, le RAP est utilisé en remplacement d'une partie des granulats naturels.

L'utilisation de RAP a été préférée à celle de gravier naturel (GN) en termes de rentabilité et de préservation de l'environnement [25]. Le RAP a été utilisé sous différentes formes fractionnées telles que les fractions grossières (RAP-G), les fractions fines (RAP-F) et les fractions combinées (RAP-C) pour la production de mélanges de béton [27]. Les différentes fractions de RAP peuvent être utilisées dans les chaussées en béton compacté au

rouleau (BCR), les chaussées en béton de ciment portland, les chaussées en béton drainant, les pavés préfabriqués en béton et le béton autoplaçant [28, 29].

De nombreuses études sont disponibles dans la littérature portant sur l'utilisation du matériau RAP dans divers mélanges de pavage tels que les mélanges de béton de ciment [25, 26, 30-33], les mélanges de béton compacté au rouleau [34-37] et le béton sec maigre [26, 30, 31, 33]. Toutes ces études ont rapporté une réduction des résistances mécaniques avec des proportions variables de RAP. La réduction des propriétés mécaniques a été attribuée à la présence d'une pellicule d'asphalte entourant les granulats RAP, interférant avec l'adhérence à l'interface de la matrice du mortier de ciment et des granulats RAP [26, 35, 36, 38].

De plus, la présence de particules agglomérées (fines grappes de RAP) a également été signalée comme un autre contaminant en dehors du film d'asphalte, responsable d'une réduction de plus de 70 % de la résistance à la compression du béton [39]. Par ailleurs, une réduction de plus de 50 % de la résistance mécanique du béton a été observée lorsque des fractions fines de RAP étaient incorporées en remplacement des granulats fins naturels [40]. Par conséquent, la plupart des chercheurs ont préféré l'utilisation de la fraction grossière de RAP avec une limite de 50 % pour différents mélanges de pavage [26, 36, 41].

Hossiney et al. [42] ont proposé une nouvelle méthode d'utilisation du RAP grossier et fin pour préparer un bloc de pavé en béton activé par un alcali. La résistance à la compression a diminué et la perte de masse a augmenté avec l'augmentation de la teneur en RAP du mélange. Hassan et al. [43] ont constaté que jusqu'à 50 % de RAP peut être adopté dans les espaces publics à faible trafic, en raison de sa faible résistance à l'abrasion. Ainsi, cela a le potentiel d'être utilisé pour les piétons et les véhicules non motorisés.

Ibrahim et al. [44] ont étudié l'effet des granulats RAP sur le béton autoplaçant contenant des ajouts minéraux (cendres volantes et laitier). Dans cette étude les granulats naturels ont été remplacés par le RAP avec des taux de 0, 25 et 50 %. Les résultats trouvés ont montré que l'inclusion de RAP diminue les résistances à la compression et à la traction du BAP pour les mélanges contenant 50 % de RAP. Cependant, les résultats des propriétés du béton frais répondaient aux exigences des BAP.

Pour garantir de bonnes performances mécaniques des BRAP, Debbarma et al. [27] ont recommandé d'utiliser : (1) un RAP présentant un faible taux d'asphalte et de particules agglomérées, (2) un RAP correctement classé, (3) un RAP très ancien, (4) ne pas dépasser un remplacement maximal de 50% de RAP.

D'après la littérature, la plupart des chercheurs recommandent que la formulation du BRAP soit similaire à celle du béton conventionnel. La conception du béton RAP nécessite les données de dosage du mélange telles que la qualité du béton, la taille nominale des granulats, les types de granulats (grossiers/fin), le dosage en ciment, la quantité d'eau, l'ouvrabilité et l'ajout chimique [45]. Les proportions de mélange adoptées par différents chercheurs sont résumées dans le tableau 1.1.

Tableau 1. 1. Proportions du mélange dans le RAP inclus dans le mélange de béton ( $\text{kg/m}^3$ ).

<b>Auteurs</b>	<b>Année</b>	<b>Granulats naturels</b>	<b>Granulats RAP</b>	<b>Ciment</b>	<b>Eau</b>	<b>E/C</b>
Nandi et al. [54]	2023	1026	556	380	212	0.56
Abraham et al. [46]	2022	735	683	425	187	0.44
Andrew et al. [47]	2022	1310	982	350	210	0.60
Liu et al. [53]	2022	1645	810	447	166	0.37
Paluri et al. [55]	2021	1078	850	430	155	0.36
Sahdeo et al.[56]	2021	1020	775	362	127	0.35
Tantri et al. [59]	2021	191	569	450	150	0.33
Debbrama et al. [49]	2020	962	437	350	185	0.53
Dubey et al. [50]	2020	643	1737	270	135	0.50
Saboo et al.[50]	2020	1568	784	314	110	0.35
Singh et al. [58]	2020	774	774	322	165	0.51
Hossiney et al. [52]	2019	1201	901	286	160	0.56
Singh et al. [57]	2019	1120	1120	425	161	0.38
Shi et al. [26]	2017	1058	768	247	123	0.50
Brand et al. [48]	2016	944	944	243	137	0.56
Erdam et al. [51]	2015	980	900	275	200	0.73
Ibrahim et al. [44]	2014	1354	411	375	139	0.37
Mahmoud et al. [29]	2012	1327	437	375	139	0.37
Hossiney et al. [42]	2010	1057	640	301	160	0.53

### **1.4.3. Utilisation du RAP en Algérie**

En Algérie, le patrimoine routier se compose actuellement (2023) de plus de 141 000 km de routes dont plus de 117 000 km revêtues, 1216 km autoroute Est-Ouest (source : ministère des travaux publics). Le ministre des travaux publics indiquera avoir donné la priorité, au cours des prochaines années, aux opérations d'entretien du réseau routier afin de le préserver, soulignant que ce volet a bénéficié d'une enveloppe de 60 milliards de dinars.

Au cours des cinq dernières années (2019-2023), dans les wilayas de Chlef, Oran, Tlemcen et Mascara, l'entretien des routes nationales a entraîné la production de plus de 350 000 tonnes de fraisats de RAP. La plupart de ces fraisats sont utilisés pour le revêtement des pistes, des accotements de routes ou sont mis à la décharge publique.

L'utilisation judicieuse des RAP dans la fabrication du béton en Algérie peut apporter des avantages économiques et environnementaux tout en répondant aux besoins croissants en infrastructure.

## **1.5. Avantages du recyclage des granulats RAP**

L'utilisation de granulats recyclés pour le béton peut contribuer à minimiser l'impact économique et environnemental du matériau de construction le plus populaire et le plus utilisé, les principaux avantages sont les suivants :

### **1.5.1. Préservation des ressources naturelles**

La chaussée est constituée de granulats, de liant bitumineux et de quelques adjuvants. L'utilisation du RAP à la place des granulats naturels permet de préserver les granulats pour les demandes futures.

L'utilisation du RAP pour la production de béton conduit à l'exploitation limitée des ressources naturelles en réduisant l'extraction et le pourcentage de la demande en granulats naturels [11, 13, 25, 58, 60]. Le RAP peut être utilisé pour remplacer partiellement les deux fractions de granulats naturels (grossiers et fins). Les études montrent que jusqu'à 50 % des granulats naturels peuvent être remplacés par du matériau RAP sans trop affecter significativement les propriétés des bétons.

De plus, l'utilisation du RAP présente des avantages en ce qui concerne la préservation de terres précieuses [11, 21, 25, 60, 61], tel que la réduction des décharges de RAP, en

particulier dans les pays surpeuplés. Il a été observé que le stockage du RAP détruisait la capacité organique des exploitations agricoles en raison de l'absence d'un système de gestion des déchets. L'utilisation du RAP contribuerait donc à préserver la capacité organique du sol pour l'agriculture en évitant la lixiviation de minéraux nocifs.

### **1.5.2. Economie d'énergie**

La consommation d'énergie dans la construction des chaussées concerne la production, le transport, le traitement, le chauffage, le mélange, la mise en place et le compactage des granulats et de l'asphalte. Moins de nouveaux matériaux signifient moins de consommation d'énergie.

L'utilisation de RAP sur place réduirait totalement les coûts de transport de déchet RAP depuis le site jusqu'au lieu d'enfouissement [28, 32, 57].

Des chercheurs [11, 25, 28, 32] ont montré que l'utilisation du RAP réduit la demande de granulats naturels, entraînant ainsi une réduction significative des coûts de transport. Le coût total du projet de production de 1 m<sup>3</sup> pourrait être réduit d'environ 45 %.

Aurangzeb et al. [62] ont révélé que l'énergie consommée pour préparer des mélanges d'enrobés bitumineux contenant 30 %, 40 % et 50 % de RAP diminue respectivement de 26 %, 33 % et 40 %. Visintine et al. [63] ont indiqué que l'ajout de 30 % et 40 % de RAP aux mélange bitumineux chaud permet de réaliser des économies de 19 % et 40 %, respectivement, en tenant compte des valeurs de construction, d'entretien, de réhabilitation et de récupération.

En outre, une étude similaire a indiqué que l'incorporation d'une teneur en RAP de 25 % dans les mélanges d'asphalte entraîne une réduction de 33 %, 35 % et 8.5 % de la consommation d'énergie, de l'émission équivalente de CO<sub>2</sub> et du coût, respectivement [64].

### **1.5.3. Préservation de l'environnement**

L'environnement a été exploité de multiples façons en raison de plusieurs facteurs, notamment le développement industriel, les transports, l'urbanisation et la construction d'infrastructures, ce qui a entraîné une augmentation de la pollution atmosphérique et des gaz à effet de serre à l'échelle mondiale.

La production d'une tonne de granulat naturel conduit à l'émission d'environ 1 % du total des gaz à effet de serre [57, 65]. Des chercheurs [36, 57, 62, 66] ont étudié la

consommation d'énergie et les émissions de gaz à effet de serre pour le RAP ainsi que l'impact du RAP sur les émissions de CO<sub>2</sub>. L'étude a montré que l'utilisation des RAP diminuait les émissions de CO<sub>2</sub>. Cette réduction est attribuée à la distance de transport plus courte lorsque le recyclage du RAP est en place.

Hossiney et al. [52] ont constaté que l'utilisation de RAP pour la production de blocs de béton a conduit à une réduction globale de 12 % des émissions de CO<sub>2</sub> et de 15 % de la consommation d'énergie. La production de blocs de béton permettait de réduire les zones de décharge et à l'excès de déchets et résoudre les complications liées aux déchets.

Lee et al. [67] ont étudié les avantages de l'utilisation du matériau RAP en termes d'économie d'énergie et de réduction des émissions de CO<sub>2</sub>. Le rapport a conclu que la consommation d'énergie n'était que de 84 % pour une production de 30 % du matériau RAP.

## **1.6. Classification et processus de fabrication du RAP**

Le RAP est un matériau obtenu lors de l'enlèvement d'une section de chaussée souple endommagée en cours de réhabilitation. La norme européenne NF EN 13108-8 [68] définit le béton bitumineux récupéré comme "le bitume de chantier transformé, apte et prêt à être utilisé à nouveau, après avoir été testé, évalué et classé conformément à la présente norme".

L'évaluation porte sur la distribution de la taille des particules, le type de liant et sa teneur, la présence de matières étrangères (ciment, béton, briques, matériaux synthétiques, métal, bois ou plastique), ainsi que l'homogénéité et la fréquence des essais de la matière première.

L'extraction peut être effectuée par fraisage contrôlé, c'est-à-dire par enlèvement des couches bitumineuses uniquement (Figure 1.7). Mais les fraiseuses peuvent être coûteuses, pour cela certains pays en voie de développement utilisent les pelleteuses et les bulldozers pour déchirer et briser la chaussée dans le cadre d'une procédure de fraisage incontrôlée ou scarification (Figure 1.8). Le fait de déchirer la chaussée entraîne des variations dans les caractéristiques et la qualité des granulats RAP [21].



Figure 1. 7. Fraisage contrôlé par fraiseuse.



Figure 1. 8. Fraisage incontrôlé (scarification) par bulldozer.

Dans les deux techniques, le traitement initial est généralement effectué pour séparer les gros morceaux de RAP, suivi d'un fractionnement des particules grossières et plus fines du matériau RAP [69]. La figure 1.9 montre quelque type de RAP illustré par Debbarma [69].

Le RAP illustre les matériaux concassés, broyés et enlevés de la chaussée pour la reconstruction et l'excavation. Il est important de reconnaître que le classement du matériau RAP fraisé sera toujours influencé par le but de l'opération de broyage. Lorsqu'un entrepreneur fraise dans le seul but de d'enlever le bitume de la route, plusieurs méthodes sont disponibles pour la production de RAP en fonction des conditions du site et des applications

[2, 70]. Dans ce contexte, l'accent est généralement mis sur la production à moindre coût, sans nécessairement se focaliser sur la granulométrie du matériau RAP.



Figure 1. 9. Type de RAP [69].

### 1.7. Propriétés physico-mécaniques des granulats RAP

La caractérisation physique des granulats RAP est l'un des facteurs les plus importants pour le développement de la conception des BRAP [3, 25]. Ils sont généralement de qualité légèrement inférieure par rapport aux granulats naturels, avec un faible module élastique et une surface hydrophobe par rapport aux granulats naturels [71].

Singh et al. [60] ont constaté que la plupart des propriétés physiques du RAP sont inférieures à celles des granulats naturels, en raison de la présence d'une couche d'asphalte les entourant. Certaines études ont indiqué que la présence de la couche d'asphalte dans les granulats RAP pourrait apporter plusieurs avantages tels qu'une valeur d'impact plus faible et une valeur d'abrasion également réduite [28, 60].

Les propriétés du RAP varient d'une chaussée à l'autre et dépendent des facteurs suivants [13, 72] :

- Méthode d'enlèvement et de la durée d'exposition de la zone d'entreposage.
- Composition et uniformité du matériau bitumineux existant.
- Etat du matériau bitumineux existant et la température de l'asphalte dans l'horizon fraisé.
- Profondeur de fraisage.
- Vitesse d'avancement de la fraiseuse et la vitesse de rotation du tambour de fraisage.
- Type de tambour de fraisage et l'état des outils de fraisage.
- Sens de la coupe (vers le haut ou vers le bas).

### 1.7.1. Densité

D'après la littérature, la densité spécifique des granulats grossiers RAP est légèrement inférieure à celle des granulats grossiers naturels. Cette différence est attribué à la présence de la couche d'asphalte souple à faible densité [12].

La densité spécifique du RAP varie généralement entre 2.00 et 2.65 [28, 35, 37, 73], tandis que celle des granulats naturels varie entre 2.51 à 2.88 [13, 26, 40, 60].

Les résultats des valeurs de la densité des granulats grossiers naturels et RAP-G rapportés par plusieurs chercheurs sont présentés dans le tableau 1.2.

Tableau 1. 2. Résumé des valeurs de la densité des granulats grossiers naturels et RAP.

<b>Auteurs</b>	<b>Naturel</b>	<b>RAP</b>
Abedalqader et al. [74]	2.61	2.35
Ashteyat et al. [75]	2.72	2.41
Debbarma et al. [36]	2.59	2.41
Ghazy et al. [76]	2.50	2.00
Hossiney et al. [52]	2.52	2.45
Khodair et Raza [77]	2.68	2.62
Kumari et al. [78]	2.64	2.59
Settari et al. [34]	2.67	2.30
Singh et al. [60]	2.64	2.49
Soltanabadi et Behfarnia [79]	2.88	2.38
Yao et al. [80]	2.65	2.27
Nimri et al. [81]	2.66	2.25
Shadmani et al. [82]	2.71	2.65
Paluri et al. [83]	2.78	2.60
Wongkvanklom et al. [84]	2.70	2.39
Shi et al. [26]	2.51	2.41
Shatarat et al. [85]	2.68	2.40

### 1.7.2. Granulométrie

La granulométrie des granulats RAP est identifiée par l'utilisation de la procédure usuelle d'analyse granulométrique.

D'après plusieurs études [30, 36, 42, 60, 86], le RAP grossier (RAP-G) est généralement plus fin que les graviers naturels, tandis que le RAP fin (RAP-F) est, au contraire, plus grossier que les sables naturels [12, 36]. Le module de finesse du RAP-F est généralement supérieur à 3 [42], et dans certains cas, il pourrait dépasser 4.4 [12]. Cela est dû à l'effet d'agglomération, où la partie la plus fine du RAP-F adhère à la périphérie du RAP-G, ce qui rend le RAP-F plus grossier et relativement granuleux que le sable naturel [75].

Courard et al. [37] ont conclu la similarité des granulats RAP par rapport aux granulats naturels. Les granulats grossiers (RAP-G) et fins (RAP-F) ont été caractérisés par une taille comprise entre 12.5 mm et 16 mm et 0.075 mm et 4.75 mm, respectivement [21, 37, 50].

Masi et al. [6] ont caractérisé différents granulats RAP de taille supérieure à 4 mm comme fraction grossière et inférieure à 4 mm comme fraction fine sur la base de la distribution de la taille des particules. Par ailleurs, Brand et al. [48] ont fractionné les granulats RAP sur un tamis de 4.75 mm pour séparer les fractions grossières des fractions plus fines, tandis que Zhu et al. [87] ont considéré le passage au tamis de 2.36 mm comme un granulats fin.

Des courbes granulométriques des granulats RAP étudiés par plusieurs auteurs sont présentées dans la figure 1.10. La figure montre que la granulométrie des RAP-G est relativement similaire à celle des granulats naturels grossiers.

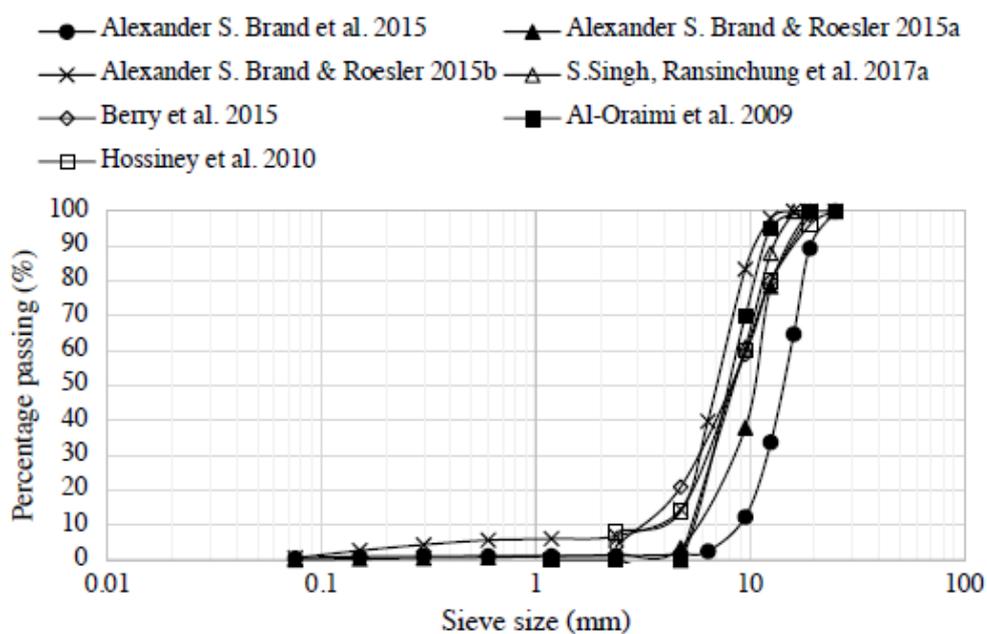


Figure 1. 10. Distribution granulométrique des granulats RAP-G [69].

### **1.7.3. Absorption d'eau**

L'absorption d'eau est un important paramètre pour les granulats recyclés. Généralement, l'absorption d'eau des RAP est inférieure à celle des granulats naturels à cause de la présence d'un film d'asphalte hydrophobe autour des granulats [28, 35-37, 42, 60, 73, 79, 88]. Dans tous les cas, l'absorption d'eau des RAP grossiers est dans la même gamme que celle des granulats naturels.

Cependant, certains chercheurs ont trouvé une absorption supérieure du RAP par rapport aux granulats naturels [12, 34, 86, 89, 90]. Ce comportement est principalement attribué à la présence de contaminants de poussière absorbant l'eau [28, 91]. Ces contaminants de poussière résultent de la technique de récupération du RAP et de la durée de stockage pendant laquelle ils ont été exposés à toutes les saisons. L'épaisseur de cette couche de poussière dépend principalement de la couche de chaussée à enlever, de la méthode d'enlèvement et de la durée de d'exposition de la zone d'entreposage.

Le matériau RAP provenant de la couche de base peut contenir une grande quantité de poussière par rapport au matériau RAP retiré de la couche de roulement. L'enlèvement du matériau RAP par fraisage crée très peu d'impuretés de poussière dans le matériau RAP par rapport à l'enlèvement par déchiquetage et concassage [88]. Si le matériau RAP est stocké de manière fermée, il protégera le matériau contre toute contamination par la poussière et l'humidité, bien que cela soit rare en raison de la grande quantité de matériau RAP. En revanche, si le matériau RAP est stocké de manière ouverte, il sera vulnérable à l'infiltration de corps étrangers.

Dans les pays en voie de développement, le RAP est généralement enlevé en vrac en arrachant la totalité de la chaussée, puis il est concassé et stocké à l'air libre pendant une longue période. Cela conduit à la formation d'un film de poussière épais autour des granulats RAP, au sein duquel la couche de poussière entoure de l'enrobé bitumineux. De plus, une quantité de particules d'agglomération peut être présente à la surface des granulats RAP en fonction de la taille et du type de granulats.

Les résultats des tests d'absorption des granulats grossiers naturels et RAP rapportés par différents chercheurs sont présentés dans le tableau 1.3. Plusieurs chercheurs [34, 52, 60, 74, 75, 78, 80, 81, 85, 92] ont trouvé que le coefficient d'absorption des RAP est supérieur à celui des granulats naturels, tandis que d'autres [26, 36, 76, 77, 79, 82-84] ont observé le contraire.

Tableau 1. 3. Résumé des valeurs de l'absorption d'eau des graviers naturels et RAP (%).

Auteurs	Naturel	RAP	Tendance
Abedalqader et al. [74]	1.48	1.90	Augmentation
Arabiyat et al. [92]	1.50	2.10	
Ashteyat et al. [75]	1.27	2.10	
Hossiney et al. [52]	1.52	2.50	
Kumari et al. [78]	0.60	0.64	
Settari et al. [34]	0.52	0.74	
Shatarat et al. [85]	1.10	2.10	
Singh et al. [60]	0.91	1.83	
Nimri et al.[81]	1.23	2.42	
Yao et al. [80]	0.30	2.30	
Debbarma et al. [36]	0.65	0.40	Diminution
Ghazy et al. [76]	1.50	1.00	
Khodair et Raza [77]	1.20	1.00	
Paluri et al. [83]	1.20	1.04	
Shadmani et al [82]	0.80	0.21	
Soltanabadi et Behfarnia [79]	1.95	1.35	
Shi et al. [26]	2.79	2.61	
Wongkvanklom et al. [84]	0.50	0.36	

#### 1.7.4. Résistance à l'abrasion

La résistance à l'abrasion des granulats RAP est une caractéristique importante qui mesure la capacité des granulats à résister à l'usure. Différentes méthodes peuvent être utilisées pour évaluer la résistance à l'abrasion des granulats d'asphalte. L'une des méthodes couramment utilisée est le test de Los Angeles, qui simule les conditions d'abrasion auxquelles les granulats peuvent être exposés sur le terrain. Le test d'abrasion de Los Angeles (LA) résulte en un pourcentage de perte de masse par les granulats qui se produit lors de l'essai d'impact de billes d'acier et les granulats.

Le tableau 1.4 présente les résultats de l'essai d'abrasion des GN et RAP obtenus par différents chercheurs. Plusieurs chercheurs [26, 34, 52, 74, 75, 83] ont trouvé que le coefficient de Los Angeles des RAP est supérieur à celui des granulats naturels, tandis que d'autres [60, 78, 85] ont observé le contraire.

Tableau 1. 4. Résultats de l'essai d'abrasion des GN et RAP obtenus par différents chercheurs.

Auteur	GN	RAP	Tendance
Abedalqader et al. [74]	26.4	29.6	Augmentation
Ashteyat et al. [75]	50	69	
Hossiney et al. [52]	25	33	
Settari et al. [34]	24.6	27.6	
Paluri et al. [83]	24.1	38.2	
Shi et al. [26]	22.8	26.5	
Kumari et al. [78]	23	21	Diminution
Shatarat et al. [85]	39.0	28.1	
Singh et al. [60]	23	19.3	

### 1.7.5. Epaisseur du film d'asphalte

Le matériau RAP est composé d'un granulat, d'une pellicule d'asphalte, d'une pellicule de poussière rigide et d'une pellicule de poussière lâche [60]. Cela engendre deux zones de transition : l'une entre les granulats et la couche d'asphalte et la seconde entre le film d'asphalte et la couche de poussière (figure 1.11(a)). L'épaisseur de la couche d'asphalte est comprise entre 6 et 10  $\mu\text{m}$  (figure 1.11(b)) [24].

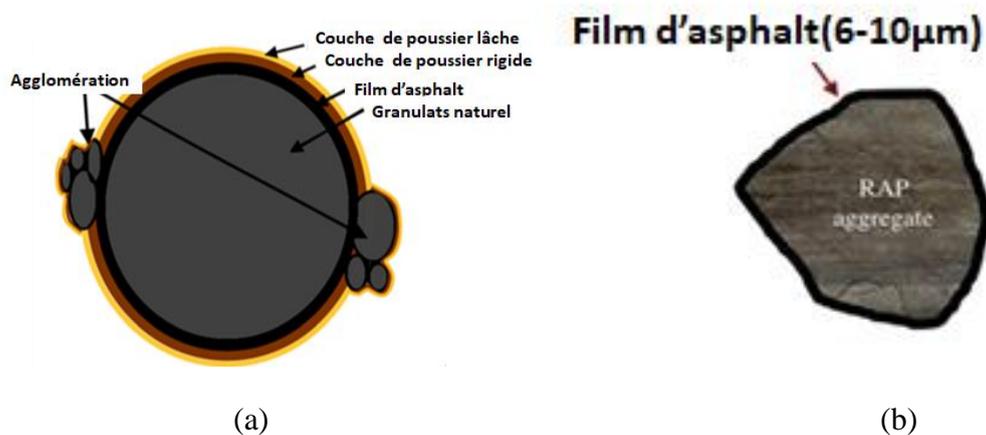


Figure 1. 11. Composition du RAP.

### 1.7.6. Teneur en bitume des RAP

Le pourcentage d'asphalte entourant les granulats RAP varie entre 2 et 7.5 % (en masse) dépendant de la fraction du RAP, de la teneur initiale en asphalte, de la méthode de fraisage, de la durée de stockage et de l'entretien. [28, 36, 39, 60]. Il est à noter que le liant bitumineux

vieilli qui adhère aux granulats RAP est plus dur que le matériau bitumineux neuf en raison de l'oxydation [93].

### 1.7.7. Point de ramollissement du RAP

Les résultats du test du point de ramollissement de l'asphalte attaché au RAP sont présentés dans la figure 1.12. On observe que le point de ramollissement du bitume se situe généralement entre 50 °C et 60 °C.

Il est important de noter que le point de ramollissement de l'asphalte n'est pas uniquement lié au degré de vieillissement de celui-ci, mais également à la performance de l'asphalte utilisé dans la chaussée, ce dernier étant le principal facteur à l'origine de la différence de point de ramollissement de l'asphalte attaché au RAP [94].

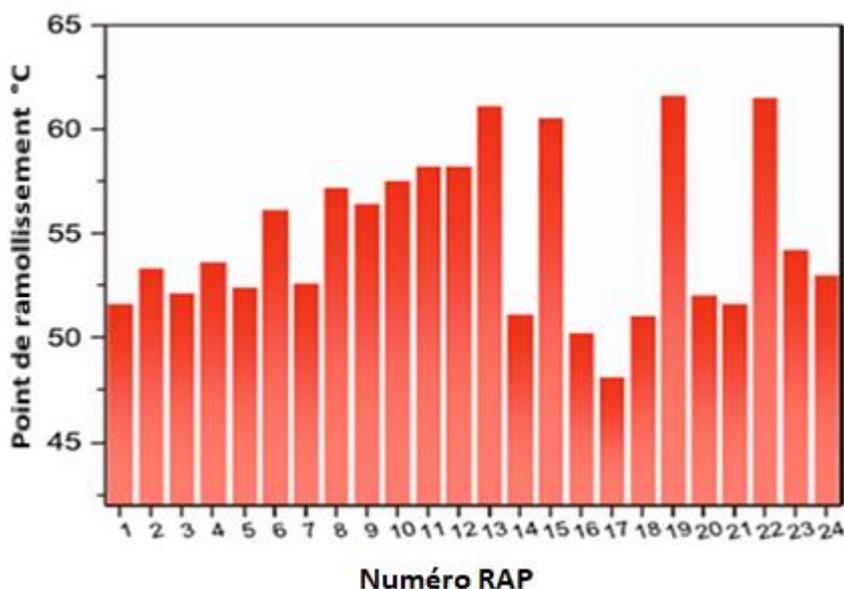


Figure 1. 12. Point de ramollissement du bitume dans le RAP [95].

Pour comparer les résultats trouvés, une étude statistique comparative des propriétés des granulats RAP par rapport aux granulats naturels est présentée dans le tableau 1.5. D'après ce tableau, de nombreuses études confirment la même influence des RAP sur la densité spécifique et la granulométrie. Cependant, l'influence des RAP sur la l'absorption d'eau et la résistance à l'abrasion semble être indécis.

Tableau 1. 5. Comparaison des propriétés des RAP par rapport aux GN.

Propriété des granulats	Tendance	Auteurs
Densité spécifique	Inférieure	[26, 34, 36, 52, 60, 74-85]
Absorption d'eau	Supérieure	[34, 52, 60, 74, 75, 78, 80, 81, 85, 92]
	Inférieure	[26, 36, 76, 77, 79, 82-84]
Coefficient de Los Angeles	Supérieur	[26, 34, 52, 75, 83]
	Inférieur	[60, 78, 85]
Granulométrie	Plus fine	[36, 60, 96]

## 1.8. Effet du RAP sur les propriétés du béton frais

### 1.8.1. Ouvrabilité

Erdem et Blankson [51] ont montré que l'affaissement du béton fabriqué avec des granulats RAP est difficile à interpréter. Des résultats contradictoires ont été trouvés par plusieurs chercheurs.

De nombreuses études ont observé que l'inclusion de RAP pouvait réduire la valeur de l'affaissement du béton par rapport au béton de contrôle. La présence de contaminants de poussière dans les granulats RAP pourrait au contraire augmenter la demande en eau du BRAP, ce qui pourrait affecter la maniabilité du béton.

Al-Oriami et al. [97] ont montré que malgré la même capacité d'absorption d'eau des granulats RAP et naturels, des bétons contenant 100 % de RAP présentaient une ouvrabilité inférieure (d'environ 80 %) à celle du béton témoin. Okafor [98] a également rapporté qu'en dépit d'une absorption d'eau faible des RAP par rapport au gravier naturel, l'ouvrabilité des BRAP serait faible. Huang et al. [24] ont constaté que l'inclusion de fractions combinées de RAP pouvaient améliorer des mélanges de béton, mais l'inclusion d'une seule fraction de RAP pouvaient réduire considérablement l'ouvrabilité. La nature plus visqueuse de l'asphalte s'est avérée être la principale raison de la réduction de l'affaissement.

Mahmoud et al. [29] ont indiqué que 25 % de RAP-G pourraient réduire de 18 %, l'affaissement du béton autoplaçant tandis que les inclusions de 50 % de RPA-G auraient un impact moindre, d'environ 8 %. D'autre part, Khodair et Raza [77] ont rapporté une réduction

linéaire des valeurs d'affaissement avec des niveaux progressifs d'introduction de granulats RAP-G. L'étude de Huang et al. [39] a montré que l'ajout d'un faible pourcentage de RAP pouvait améliorer la maniabilité des BRAP ; cependant, des proportions plus élevées de RAP, en particulier de RAP-F, pouvaient produire un BRAP ferme à affaissement nul. Une observation similaire a été rapportée par Singh et al. [99], où les inclusions de RAP-F ont réduit la maniabilité de manière significative par rapport aux mélanges avec RAP-G.

Erdem et Blankson [51] ont constaté que l'asphalte adhérent peut se détacher de la surface du granulats pendant la phase de malaxage, et donc l'ouvrabilité des mélanges pouvait être réduite d'environ 45 % en raison de l'absorption d'eau par la surface du RAP.

D'autre part, certaines études ont montré que l'utilisation de RAP améliore l'ouvrabilité des BRAP. Hossiney et al. [42] et Shi et al. [26] ont rapporté une amélioration de l'ouvrabilité en raison de la sphéricité des granulats RAP. De même, Brand et Roesler [100] ont indiqué que l'ouvrabilité pouvait être améliorée d'environ 40 % en incluant des granulats RAP moins absorbants dans une proportion de 50 %.

Papakonstantinou [101] a observé que les inclusions de RAP-G avaient un effet négatif sur l'ouvrabilité des béton que les granulats RAP-F [101]. De même, le RAP obtenu en vertu d'un broyage non contrôlé (ayant une absorption d'eau plus élevée) aura certainement une teneur en eau plus élevée.

En conclusion, les études publiées ont révélé une tendance peu claire quant à l'effet des inclusions de matériau RAP sur l'ouvrabilité des bétons. Cependant, des recherches supplémentaires sont nécessaires pour parvenir à une conclusion plus claire.

### **1.8.2. Teneur optimale en humidité**

La détermination de la teneur optimale en humidité (TOH) est un paramètre de conception essentiel du béton [102]. La quantité d'eau présente dans les pores du béton joue un rôle fondamental dans le vieillissement des structures de génie civil, tels que le retrait et le fluage du béton. La valeur de la teneur en humidité d'un mélange à base de GN se situe généralement entre 4 % et 7 % de son volume total. Lorsque le RAP est utilisé à la place des GN, cette valeur de la TOH diminue généralement en raison de la nature hydrophobe du bitume [102].

Les granulats RAP contribueront à obtenir une progression d'hydratation plus élevée à un rapport eau/ciment constant [88]. Ce comportement a été positivement identifié, où la

valeur TOH s'est avérée réduite de 8 à 12 %, quelle que soit la fraction du RAP utilisée. Debbarma et al. [28] ont également démontré que l'utilisation de fractions grossières de RAP pouvait réduire la TOH jusqu'à 4 %.

En revanche, des chercheurs ont signalé que l'incorporation de RAP pouvait également augmenter les valeurs de la TOH. Boussetta et al. [73] a trouvé qu'avec l'incorporation de RAP, les valeurs de TOH augmentent de 12 %. Cela peut être dû aux particules de RAP agglomérées qui emprisonnent l'eau dans les vides créés en raison de l'agglomération, induisant ainsi des valeurs de TOH plus élevées [73]. Une autre raison possible pourrait être la présence de contaminants de poussière absorbant l'eau entourant les granulats RAP [28].

### **1.8.3. Masse volumique**

La masse volumique des bétons à base de RAP se situe généralement entre 2155 et 2342 kg/m<sup>3</sup>. D'autre part, un effet négatif négligeable sur la masse volumique du béton pourrait être attendu lors de l'incorporation des granulats RAP. La faible masse volumique des mélanges BRAP est attribuée à la faible densité du revêtement d'asphalte entourant les granulats RAP.

Selon la littérature, on peut affirmer que l'incorporation de granulats RAP n'aurait pas beaucoup d'effets sur les propriétés fraîches des bétons avec RAP. Au contraire, l'angularité inférieure des granulats RAP et la lubrification du revêtement d'asphalte pourraient fournir une meilleure maniabilité et une meilleure compactibilité des bétons à des faibles rapports eau/ciment.

Les résultats précédents sont confirmés par plusieurs études publiées, où une légère réduction de la masse volumique du béton frais a été notée lors de l'inclusion des granulats RAP (fins ou grossiers). Les études menées par Brand et al. [86] et Brand et Roesler [100] indiquent que le béton frais contenant 50 % de RAP pourrait avoir une diminution de la densité de 5 à 6 % par rapport au béton témoin. Une étude réalisée par Delwar et al. [40] a montré que le remplacement de n'importe quelle fraction de granulat naturel par du RAP aurait moins de 3 % d'effet sur la densité du béton frais. De même, une variation de moins de 2 % a été signalée par Hossiney et al. [42] pour le mélange contenant une fraction de 40 % de RAP par rapport au mélange témoin. Singh et al. [60] ont rapporté que le mélange contenant 100 % de RAP avait moins de 2 % de variation dans la densité par rapport au mélange de béton. En revanche, le mélange contenant 100 % de RAP-F présentait une variation plus

élevée que le RAP-C à 100 %, mais la variation était de nouveau inférieure à 6 % par rapport au mélange témoin [12].

A partir des études publiées, on peut conclure que les granulats naturels peuvent être remplacés par des granulats RAP sans affecter significativement la masse volumique des bétons frais.

## **1.9. Effet du RAP sur les propriétés mécaniques**

### **1.9.1. Résistance à la compression**

La majorité des études ont montré que l'incorporation des RAP dans le béton entraîne une réduction de la résistance à la compression [39, 60, 97, 100, 103, 104] (Figure 1.13).

Le type et l'âge du RAP ont un effet significatif sur la résistance à la compression. L'utilisation d'un RAP relativement moins vieilli entraîne une réduction de la résistance à la compression beaucoup plus élevée que dans le cas d'un RAP très ancien, lorsqu'il est utilisé dans des mélanges B-RAP, la présence d'un film mince de bitume vieilli, de poussière et de particules agglomérées est considérée comme une raison principale de la réduction de la résistance [43].

Les niveaux de remplacement et la fraction du RAP utilisé ont également un effet significatif sur la réduction de la résistance à la compression. Plus le niveau de remplacement du RAP est grand, plus la réduction de la résistance à la compression sera importante.

La principale cause de la diminution des propriétés de résistance des BRAP est la faiblesse et la porosité de Zone de Transition Interfaciale (ITZ) entre le granulat RAP et le mortier de ciment. La présence d'une couche de bitume autour du RAP fait obstacle à la création d'une forte adhérence entre les granulats RAP et le mortier de ciment [61, 91].

Debbarma et al. [36, 91] ont rapporté une diminution de la résistance à la compression de 26 % à 67 % lors de l'utilisation de RAP moins âgé, tandis qu'une réduction de 9 % à 37 % a été observée lors de l'utilisation de RAP très âgé. Ce comportement est principalement attribué à l'effet d'oxydation des granulats de RAP très vieillis, qui, lors de l'oxydation, crée une fenêtre pour une meilleure adhérence entre le granulat et le mortier.

Hossiney et al. [42] ont observé une réduction de 65 % de la résistance à la compression du béton avec RAP grossier, une réduction de 80 % du béton contenant à la fois des granulats RAP grossiers et fins à l'âge de 28 jours.

De nombreux chercheurs ont trouvé que l'utilisation de RAP à moins de 50 % entraînait une faible réduction de la résistance à la compression. Une étude de Modarres [88] a révélé que l'utilisation du RAP grossier pouvait entraîner une réduction de la résistance à la compression d'environ 25 %. Hassan et al. [43] ont constaté que jusqu'à 50 % du contenu en RAP peut être adopté dans les espaces publics à faible trafic en raison de sa faible résistance à l'abrasion. Ainsi, cela a le potentiel d'être utilisé pour les piétons et les véhicules non motorisés. Sur la base de l'étude, le béton contenant du RAP grossier et fin a montré une réduction significative de la résistance par rapport à la combinaison de RAP grossier et fin.

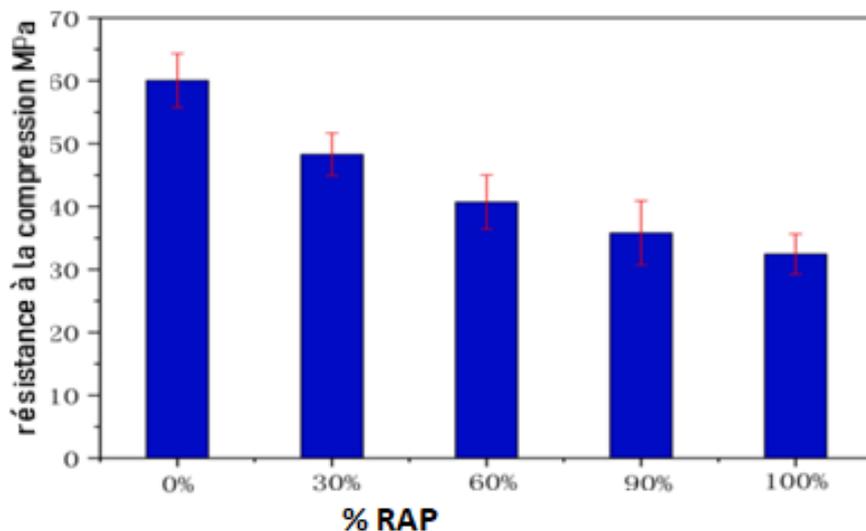


Figure 1. 13. Résistance à la compression des BRAP [104].

L'étude actuelle sur le béton à haute résistance et le béton autoplaçant avec RAP est assez limitée. Une étude de Mahmoud et al. [29] a révélé qu'il est possible d'atteindre une résistance à la compression de 42 MPa avec 50 % de granulats RAP. De même, des bétons autoplaçants avec 25 % de RAP ont été obtenus [44]. Le développement des bétons à haute résistance et autoplaçants avec RAP nécessite des recherches plus approfondies en raison de références très limitées.

Le tableau 1.6 résume le pourcentage diminution de la résistance à la compression à 28 jours lorsque le GN est remplacé par le RAP-G dans le béton.

Tableau 1. 6. Taux de diminution de la résistance à la compression des BRAP à 28 jours.

<b>Auteur</b>	<b>(%) diminution</b>
Al-Oriami et al. [97]	60
Brand et Roesler [100]	16-39
Brand et al. [105]	44
Debbarma et al. [28]	24-33
Debbarma et al. [36]	33-59
Delwar et al. [40]	13-15
Erdem et Blankson [51]	62
Hassan et al. [43]	66
Huang et al. [24]	41
Huang et al. [39]	22-71
Ibrahim et al. [44]	9-29
Khodair et al. [77]	15-35
Modarres et Hosseini [88]	25
Okafor [98]	42
Settari et al. [34]	56
Shi et al. [26]	47
Singh et al. [12]	23

### **1.9.2. Résistance à la flexion**

La résistance à la flexion est considérée comme l'un des critères de conception pour toute application de béton. La littérature disponible indique que la résistance à la flexion des bétons RAP diminue avec l'augmentation du pourcentage de RAP, indépendamment des âges de cure [26, 42, 60, 90]. Le type et l'âge du RAP utilisé ont un effet significatif sur la résistance à la flexion des bétons.

Modarres et al. [88] ont découvert que l'utilisation d'une fraction plus grossière de RAP donnera une résistance à la flexion plus élevée par rapport aux fractions fines et combinées. Cela est principalement dû à la faible concentration d'asphalte et à la densité plus élevée du RAP grossier par rapport au RAP fin. En tenant compte de ces facteurs dans la conception du mélange avec RAP grossiers, une ITZ dense et moins poreuse par rapport à celle du mélange avec RAP fin, pourrait être attendue [28].

Le remplacement des granulats grossiers naturels par du RAP-G réduit la résistance à la flexion de 4 à 79 % [26, 43, 58, 60]. Al-Oraimi et al. [97], Hassan et al. [43], Huang et al. [39], Okafor [98] et Singh et al. [60] ont noté une réduction de la résistance de flexion allant de 25 à 79% lorsque 100% de RAP-G était incorporé. D'autre part, une réduction plus faible allant de 4 à 25 % a été notée lorsqu'un pourcentage plus faible de RAP (20-50 %) était utilisé [100, 105].

De plus, Shi et al. [26] ainsi que Ben Said et al. [106] ont observé une diminution respective de 8 % à 27 % de la résistance lorsque 20 % et 40 % de RAP étaient utilisés dans les bétons. Une étude menée par Singh et al. [60] a montré que le lavage des granulats RAP-G pouvait réduire le taux de diminution de 4 %. En ce qui concerne les mélanges RAP-F, il a été constaté que leur incorporation dans le béton entraînait une réduction de la résistance à la flexion de 17 % à 42 % lorsque les granulats RAP-F étaient ajoutés de 25 % à 100 %, respectivement [99].

Abraham et Ransinchung [89] ont rapporté une diminution de 39 % de la résistance à la flexion lorsque le sable naturel était remplacée en masse par des RAP-F. Cependant, lorsque les RAP-F étaient remplacée en volume, la réduction a été notée comme étant plus faible (6-25 %). Pour les bétons de RAP combinés, un important taux de diminution de 68 % a été trouvé [28, 88].

Malgré des réductions importantes de la résistance à la flexion par rapport au mélange témoin, plusieurs auteurs ont recommandé l'utilisation du RAP-G dans des proportions de 75 % [97], 20-50 % [100, 105], 40 % [106], et 100 % [28, 36, 60, 88].

Dans le cas des bétons incluant du RAP-F, Singh et al. [99] et Debbarma et al. [36] ont recommandé l'utilisation de granulats RAP-F jusqu'à 50 % pour le béton. D'autre part, l'utilisation de RAP combiné jusqu'à 100 % pourrait également être utilisée pour la production de béton [28].

Brand et al. [107] ont montré que dans les BRAP, la rupture se produit au niveau de la cohésion asphalte-mortier. Cette cohésion pourrait être minimisée en utilisant des granulats RAP grossier ayant une faible concentration d'asphalte et de particules agglomérées [28]. L'utilisation de RAP-G avec de l'asphalte très vieilli a permis d'obtenir de bons résultats, car l'asphalte oxydé augmente l'affinité chimique entre l'asphalte et le ciment [28].

En revanche, l'utilisation d'un RAP-G moins âgé peut ne pas permettre d'obtenir un béton aussi résistant et durable, en raison de la concentration plus élevée en asphalte et en

particules agglomérées [36]. Plus important encore, le pourcentage de la surface des granulats RAP recouvert d'asphalte a plus d'influence sur la résistance du béton.

Moaveni et al. [108] ont constaté que la présence d'un revêtement d'asphalte peut augmenter l'indice d'angularité et l'indice de texture de surface des particules RAP. Plus l'épaisseur du film de liant est épaisse, plus la teneur en asphalte est élevée, ce qui entraîne des réductions de résistance plus importantes [108].

La distribution granulométrique du RAP a également une incidence significative sur la résistance à la flexion du BRAP. Le RAP obtenu par fraisage contrôlé peut générer un RAP finement gradué susceptible de poser des problèmes de maniabilité et d'avoir un impact négatif sur la résistance à la flexion [36]. Cependant, l'utilisation de particules de RAP bien calibrées et de taille intermédiaire peut conduire à une granulométrie dense et produire de meilleures propriétés de béton [26, 28].

Malgré la diminution de la résistance à la flexion des BRAP, on peut conclure que le RAP pourrait être utilisé dans les bétons, car il a pu atteindre la résistance à la flexion recommandée.

Le tableau 1.7 résumé le pourcentage diminution de la résistance à la flexion à 28 jours des bétons à base de RAP-G.

Tableau 1. 7. Taux de diminution de la résistance à la flexion des BRAP à 28 jours.

<b>Auteur</b>	<b>(%) diminution</b>
Al-Oriami et al. [97]	33
Brand et Roesler [39]	20
Brand et al. [105]	25
Debbarma et al. [28]	11-31
Hassan et al. [43]	35
Modarres et Hosseini [88]	11-31
Okafor [98]	25-30

### **1.9.3. Module d'élasticité**

Le module d'élasticité du béton nous renseigne sur sa rigidité. Plus le module d'élasticité est élevé, plus sa capacité à supporter des charges est grande et moins la déformation est importante.

Les chercheurs ont rapporté que l'incorporation de RAP dans le béton pouvait réduire son module d'élasticité, quelle que soit la fraction RAP. Des chercheurs [34, 39, 62] ont noté une réduction de 53 % de la valeur du module d'élasticité lorsque 50 % de RAP-G étaient incorporés dans les bétons.

Brand et al. [105] ont signalé une diminution de 25 % de la valeur du module d'élasticité lors de l'incorporation de 45 % de RAP-G. Dans une autre étude de Brand et Roesler [100], le taux de réduction est passé de 16 % à 30 % avec l'incorporation de RAP-G à des pourcentages de 20 % à 50 %. Dans le cas des mélanges avec RAP-F, un taux de réduction similaire à celui du mélange RAP-G a été observé [34, 106].

D'autre part, l'incorporation de granulats combinés RAP-C a entraîné une réduction drastique du module d'élasticité de 18-60 % [35, 51], 44 % [34], et 25-58 % [35, 42]. Khay et al. [109] ont quant à eux rapporté une réduction de 72 % lorsque 100 % des granulats RAP combinés ont été utilisés. Il est intéressant de noter que l'épaisseur du film d'asphalte n'est pas le principal facteur qui affecte le module du BRAP, mais plutôt la faible cohésion entre les granulats RAP et la pâte de ciment [110].

Néanmoins, la littérature disponible indique clairement que l'incorporation de granulats RAP dans le béton réduisait les propriétés mécaniques de manière significative (Tableau 1.8).

Tableau 1. 8. Résumé de la littérature sur l'effet du RAP sur les propriétés mécaniques.

Auteur	RAP	% RAP	E/C	f <sub>c</sub> (MPa)	f <sub>t</sub> (MPa)	E (GPa)
Su et al. [111]	combiné	0%	0.5	42.1	3.4	34.8
		20%	0.5	31.2	2.9	26.8
		40%	0.5	23.3	2.28	19.9
		70%	0.5	17.3	1.9	14.5
		100%	0.5	11.9	1.5	10.5
Shi et al. [26]	G	0%	0.4	33.6	4.4	32.9
		20%	0.4	23.8-30.5	4.2-4.5	27.1-30.5
		40%	0.4	17.8-27.0	3.05-3.9	24.1-26.1
Thomas et al. [112]	G	0%	0.47	73.8	/	/
		25% -50%	0.47	47.4-30.1	/	/
Abraham et Ransinchung [113]	G	0%	0.44	51	4.9	/
		25% -100%	0.44	46-34	3.3-2.3	/
Singh et al. [12]	G	0%		17.8	/	/
		25% -100%		13-0.9	/	/
	G+N	25% -100%		11-5.3	/	/
Debbarma et al. [28]	témoin	0%	0.37	37	4.2	/
	G	50%	0.36	28	3.6	/
		100%	0.35	25	3.2	/
	combiné	50%	0.4	29	2.8	/
		100%	0.41	23	2.2	/
Huang et al. [24]	témoin	0%	0.5	37.7	3.21	/
	G	100%	0.5	22.1	3.06	/
	combiné	100%	0.5	10.4	1.59	/
El Euch Ben Said et al. [106]	combiné	0%	0.6	30.1	3.1	31.1
		20%	0.6	23.8	2.8	28.9
		40%	0.6	20.7	2.3	24.6
		60%	0.6	16.7	2.2	22.3
		75%	0.6	13.7	2	20.1
		100%	0.6	11.4	1.7	14.5
Papakonstantinou [101]	témoin	0%	0.45	34	/	28.52
	combiné	5%-15%	0.45	30-28	/	26.94-29.97
Shatarat et al. [85]	G	0%	0.57	46	/	/
		20%-100%	0.57	45-30	/	/
Hossiney et al. [42]	combiné	0%	0.53	38.58	3.73	32.95
		10% - 40%	0.53	34.03-17.38	3.11-2.34	27.57-16.2
Brand et al. [103]	G	0%	0.37	46	6.3	44.4
		20%	0.37	37.2	4.7	37.4
		35%	0.37	32.7	3.4	31.9
		50%	0.37	27.9	3	30.9

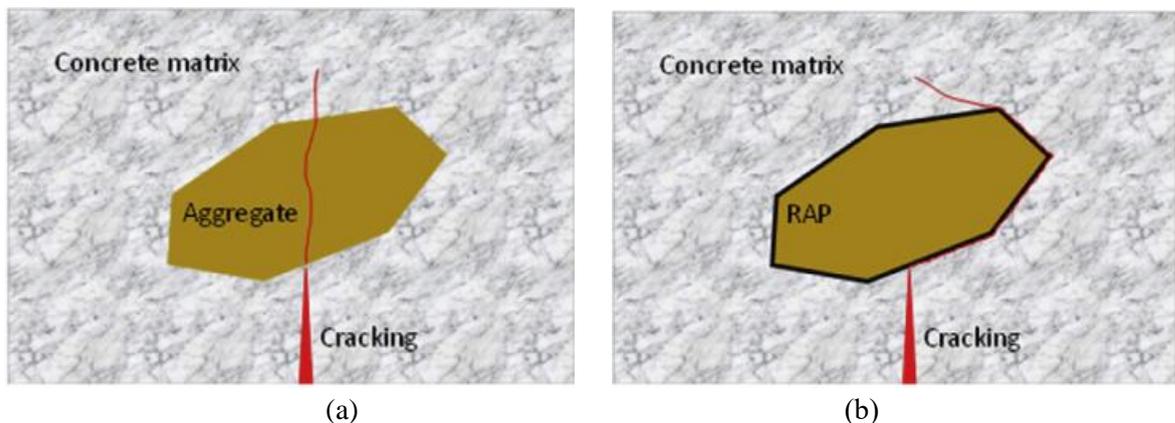
#### 1.9.4. Ténacité

Dans le béton ordinaire, les fissures se développent généralement à travers les granulats naturels (fissures intergranulaires), alors que dans le cas du béton RAP, les fissures contournent les granulats RAP (fissures transgranulaires), en raison de la présence d'une couche bitumineuse autour du RAP qui oriente la propagation des fissures (Figure 1.14) [24].

Par conséquent, le béton avec RAP a le potentiel de supporter des charges même après la rupture, ce qui augmente sa ténacité [24, 90].

Huang et al. [24] ont rapporté que les spécimens RAP pouvaient supporter la charge maximale tout en subissant un déplacement relativement important. En fait, les éprouvettes avec RAP ont subi une rupture ductile contrairement aux éprouvettes de contrôle [12, 36].

Fakhri et Amoosoltani [35] et Debbarma et al. [32] ont trouvé une augmentation notable de la ténacité avec l'ajout de matériau RAP.



### 1.9.5. Microstructure

Le béton est un matériau hétérogène qui est un mélange de granulats et de mortier à l'échelle macroscopique. Mais à l'échelle microscopique, il se compose principalement de trois éléments : pâte de ciment, granulats, et zone de transition interfaciale [114].

Les recherches ont montré que l'ajout de RAP au béton diminuerait les propriétés de résistance et de module d'élasticité. Brand et al. [107] ont étudié les causes microstructurales à l'origine de ces diminutions, en particulier en ce qui concerne l'adhérence et la zone de transition interfaciale (ITZ). L'ITZ est considérée comme le "maillon faible" de la défaillance du béton, en raison de : (1) la porosité plus élevée dans l'ITZ, (2) des cristaux CH plus gros et orientés de manière préférentielle, (3) la faiblesse de la liaison ciment-granulat [115, 116].

Brand [107] a montré que les propriétés de l'ITZ à 1 jour n'étaient pas significativement différentes entre les mortiers avec et sans RAP. Cependant, à 7 et 28 jours, le mortier avec RAP présentait une porosité plus élevée et une largeur d'ITZ plus importante, ainsi qu'une teneur en CH plus élevée et moins de C-S-H à l'interface, ce qui conduira à la réduction de la

résistance et du module du béton. L'hypothèse est que la solution interstitielle à pH élevé lixivie les composés organiques de l'asphalte, perturbant ainsi le processus d'hydratation. En conséquence, la porosité est plus grande et la quantité de C-S-H diminue dans l'ITZ, affectant ainsi la croissance du CH [107].

L'épaisseur de l'ITZ entre les granulats et le mortier est comprise entre 30  $\mu\text{m}$  et 50  $\mu\text{m}$ . L'ITZ des bétons ordinaires étant plus petite que l'ITZ des bétons avec RAP. Ainsi, la porosité plus élevée et la plus grande largeur d'ITZ sont les principaux facteurs entraînant des réductions de la résistance à la compression et du module d'élasticité des BRAP [107].

### 1.9.6. Porosité

Abraham et al. [117] ont étudié la porosité du mortier de ciment avec différents niveaux de remplacement des granulats RAP fins à l'âge de durcissement de 28 jours (Figure 1.15). Les résultats montrent qu'avec l'augmentation de la teneur en RAP-F, la porosité augmente, ce qui est conforme avec d'autres études [89, 118]. L'étude menée par Topcu et Isikdag [118] a également observé que pour les bétons avec 50 %, 75 % et 100 % de RAP, les valeurs de porosité ont augmenté de 71.5 %, 73.8 % et 89.8 %, respectivement. L'augmentation de la porosité est due à la faible ITZ des BRAP [107].

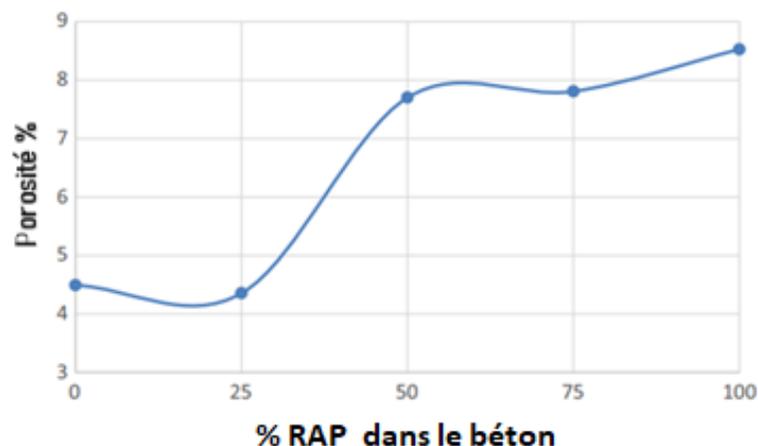


Figure 1. 15. Porosité du béton à base de granulats RAP [117].

### 1.9.7. Effet de l'âge du RAP

L'âge peut également jouer un rôle important sur les propriétés des granulats RAP et par la suite sur les propriétés mécaniques des BRAP.

Singh et al. [12, 60] ont trouvé que les granulats grossiers de RAP provenant de nouvelles chaussées avaient un effet plus négatif sur les propriétés fraîches et durcies des bétons. Un granulat RAP provenait d'une chaussée de 2.5 ans fraîchement broyée, tandis que l'ancien granulat provenait d'une chaussée vieille de 20 ans avec huit mois de stockage. Les granulats RAP plus anciens ont une couche d'asphalte plus oxydée, alors que les granulats grossiers extraits du nouveau revêtement (2.5 ans) étaient constitués d'asphalte relativement non oxydé qui lie fermement les granulats, ce qui entraîne une plus grande concentration de particules agglomérées dans celui-ci par rapport aux granulats grossiers obtenus à partir de l'ancien revêtement (20 ans).

Brand et Roesler [107] ont montré que l'oxydation pourrait modifier la chimie de la surface de l'asphalte, conduisant à une meilleure mouillabilité et une meilleure liaison avec la pâte de ciment.

## **1.10. Effet du RAP sur la durabilité**

### **1.10.1. Absorption d'eau**

L'absorption d'eau du béton est la mesurée de la quantité d'eau qui pénètre dans les échantillons de béton lorsqu'ils sont immergés dans l'eau pendant un certain temps. De nombreux chercheurs ont rapporté que l'absorption d'eau du béton diminue avec l'incorporation de granulats RAP [119, 120]. Singh et al. [58] ont constaté que l'absorption d'eau des bétons diminue avec l'ajout de granulats RAP, tandis que Debbarma et al. [36] ont constaté une tendance similaire lorsque la fraction RAP était utilisée dans les mélanges béton.

Nandi et al. [121] ont rapporté qu'en raison de la quantité élevée de particules de poussière autour des granulats RAP, la valeur d'absorption d'eau des BRAP augmente.

La remontée capillaire de l'absorption d'eau dans les bétons peut être estimée indirectement en utilisant le concept de sorptivité. De nombreux chercheurs ont déterminé les caractéristiques de sorptivité de deux manières dans les mélanges RAP, à savoir le taux primaire d'absorption d'eau (de 1 h à 6 h) et le taux secondaire d'absorption (de 1 jour à 7 jours) [27].

Abraham et al. [113] et Debbarma et al. [90] ont observé que la sorptivité diminuait avec l'augmentation de la teneur en RAP à différents âges de durcissement (28 et 91 jours).

Des résultats contradictoires ont été trouvés lorsque les RAP ont été remplacés par des granulats naturels. Par conséquent, des études supplémentaires sont nécessaires pour déterminer le comportement d'absorption d'eau des BRAP.

### **1.10.2. Perméabilité à l'eau**

La vitesse de diffusion de l'eau à travers une structure en béton sous un l'effet d'une pression est connue sous le nom de perméabilité. La perméabilité est évaluée par la profondeur de pénétration de l'eau.

Plusieurs chercheurs ont trouvé que lorsque des granulats RAP ont été ajoutés aux bétons, la perméabilité à l'eau augmente [50, 56, 122, 123]. Saboo et al. [50] ont précisé que l'ajout des cendres volantes réduisait la perméabilité à environ 50 % lorsque 100 % de RAP grossier était utilisé.

### **1.10.3. Pénétration des ions chlore**

La pénétration des ions chlore constitue l'une des attaques environnementales les plus fréquentes entraînant la détérioration des structures en béton [124]. Un béton à faible porosité a tendance à restreindre la pénétration des chlorures. Ainsi, l'utilisation des ajouts minéraux tels que la fumée de silice, les cendres volantes et le laitier pourrait réduire la pénétration des chlorures en améliorant la compacité du béton [112].

L'utilisation de granulats RAP dans les bétons peut susciter des préoccupations quant à la diminution de la résistivité à la pénétration des chlorures et des résultats contradictoires ont été trouvés dans la littérature lorsque les RAP ont été remplacés par des granulats naturels.

Berry et al. [30] ont étudié l'impact des granulats RAP sur la résistance à la pénétration des chlorures, mais, aucune différence n'a été trouvée entre les bétons témoins et les BRAP, de sorte qu'aucune conclusion n'a été formulée.

Brand et Roesler [100] ont démontré que le taux de pénétration des chlorures pour les bétons contenant 20 %, 25 % et 50 % de RAP était très faible.

De même, dans une étude menée par Thomas et al. [112], la pénétration des chlorures dans le béton à haute résistance n'a pas été affectée par l'incorporation de 25 à 50 % de granulats RAP. En fait, il a été rapporté que la pénétration des chlorures diminuait lorsque des granulats RAP associés avec des cendres volantes et des laitiers [77].

D'autre part, Singh et al. [60] ont trouvé que l'incorporation de 100 % de RAP non lavé et de 100 % de RAP lavé a augmenté la teneur en chlorure d'environ 56 % et 32%, respectivement par rapport au mélange de contrôle. Cependant, l'utilisation de 100 % de RAP traité en surface pourrait conduire à une réduction considérable de la teneur en ions chlore.

D'après la littérature, on peut noter que l'incorporation de granulats RAP a eu très peu d'effet négatif sur la pénétration des chlorures dans les bétons. Cependant, afin de parvenir à une conclusion définitive, des études approfondies supplémentaires doivent être réalisées.

#### **1.10.4. Carbonatation**

Lorsque le dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) de l'air pénètre dans la matrice de béton, il réagit avec l'hydroxyde de calcium ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ). Cette réaction entraîne la formation de carbonates de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ), ce qui a pour effet de modifier les propriétés du béton. La carbonatation est généralement évaluée en pulvérisant une solution de phénolphaléine sur des éprouvettes de béton.

Actuellement, peu de recherches sur les effets de la carbonatation lorsque des granulats RAP sont inclus dans le béton [39, 58].

Hossiney et al. [42], Singh et al. [60], et Debbarma et al. [90] ont constaté que la carbonatation n'a pas un effet significatif sur les bétons contenant des RAP grossiers. Des observations similaires ont également été notées dans les mélanges de béton contenant des granulats RAP fins ou combinés [12, 90].

#### **1.10.5. Attaque par les acides les sulfates**

La présence d'une grande concentration d'acide dans l'eau ou dans les différentes conditions de l'environnement au contact du béton durci conduit à sa dégradation. Les structures en béton construites à proximité d'environnements marins sont souvent détériorées par les sulfates et les ions chlore [125].

La résistance à l'acide est déterminée en soumettant des échantillons de béton à une solution d'acide chlorhydrique ( $\text{HCl}$ ) ou acide sulfurique ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) à différents âges. La résistance à l'acide de l'échantillon de béton est évaluée au moyen de la perte de masse et de la perte de la résistance à la compression après une période d'immersion [126].

Les incorporations de toutes les fractions RAP ont été identifiées pour réduire la résistance des bétons contre les effets nocifs des sulfates. Les études menées par Singh et al.

[32] ont montré que les inclusions de RAP-G pouvaient réduire les performances en termes de perte de masse et de résistance d'environ 30 % et 44 %, tandis que l'incorporation de RAP-F réduit la performance d'environ 60 % et 70 % par rapport au béton de contrôle. L'inclusion d'une fraction combinée RAP-C n'est pas recommandée en raison de sa plus grande sensibilité à l'attaque par les sulfates. La raison de la réduction de la performance contre les attaques sulfatiques est due à la porosité plus élevée et aux vides interconnectés dans les BRAP. Ces vides interconnectés ont permis l'entrée facile de agents agressifs dans le béton qui réagissent avec l'hydroxyde de calcium et provoque la détérioration de la structure du béton [32].

Sur la base de la littérature [28, 32, 60], les inclusions de RAP pourraient induire une porosité au sein de l'ITZ et de la microstructure du béton, ce qui faciliterait la pénétration des agents agressifs et la dégradation subséquente de la structure. Cependant, des proportions de 25-50 % de RAP-G semblent être tolérées. Cependant, pour le RAP-F et le RAP-C, des études plus approfondies doivent être menées.

#### **1.10.6. Résistance au gel/dégel**

La résistance du béton au gel/dégel est un paramètre important qui détermine sa capacité à résister à l'expansion de l'eau sous l'effet des variations thermiques dans des conditions climatiques extrêmes [112].

Très peu d'études ont été menées sur le comportement des BRAP au gel/dégel. Berry et al. [30] ont rapporté une diminution de la durabilité au gel/dégel avec l'augmentation de la teneur en RAP.

Brand et al. [86] ont montré qu'un excellent facteur de durabilité au gel/dégel a été trouvé pour le béton contenant 20 % de RAP-G. Cependant, pour le mélange contenant 35 % et 50 % de RAP-G le facteur de durabilité de gel/dégel a été réduit, bien qu'il demeurait toujours dans les limites acceptables de 60 après 300 cycles de gel-dégel [86].

Dans une étude réalisée par Thomas et al. [112], un facteur de durabilité gel/dégel d'environ 70-96 après 300 cycles a été trouvé lorsque les graviers naturels ont été remplacés par le RAP-G dans des proportions de 25 % à 50 %.

Sur la base de la littérature, il peut être bénéfique d'inclure le RAP-G dans une proportion inférieure à 50 % pour les bétons de chaussée dans des zones présentant des risques de gel-dégel [69].

### 1.11. Effet du RAP sur le retrait

Brand et Roesler [48] ont étudié le retrait de séchage des bétons incluant du RAP, où aucune différence significative n'a été observée dans le retrait de séchage lorsque la fraction RAP-G (20 %, 35 % et 50 %) a été incorporée.

Khodair et Raza [77] ont noté que l'incorporation de granulats RAP dans des proportions de 15 %, 30 % et 50 % augmentait le retrait total des BRAP d'environ 8.4 %, 16 % et 23.1 %, respectivement. Dans une autre étude réalisée par Ibrahim et al. [44], l'incorporation de 25 % et 50 % de granulats RAP dans le béton armé a permis de réduire la déformation de retrait de 13 % et 6 %, respectivement [44].

Topcu [118] a trouvé une augmentation de retrait d'environ 40 % dans le béton à 100 % RAP comparée au béton témoin. Cette augmentation peut s'expliquer par le fait que le module d'élasticité plus faible du BRAP induit une faible contrainte dans la pâte de ciment lors du retrait. Le granulat moins rigide contribue à réduire la déformation interne, entraînant ainsi une augmentation de la déformation de retrait.

De plus, le retrait de séchage est également influencé par la teneur en asphalte du RAP. Tia et al. [127] ainsi que Brand et Roesler [128] ont utilisé un RAP avec une teneur en asphalte de 2.1 %, et il a été constaté qu'il n'y avait pas de différence entre le béton avec et sans granulats RAP.

En se basant sur la littérature, on peut constater que le retrait du BRAP augmente avec l'augmentation du taux de remplacement du RAP.

### 1.12. Fluage

Lorsqu'une éprouvette est soumise à une charge extérieure constante, elle présente une déformation instantanée, au moment du chargement, suivie d'une déformation différée, qui commence immédiatement après l'application du chargement et se poursuit dans le temps à un taux décroissant durant l'application de la charge (Figure 1.16) [129].

Il est à noter que la déformation instantanée (déformation élastique) est difficile à extraire des déformations obtenues lors d'un essai de fluage.

La déformation du fluage propre est définie comme étant la déformation mesurée dans le temps d'une éprouvette chargée à l'instant  $t_0$ , en partant d'un état hydrique et thermique uniforme maintenu constant tout au long de l'essai. Cette déformation est proportionnelle à la contrainte appliquée pour des niveaux de chargement inférieurs à 50 % de la charge ultime.

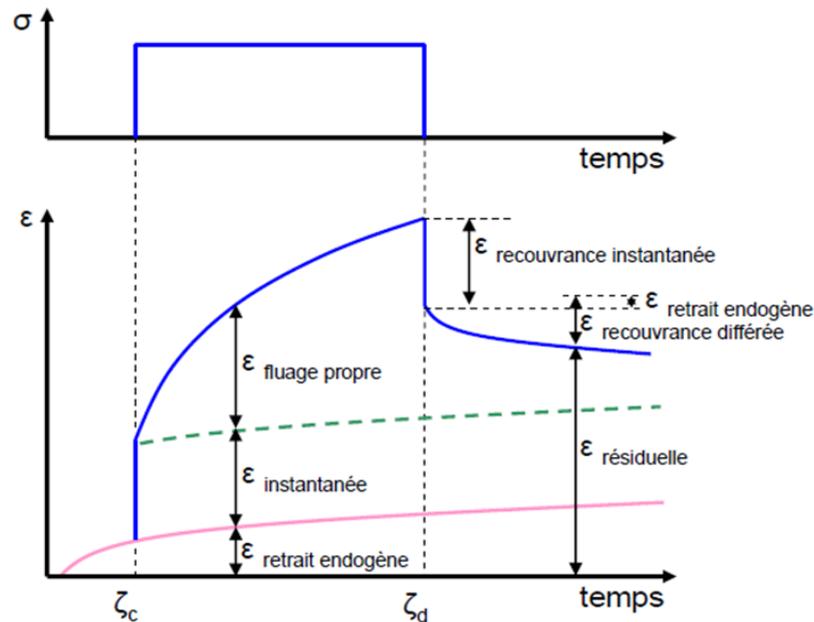


Figure 1. 16. Décomposition des déformations de fluage [129].

### 1.12.1. Origine physico-chimique du fluage

Dans la littérature deux mécanismes physiques sont principalement utilisés pour expliquer le fluage propre du béton [129, 130].

A court terme, les contraintes extérieures entraînent un processus de micro diffusion de l'eau capillaire. Au niveau microscopique, la transmission des efforts extérieurs se fait via les hydrates qui entourent les pores capillaires, perturbant ainsi l'équilibre thermodynamique de l'eau librement adsorbée. Pour le rétablir des molécules d'eau diffusant dans les couches d'eau adsorbée vers les zones libres, ce qui déforme le squelette solide (Figure 1.17) [129, 130].

A long terme, l'explication serait plutôt d'origine mécanique. Il y aurait rupture des liaisons hydrogène entre les surfaces solides adjacentes aux zones d'adsorption. Ces liaisons se reforment dans des zones adjacentes de moindres surtensions du fait du glissement des feuillets C-S-H (Figure 1.18). Ce mécanisme lié à l'instabilité des hydrates est supposé irréversible.

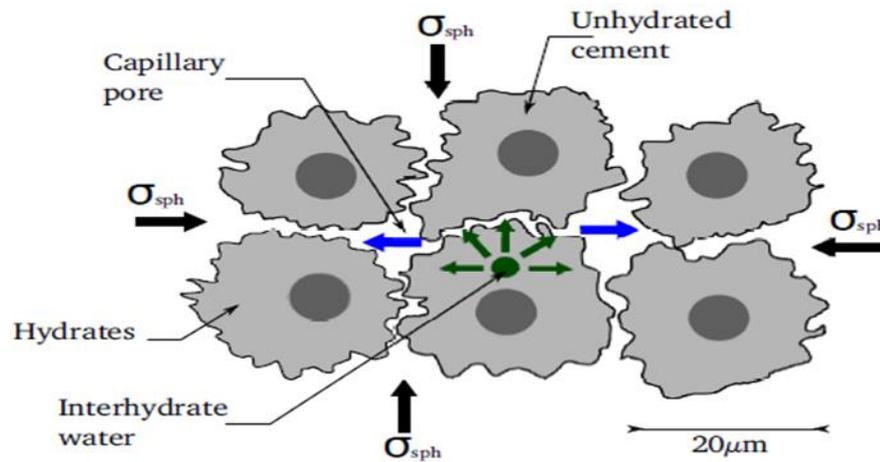


Figure 1. 17. Migration de l'eau adsorbée [130, 131].

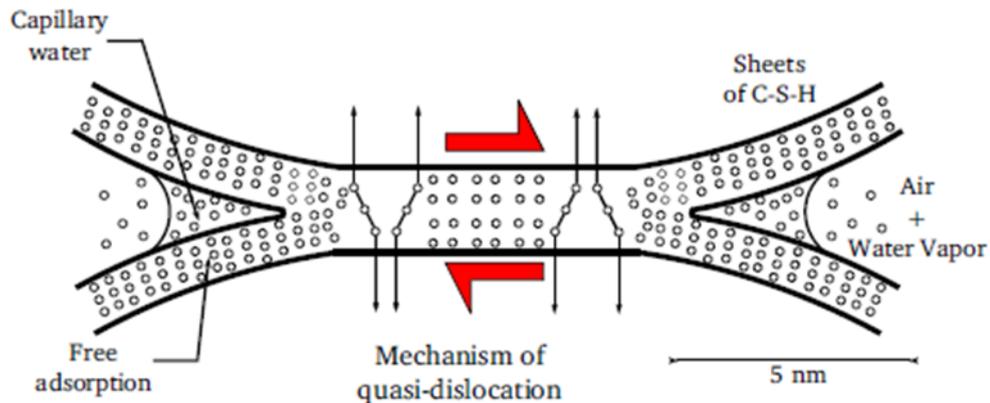


Figure 1. 18. Mécanisme de glissement des feuillets C-S-H [130].

### 1.12.2. Effet du RAP sur le fluage

Aucun travail expérimental n'a été réalisé sur le fluage en flexion ou en compression des bétons à base de granulats RAP.

## 1.13. Conclusion de la revue bibliographique

D'après la revue bibliographique, les conclusions suivantes peuvent être tirées de l'étude l'utilisation du RAP pour la production du béton de ciment.

### - Propriétés des granulats RAP :

La présence du film d'asphalte et des particules agglomérées a été identifiée comme la principale cause des faibles performances des bétons avec RAP. Si le film d'asphalte pouvait être retiré de la surface des granulats, le RAP pourrait se comporter comme un granulats naturel, ouvrant ainsi la possibilité de développer des méthodes de traitement de surface.

- **Propriétés du BRAP à l'état frais :**

Les études publiées ont révélé une tendance indistincte quant à l'effet des inclusions de RAP sur l'ouvrabilité des bétons frais. Par conséquent, des études supplémentaires, prenant en compte divers paramètres du RAP tels que la forme, les caractéristiques de l'asphalte adhérent, les particules agglomérées, l'absorption d'eau, les techniques de broyage et de traitement, etc. sont nécessaires pour obtenir des résultats clairs sur l'ouvrabilité du béton frais.

- **Propriétés du BRAP durci :**

Presque toutes les études ont montré qu'avec l'augmentation du pourcentage de RAP, les propriétés mécaniques telles que la résistance à la compression, la résistance à la flexion et le module d'élasticité ont diminué. D'autre part, la rigidité et la ductilité se sont améliorées. Ces études peuvent considérer la rigidité du revêtement d'asphalte comme un paramètre déterminant, étant donné que le revêtement d'asphalte mou peut induire une ductilité plus élevée que le film d'asphalte oxydé.

- **Propriétés de durabilité du BRAP:**

Très peu d'études ont menées sur l'effet de l'incorporation de RAP sur la performance de durabilité des bétons. Les résultats de ces études pourraient servir de point de départ à des investigations plus approfondies.

- **Retrait du BRAP:**

Très peu d'études ont menées sur le retrait des bétons à base de granulats RAP. En revanche, aucune étude n'a été faite sur l'effet de la température de cure (de 20 °C à 60 °C) sur le retrait de ces bétons.

- **Fluage du BRAP:**

Aucune étude expérimentale n'a été réalisée sur le fluage des bétons à base de granulats RAP.

---

# **Chapitre 2 :**

# **Matériaux et matériel d'essai**

---

## Chapitre 2 : Matériaux et matériel d'essai

### 2.1. Introduction

Ce travail expérimental a été réalisé au Laboratoire des Sciences des Matériaux et Environnement (LSME) de l'Université Hassiba Benbouali de Chlef (Algérie).

Avant d'entamer la partie expérimentale, il nous paraît important de caractériser les matériaux utilisés dans la composition des bétons testés, car ces matériaux jouent un rôle important sur leurs propriétés et leurs performances ultérieures.

Dans ce chapitre, on présentera les différents matériaux à utiliser dans la confection des bétons testés. Nous examinerons également les essais à effectuer conformément aux normes internationales et aux modes opératoires en vigueur. Les objectifs de cette étude expérimentale visent à étudier l'influence de la substitution de gravier naturel par le RAP sur les propriétés physico-mécanique et les déformations différées des bétons, afin d'apprécier la possibilité de l'utilisation des RAP dans les travaux de construction.

### 2.2. Matériaux utilisés

#### 2.2.1. Ciment

Le ciment utilisé est un ciment Portland composé de type CEM II/A-L 42.5 N, produit par la cimenterie "ECDE" d'Oued Sly (Chlef) dont l'ajout est 18 % de calcaire. Il présente une densité de 3.1 et une surface spécifique de 3290 cm<sup>2</sup>/g. Sa résistance minimale à la compression à 28 jours est 42.5 MPa. Les caractéristiques chimiques et minéralogiques de ce ciment sont indiquées dans le tableau 2.1.

Tableau 2. 1. Composition chimique et minéralogique du ciment utilisé.

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	PAF
62.78	20.68	4.80	4.70	0.55	2.27	0.15	0.42	0.90
Composition minéralogique (%)								
C <sub>3</sub> S		C <sub>2</sub> S		C <sub>3</sub> A		C <sub>4</sub> AF		
60.83		18.92		8.82		10.96		

### 2.2.2. Sable

Le sable utilisé dans cette étude est un sable naturel provenant d'Oued Chlef. Sa nature minéralogique est siliceuse, d'une taille maximale de 4 mm. Il présentait un module de finesse de 2.79 et une masse volumique spécifique 2670 kg/m<sup>3</sup>.

### 2.2.3. Gravier naturel

Un gravier naturel (GN) provenant de la carrière de Ain Nsour (Ain Defla), d'origine calcaire et de dimensions 4/15 a été utilisé dans cette étude. Son coefficient de Los Angeles est de 28, et sa masse volumique spécifique est de 2720 kg/m<sup>3</sup>.

### 2.2.4. Gravier RAP

Un frisât de chaussée (RAP) provenant de l'entretien du réseau routier âgé de plus de 15 ans et récupéré du centre-ville de la commune de Chlef, a été utilisé dans cette étude pour remplacer le gravier naturel. Les granulats extraits ont été passé au tamis 5 mm et 16 mm afin de ne sélectionner que ceux dont la taille se situe entre 4 mm et 15 mm. Par la suite, ces granulats ont été lavés pour éliminer les particules fines. La figure 2.1 présente les granulats utilisés dans cette étude et la figure 2.2 montre leur analyse granulométriques.

Les granulats RAP ont un coefficient de Los Angeles de 26 qui est légèrement inférieur à celui du GN et une masse volumique spécifique 2650 kg/m<sup>3</sup>.



(a) GN



(b) RAP

Figure 2. 1. Granulats utilisés (GN et RAP).

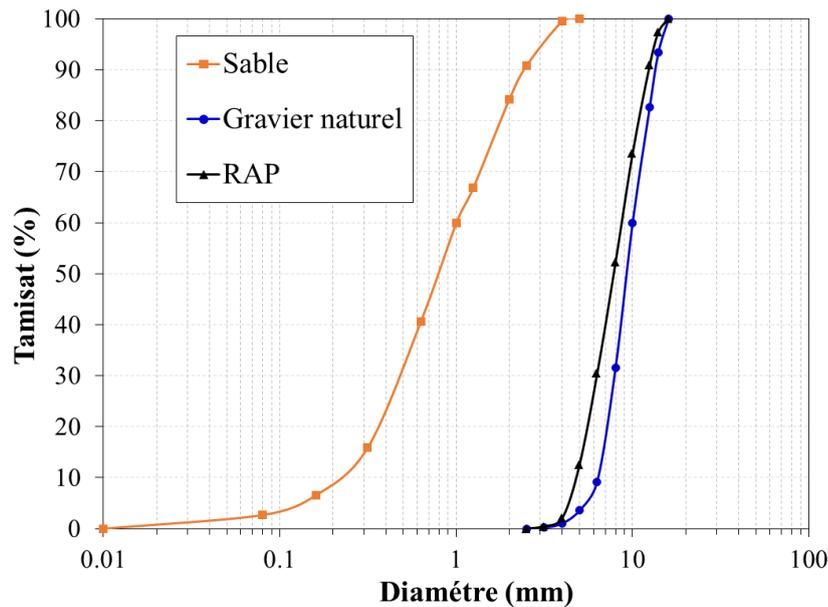


Figure 2. 2. Analyse granulométrique des granulats.

Les résultats de la caractérisation physique et mécanique des granulats sont présentés dans le tableau 2.2.

Dans cette étude, le RAP présentait un coefficient de Los Angeles légèrement inférieur à celui du GN et une absorption d'eau supérieur à celles du GN.

Tableau 2. 2. Caractérisation physique et mécanique des granulats.

	Sable	Gravier	RAP
Module de finesse	2.79	/	/
Masse volumique absolue (kg/m <sup>3</sup> )	2670	2720	2650
Masse volumique apparente (kg/m <sup>3</sup> )	1580	1450	1230
Equivalent de sable (%)	87	/	/
Absorption d'eau (%)	1.60	0.2	1.56
Coefficient de Los Angeles (%)	/	28	26
Coefficient de fragmentation dynamique (%)	/	19	17

### 2.2.5. Teneur en bitume des granulats RAP

Pour déterminer la teneur en bitume du RAP, l'essai Kumagawa conforme à la norme NF EN 1428 [132] a été réalisé, afin de déterminer la quantité de bitume qui recouvre les granulats RAP. Cette analyse a été menée au sein du laboratoire LCTP de Chlef.

L'appareillage de l'essai Kumagawa est composé, d'un chauffe ballon avec régulateur incorporé 220 V, un ballon, un Dean Stark, un réfrigérant, un panier métallique, noix et pinces, cartouches (Figure 2.3).

L'essai consiste à extraire le bitume du RAP à chaud en utilisant un solvant qui forme un mélange azéotropique avec l'eau. Le poids du liant est calculé par différence entre celui de l'échantillon et celui du granulat et de l'eau. Le matériau à tester est chauffé avec un solvant non miscible à l'eau. Le solvant condensé et le bitume sont séparés en continu dans un piège, le bitume se dépose dans la section graduée du piège et le solvant retourne dans l'alambic.

Le résultat de l'essai a donné une teneur en bitume de 4 %. Cette valeur est similaire aux résultats trouvés par d'autres chercheurs [28, 36, 39, 57, 117], qui ont rapporté que le pourcentage d'asphalte varie de 2 à 7.5 % (en masse). La teneur en bitume dépend de plusieurs facteurs, tels que la fraction du RAP, la teneur initiale en asphalte, la méthode d'extraction utilisée, la durée de stockage et de service.



Figure 2. 3. Essai Kumagawa.

### 2.3. Formulation des bétons

La formulation du béton consiste à définir le mélange optimal des différents granulats, ainsi que le dosage en ciment et en eau, afin de réaliser un béton dont les qualités soient celles recherchées, en particulier l'ouvrabilité et la résistance mécanique.

Cette étude visait à analyser les impacts des granulats RAP issus de béton bitumineux sur le béton de ciment. Pour ce faire, cinq formulations ont été préparées. Un mélange avec 100% de gravier naturel conçu comme béton témoin et quatre mélanges avec le RAP qui remplace le volume du gravier naturel avec des taux de 25%, 50%, 75% et 100%.

Toutes les formulations ont un même rapport (eau/ciment) E/C de 0.57. Il convient de noter qu'aucun adjuvant chimique n'a été incorporé dans les mélanges.

Le tableau 2.3 montre les proportions de tous les mélanges préparés.

Tableau 2. 3. Composition des bétons testés (kg/m<sup>3</sup>).

<b>Bétons</b>	<b>Ciment</b>	<b>Eau</b>	<b>Sable</b>	<b>GN</b>	<b>RAP</b>
BGN	400	228	745	968	0
BRAP-25	400	228	745	726	236
BRAP-50	400	228	745	484	472
BRAP-75	400	228	745	242	707
BRAP-100	400	228	745	0	943

### 2.4. Gâchage et malaxage

Après la préparation des quantités nécessaires de matériaux, les constituants du béton ont été introduits par ordre décroissant de granulométrie dans un malaxeur rotatif d'une capacité de 100 litres.

La durée totale de malaxage est de 03 minutes. Une première minute de malaxage à sec des granulats et du ciment, suivi de deux minutes de malaxage humide après l'ajout d'eau, conformément à la norme NF P 18-404 [133]. La vibration des éprouvettes a été réalisée à l'aide d'une table vibrante (Figure 2.4).



Figure 2. 4. Vibration des éprouvettes.

Après le coulage, les éprouvettes sont revêtues d'une bâche mouillée pour éviter leur évaporation d'eau au très jeune âge. Après 24 heures, les échantillons sont démoulés et placés en immersion dans un bac thermostatique et saturé de chaux, à une température stable de 20 °C, et cela jusqu'au jour de réalisation de l'essai (Figure 2.5). La présence de chaux dans le bac thermostatique pour éviter le phénomène de lixiviation.



Figure 2. 5. Conservation des éprouvettes.

## 2.5. Essais sur béton frais

### 2.5.1. Masse volumique

La masse volumique du béton frais a été déterminée conformément à la norme NF EN 12350-6 [134], en mettant du béton frais dans un récipient de volume ( $V = 5 \text{ l}$ ) et de masse ( $m_1$ ), puis en pesant le tout, c'est-à-dire la masse ( $m_2$ ). La formule suivante permet de calculer la masse volumique ( $M_v$ ) du béton frais.

$$M_v = \frac{m_2 - m_1}{V} \quad (\text{kg/m}^3) \quad (2.1)$$

### 2.5.2. Affaissement au cône d'Abrams

L'essai d'affaissement du béton est effectué conformément aux prescriptions de la norme NF EN 12350-2 [135]. Cet essai de mesure de consistance est le plus utilisé. Le cône a un diamètre intérieur à sa base de 200 mm, un diamètre intérieur à son sommet de 100 mm et une hauteur de 300 mm. Placé sur une surface lisse, le cône est rempli de béton en trois couches. Chacune des couches est compactée avec 25 coups d'une tige métallique normalisée de 16 mm de diamètre, dont l'extrémité est arrondie. Une fois le cône rempli, le dessus de la surface doit être arasé en se servant de la tige.

Après remplissage, le cône est relevé lentement et le béton s'affaisse, la différence entre la hauteur du béton affaissé et la hauteur du cône est appelée l'affaissement comme montré sur la figure 2.6.



Figure 2. 6. Essais affaissement au cône d'Abrams.

### 2.5.3. Rhéologie des bétons

L'essai au cône d'Abrams est l'essai le plus utilisé dans le monde pour sa simplicité, mais il demeure une mesure statique ne mesurant qu'un seul paramètre et ne donne pas une bonne indication sur la rhéologie du béton.

La rhéologie est une science qui traite l'écoulement des fluides sous l'effet de contraintes appliquées. Les matériaux fluides sont caractérisés par deux paramètres rhéologiques : le seuil de cisaillement et la viscosité plastique.

L'évolution du comportement rhéologique des bétons est suivie à l'aide d'un rhéomètre ICAR avec une géométrie Vane. Cet appareil mesure le couple nécessaire au cisaillement du béton frais et fonctionne à une vitesse de cisaillement contrôlée.

Le seuil de cisaillement (Pa) et la viscosité (Pa.s) sont fournis directement par un logiciel utilisé pour piloter le rhéomètre. La figure 2.7 présente le rhéomètre ICAR. La Vane utilisée est composée de quatre pales d'une épaisseur de 2 mm. Chaque pale mesure 12.5 cm de hauteur et 12.5 cm de diamètre enveloppée dans du béton et cisailé avec un protocole défini. le béton est versé dans une cuve de 20 litres. Après cela, le croisillon est placé au milieu du béton, créant un entrefer de 20 mm entre la vanne et les parois latérales.



Figure 2. 7. Rhéomètre ICAR.

## 2.6. Propriétés mécaniques du béton durci

Pour l'étude de l'évolution mécanique des bétons étudiés, on a mesuré la résistance à la compression sur des éprouvettes cubiques 10x10x10 cm à un âge de 3, 7, 14, 28, et 90 jours et la résistance à la flexion sur des éprouvettes prismatiques 7x7x28 cm à un âge de 7, 14, 28, et 90 jours. Le module d'élasticité est mesuré sur des éprouvettes cylindriques 15x30 cm à l'âge de 28 jours. Une heure avant chaque essai mécanique, les éprouvettes sont ressorties du bac et mises à l'air libre sous les conditions ambiantes du laboratoire.

### 2.6.1. Résistance à la compression

L'essai de résistance à la compression des bétons a été effectué selon la norme NF EN 12390-3 [136], à l'aide d'une presse hydraulique de capacité 3000 kN (Figure 2.8). L'éprouvette cubiques 10x10x10 cm est placée et centrée entre les deux plateaux de la presse puis chargée progressivement avec une vitesse constante de 0.5 MPa/s jusqu'à la rupture. Les résultats de la résistance en compression correspondent à la contrainte moyenne d'écrasement de trois éprouvettes à chaque âge d'essai.



Figure 2. 8. Essai de résistance à la compression.

### 2.6.2. Résistance à la traction par flexion

La résistance à la traction par flexion est déterminée sur des éprouvettes prismatiques 70x70x280 mm à l'aide d'une machine de flexion trois points d'une capacité de 200 kN, conformément à la norme NF EN 12390-5 [137] (Figure 2.9). La mise en charge est effectuée à une vitesse constante.

La contrainte de flexion est calculée par la formule suivante :

$$f_t = \frac{3FL}{2a^3} \quad (2.2)$$

$f_t$ : résistance à la flexion exprimée en MPa.

F : force de rupture exprimée en N.

a : dimension de la section (a = 70 mm).

L : distance entre appuis (L = 210 mm).



Figure 2. 9. Essai de traction par flexion trois points.

### 2.6.3. Module d'élasticité

Le module d'élasticité des bétons est mesuré à 28 jours sur des cylindres 150x300 mm selon la norme ASTM C-469 [138], à l'aide d'un extensomètre qui permet de mesurer la déformation du cylindre soumis à une compression axiale (Figure 2.10).



Figure 2. 10. Essai de mesure du module d'élasticité.

Le module d'élasticité  $E$  est calculé selon la relation suivante [138] :

$$E = (\sigma_2 - \sigma_1) / (\varepsilon_2 - 0.00005) \quad (2.3)$$

Avec :

$\sigma_2$  : Contrainte de compression correspondante à 40 % de la charge de rupture en MPa;

$\sigma_1$  : Contrainte de compression correspondant à la déformation 0.05 %;

$\varepsilon_2$  : Déformation longitudinale produite correspondante à la contrainte  $\sigma_2$ .

Afin de garantir la fiabilité des résultats, les surfaces sur lesquelles s'applique la charge doivent être planes et parallèles. Les cylindriques ont été soumis à une rectification mécanique des deux faces transversales à l'aide d'une rectifieuse électrique à disque abrasif (Figure 2.11).



Figure 2. 11. Surfaçage des éprouvettes cylindriques.

#### **2.6.4. Auscultation dynamique**

L'utilisation de techniques non destructives offre de nombreux avantages dans les activités de diagnostic des bâtiments en termes de durabilité. La vitesse des ondes ultrasoniques à travers le béton est déterminée par le temps mis par les ondes pour traverser l'échantillon de béton. Cette vitesse dépend fortement du module d'élasticité des granulats et de leur quantité dans le béton.

Cet essai consiste à déterminer la vitesse de propagation d'ondes sonique à l'intérieur d'une éprouvette en béton conformément à la norme NF EN 12504-4 [139] (Figure 2.12). L'essai a été effectué sur des éprouvettes cubiques 100x100x100 mm à 3, 7, 28 et 90 jours.

L'émetteur et le récepteur sont appliqués sur les deux faces de l'éprouvette. Les impulsions sont produites par des cristaux piézo-électriques à excitation par choc. La fréquence de générateur d'ondes est comprise entre 10 et 150 HZ, le temps de propagation des ondes dans le béton est mesuré par des circuits de mesure électroniques.

La vitesse de propagation du son est calculée par la formule suivante :

$$V = d/t \text{ (m/s)} \quad (2.4)$$

d : distance entre face de l'éprouvette mesurée en mètre (m).

t : temps de propagation d'onde en second (s).



Figure 2. 12. Appareil de mesure de la vitesse d'impulsion.

## 2.7. Microstructure

Le microscope électronique à balayage (MEB) a été réalisé au niveau du CRAPC de Laghouat, est utilisé conformément à la norme ASTM C 1723 [140] pour analyser les zones de transition interfaciales (ITZ), évaluer l'état de transition entre les granulats et la pâte de ciment et détecter les fissures et les pores dans la pâte de ciment.

Un échantillon cylindrique de 20×30 mm est utilisé dans l'essai, comme l'indique la figure 2.13. Pour obtenir une excellente clarté, même à un grossissement extrême, l'échantillon est nettoyé à l'acétone puis séché avant d'être placé sur une diapositive et dans la chambre d'observation.

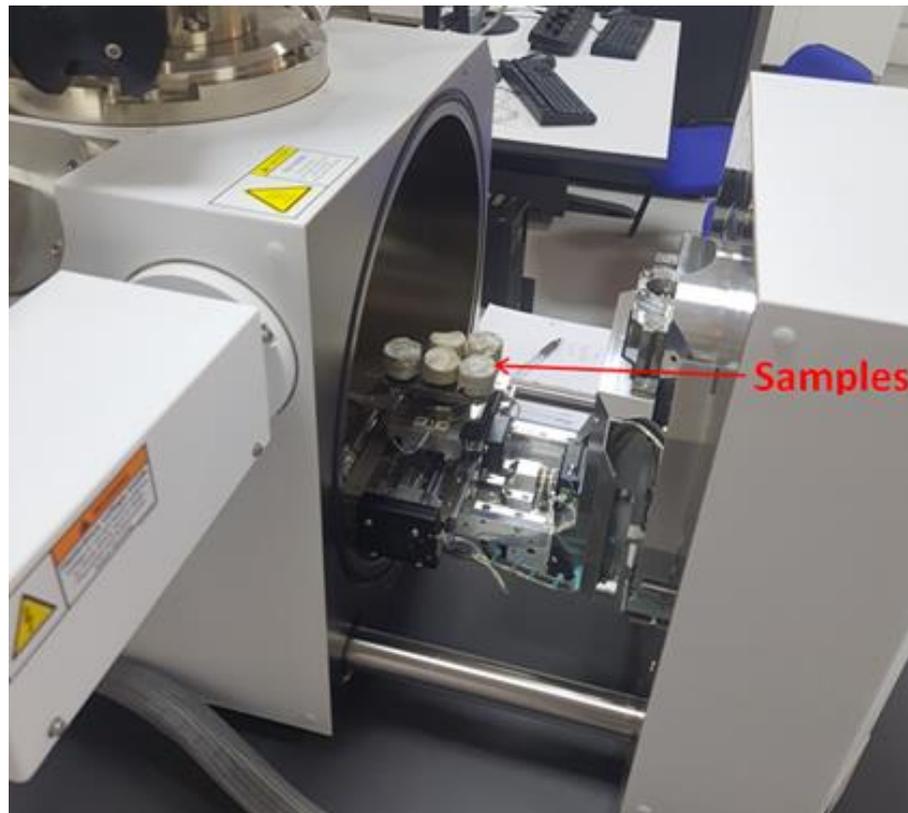


Figure 2. 13. Essai de microscope électronique à balayage (MEB).

## 2.8. Durabilité

### 2.8.1. Absorption capillaire

L'essai est effectué conformément aux prescriptions de la norme ASTM C1585-11 [141]. L'essai a été réalisé à 28 et 90 jours sur des échantillons prismatiques 70x70x280 mm. Préalablement, les éprouvettes ont été séchées dans une étuve ventilée à 50 °C, jusqu'à atteindre une masse constante ( $\Delta M < 0.1 \%$  en 24 heures). Les faces latérales des éprouvettes ont été revêtues d'une fine couche de résine pour garantir un écoulement unidirectionnel de l'eau et éviter l'évaporation latérale de l'eau absorbée.

L'objectif de cet essai est de suivre l'évolution de la masse d'eau absorbée des éprouvettes plongées à une profondeur de 5 mm dans l'eau (Figure 2.14).

Pour calculer le pourcentage d'eau absorbée, les éprouvettes sont retirées du récipient, essuyées à l'aide d'une éponge, puis pesées avec une balance de précision de 0.01 g puis relancées dans le récipient. Les échéances de mesure sont les suivantes : 0 mn, 8 mn, 17 mn, 24 mn, 35 mn, 42 mn, 60 mn, 90 mn et 1440 mn.

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

$$Ca = \frac{(M_t - M_0)}{A} \quad (2.5)$$

Où :

Ca : absorption capillaire (g/mm<sup>2</sup>) ;

M<sub>t</sub> : Masse de l'éprouvette après immersion pendant un temps t, en g.

M<sub>0</sub> : Masse de l'éprouvette après séchage à la sortie de l'étuve en g.

A : Surface brute de la face de l'éprouvette immergée dans l'eau en mm<sup>2</sup>, A = 4900 mm<sup>2</sup>.

L'absorption capillaire de l'eau est calculée en fonction de la racine carrée du temps [117]. Le coefficient de sorptivité (S) du béton est déterminé par l'expression suivante :

$$\frac{Q}{A} = S\sqrt{t} \quad (2.6)$$

Q : quantité d'eau absorbée en (g),

A : surface de spécimen en contact avec l'eau en cm<sup>2</sup> (A = 49 cm<sup>2</sup>),

t : temps en minute (min).

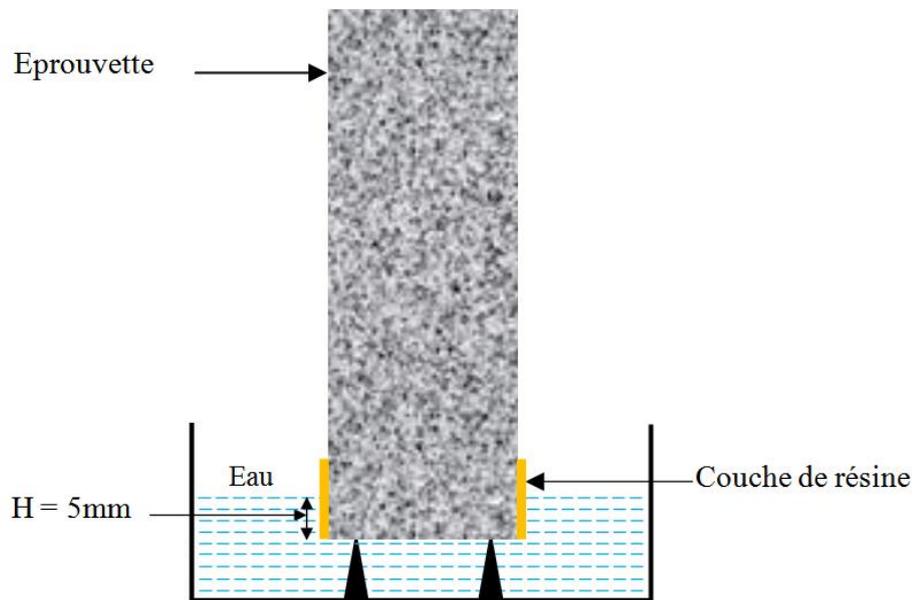


Figure 2. 14. Essai d'absorption capillaire.

### 2.8.2. Absorption par immersion

L'absorption d'eau par immersion est le résultat des mouvements capillaires dans les pores du béton qui sont ouverts sur le milieu ambiant. Elle est déterminée par immersion dans un bac d'eau d'une éprouvette de béton dans l'eau jusqu'à obtention d'une une masse

constante, conformément à la norme NF EN 206-1 [142]. Elle est exprimée en pourcentage de la masse sèche de l'éprouvette. Etant qu'indice de la porosité, l'absorption d'eau est utilisée comme un indicateur de la qualité du béton.

L'absorption d'eau par immersion est exprimée en pourcentage de la masse sèche et est calculée par la relation suivante :

$$Abs = \frac{m_h - m_s}{m_s} \times 100 \quad (2.7)$$

Où :  $M_h$  : Masse de l'éprouvette après immersion en g.

$M_s$  : Masse de l'éprouvette après séchage en g.

### 2.8.3. Perméabilité à l'eau

La détermination de la profondeur de pénétration d'eau sous pression est essentielle dans des situations où il y a présence d'une pression d'eau, comme dans le cas des tunnels, des stations d'épuration des eaux usées, des garages souterrains, et des caves, etc.

L'essai de perméabilité à l'eau a été réalisé conformément à la norme NF EN 12390-8 [143]. Des éprouvettes cylindriques 150×150 mm ont été soumises à un test de perméabilité sous une pression constante d'eau (5 bars) pendant une durée de 72 heures (Figure 2.15).

Les tests de perméabilité à l'eau ont été réalisés à 28 jours et 90 jours d'âge, la pression est appliquée sur la surface inférieure, au centre d'éprouvette.

Après 72 heures de l'application de la pression, les éprouvettes sont divisées en deux parties à l'aide de l'essai de fendage. On mesure ensuite la profondeur de pénétration de l'eau à l'aide d'un pied à coulisse. Le tableau 2.4 présente les valeurs limites de l'essai de perméabilité à l'eau.

Tableau 2. 4. Echelle pour l'essai de perméabilité à l'eau [144].

Pénétration d'eau	Perméabilité à l'eau
< 30 mm	Faible
30 – 60 mm	Moyenne
> 60 mm	Elevée



Figure 2. 15. Essai de perméabilité à l'eau.

#### **2.8.4. Perméabilité aux ions chlore**

La pénétration des ions chlore dans le béton est évaluée par la méthode de pénétrabilité conformément à la norme ASTM C1202 [145]. Cet essai est effectué sur des éprouvettes cylindriques en béton de diamètre 100 mm et d'épaisseur 50 mm, à un âge de 28 jours. Avant chaque essai, les éprouvettes sont préalablement saturées dans l'eau à une température de à 20 °C.

L'éprouvette est positionnée dans une cellule de manière à ce qu'une de ses faces soit en contact avec une solution de chlorure de sodium (3 % de NaCl soit 30 g/l), dans laquelle se trouve une électrode émettrice (cathode). L'autre face de l'éprouvette est en contact avec une solution d'hydroxyde de sodium (0.3N NaOH soit 12 g/l), dans laquelle se trouve une autre électrode qui boucle le circuit (anode), comme le montre la figure 2.16.

L'essai consiste à appliquer entre les deux faces de l'éprouvette une différence de potentiel de 60 V pendant une période de 6 heures. La résistance du béton à la pénétration des ions chlorure est exprimée par la charge électrique totale (coulombs) qui traverse

l'échantillon. Les valeurs limites de la charge électrique totale passante sont répertoriées dans le tableau 2.5.

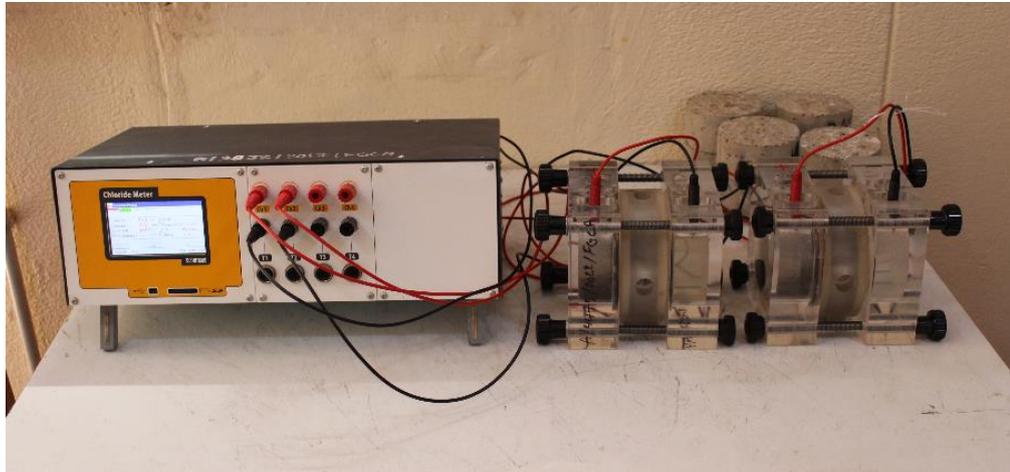


Figure 2. 16. Essai de perméabilité aux ions chlore.

Tableau 2. 5. Echelle pour l'essai de perméabilité aux ions chlore [145].

Charge passée (coulombs)	Perméabilité des ions chlore
$\geq 4000$	Haute
2000 - 4000	Modéré
1000 - 2000	Faible
100 - 1000	Très lent
$\leq 100$	Négligeable

## 2.9. Déformations différées

### 2.9.1. Retrait

Les éprouvettes destinées au retrait sont coulées dans des moules prismatiques 100×100×400 mm, munis de deux plots espacés de 30 cm. Pour éviter toute évaporation prématurée à un âge très précoce, les éprouvettes sont recouvertes d'une toile de jute humide. Elles sont ensuite conservées dans le laboratoire à une température constante de 20 °C ± 2 et à une humidité relative de 90 % ± 5. Après 24 heures, les éprouvettes sont démoulées, et préparées pour les mesures de retrait total.

Les éprouvettes sont munies d'une mince couche de bitume entourée d'une bande adhésive aux deux bouts pour éviter les effets de bord et assurer un milieu sans échange hydrique avec le milieu extérieur. Par la suite, elles sont conservées dans des étuves à vapeur maintenues en position verticale à différentes températures de cure 20 °C, 40 °C et 60 °C, comme le montre la figure 2.17.



Figure 2. 17. Mesure du retrait.

Les paramètres testés dans ce travail et leurs niveaux sont présentés dans le tableau 2.6.

Tableau 2. 6. Paramètres d'études.

Paramètres	Variation
Type de béton	BGN, BRAP-25, BRAP-50, BRAP-75, BRAP-100
Température de cure (°C)	20, 40, 60

Les mesures du retrait sont prises à l'aide d'un comparateur digital de précision 1 µm comme illustré dans la figure 2.18. Ces mesures sont prises selon quatre échéanciers [146] :

- 1<sup>e</sup> échéancier : deux fois par jour la première semaine ;
- 2<sup>e</sup> échéancier : une fois par jour pendant trois semaines ;
- 3<sup>e</sup> échéancier : une fois par semaine pendant deux mois ;
- 4<sup>e</sup> échéancier : une fois par mois pendant trois mois.

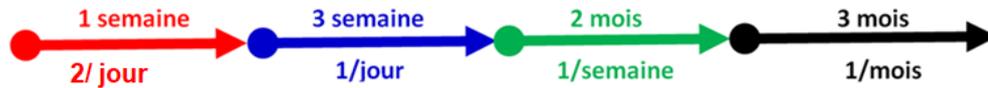


Figure 2. 18. Chronologie de mesure du retrait.

Les valeurs mesurées correspondent à la moyenne des résultats obtenus sur trois éprouvettes fabriquées à partir d'un même mélange et conservées dans les mêmes conditions. Il a été constaté que la variation des erreurs ne dépasse pas 5% pour toutes les mesures [147]. L'ensemble des mesures de retrait est effectué dans les mêmes conditions atmosphériques.

La déformation de retrait est déterminée par la formule suivante :

$$\varepsilon(t) = \frac{\Delta L}{L} \quad (2.8)$$

Avec :

$\varepsilon$  : Déformation de retrait exprimée en  $\mu\text{m}/\text{m}$ .

$\Delta L$  : Variation de longueur exprimée en  $\mu\text{m}$ .

$L$  : Longueur initiale entre les deux plots.

### 2.9.2. Fluage

Dans le but d'étudier le phénomène de fluage en flexion, cinq poutres en béton armé de section rectangulaire de  $10 \times 10$  cm et d'une longueur de 2.40 m entre les appuis ont été préparées.

Le ferrailage longitudinal dans la zone comprimée est de  $2\phi 6$  est situé à 4 cm de l'axe neutre et de  $2T8$  dans la zone tendue est situé à 4 cm de l'axe neutre. Les cadres ( $\phi 4$ ) sont espacés de 10 cm pour toutes les poutres. Le schéma de ferrailage des poutres est représenté sur les figures 2.19 et 2.20.

Les corps d'épreuves sont confectionnés au laboratoire. Les cinq poutres sont coulées avec différentes compositions de béton (BGN, BRAP-25, BRAP-50, BRAP-75, BRAP-100). Pour le compactage, une aiguille vibrante a été utilisée, et l'affaissement est mesuré à chaque coulage avec le cône d'Abrams pour vérifier la conformité aux spécifications des bétons étudiés.

En parallèle, des échantillons sont prélevés de chaque béton coulé afin de contrôler et vérifier sa composition. Il s'agit d'éprouvettes cubiques de 10 cm pour évaluer la résistance à

la compression et d'éprouvettes prismatiques 7×7×28 cm pour le contrôle de la résistance à la traction par flexion.

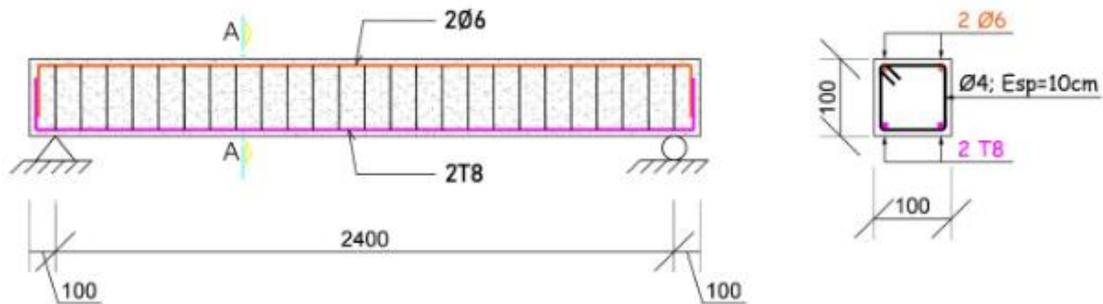


Figure 2. 19. Ferrailage des poutres.



Figure 2. 20. Coffrage des poutres.

Les poutres sont conservées à une température de  $20 \pm 2$  °C et une humidité relative de  $90 \pm 5$  % dans l'attente de l'essai de fluage à 28 jours. Les poutres sont protégées contre la dessiccation tout au long de cette période.

Pour les essais de fluage, une contrainte de flexion constante de 2.25 MPa est appliquée à chaque poutre, correspondant à un taux de chargement de 45 % de la charge ultime. Les charges appliquées pour chaque type du béton sont présentées dans le tableau 2.7 et la figure 2.21 sans tenir compte du poids propre de la poutre.

Tableau 2. 7. Chargement appliqué à chaque poutre.

Type de béton	BGN	BRAP-25	BRAP-50	BRAP-75	BRAP-100
Charge (kg/ml)	35.41	33.33	32.08	28.85	27

La flèche de chaque poutre est mesurée à mi-travée à l'aide d'un comparateur de précision de 0.01 mm, comme illustré dans la figure 2.22.

Pour la mesure les déformations de fluage, des plots métalliques espacés de 30 cm sont fixés sur la partie comprimée et tendue latérales des poutres. Un comparateur digital de précision 1  $\mu$ m de précision est utilisé pour mesurer les déformations.



Figure 2. 21. Poutres chargées.



Figure 2. 22. Mesure des déformations du fluage et de la flèche.

Les mesures des déformations sont effectuées à deux endroits de chaque poutre :

- A la fibre supérieure située à 4 cm de l'axe neutre (zone comprimée) pour mesurer le fluage en compression.
- A la fibre inférieure située à 4 cm de l'axe neutre (zone tendue) pour mesurer le fluage en traction.

Le comparateur est systématiquement remis à zéro avant chaque série de mesure à l'aide du bouton étalon et le "zéro" est régulièrement vérifié au cours d'une même série. Une série de relevés correspond à une même échéance et consiste à mesurer les déformations sur l'ensemble des poutres de fluage pour une campagne expérimentale donnée.

Ces mesures sont prises selon quatre échéanciers [148]:

- 1<sup>e</sup> échéancier : Deux fois par jour pendant la première semaine ;
- 2<sup>e</sup> échéancier : Une fois par jour pendant deuxième semaine ;
- 3<sup>e</sup> échéancier : une fois par semaine pendant quatre mois ;
- 4<sup>e</sup> échéancier : une fois par mois jusqu'à la stabilisation ;

Il est à noter que pour une même base de mesure, vingt mesures sont répétées avec remise à zéro systématique du comparateur avant chaque mesure, l'écart entre la valeur maximale et minimale mesurée ne dépasse pas 2  $\mu\text{m}$ . Par convention.

La déformation de fluage en compression ou en traction est déterminée par la formule suivante :

$$\text{Déformation de fluage} = (L_i - L_0)/L_0 \quad (2.9)$$

Où :

$L_0$  : mesure de référence (soit la longueur mesurée lors de la première échéance),

$L_i$  : mesure relevée à un instant t.

Concernant la déformation instantanée du fluage, il faut préconiser que celle-ci doit être mesuré 24 heures après la mise en charge pour chaque poutre.

Parallèlement aux mesures de déformations, on a mesuré la flèche qui représente la dénivelée verticale de la poutre sous chargement. Ces mesures sont prises en un seul point à mi- portée de la poutre par des comparateurs de précision de 0.01 mm, fixés sur des supports magnétiques.

## **2.10. Conclusion**

Ce travail expérimental a pour objectif de mettre en évidence l'influence du remplacement de gravier naturel par le RAP sur les propriétés physico-mécaniques, durabilité et les déformations différées des BRAP. Ce travail a été fait en plusieurs étapes :

- Préparation et caractérisation des granulats.
- Formulations des bétons contenant 0 %, 25 %, 50 %, 75 % et 100 % de RAP.
- Essais sur bétons frais (ouvrabilité, densité, rhéologie).
- Essais mécaniques sur bétons durcis (compression, flexion et module d'élasticité).
- Essais de durabilité (absorption d'eau, perméabilité à l'eau et diffusion des ions chlore).
- Essais de retrait et fluage.
- Modélisation numérique du retrait.

---

**Chapitre 03 :**  
**Analyse des résultats expérimentaux**

---

## Chapitre 03 : Analyse des résultats expérimentaux

### 3.1. Introduction

Dans ce chapitre on présentera les résultats des essais des bétons à l'état frais et durci, à savoir l'ouvrabilité, la rhéologie, la résistance à la compression, la résistance à la traction par flexion et le module d'élasticité pour tous les mélanges ainsi que les résultats de l'essai de durabilité (absorption capillaire, absorption par immersion, perméabilité à l'eau et essai de perméabilité aux ions Chlore) et les déformations différées (le retrait et le fluage).

### 3.2. Influence du RAP sur les propriétés du béton frais

#### 3.2.1. Influence du RAP sur la masse volumique du béton frais

La figure 3.1 montre l'évolution de la masse volumique du béton frais en fonction du taux des RAP. On observe que la densité du béton frais diminue avec la substitution successive des granulats naturels par les granulats RAP. Cette diminution a été principalement attribuée à la faible densité des granulats RAP. Généralement, le RAP a une densité spécifique inférieure à celle des granulats naturels, de l'ordre de 2.1 à 2.65 par rapport à la densité spécifique des granulats naturels comprise entre 2.4 et 2.9.

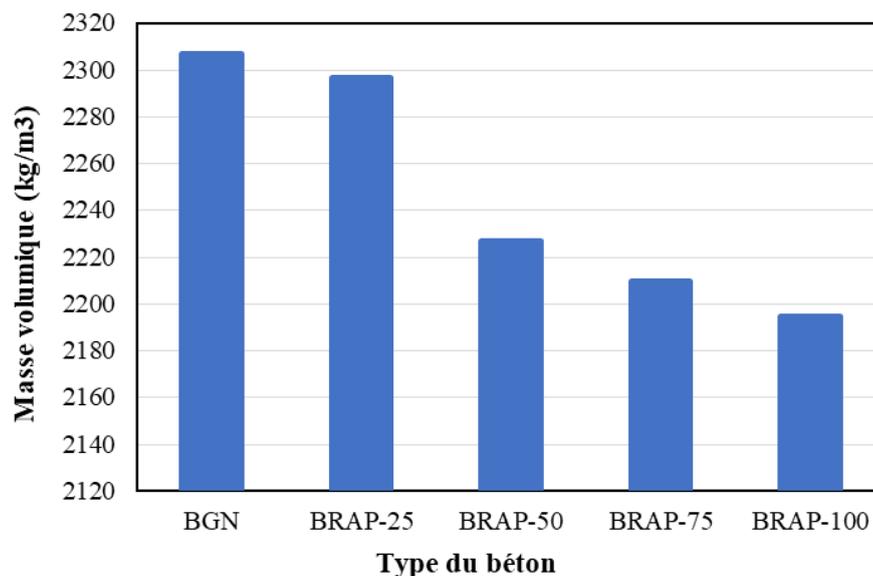


Figure 3. 1. Masse volumique des bétons frais.

### 3.2.2. Influence du RAP sur l'affaissement du béton

La figure 3.2 présente les valeurs de l'affaissement des différents types bétons. Chaque résultat est la moyenne de trois mesures. Les résultats montrent une diminution de l'ouvrabilité lorsque les granulats naturels sont remplacés par les granulats RAP. L'affaissement le plus élevé 180 mm a été observé pour le béton à base de granulats naturels (BGN), tandis que le plus bas 120 mm a été enregistré pour le béton avec 100% RAP (BRAP-100). Les valeurs d'affaissement pour les mélanges avec 25% RAP, 50% RAP et 75% RAP sont respectivement 170 mm, 160 mm et 150 mm.

La diminution de la valeur d'affaissement du béton fabriqué avec des granulats RAP est attribuée à la viscosité élevée de l'asphalte qui entoure les granulats naturels.

De nombreuses études ont trouvé des résultats similaires. Il a été observé que les inclusions de RAP peut réduire la valeur d'affaissement des BRAP par rapport au mélange de contrôle [29, 77, 98].

Erdem et Blankson [51] ont indiqué qu'il est difficile d'interpréter l'ouvrabilité des bétons réalisés avec des granulats RAP. En effet, le RAP est constitué de particules grossières angulaires et de sable ; tous deux entièrement ou partiellement enrobés de bitume. Lors du malaxage, les particules de granulats et de sable sont exposées lorsque le bitume se sépare des particules granulaires, entraînant ainsi une augmentation de la capacité d'absorption des granulats RAP.

La présence de poussières contaminantes dans les granulats RAP, qui absorbe plus d'eau que les granulats naturels, peut être à l'origine de la réduction de l'affaissement du béton [28].

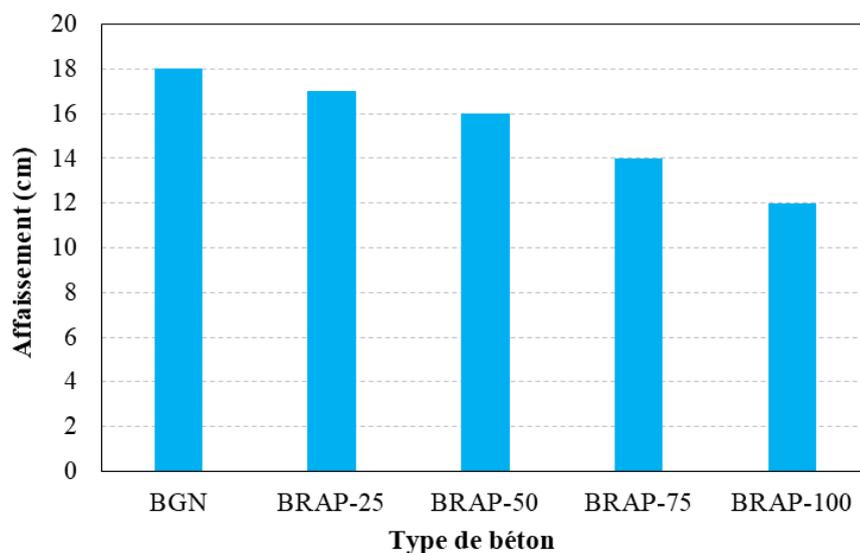


Figure 3. 2. Affaissement des différents bétons.

### 3.2.3. Influence du RAP sur la rhéologie des bétons

Les résultats des essais de rhéologie des bétons (seuil de cisaillement et la viscosité plastique) pour les différents taux de remplacement des RAP sont illustrés dans les figures 3.3 et 3.4, respectivement.

On remarque que l'augmentation du taux RAP dans le béton entraîne une augmentation du seuil de cisaillement et de la viscosité plastique. Cette observation peut être attribuée à la nature plus visqueuse de l'enrobage bitumineux autour des granulats RAP.

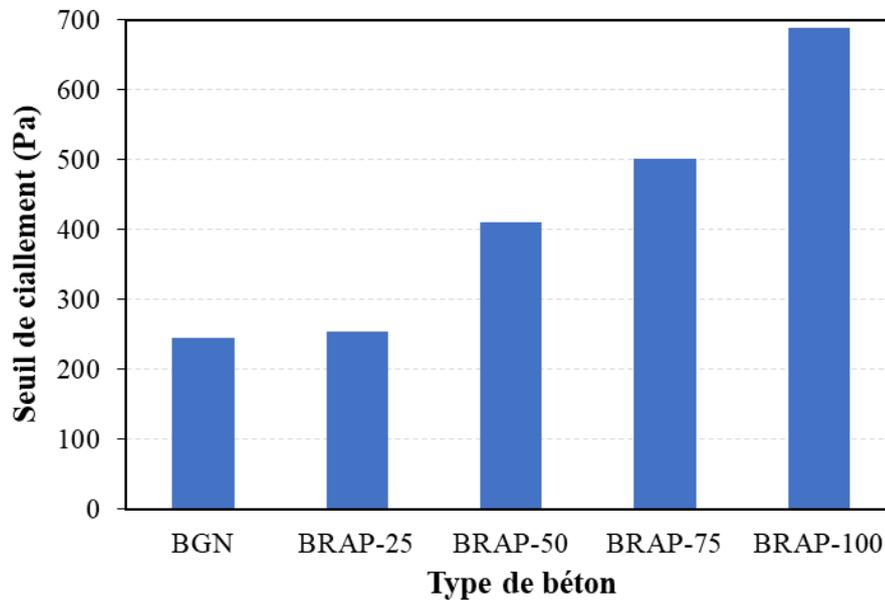


Figure 3. 3. Seuil de cisaillement des bétons.

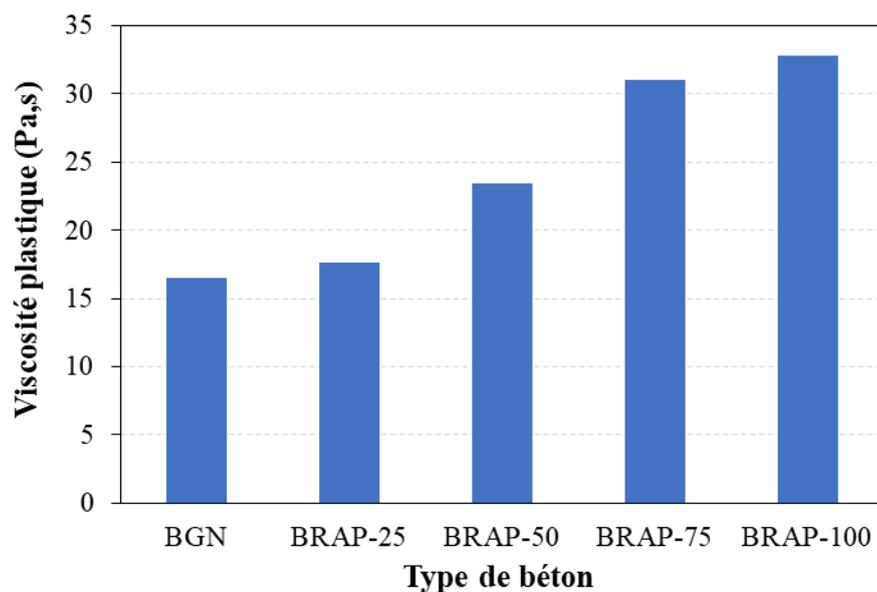


Figure 3. 4. Viscosité plastique des bétons.

### 3.3. Influence du RAP sur les propriétés du béton durci

#### 3.3.1. Influence du RAP sur la résistance à la compression

La figure 3.5 montre la variation de la résistance à la compression en fonction du taux de remplacement du gravier naturel par le RAP à 3, 7, 14, 28 et 90 jours.

On peut observer que la variation de la résistance à la compression avec les différents pourcentages de RAP est significative. Les résultats montrent que la résistance à la compression diminue avec l'augmentation du taux de remplacement du GN.

A 28 jours, les pourcentages de réduction des mélanges BRAP par rapport au béton de contrôle BGN sont de 9 % pour BRAP-25, 20 % pour BRAP-50, 29 % pour BRAP-75 et 37 % pour BRAP-100.

A 3, 7, 28 et 90 jours, la perte de résistance pour le BRAP-100 est respectivement de 35 %, 32 %, 37 % et 34 % par rapport au béton de référence (BGN).

Cependant, il convient de noter qu'un niveau de remplacement de 25 % de RAP a un effet négligeable sur la résistance à la compression. Au-delà de 50% de RAP, une perte considérable de résistance à la compression se produit. Cette perte est due à la présence d'une couche d'asphalte entourant les granulats RAP et aux problèmes causés par l'agglomération du RAP [26].

Dans le béton, la résistance à la compression dépend étroitement de la qualité de la zone de transition interfaciale entre le granulat et la pâte de ciment. La qualité de cette zone dépend en grande partie de sa porosité, souvent plus importante que la porosité de la matrice cimentaire [149, 150].

La présence d'une couche d'asphalte sur le matériau RAP crée une faible zone de transition interfaciale (ITZ) entre le matériau RAP et la nouvelle pâte de ciment, ce qui réduit la résistance à la compression [69]. Selon Wongkvanklom et al. [84], la résistance à la compression diminue lorsque la quantité de RAP augmente, en raison de la faible adhérence entre le mortier de ciment et le RAP, dont la surface est recouverte d'une couche de bitume. De plus, la caractéristique hydrophobe de l'asphalte repousse l'eau formée autour du granulat dans le mélange frais, ce qui augmente la porosité et entraîne un affaiblissement de l'ITZ dans le BRAP [110].

Des résultats similaires ont été obtenus par plusieurs chercheurs [24, 36, 43, 57, 97, 100, 103]. Huang et al. [24] ont rapporté que la présence de RAP entraîne une réduction de la

résistance à la compression de 70 % pour un béton avec 100% de RAP. Debbarma et al. [36] ont signalé que la résistance à la compression pouvait diminuer d'environ 26 % à 67 % avec l'utilisation du RAP.

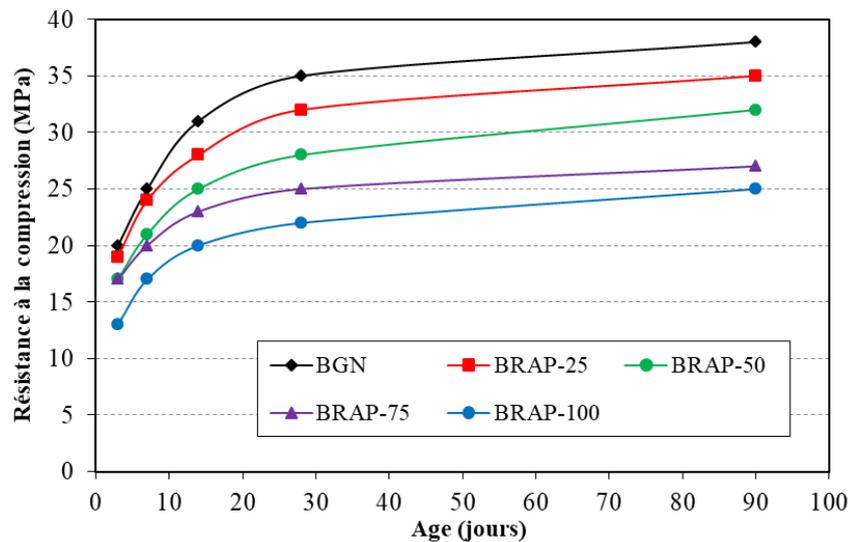


Figure 3. 5. Résistance à la compression des bétons.

### 3.3.2. Courbes contraintes-déformations

Les courbes contraintes-déformations à 28 jours des bétons avec différentes teneurs en RAP sont présentées dans la figure 3.6. Nous constatons des variations dans le comportement des bétons. Les éprouvettes de béton réalisées avec RAP présentent une bonne ductilité par rapport à celle du béton témoin. Seules quelques fissures sont apparues à la surface des éprouvettes de béton avec RAP lors de leur rupture. De plus, les BRAP la rigidité des BRAP diminue avec le taux de RAP.

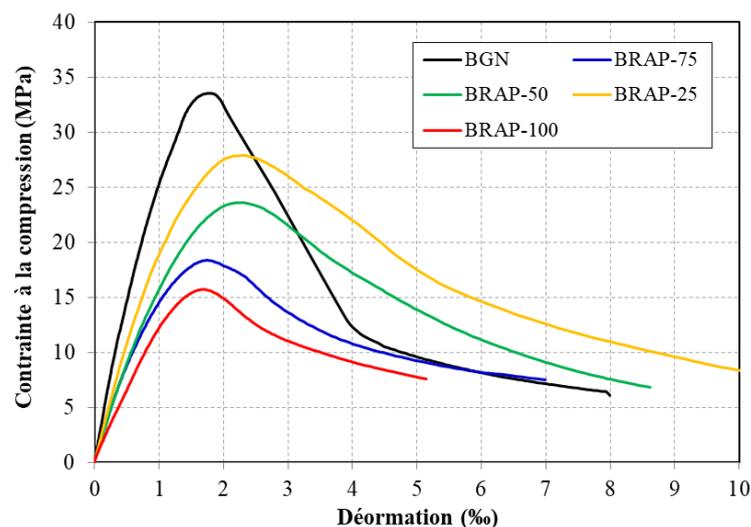


Figure 3. 6. Courbes contraintes-déformations en compression à 28 jours.

### 3.3.3. Influence du RAP sur la résistance à la flexion

Les variations de la résistance à la flexion des bétons avec différents taux de substitution des granulats RAP sont présentées dans la figure 3.7. On constate que la résistance à la flexion diminue lorsque le taux de remplacement du RAP augmente.

A 28 jours, la perte de résistance à la flexion pour le BRAP-100 est de 34 % par rapport au béton de référence (BGN), et de 16 % pour le BRAP-50.

A 90 jours, la résistance à la flexion du BRAP-100 est inférieure de 33 % à celle du BGN. Les réductions pour les mélange BRAP-25, BRAP-50 et BRAP-75 sont respectivement de 8 %, 16 % et 26 %.

L'ITZ entre les granulats et le mortier de ciment est un facteur crucial qui influe sur la résistance à la flexion. La présence d'une couche d'asphalte autour du RAP crée une faible connexion interfaciale entre le mortier de ciment et le RAP, réduisant ainsi la résistance à la flexion [38, 73].

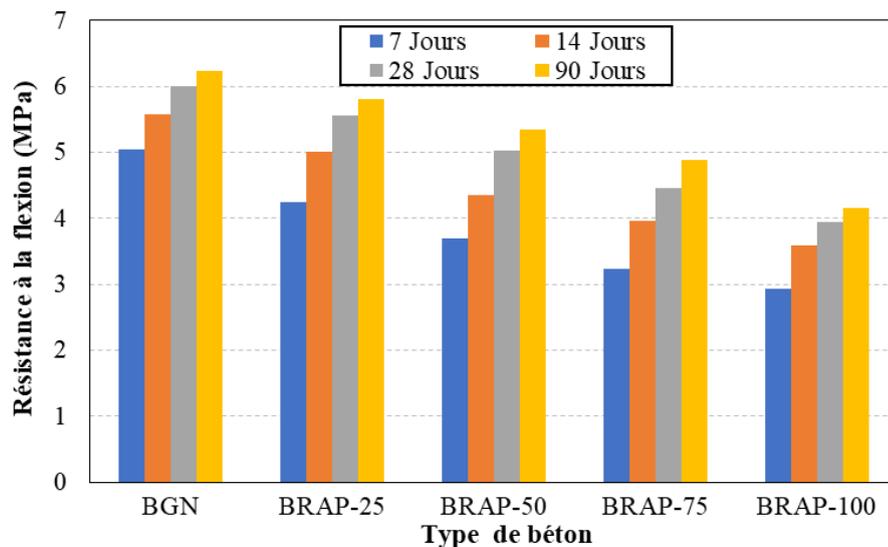


Figure 3. 7. Résistance à la flexion des bétons.

La réduction de la résistance à la flexion est en accord avec des études antérieures [24, 42, 89, 118]. Brand et Roesler [110] ont indiqué que la faiblesse de l'ITZ est à l'origine de cette diminution. L'ITZ est considérée comme la zone la plus fragile du BRAP, qui cède facilement sous l'effet des charges externes. De plus, les fissures se développent autour du

RAP plutôt qu'à travers lui, d'autant plus elles traverse la couche d'asphalte, ce qui réduit la résistance à la flexion.

Moaveni et al. [108] ont constaté que le bitume peut augmenter l'angularité et la texture des particules de RAP. Plus l'épaisseur du film est importante, plus la teneur en matériau RAP est élevée et plus les réductions de résistance sont importantes.

### 3.3.4. Influence du RAP sur le module d'élasticité

Le module d'élasticité à 28 jours des bétons testés est présenté dans la figure 3.8. En général, le module d'élasticité diminue avec l'augmentation du taux de RAP. Il est évident que tous les BRAP ont présenté des valeurs inférieures à celles du BGN ; cependant, le béton fabriqué avec un remplacement de 25 % de RAP révèle une réduction d'environ 12 % ; par rapport au BGN. L'utilisation de 50 %, 75 % et 100 % de RAP a entraîné une diminution du module d'élasticité de 32 %, 36 % et 48 %, respectivement, en comparaison avec le BGN.

Le module d'élasticité du béton est généralement influencé par le type et la rigidité du gravier, ainsi que par la rigidité, la porosité et la cohésion du mortier [151, 152]. Les granulats RAP présentent une faible rigidité que les granulats naturels en raison de la présence d'un film d'asphalte, ce qui diminue l'adhérence entre les granulats RAP et la pâte de ciment [110]. De plus, la présence de microfissures et de vides dans la ITZ entre l'asphalte et la pâte de ciment réduit davantage le module d'élasticité du béton [69, 106].

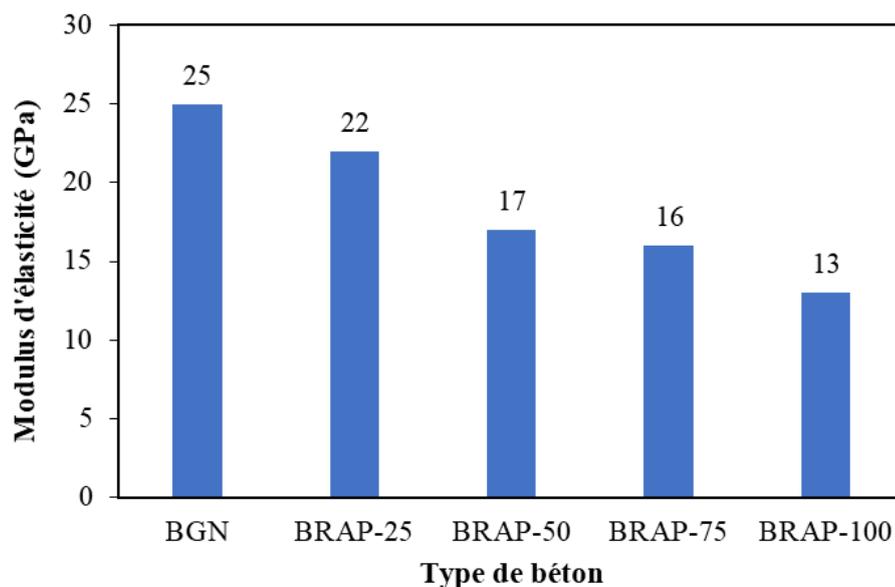


Figure 3. 8. Résultats du module d'élasticité.

### 3.3.5. Influence du RAP sur les auscultations dynamiques

Les résultats de tous les bétons testés pour la mesure de la vitesse d'impulsion ultrasonique pour les différents bétons confectionnés à 3, 7, 28 et 90 jours d'âge sont présentés dans la figure 3.9.

Les vitesses du son diminuent avec l'augmentation du taux de remplacement des GN par le RAP. Les vitesses pour le béton à base de granulats naturels est de 4049 m/s à 28 jours et 4250 m/s à 90 jours. Les faibles résultats ont été trouvés pour le BRAP-100 avec 3676 m/s à 28 jours et 3800 m/s à 90 jours. Ces résultats sont en concordance avec les résultats obtenus par des travaux de recherche antérieurs [153-155].

Le pourcentage de diminution de la vitesse d'impulsion ultrasonique pour les bétons produit avec 25 %, 50 %, 75 % et 100 % de RAP par rapport au BGN est respectivement 4 %, 5 %, 9% et 12 % à 28 jours, et de 1 %, 2 %,6% et 10 % à 90 jours.

L'augmentation du taux de remplacement des granulats naturels par des granulats RAP a entraîné une augmentation des espaces poreux qui a affecté la transmission des ondes ultrasoniques. Les granulats RAP sont plus poreux que les GN, ce qui réduit la vitesse d'impulsion ultrasonique. Topcu et Isikdag a conclu que la diminution de la vitesse ultrasonique dans les bétons incluant du RAP était due à la nature poreuse des granulats RAP [118].

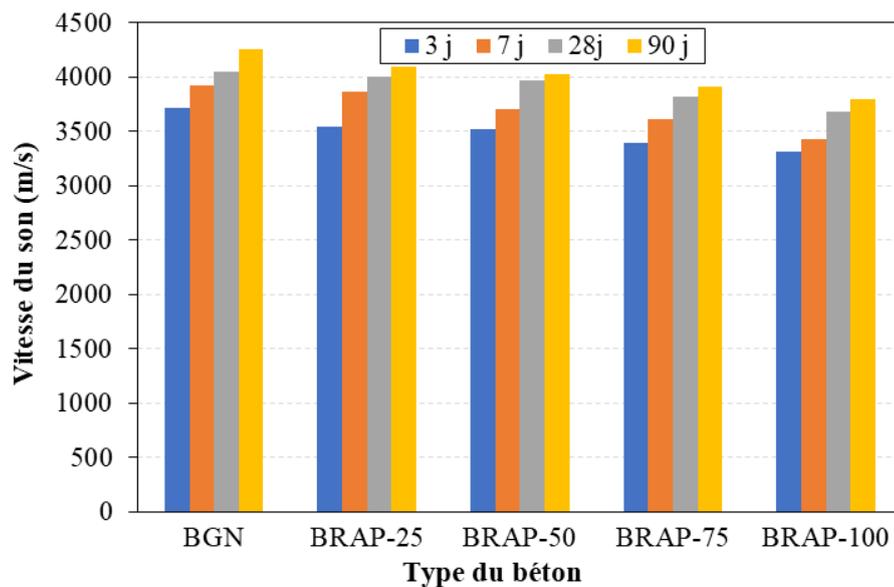


Figure 3. 9. Vitesse d'impulsion ultrasonique des bétons.

A partir des mesures de vitesse de propagation, il est possible de calculer le module élastique dynamique  $E$  selon la formule suivante [156] :

$$E = V^2 \rho \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{1-\nu} \quad (3.1)$$

Où :

$E$  : Module élastique dynamique GPa.

$V$  : vitesse en km/s.

$\rho$  : Densité du béton en  $\text{kg/m}^3$ .

$\nu$  : coefficient de Poisson ( $\nu = 0.30$  selon [156]).

Les résultats de calcul module d'élasticité dynamique sont présentés dans la figure 3.10. La figure montre que le module d'élasticité dynamique diminue à mesure que le taux de remplacement RAP augmente. On constate également que les valeurs du module calculées sont légèrement supérieures à celles mesurées expérimentalement.

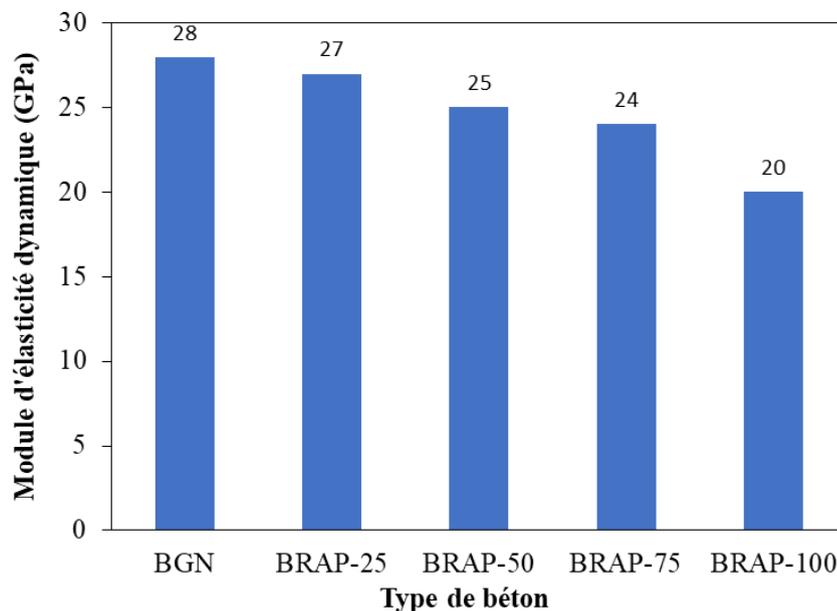


Figure 3. 10. Module d'élasticité dynamique des bétons à 28 jours.

### 3.4. Microstructure de la matrice BRAP

La figure 3.11 présente des sections d'éprouvettes du BRAP-100 après l'essai de la résistance à la flexion. La figure montre les compositions du BRAP-100 tel que les granulats RAP et le mortier.



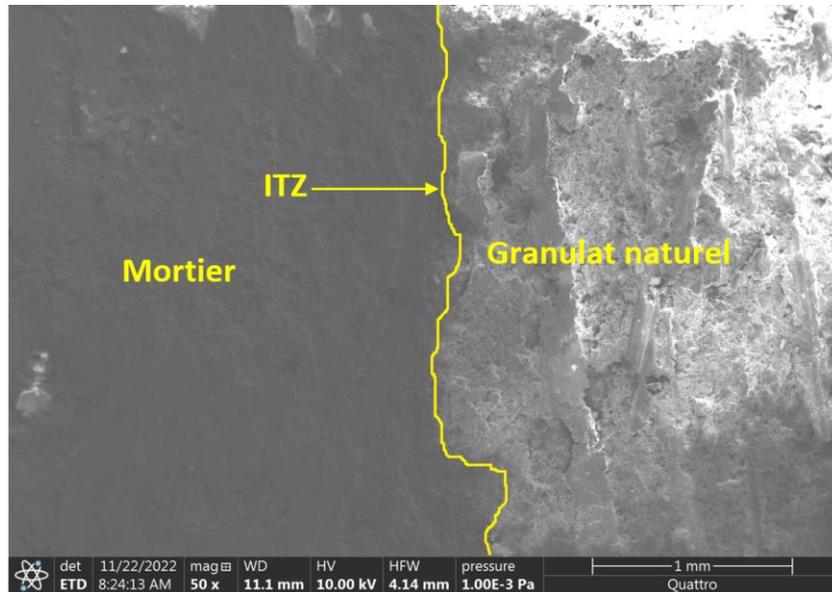
Figure 3. 11. Faciès d'une éprouvette BRAP-100 après essai de flexion.

La figure 3.12 présente la microstructure du BRAP-100 examinée par MEB. La présence d'une couche d'asphalte autour du RAP empêche la création d'une bonne liaison interfaciale, contribuant à une ITZ faible et plus poreuse que celle formée entre le bitume et le mortier de ciment, ce qui réduit la qualité du béton.

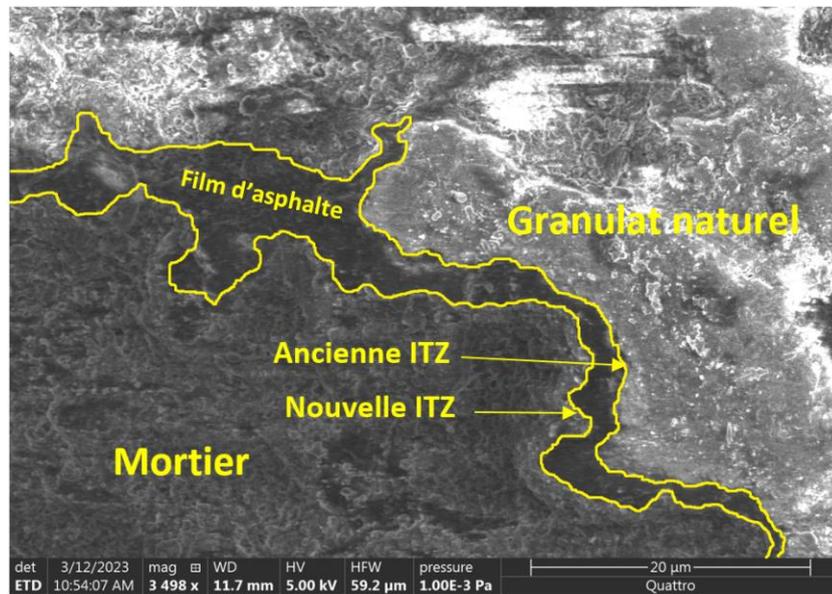
Il est possible d'observer la formation de trois ITZ dans la microstructure de béton : (i) entre le granulat naturel et le film d'asphalte, (ii) entre le granulat et le mortier de ciment (iii) entre le film d'asphalte et le mortier de ciment. L'ITZ la plus faible est celle formée entre le film d'asphalte et le mortier cimentaire.

Les tracés XRD du BGN et du RAP sont présentés dans la figure 3.13. Les pics des éléments chimiques (O, Si, C et Ca) (poids (%)), qui sont les principaux constituants de la pâte de mortier non hydratée adhérente et de la pâte de ciment. Le rapport Ca/Si du BGN est de 4.74. Cependant, le rapport dans le BRAP-100 est de 20.98. On remarque également que 27.41% de C est présent dans le mélange BRAP, et 6.06% de C dans le BGN. En effet, le rapport Ca/Si et le pourcentage élevé de C dans les mélanges BRAP ont augmenté avec une augmentation du taux de substitution RAP en raison de la présence d'un film d'asphalte autour des granulats qui affecte le processus d'hydratation, entraînant une teneur plus élevée en

particules non hydratées sous forme de cristaux CH et réduisant la formation du principal produit d'hydratation (C-S-H). On peut également noter que l'augmentation des rapports (de  $\text{Ca/Si} = 4.74$  à  $\text{Ca/Si} = 20.98$ ) est due à la largeur et à la porosité de l'ITZ.



(a) BGN



(b) BRAP-100

Figure 3. 12. MEB du BGN et BRAP-100.

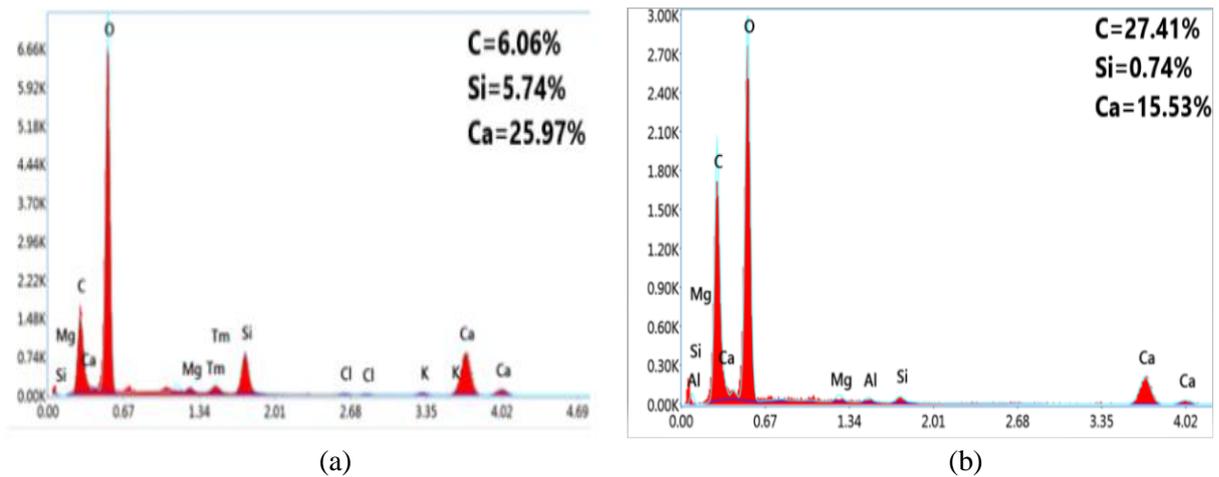


Figure 3. 13. Analyse MEB et DRX (a) BGN (b) BRAP-100.

### 3.5. Essai de durabilité

#### 3.5.1. Absorption capillaire

Les caractéristiques d'absorption sont des mesures alternatives permettant d'évaluer les aspects de durabilité des bétons. La figure 3.14 présente l'évolution de l'absorption d'eau par capillarité des mélanges BRAP à 28 et 90 jours de cure. Il a été observé que l'incorporation de RAP pouvait significativement augmenter l'absorption capillaire d'eau du béton.

Une légère augmentation des valeurs d'absorption capillaire d'eau a été observée jusqu'à un taux de remplacement de 50 %, au-delà duquel des augmentations substantielles ont été notées. A 28 jours, l'augmentation de l'absorption capillaire d'eau est de 6 % et 17 % pour les niveaux de remplacement de 25 % et 50 %, respectivement par rapport à béton témoin. Pour les taux de remplacement de 75 % et 100 %, l'augmentation est plus significative, atteignant respectivement 44 % et 53 %.

Cependant, à 90 jours, on observe des augmentations de l'absorption capillaire d'eau de 8 %, 24 %, 44 % et 57 % pour les mélanges BRAP-25, BRAP-50, BRAP-75 et BRAP-100, respectivement, par rapport au mélange témoin.

L'augmentation des valeurs d'absorption d'eau pour le béton contenant du RAP est attribuée à la capacité d'absorption élevée des granulats RAP [99].

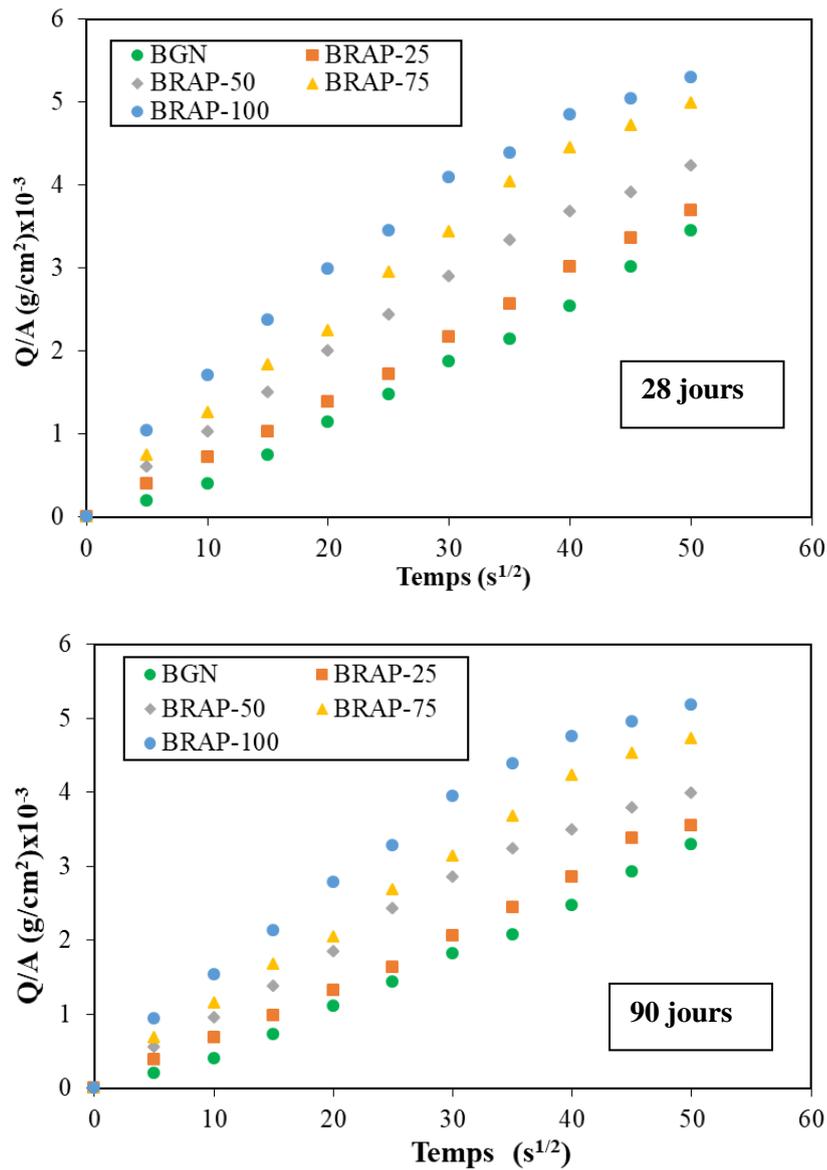


Figure 3. 14. Résultat de l'essai d'absorption capillaire.

A 28 jours, une augmentation remarquable de la sorptivité des bétons en fonction du taux de remplacement des RAP a été trouvée. Pour le BRAP-100, la sorptivité est de  $7.0497 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{s}^{-1/2}$  contre  $3.4064 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{s}^{-1/2}$  pour le BGN (Figure 3.15). La grande sorptivité du BRAP-100 confirme que le BRAP-100 a une absorption capillaire plus grande que le BGN.

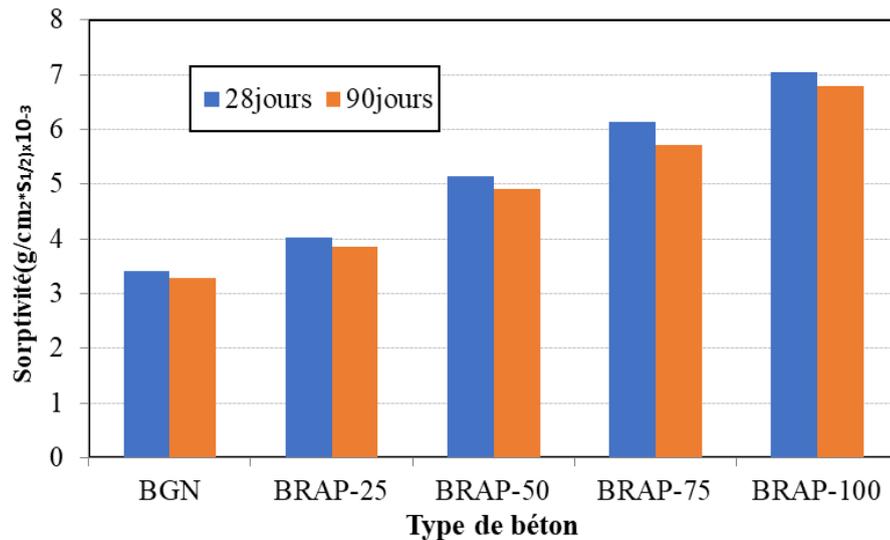


Figure 3. 15. Effet des RAP sur la sorptivité des bétons à 28 et 90 jours.

### 3.5.2. Absorption par immersion

L'absorption d'eau des différents types de bétons à 28 et 90 jours est présentée dans la figure 3.16. On observe une diminution du taux d'absorption d'eau avec l'âge du béton. Cette tendance est presque similaire pour tous les mélanges. La capacité d'absorption d'eau augmente avec l'incorporation de granulats RAP dans le béton par rapport au béton témoin (BGN).

A 28 jours, il est intéressant de constater une augmentation de l'absorption de 17 %, 33 %, 73 % et 83 % respectivement pour les mélanges BRAP-25, BRAP-50, BRAP-75 et le BRAP- 100 par rapport au BGN.

L'ajout de granulats RAP dans le béton augmente sa capacité d'absorption d'eau par rapport au béton ordinaire. Ceci est principalement attribué à la présence d'une couche d'asphalte sur le granulat RAP et la couche de poussière entourant le granulat, résultant en un taux d'absorption d'eau plus élevé [60, 113].

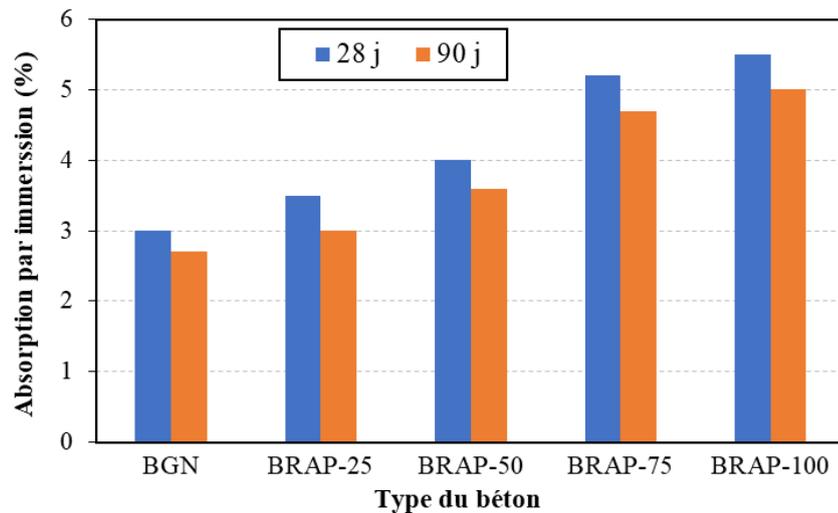


Figure 3. 16. Résultats de l'essai d'absorption par immersion.

#### 4.5.3. Perméabilité à l'eau

La figure 3.17 montre la profondeur de pénétration maximale de l'eau sous pression pour les différents bétons exprimée en millimètres (mm). On constate que la perméabilité des bétons augmente avec le taux de RAP. De plus, on peut noter que la profondeur de pénétration de l'eau diminue pour tous les bétons à mesure que l'âge de cure augmente, en raison de l'amélioration de la compacité du béton à long terme, favorisant la formation de plus de CSH dans la matrice du béton.

A 28 jours, la profondeur de pénétration de l'eau est de 28 mm pour le BGN et de 40 mm pour le BRAP100. Quant aux mélanges BRAP-25, BRAP-50 et BRAP-75, les profondeurs de pénétration d'eau sont respectivement de 30 mm, 35 mm et 37 mm. Ces résultats concordent avec ceux trouvés par Hassan et al. [43], qui ont également trouvé des valeurs élevées de perméabilité pour des bétons contenant 100% de RAP.

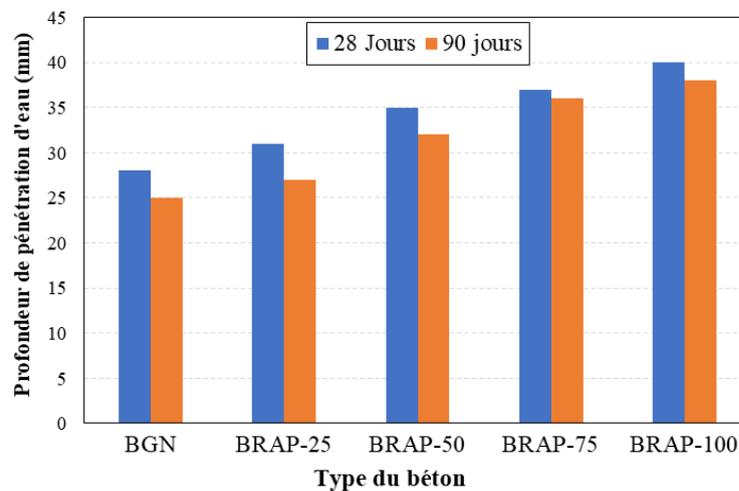


Figure 3. 17. Résultat de la perméabilité à l'eau.

### 3.5.4. Perméabilité aux ions chlore

L'essai de la perméabilité aux ions chlore a été réalisé sur les BRAP avec des taux de remplacement de 0 %, 25 %, 50 %, 75 %, et 100 %. La charge électrique Q (en coulomb) qui traverse l'échantillon est mesurée à la fin de l'essai (6 heures). Les résultats de l'essai sont présentés sur la figure 3.18.

A 28 jours, on observe une diminution de la charge totale transmise à travers les échantillons de l'ordre de 1 %, 3 %, 5 % et 11 % pour les mélanges BRAP-25, BRAP-50, BRAP-75 et BRAP-100, respectivement, par rapport à celle du BGN.

L'utilisation de granulats RAP dans les mélanges de béton peut susciter des préoccupations quant à la réduction de la résistivité à la pénétration des chlorures. Cette réduction pourrait résulter de l'infiltration de l'asphalte dans les pores perméables du béton, réduisant ainsi sa porosité et pouvant entraîner une diminution de la perméabilité [69].

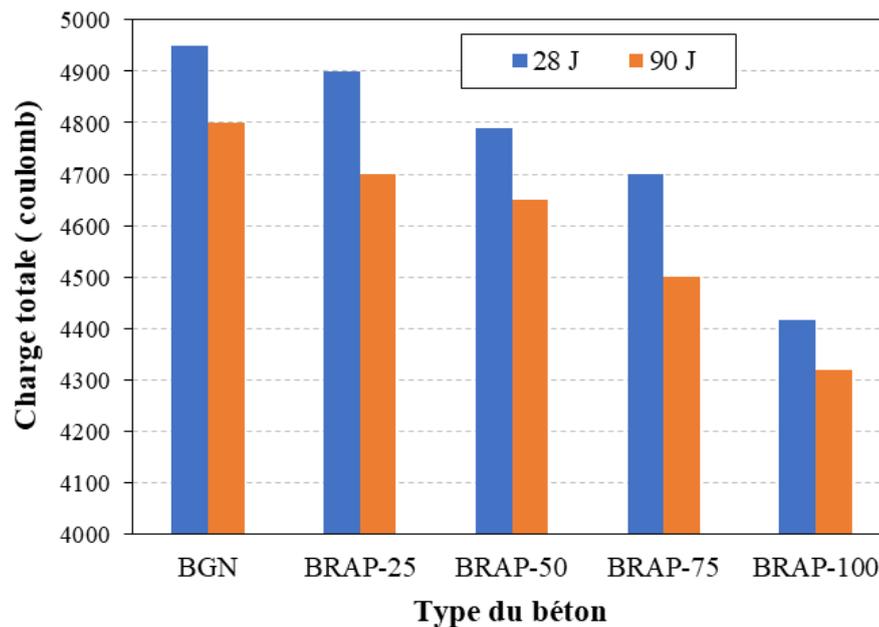


Figure 3. 18. Résultats de la perméabilité aux ions chlore.

### 3.6. Essais de déformations différées

#### 3.6.1. Influence du RAP sur le retrait total

Lorsque le durcissement du béton sans l'impact de forces extérieures et avec des changements d'humidité, les caractéristiques physiques et chimiques du béton provoquent une diminution du volume du béton (retrait). Le retrait du béton est principalement affecté par le type de graviers utilisés, leur taille, leur volume et leur module d'élasticité. En effet, le type de graviers détermine le volume du béton et peut donc influencer le retrait [157].

La figure 3.19 montre l'évolution du retrait total pour tous les bétons testés avec différents remplacements de RAP en fonction du temps et pour trois températures de cure. Pour une même température et pendant tout la durée de durcissement, on observe que l'utilisation de RAP augmente le retrait total de tous les BRAP, en raison de la plus faible rigidité des BRAP [77].

A 180 jours, le retrait total du BRAP-100 est environ 42 %, 30 % et 13 % plus élevé que celui du mélange témoin BGN à des températures de cure de 20, 40 et 60 °C, respectivement. Cependant, le BRAP-25 a affiché des valeurs de retrait similaires à celles obtenues pour le BGN. Au-delà de 50 % de RAP, une augmentation significative de retrait est observée, Pour le BRAP-50, l'augmentation est respectivement de 21 %, 15 % et 6 %. Pour le BRAP-75, le retrait total augmente de 30 %, 21 % et 11 %, respectivement. Cette augmentation peut être attribuée au module d'élasticité plus faible du RAP par rapport au GN [77].

Le retrait du BRAP est plus élevé que celui du BGN, cela est dû à la grande porosité du BRAP. Cette porosité joue un rôle très important sur le comportement différé des bétons. En effet la porosité ouverte régit les possibilités de transfert de l'eau libre ou faiblement liée vers l'extérieur du béton. Le diamètre des pores est un paramètre très influent sur le retrait. Des diamètres de pore importants, facilitent la migration de l'eau lors du séchage du béton et amplifient l'effet du séchage et crée des tensions internes plus élevées en augmentant les déformations de retrait [118].

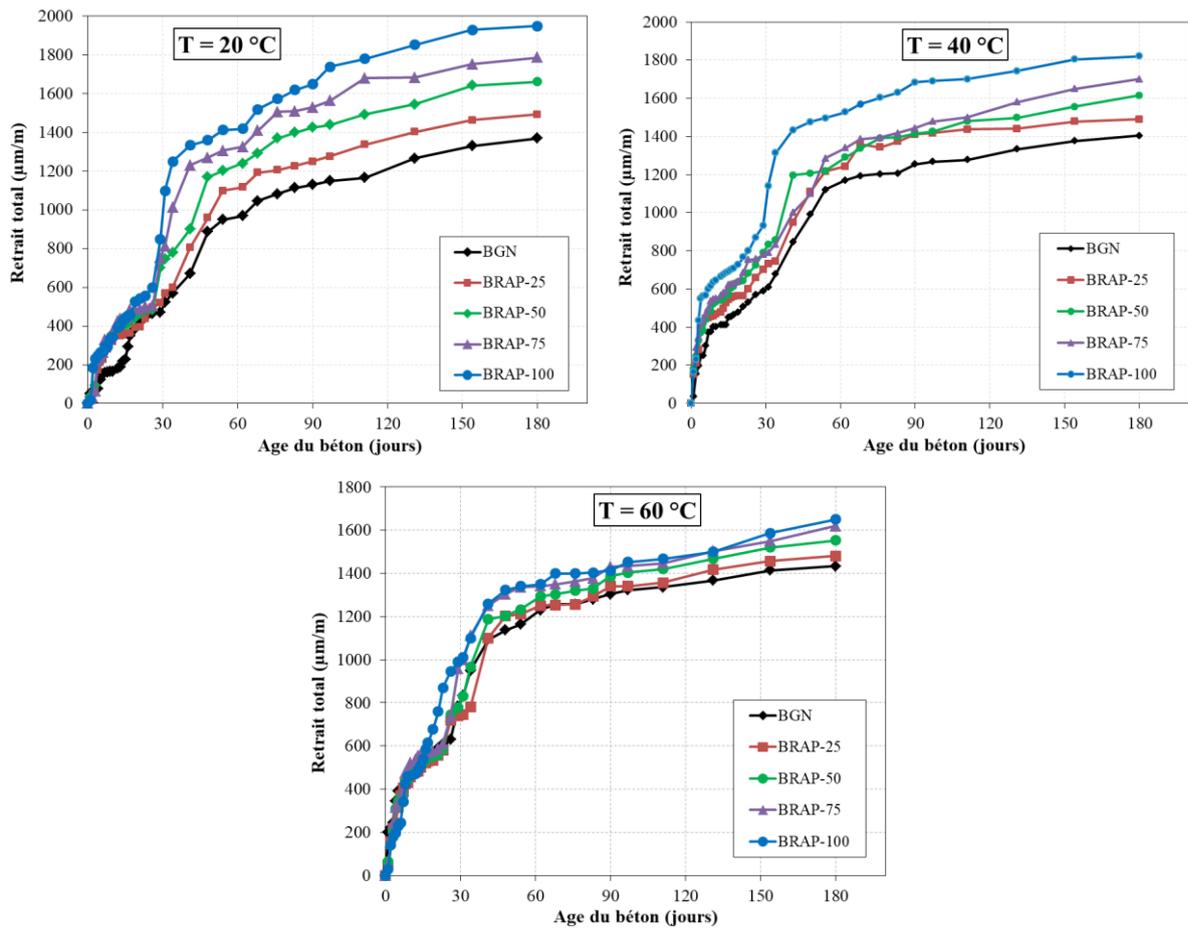


Figure 3. 19. Evolution du retrait total des bétons.

### 3.6.2. Influence de la température de cure sur le retrait total du BRAP

La figure 3.20 montre la variation du retrait total des bétons testés en fonction du temps allant de 1 jusqu'à 180 jours, sous des températures de cure de  $20\text{ °C}$ ,  $40\text{ °C}$  et  $60\text{ °C}$ .

La cinétique et l'amplitude du retrait total dépendent principalement de la température de cure. Il est souvent rapporté que des températures élevées entraînent un retrait total important. Cependant, les résultats obtenus montrent le contraire : le retrait total du BRAP à une température  $60\text{ °C}$  est inférieur à celui à  $40\text{ °C}$ , et le retrait total du même BRAP à une température  $40\text{ °C}$  est inférieur à celui à  $20\text{ °C}$ .

A 180 jours pour le BRAP-100, la valeur minimale de retrait est de  $1650\text{ }\mu\text{m/m}$  à  $60\text{ °C}$ ,  $1820\text{ }\mu\text{m/m}$  à  $40\text{ °C}$  et la valeur maximale est de  $1950\text{ }\mu\text{m/m}$  à  $20\text{ °C}$ . Pour le BRAP-50, la valeur de retrait est de  $1554\text{ }\mu\text{m/m}$  à  $60\text{ °C}$ ,  $1615\text{ }\mu\text{m/m}$  à  $40\text{ °C}$  et  $1663\text{ }\mu\text{m/m}$  à  $20\text{ °C}$ .

Pour le BRAP-75, la valeur de retrait est de  $1620\text{ }\mu\text{m/m}$  à  $60\text{ °C}$ ,  $1700\text{ }\mu\text{m/m}$  à  $40\text{ °C}$  et  $1786\text{ }\mu\text{m/m}$  à  $20\text{ °C}$ . Pour le BGN, la valeur de retrait maximale est de  $1434\text{ }\mu\text{m/m}$  à  $60\text{ °C}$  ;  $1403\text{ }\mu\text{m/m}$  à  $40\text{ °C}$  et la valeur de retrait minimale était de  $1370\text{ }\mu\text{m/m}$  à  $20\text{ °C}$ .

L'asphalte a la capacité d'absorber la chaleur d'hydratation, ce qui peut modifier les structures des pores internes, limitant ainsi le mouvement et la fuite de l'eau des pores internes. Par ailleurs, les granulats RAP, ayant un taux d'absorption d'eau élevé, peuvent influencer le processus de durcissement interne des bétons [80].

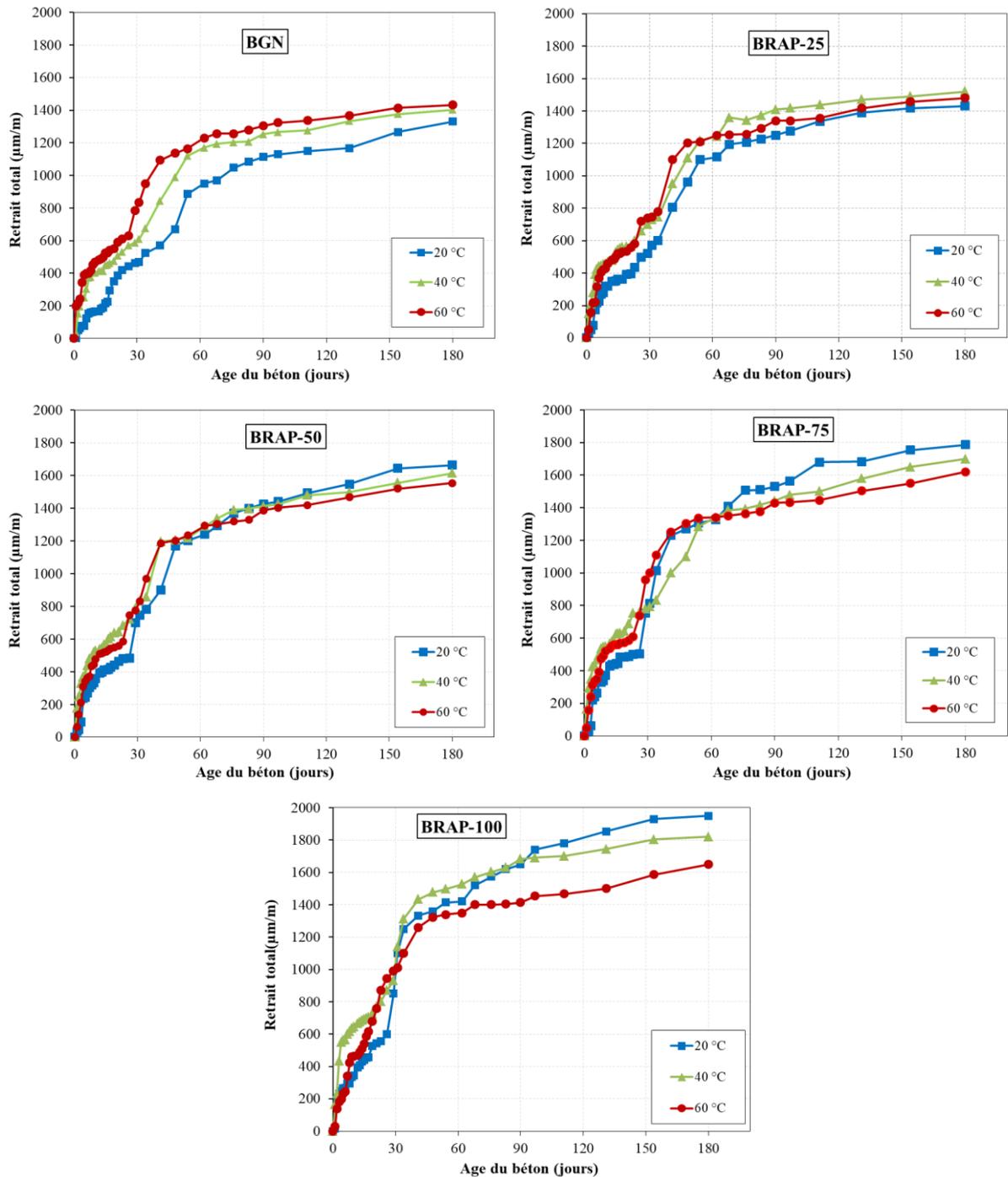


Figure 3. 20. Effet de la température de cure sur le retrait total du BRAP.

Lorsque la teneur en granulats RAP dans le mélange augmente, la porosité du BRAP augmente également [117]. A des températures élevées dépassant le point de ramollissement de l'asphalte, l'asphalte peut s'écouler à travers le béton, obstruant ainsi les pores et réduisant par la suite la porosité. Le point de ramollissement de l'asphalte se situe entre 40 °C et 60 °C [95], de sorte que le bitume fond et s'infiltré dans les pores du BRAP pendant le séchage et modifiant les structures internes des pores, ce qui entraîne une restriction du mouvement et une perte d'eau interne. Cette modification conduit à une diminution de la porosité des mélanges et conduit à une réduction du retrait du BRAP [60, 117, 158].

### 3.6.3. Influence du RAP sur le fluage

#### 3.6.3.1. Influence du RAP sur le fluage en compression

La figure 3.21 illustre la déformation de fluage total en compression dans la section de la poutre. On observe que l'utilisation de RAP augmente le fluage total de tous les BRAP.

Après 12 mois de chargement, le BRAP-100 présente des déformations de fluage en compression importantes, atteignant 394  $\mu\text{m}/\text{m}$ , nettement supérieures à celles du BGN, qui est de 267  $\mu\text{m}/\text{m}$ .

Les déformations de fluage en compression pour le BRAP-25, BRAP-50, BRAP-75 et BRAP-100 sont respectivement 12 %, 26%, 38 % et 48 % plus élevées que celles du BGN.

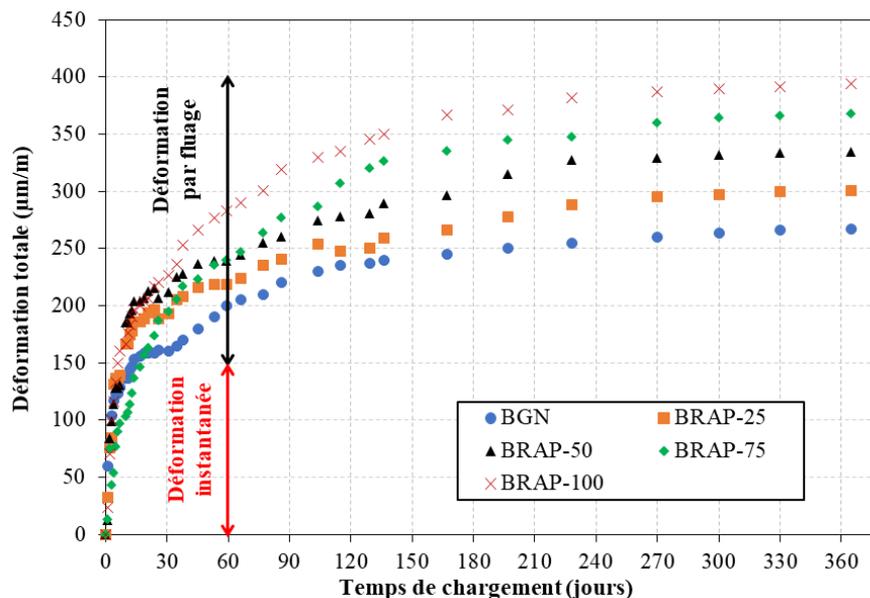


Figure 3. 21. Fluage en compression.

### 3.6.3.2. Influence du RAP sur le fluage en traction

La Figure 3.22 illustre le champ de la déformation de fluage total en traction dans la section de la poutre. On remarque que l'utilisation de RAP augmente le fluage total en traction pour tous les BRAP. Une déformation de 337  $\mu\text{m}/\text{m}$  a été observée pour le BGN. On note des augmentations respectives de 14 %, 24 %, 44% et 56 % pour le BRAP-25, BRAP-50, BRAP-75 et BRAP-100, par rapport au BGN.

D'après les figures 3.21 et 3.22, on observe une augmentation du fluage totale en compression et en traction avec l'augmentation du taux de RAP. Cela est dû à la grande porosité du BRAP, qui conduit à une augmentation de la diffusion de l'eau adsorbée dans la porosité capillaire et le glissement des C-S-H sous l'action de contraintes extérieures. Cette interprétation a été confirmée par Ruetz [159], Wittmann [160] et Ulm et al. [130].

Pour tous les types de béton, on constate que la vitesse moyenne de fluage est très élevée dans les premiers temps de la mise en charge, puis diminue progressivement avec le temps jusqu'à devenir quasiment nulle.

La porosité a tendance à s'ouvrir et à absorber l'eau libre présente dans les pores plus larges, entraînant ainsi une expansion du matériau [161].

Les contraintes sont retransmises à l'échelle microscopique à travers les produits d'hydratation qui entourent les pores capillaires. Ce transfert d'effort microscopique crée localement un déséquilibre thermodynamique entre les molécules d'eau en adsorption libre dans ces zones de transmission et celles qui sont plus loin (porosité capillaire). Pour rétablir l'équilibre, les molécules d'eau diffusent dans les couches d'eau adsorbée (diffusion surfacique) vers la porosité capillaire, entraînant la déformation du squelette solide.

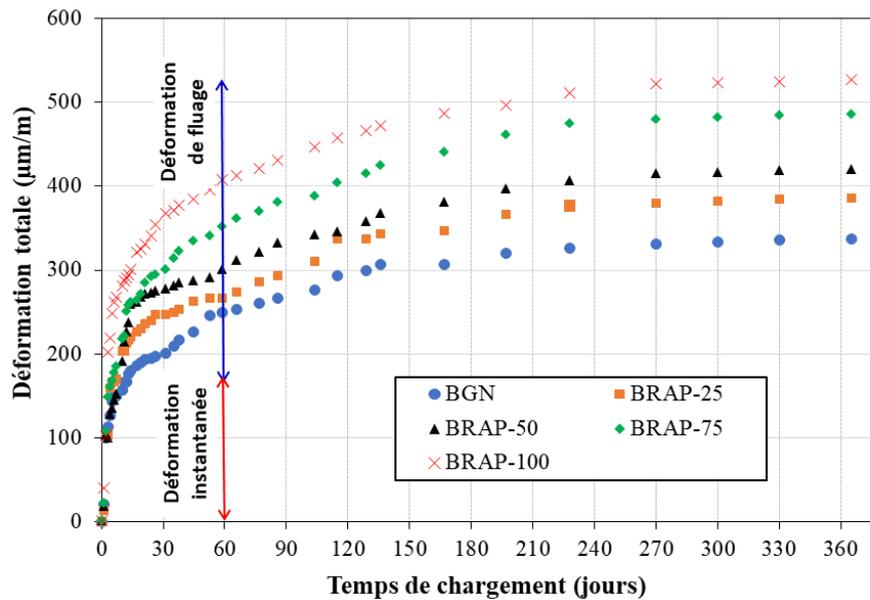


Figure 3. 22. Fluage en traction.

### 3.6.3.3. Comparaison entre le fluage en compression et en traction

Pour tous les mélanges testés, la déformation de fluage en traction est supérieure à celle en compression. On constate que l'évolution de fluage en traction dépasse celui en compression par des grandeurs de 26% , 28%, 25%, 33% et 34% pour le BGN, BRAP-25, BRAP-50, BRAP-75 et BRAP-100, respectivement.

Il convient de rappeler que Brooks et Neville [162] ont trouvé sur un même béton, une déformation de fluage en traction légèrement supérieure à celle en compression. Bissonnette et al. [161] ont également observé des résultats similaires. Par conséquent, il semble difficile de déduire une règle universelle pour la transposition entre la déformation spécifique du fluage en traction et en compression.

L'augmentation du fluage en traction par rapport à celui en compression est basée sur deux mécanismes essentiels, la microfissuration provoque vraisemblablement une perte de rigidité du béton. Cet effet est dû à la plus faible rigidité de la fibre tendue que la fibre comprimée (module d'élasticité en compression est plus important que le module d'élasticité en traction).

### 3.6.3.4. Coefficient de fluage

Le coefficient de fluage est le rapport entre la déformation totale subie par le matériau à une échéance donnée et la déformation instantanée. Ce paramètre revêt une importance primordiale dans le dimensionnement des structures en béton, permettant d'estimer les pertes

de précontraintes dues au fluage. Le coefficient du fluage ( $\Phi$ ) pour tous les bétons est calculé par la formule suivante :

$$\Phi = (\varepsilon_f - \varepsilon_i) / \varepsilon_i \quad (3.2)$$

Ou :

$\varepsilon_i$ : Déformation instantanée ( $\mu\text{m/m}$ ).

$\varepsilon_f$ : Déformation finale ( $\mu\text{m/m}$ ).

La figure 3.23 illustre les valeurs des coefficients de fluage en compression et en traction des différents bétons étudiés après une année de chargement. On observe qu'au bout d'une année, les coefficients de fluage des BRAP sont plus importants que celui du BGN.

Pour le BGN, le coefficient du fluage en compression est de 2.33. Quant au BRAP-25, BRAP-50, BRAP-75 et BRAP-100, les coefficients sont respectivement de 2.95, 2.97, 3.9 et 4.62.

Le coefficient du fluage en traction pour le BGN est de 2.36, tandis que pour le BRAP-25, BRAP-50, BRAP-75 et BRAP-100, les valeurs sont de 2.87, 3.09, 3.60 et 4.22, respectivement.

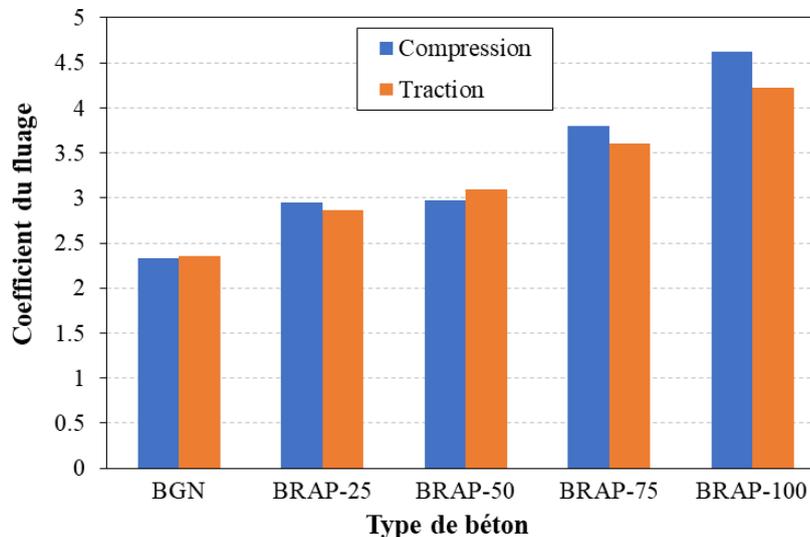


Figure 3. 23. Coefficient de fluage.

### 3.6.3.5. Flèche

La figure 3.24 représente l'évolution de la flèche à mi- portée de la poutre pour les différents bétons testés. On constate que la flèche augmente lorsque le taux de remplacement du RAP augmente. Après 360 jours; une flèche de 6.2 mm a été enregistrée pour le BGN,

tandis que le BRAP-25, BRAP-50, BRAP-75 et BRAP-100 présentaient respectivement des flèches de 6.9, 8.5, 9.2 et 10.1mm.

D'après la figure 3.24, on remarque une augmentation de la flèche avec l'augmentation du taux de RAP dans le béton. La diminution des caractéristiques mécaniques, telles que la résistance à la compression et le module d'élasticité des BRAP, pourrait être une cause principale de cette augmentation.

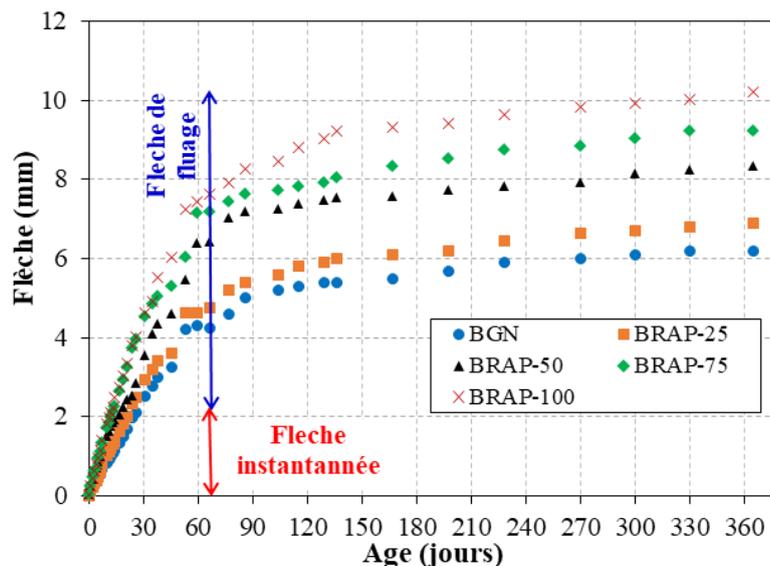


Figure 3. 24. Flèche des différents bétons testés.

### 3.7. Conclusion

Les résultats trouvés dans cette étude expérimentale montrent que l'augmentation du taux de remplacement de gravier naturel par le RAP dans le béton entraîne une diminution de l'ouvrabilité, des résistances mécaniques et du module d'élasticité.

De plus, le béton à base de RAP a montré une absorption d'eau et une perméabilité plus élevées que le béton à base de GN. En revanche, le BRAP a démontré une bonne résistance à la pénétration des ions chlore par rapport aux BGN quel que soit le taux de remplacement.

Les déformations dues au retrait et au fluage augmentent également avec le taux de RAP. En revanche, en raison du ramollissement du bitume à des températures de cure élevées, le retrait total du BRAP diminue avec l'augmentation de la température de cure.

---

# **Chapitre 4 :**

## **Etude numérique du retrait**

---

## Chapitre 4 : Etude numérique du retrait

### 4.1. Introduction

Le retrait n'est pas un phénomène inévitable qui se produit à court- et à long-terme pour le béton. L'ingénieur devra connaître les déformations du béton durci en fonction du temps afin d'évaluer l'endommagement du béton.

Les chercheurs ont proposé différentes méthodes pour prédire le retrait en fonction de la variation de la température dans le temps. Miyazawa et al. [163] et Turcy et al. [164] ont affirmé que l'approche de la maturité peut être utilisée avec succès pour estimer l'effet de la température sur le retrait. Chu et al. [165] ont utilisé une prédiction basée sur l'énergie d'activation dépendante du temps et de la température pour anticiper les impacts de la température sur le retrait autogène.

Mushtaq [150] a proposé un modèle influencé par l'ACI-209 pour prédire le retrait du béton à tout moment. Maghfouri et al. [166] ont utilisé cinq modèles tels que ACI209R, EN1992, GL2000, B3 et SAK pour prédire le retrait du béton, qu'ils ont ensuite comparé aux résultats expérimentaux. Lahmar et al. [167] et Bouziadi et al. [168] ont utilisé le logiciel ANSYS basé sur l'analyse élémentaire pour estimer le retrait du béton en utilisant un modèle à deux phases en série.

Dans ce chapitre on va étudier l'influence de la température sur le retrait du béton en utilisant l'approche de la maturité basée sur la loi d'Arrhenius.

### 4.2. Méthode de maturité

Dans ce chapitre, le retrait total du BRAP est prédit à l'aide du logiciel ANSYS. Le calcul du retrait total pour les trois températures de cure (20 °C, 40 °C et 60 °C) nécessite la connaissance des propriétés thermomécaniques des BRAP pour chaque température. Ces valeurs sont obtenues en utilisant une approche expérimentale combinée, la méthode de maturité et le modèle à deux phases en série.

Les propriétés mécaniques sont déduites de l'étude expérimentale à une température de 20 °C, tandis que, pour les températures de 40 °C et 60 °C, elles sont estimées en utilisant la méthode de maturité.

La méthode de maturité, telle que proposée par Knudsen (1982) et adoptée par la norme ASTM C 1074 [169], a été utilisée pour évaluer l'évolution des propriétés mécaniques du béton à différentes températures de cure [170].

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_u \frac{t - t_0}{(t - t_0) + t_{50}} \quad (4.1)$$

où  $\varepsilon(t)$  est le retrait au temps  $t$ ,  $\varepsilon_u$  est la valeur de retrait extrême,  $t_{50}$  est le temps nécessaire pour atteindre 50 % de la valeur extrême (jours) et  $t_0$  est le temps de fin de prise (pour les essais sur le retrait on prend  $t_0 = 1$  jour).

#### 4.2.1. Degré d'hydratation

Le degré d'hydratation  $\alpha(t)$  du ciment est exprimé comme étant le rapport entre le retrait à un âge donné  $t$  et le retrait ultime mesuré à 180 jours. L'équation (4.2) est déduite de l'équation (1) pour estimer la variation de  $\alpha(t)$  avec le temps  $t$  [169].

$$\alpha(t) = \frac{\varepsilon(t)}{\varepsilon_u} = \frac{(t - t_0)}{(t - t_0) + t_{50}} \quad (4.2)$$

#### 4.2.2. Demi-âge de retrait

Le demi-âge est l'âge ( $t_{50}$ ) auquel le retrait atteint la moitié de sa valeur ultime atteinte à 180 jours. Il peut être calculé en utilisant la relation entre les événements et les courbes linéaires ( $y = ax + b$ ).

Le tableau 4.1 montre les résultats concernant le demi-âge de retrait pour différentes températures de cure et différents bétons. Le demi-âge diminue avec l'augmentation du taux de remplacement du matériau RAP et de la température.

Tableau 4. 1. Demi-âge des mélanges de béton pour différentes températures de cure.

Mélanges	$t_{50}$ (jours)		
	20°C	40 °C	60 °C
BGN	42	35	28
BRAP-25	39	34	29
BRAP-50	37	32	29
BRAP-75	34	30	27
BRAP-100	30	28	25

### 4.2.3. Energie d'activation

L'énergie d'activation d'un mélange est une mesure de sa sensibilité à la température. Elle est utilisée dans l'approche de l'âge équivalent pour transformer les propriétés du béton définies à la température standard à n'importe quelle température de cure (T). Elle peut être calculée par l'équation d'Arrhenius suivante [169]:

$$K = A \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (4.3)$$

Le même degré d'évolution de l'hydratation doit être atteint aux temps  $t_1$  et  $t_2$ , évalués comme suit [169, 171] :

$$\frac{t_2}{t_1} = \exp\left[\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right)\right] \quad (4.4)$$

où K est la constante cinétique, A est la constante pour deux températures  $T_1$  et  $T_2$ , et T est la température en Kelvin.  $E_a$  est l'énergie d'activation ( $\text{kJ mol}^{-1}$ ), R est la constante des gaz parfaits  $R = 8.314 \text{ J/mol.K}$ ,

Le tableau 4.2 présente l'énergie d'activation obtenue pour les divers bétons, montrant une diminution de cette énergie lorsque le taux de remplacement du RAP augmente.

Tableau 4. 2. Energie d'activation des différents bétons.

Béton	BGN	BRAP-25	BRAP-50	BRAP-75	BRAP-100
$E_a$ (kJ/mol)	8.28	6.04	4.91	4.67	3.75

### 4.2.4. Age équivalent

La méthode de l'âge équivalent permet de calculer le temps à la température de référence  $T_r$  qu'il faudra au mélange pour atteindre le même degré d'hydratation à toute autre température T [169, 171]. Le rapport entre le temps équivalent ( $t_e$ ) et le temps (t) est fonction de deux températures et sa loi est dérivée de la loi générale d'Arrhenius sur l'accélération des réactions chimiques.

$$t_e = t \exp\left[-\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_r}\right)\right] \quad (4.5)$$

Cette méthode permet de prédire le retrait à différentes températures. L'évolution isotherme du degré d'hydratation à 20 °C et l'énergie d'activation étant connues, il est possible de déduire l'évolution du retrait pour un béton exposé à n'importe quelle température. La figure 4.1 montre le retrait en fonction de l'âge équivalent à différentes températures des différents bétons.

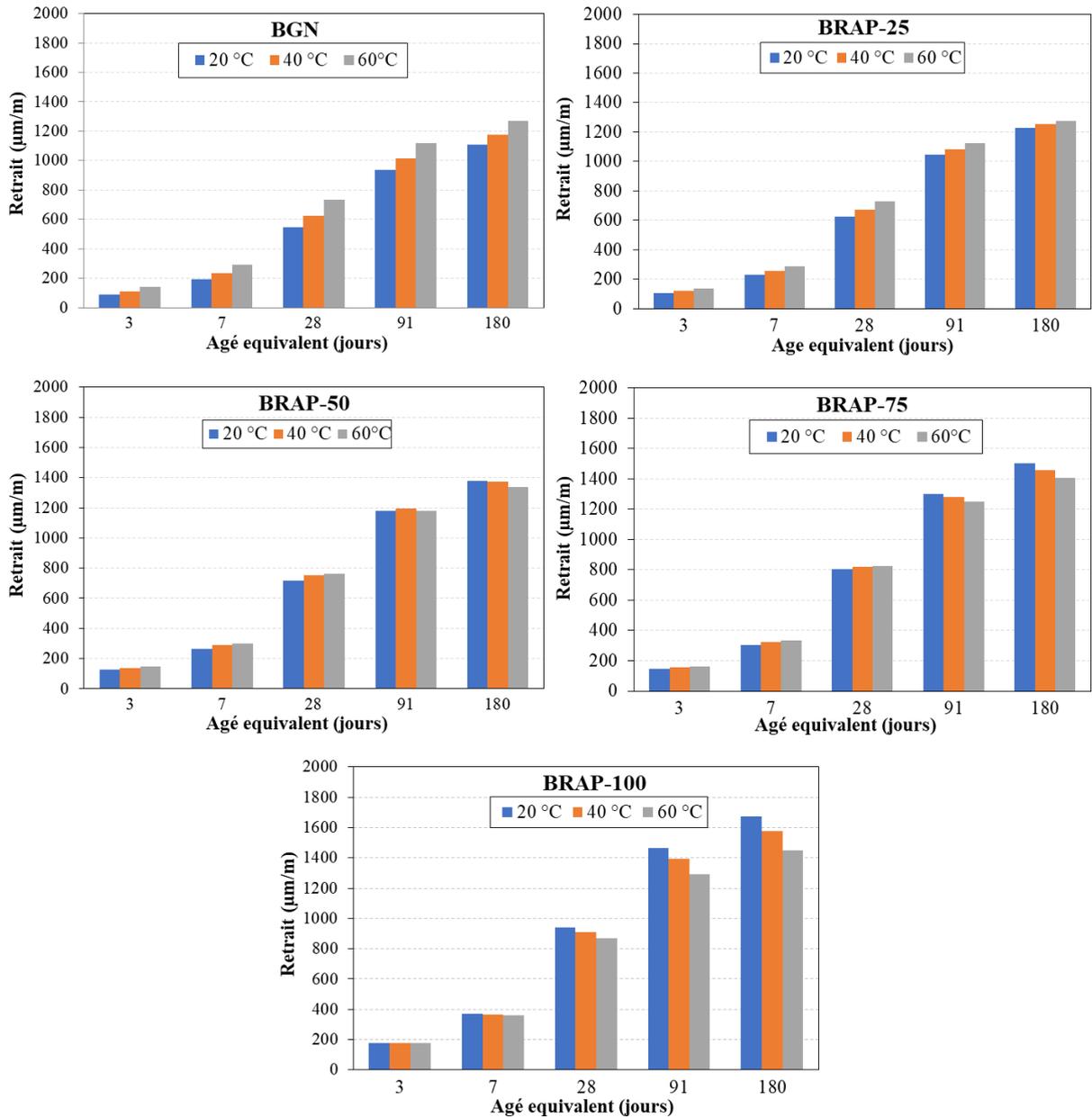


Figure 4. 1. Retrait en fonction de l'âge équivalent à différentes températures.

#### 4.2.5. Caractéristiques thermiques du béton

La capacité thermique spécifique (C) et la conductivité thermique (K) du mortier sont évaluées comme suit [172] :

$$C = C_m (1.15 - 0.15 \alpha(t)) \quad (4.6)$$

$$K = K_m (1.1 - 0.10 \alpha(t)) \quad (4.7)$$

Où  $C_m$ ,  $K_m$  et  $V_m$  sont respectivement la capacité thermique spécifique, la conductivité thermique et le volume du mortier.

Dans cette étude,  $C_m$  et  $K_m$  sont respectivement prises égales à  $900 \text{ Jkg}^{-1}\text{C}^{-1}$  et  $2.7 \text{ Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$ .

La capacité thermique spécifique ( $C_b$ ) et la conductivité thermique ( $K_b$ ) du béton sont évaluées au moyen du modèle à deux phases en série (Figure 4.2) comme suit [173, 174] :

$$C_b = \frac{1}{\frac{v_m}{C(\alpha)} + \frac{v_g}{C_g}} \quad (4.8)$$

$$K_b = \frac{1}{\frac{v_m}{K(\alpha)} + \frac{v_g}{K_g}} \quad (4.9)$$

Où  $C_g$ ,  $K_g$  et  $V_g$ , sont respectivement la capacité thermique spécifique, la conductivité thermique et le volume du granulat grossier.

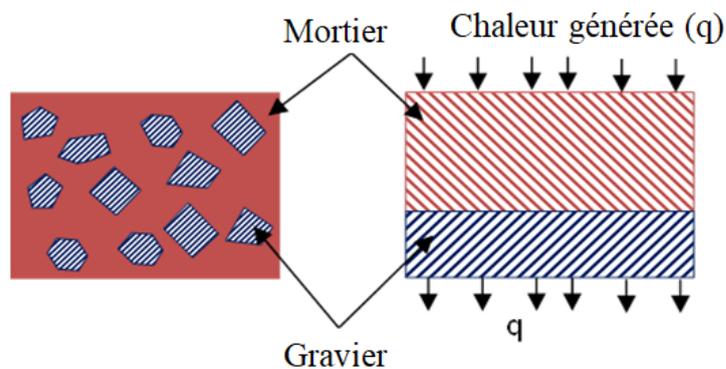


Figure 4. 2. Modèle à deux phases en série [173].

La capacité thermique spécifique  $K_g$  est calculée comme suit [175] :

$$K_g = 0.293 + 1.01 V_g \quad (4.10)$$

Le coefficient de dilatation thermique du béton  $\alpha_b(t)$  ( $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ) au temps  $t$  est calculé comme suit [176] :

$$\alpha_b(t) = \alpha_k (1 + 41 t^{-2}) \quad (4.11)$$

Où  $\alpha_k$  est le coefficient de dilatation thermique du béton à 28 jours ( $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ) [30].

$$\alpha_k = (0.008 T + 6) 10^{-6} \quad (4.12)$$

#### 4.2.6. Caractéristiques mécaniques du béton

Les propriétés mécaniques des bétons à  $t_e$  (jours) sont évaluées comme suit :

- La résistance à la traction est déterminée en utilisant la norme Model Code 2010 [177] comme suit :

$$f_t(t_e) = f_{t28} \left\{ \exp \left[ 0.25 \left( 1 - \sqrt{\frac{28}{t_e - 1}} \right) \right] \right\}^{0.11} \quad (4.13)$$

- La résistance à la compression  $f_c(t_e)$  est calculée comme suit [138] :

$$f_t(t_e) = 0.395 (f_c(t_e))^{0.55} \quad (4.14)$$

- Le module d'Young  $E_t(t_e)$  est donné par [177] :

$$E_t(t_e) = E_{t28} \times \left\{ \exp \left[ 0.25 \times \left( 1 - \sqrt{\frac{28}{t_e - 1}} \right) \right] \right\}^{0.11} \quad (4.15)$$

Où  $f_{t28}$  est la résistance à la traction (MPa) à 28 jours,  $f_{c28}$  est la résistance à la compression à 28 jours,  $E_{28}$  est le module d'Young du béton à 28 jours.

Le retrait total est la somme du retrait de séchage, du retrait autogène et du retrait thermique. La contrainte de retrait total  $\varepsilon_{total}$  est donnée par [168] :

$$\varepsilon_{total} = \varepsilon_{sechage} + \varepsilon_{autogène} + \varepsilon_{thermique} \quad (4.16)$$

Le retrait thermique est obtenu à partir de l'équation suivante :

$$\varepsilon_{thermique} = \Delta T \alpha_c(t) \quad (4.17)$$

où  $\Delta T$  est le gradient thermique non linéaire ( $^{\circ}\text{C}$ ).

$$\Delta T = T(t) - T_{\text{time-zero}} \quad (4.18)$$

où  $T(t)$  est la température du béton ( $^{\circ}\text{C}$ ) à l'instant  $t$  et  $T_{\text{time-zero}}$  est sa température initiale.

La fonction suivante est appliquée pour exprimer le retrait de séchage [168] :

$$\epsilon_{\text{sechage}} = -1.2k_{vs} k_{hs} k_f k_{td} \epsilon_u \quad (4.19)$$

où  $\epsilon_u$  est le retrait ultime (égal à 480  $\mu\text{m/m}$ ).

$k_{vs}$ ,  $k_{hs}$ ,  $k_f$  et  $k_{td}$  sont calculés comme suit :

$$k_{vs} = 1.45 - 0.13\left(\frac{V}{S}\right) \quad (4.20)$$

$$k_{hs} = 2 - 0.014 \text{ RH} \quad (4.21)$$

$$k_f = \frac{5}{1 + f_{c28}} \quad (4.22)$$

$$k_{td} = \frac{t}{61 - 4f_{c28} + t} \quad (4.23)$$

où  $S$  ( $\text{cm}^2$ ) et  $V$  ( $\text{cm}^3$ ) sont respectivement la surface et le volume de l'échantillon.

Le retrait autogène est exprimé comme suit [168] :

$$\epsilon_{\text{auto}}(t, T) = \epsilon_{\text{auto}}(t, 20) \left[ 1 + \frac{(0,237)}{(t-0,27)^{T-20} / -224,7} \right] \quad (4.24)$$

$$\epsilon_{\text{auto}}(t, 20) = 2 \epsilon_{\text{auto},28} \beta(t) \quad (4.25)$$

$$\epsilon_{\text{auto},28} = -3070e^{(-18,25)} \quad (4.26)$$

$$\beta(t) = \exp\left(0,517\left[1 - \left(\frac{28-0,27}{t-0,27}\right)^{0,415}\right]\right) \quad 0,27 = \text{temps de prise} \quad (4.27)$$

où  $\epsilon_{\text{auto}}(t, T)$  ( $\mu\text{m/m}$ ) est le retrait autogène correspondant à  $T$  au temps  $t$  (jours),  $\epsilon_{\text{auto}}(t, 20)$  ( $\mu\text{m/m}$ ) est le retrait autogène correspondant à 20 °C au temps  $t$  (jours),  $\epsilon_{\text{auto},28}$  ( $\mu\text{m/m}$ ) est le retrait autogène à 28 jours et  $\beta(t)$  est une fonction du retrait autogène à 20 °C qui dépend de l'âge [30].

### 4.3. Analyse numérique

#### 4.3.1. Analyse non linéaire par éléments finis

L'élément SOLID70 est utilisé dans ANSYS pour évaluer la déformation thermique (60-65). Ensuite, la contrainte élastique thermique est commutée par l'élément SOLID70 à l'élément SOLID65.

Les propriétés des bétons utilisés dans le travail numérique sont indiquées dans le tableau 4.3.

Tableau 4. 3. Propriétés des bétons utilisés pour le modèle EF.

		Unit	BGN	BRAP-25	BRAP-50	BRAP-75	BRAP-100
Propriétés thermiques	Densité $\rho$	kg/m <sup>3</sup>	2307	2297	2227	2210	2195
Propriétés mécaniques	Résistance à la traction $f_t(t_c)$	MPa	6	5.55	5.02	4.45	3.94
	Résistance à la compression $f_c(t_c)$	MPa	Calculée en fonction de $f_t(t_c)$				
	Module d'Young $E_t(t_c)$	GPa	25	22	17	16	13

Pour l'étude thermique, les conditions aux limites sont représentées par le coefficient de film et le transfert de chaleur convectif  $h_{free}$  (W m<sup>-2</sup> °C<sup>-1</sup>) [168, 172] :

$$h_{free} = \begin{cases} 5.6 + 3.95 \varpi & (\varpi \leq 5 \text{ m/s}) \\ 7.8 \varpi^{0.78} & (\varpi > 5 \text{ m/s}) \end{cases} \quad (4.28)$$

où  $\varpi$  est la vitesse du vent (m s<sup>-1</sup>) supposée être de 1 m s<sup>-1</sup> (échantillons conservés dans une étuve). Par conséquent, pour cette étude,  $h_{free} = 9.55 \text{ W m}^2 \text{ °C}^{-1}$ .

Pour s'assurer que le modèle EF est en équilibre statique, les conditions limites de l'analyse structurelle sont fixées en bloquant le bord inférieur comme support stable sans translations ni rotations.

#### 4.3.2. Validation de l'analyse EF

Une comparaison entre les résultats expérimentaux et numériques sur le retrait des bétons est présentée dans la figure 4.3. De plus, les valeurs élevées du coefficient de détermination  $R^2$  prouvent que le retrait suit une relation linéaire avec la variation du pourcentage de RAP dans le béton, à différentes températures de cure.

Comme le montre la figure 4.3, les valeurs numériques du retrait ne diffèrent pas significativement des résultats expérimentaux. La valeur élevée de  $R^2$  montre que le modèle à deux phases en série utilisant ANSYS et la méthode de maturité peut prédire très précisément le retrait total du béton BRAP.

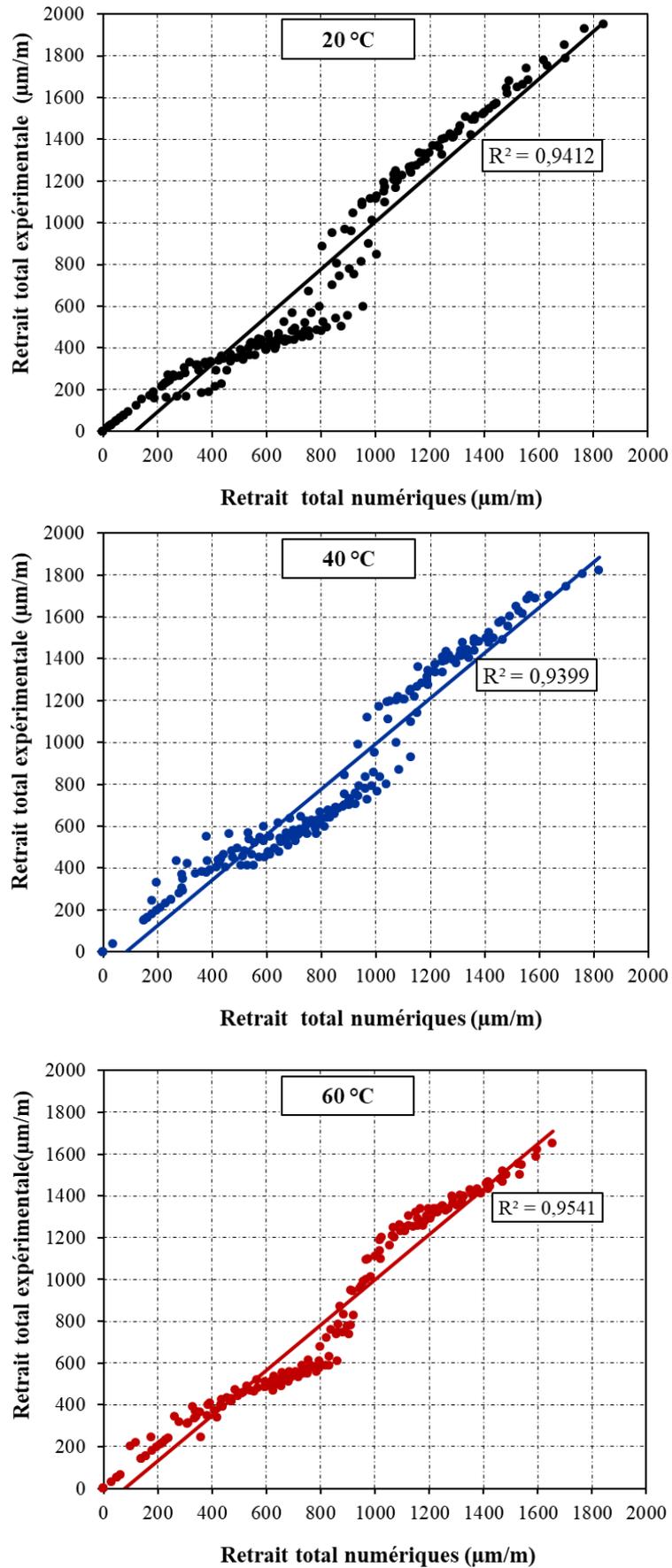


Figure 4. 3. Retrait expérimental et numérique à différentes températures de durcissement.

La précision de l'approche numérique utilisant le modèle à deux phases en série et l'approche de la maturité ensemble peut également être établie par l'analyse du pourcentage d'erreur résiduelle.

Le tableau 4.4 montre le pourcentage d'erreurs résiduelles pour différents mélanges. En général, le pourcentage d'erreur résiduelle trouvé est acceptable. En fin de compte, l'utilisation du modèle à deux phases en série et de la méthode de maturité pour un taux de RAP compris entre 0 et 100 % et des températures de cure comprises entre 20 °C et 60 °C donne des résultats en accord étroit avec les données expérimentales.

Tableau 4. 4. Erreurs résiduelles pour les différents mélanges.

	BGN	BRAP-25	BRAP-50	BRAP-75	BRAP-100
<b>20 °C</b>					
3 jours	2.09	1.45	0.34	3.76	-3.27
7 jours	-2.43	4.87	1.34	-5.21	-1.52
30 jours	1.76	-8.87	1.43	-9.65	2.44
90 jours	4.67	-4.54	6.76	3.32	1.43
180 jours	1.32	0.56	-5.98	2.12	0.13
<b>40 °C</b>					
3 jours	-1.09	2.06	2.45	2.98	1.90
7 jours	5.03	4.38	3.53	-3.12	2.98
30 jours	3.96	-2.47	-1.56	2.98	4.87
90 jours	-4.92	4.60	1.09	3.98	-5.98
180 jours	1.16	-2.60	1.17	-1.67	3.76
<b>60 °C</b>					
3 jours	3.75	2.78	4.98	-2.76	-1.34
7 jours	6.98	-5.09	3.87	3.34	1.30
30 jours	4.20	-9.39	4.34	-2.06	-3.02
90 jours	-4.03	3.23	3.87	4.33	2.65
180 jours	-3.87	2.87	2.98	3.32	4.88

De même, le tableau 4.5. Présente une comparaison entre les résultats expérimentaux et numériques du retrait total des échantillons de béton à différents âges. Sur la base des valeurs indiquées, les retraits expérimentaux ( $\epsilon_{exp}$ ) sont en bon accord avec les retraits numériques ( $\epsilon_{num}$ ), avec un rapport moyen  $\epsilon_{exp}/\epsilon_{num}$  allant de 0.81 à 1.13. L'écart type varie entre 0 et 0.09 et le coefficient de variation entre 0 et 9.11 % [73].

En conséquence, le retrait total numérique des échantillons de béton soumis à différents niveaux de température montre un bon accord avec les valeurs expérimentales obtenues. Par

conséquent, la simulation numérique du retrait total peut être évaluée avec précision à l'aide du logiciel ANSYS.

Tableau 4. 5. Comparaison des valeurs numériques et expérimentales du retrait total.

	résultats expérimentaux					résultats numériques					$\epsilon_{exp}/\epsilon_{num}$				
	$\epsilon_{exp}$ ( $\mu\text{m/m}$ )					$\epsilon_{num}$ ( $\mu\text{m/m}$ )									
	3 jours	7 jours	30 jours	90 jours	180 jours	3 jours	7 jours	30 jours	90 jours	180 jours	3 jours	7 jours	30 jours	90 jours	180 jours
<b>20 °C</b>															
BGN	77	160	523	1130	1370	77	165	520	1007	1228	1.00	0.97	1.01	1.12	1.12
BRAP-25	77	270	570	1250	1494	77	258	650	1245	1363	1.00	1.05	0.88	1.00	1.10
BRAP-50	93	303	747	1427	1663	93	300	868	1276	1540	1.00	1.01	0.86	1.12	1.08
BRAP-75	63	330	813	1530	1787	63	318	825	1402	1696	1.00	1.04	0.99	1.09	1.05
BRAP-100	230	293	1100	1650	1950	230	353	1034	1521	1838	1.00	0.83	1.06	1.08	1.06
Moyenne											1.00	0.98	0.96	1.08	1.08
Ecart type											0.00	0.09	0.09	0.05	0.03
Coefficient de variation (%)											0.00	9.06	9.11	4.42	2.36
<b>40 °C</b>															
BGN	197	373	610	1253	1403	197	338	609	1128	1343	1.00	1.10	1.00	1.11	1.05
BRAP-25	280	447	730	1410	1490	280	433	725	1244	1463	1.00	1.03	1.01	1.13	1.02
BRAP-50	330	480	833	1413	1615	320	474	961	1310	1537	1.03	1.01	0.87	1.08	1.05
BRAP-75	347	497	792	1443	1700	359	493	796	1336	1564	0.96	1.01	1.00	1.08	1.09
BRAP-100	433	600	1140	1683	1820	426	590	1153	1556	1818	1.02	1.02	0.99	1.08	1.00
Moyenne											1.00	1.03	0.97	1.10	1.04
Ecart type											0.03	0.04	0.06	0.02	0.03
Coefficient de variation (%)											2.50	3.89	6.06	2.22	3.15
<b>60 °C</b>															
BGN	243	400	833	1303	1433	246	433	885	1209	1419	0.99	0.92	0.94	1.08	1.01
BRAP-25	217	407	747	1340	1480	217	391	881	1233	1461	1.00	1.04	0.85	1.09	1.01
BRAP-50	210	373	830	1387	1553	210	409	921	1288	1526	1.00	0.91	0.90	1.08	1.02
BRAP-75	240	390	999	1430	1620	240	438	969	1350	1598	1.00	0.89	1.03	1.06	1.01
BRAP-100	180	340	1012	1413	1650	180	419	985	1391	1655	1.00	0.81	1.03	1.02	1.00
Moyenne											1.00	0.92	0.95	1.06	1.01
Ecart type											0.00	0.08	0.08	0.03	0.01
Coefficient de variation(%)											0.42	8.98	8.40	2.67	0.79

#### 4.4. Conclusion

Dans ce chapitre, on a déterminé les différentes propriétés de durcissement de béton tel que le demi-âge du retrait total ( $t_{50}$ ), l'énergie d'activation apparente ( $E_a$ ) et le degré hydratation ( $a$ ).

Les résultats numériques du retrait ont montré une similitude avec les résultats expérimentaux, ce qui implique que l'approche numérique utilisant le modèle à deux phases en série et l'approche de la maturité, combinés, peuvent prédire avec précision la déformation de retrait du béton.

---

# **Conclusion générale**

---

## Conclusion générale

Cette étude vise à compléter les recherches antérieures sur le comportement des bétons à base de granulats RAP. L'objectif de la thèse est d'évaluer les propriétés physico-mécaniques, la durabilité, les déformations de retrait et de fluage des BRAP, en les comparant à un béton élaboré exclusivement à partir de granulats naturels.

Pour répondre à cette question, nous avons commencé par caractériser les différents granulats utilisés dans les compositions de béton. Par la suite, cinq types de béton ont été conçus, incorporant 0 %, 25 %, 50 %, 75 et 100 % de granulats RAP en substitution au gravier naturel.

Les principales conclusions de cette étude expérimentale sont les suivantes :

- Les granulats RAP ont une absorption de 1.56 % supérieure à celle du GN qui est de 0.2 %. Leur densité est de 2.65, tandis que celle du GN est de 2.70. De plus, leur résistance à l'abrasion, de 26, est légèrement inférieure à celle des granulats naturels, qui est de 28.
- A l'état frais, l'affaissement des bétons est principalement influencé par le taux de remplacement du RAP. Le béton à base de granulats naturels présentait un affaissement de 180 mm, tandis que le béton contenant 100% de RAP affichait un affaissement de 140 mm.
- Une diminution significative de la résistance à la compression et à la flexion est observée avec l'augmentation du taux de RAP. Comparativement au béton témoin BGN. La réduction à 28 jours de la résistance à la compression est de 9 % pour le BRAP-25, 20 % pour BRAP-50, 29 % pour BRAP-75 et 37 % pour BRAP-100.
- On observe une diminution du module d'élasticité avec l'augmentation de la proportion de granulats RAP. Le mélange BRAP-25 a eu une réduction du module d'élasticité d'environ 12 % par rapport au BGN. Les mélanges BRAP-50, BRAP-75 et BRAP-100 ont présenté une diminution d'environ 32 %, 36 % et 48 %, respectivement, par rapport au BGN.
- La vitesse ultrasonique diminue avec l'augmentation de la proportion de granulats RAP. Le béton à base de granulats naturels a atteint une vitesse de 4049 m/s à 28 jours et 4250 m/s à 90 jours. Le BRAP-100 a montré des résultats inférieurs avec une vitesse de 3676 m/s à 28 jours et 3800 m/s à 90 jours.
- Le coefficient d'absorption d'eau augmente avec une l'augmentation de la proportion de granulats RAP. A 28 jours. On note une augmentation de l'absorption des BRAP de 17%, 33%, 73% et 83% pour les BRAP-25, BRAP-50, BRAP-75 et BRAP-100, respectivement par rapport au BGN.

- Plus la teneur en RAP est élevée, plus la perméabilité à l'eau augmente. Cette augmentation est justifiée par la capacité d'absorption des RAP et la perméabilité de la structure du béton.
- La perméabilité aux ions de chlore est plus faible pour les BRAP par rapport au BGN. A 28 jours, il y a eu une réduction de la charge totale de 3 %, 5 % et 11 % pour les BRAP-50, BRAP-75 et BRAP-100, respectivement. La perméabilité du BRAP-25 est similaire à celle du BGN.
- Le retrait total augmente avec l'augmentation de la proportion de RAP à la même température. Le retrait total du BRAP-100 était environ 42 %, 30 % et 13 % plus élevé par rapport au BGN à des températures de durcissement de 20, 40 et 60 °C, respectivement. Pour le BRAP-25, l'augmentation était faible.
- Le retrait total de tous les mélange BRAP diminué avec l'augmentation de la température de cure (de 20 °C à 60 °C). Pour le BRAP-100, une réduction de 18 % et de 10 % a été constatée à 60 °C et 40 °C, respectivement, par rapport à 20 °C. Ceci est considéré comme un avantage, et ce type de granulats peut être utilisé dans les zones à climat chaud.
- Avec l'augmentation de la proportion de granulats RAP dans le béton, le fluage total dans les fibres tendues et comprimées augmente également.
- La flèche expérimentale due au fluage à mi-portée des poutres des différents bétons augmente lorsque le taux de remplacement du RAP augmente. On a trouvé une flèche de 6.2 mm pour le BGN et de 6.9 mm, 8.3 mm, 9.2 mm et 10.1 mm pour le BRAP-25, BRAP-50, BRAP-75 et BRAP-100, respectivement.
- Les résultats numériques du retrait concordent avec les résultats expérimentaux. Ce qui implique que l'approche numérique utilisant le modèle à deux phases en série et l'approche de la maturité peuvent prédire avec précision la déformation de retrait du béton.
- En général, le remplacement jusqu'à 25 % des GN par du matériau RAP a un effet marginal sur les propriétés mécaniques et le retrait du béton, ce qui rend l'utilisation du matériau RAP recommandée. Au-delà de 25 %, les propriétés à court et à long terme du BRAP diminuent progressivement avec l'augmentation du niveau de remplacement des granulats naturels.

## **Perspectives**

Cette étude ouvre d'autres perspectives de recherche pour mieux comprendre les bétons produits avec des granulats RAP.

- Techniques d'amélioration de la qualité des granulats RAP pour améliorer les performances des BRAP.
- Utilisation des RAP dans la production des BHP et BAP.
- Etude de la conductivité thermique du BRAP.
- Etude de l'effet de température sur les propriétés mécaniques des BRAP.

---

# Bibliographie

---

## **Bibliographie**

- [1] Saride S, Balunaini U. Towards green pavements in India. First US-India workshop on global geoenvironmental engineering challenges, New Delhi, India 2010.
- [2] Taha R, Al-Harthy A, Al-Shamsi K, Al-Zubeidi M. Cement stabilization of reclaimed asphalt pavement aggregate for road bases and subbases. *Journal of materials in civil engineering*. 2002;14(3):239-45.
- [3] Magar S, Xiao F, Singh D, Showkat B. Applications of reclaimed asphalt pavement in India—A review. *Journal of Cleaner Production*. 2022;335:130221.
- [4] Zhou F, Hu S, Das G, Scullion T. High RAP mixes design methodology with balanced performance. United States. Federal Highway Administration; 2011.
- [5] Arnold JW, Behnia B, McGovern ME, Hill B, Buttlar WG, Reis H. Quantitative evaluation of low-temperature performance of sustainable asphalt pavements containing recycled asphalt shingles (RAS). *Construction and Building Materials*. 2014;58:1-8.
- [6] Masi G, Michelacci A, Manzi S, Bignozzi MC. Assessment of reclaimed asphalt pavement (RAP) as recycled aggregate for concrete. *Construction and Building Materials*. 2022;341:127745.
- [7] EAPA. European Asphalt Pavement Association. Asphalt in Figure 20202021.
- [8] Gregson N, Crang M, Fuller S, Holmes H. Interrogating the circular economy: the moral economy of resource recovery in the EU. *Economy and society*. 2015;44(2):218-43.
- [9] Roberts FL, Kandhal PS, Brown ER, Lee D-Y, Kennedy TW. Hot mix asphalt materials, mixture design and construction. National Asphalt Pavement Association Research and Education Foundation, USA; 1996.
- [10] Cross SA, Jakatimath Y. Evaluation of cold in-place recycling for rehabilitation of transverse cracking on US 412. Oklahoma State University; 2007.
- [11] Shi X, Mukhopadhyay A, Zollinger D. Sustainability assessment for portland cement concrete pavement containing reclaimed asphalt pavement aggregates. *Journal of Cleaner Production*. 2018;192:569-81.
- [12] Singh S, Ransinchung RN G, Kumar P. Laboratory investigation of concrete pavements containing fine RAP aggregates. *Journal of materials in civil engineering*. 2018;30(2):04017279.
- [13] Copeland A. Reclaimed asphalt pavement in asphalt mixtures: State of the practice. United States. Federal Highway Administration. Office of Research; 2011.
- [14] Tusar M, Nielsen E, Batista F, Antunes M, Mollenhauer K, Vansteenkiste S, et al. Optimization of reclaimed asphalt in asphalt plant mixing. *Re-Road End of Life Strategies of Asphalt Pavements*, European Commission DG Research. 2012.

- [15] Olard F, Pouget S. Current status of RAP application in France. *Transportation Research Circular*, Number E-C188, Transportation Research Board. 2014:42-50.
- [16] Kennedy TW, Tam WO, Solaimanian M. Optimizing use of reclaimed asphalt pavement with the Superpave system. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*. 1998;67.
- [17] Yu B, Gu X, Wu M, Ni F. Application of a high percentage of reclaimed asphalt pavement in an asphalt mixture: blending process and performance investigation. *Road Materials and Pavement Design*. 2017;18(3):753-65.
- [18] Singh D, Chitragar SF, Ashish PK. Comparison of moisture and fracture damage resistance of hot and warm asphalt mixes containing reclaimed pavement materials. *Construction and Building Materials*. 2017;157:1145-53.
- [19] McDaniel RS, Kowalski KJ, Shah A. Evaluation of reclaimed asphalt pavement for surface mixtures. 2012.
- [20] Mantalovas K, Di Mino G. The sustainability of reclaimed asphalt as a resource for road pavement management through a circular economic model. *Sustainability*. 2019;11(8):2234.
- [21] Kumari M, Ransinchung GD, Singh S. A laboratory investigation on Dense Bituminous Macadam containing different fractions of coarse and fine RAP. *Construction and Building Materials*. 2018;191:655-66.
- [22] McGarrah EJ. Evaluation of current practices of reclaimed asphalt pavement/virgin aggregate as base course material. United States. Federal Highway Administration; 2007.
- [23] Piao Z, Mikhailenko P, Kakar MR, Bueno M, Hellweg S, Poulikakos LD. Urban mining for asphalt pavements: A review. *Journal of Cleaner Production*. 2021;280:124916.
- [24] Huang B, Shu X, Li G. Laboratory investigation of portland cement concrete containing recycled asphalt pavements. *Cement and concrete research*. 2005;35(10):2008-13.
- [25] Shi X, Mirsayar M, Mukhopadhyay A, Zollinger D. Characterization of two-parameter fracture properties of portland cement concrete containing reclaimed asphalt pavement aggregates by semicircular bending specimens. *Cement and Concrete Composites*. 2019;95:56-69.
- [26] Shi X, Mukhopadhyay A, Liu K-W. Mix design formulation and evaluation of portland cement concrete paving mixtures containing reclaimed asphalt pavement. *Construction and Building Materials*. 2017;152:756-68.
- [27] Debbarma S, Ransinchung G. Achieving sustainability in roller compacted concrete pavement mixes using reclaimed asphalt pavement aggregates—state of the art review. *Journal of Cleaner Production*. 2021;287:125078.
- [28] Debbarma S, Ransinchung G, Singh S. Feasibility of roller compacted concrete pavement containing different fractions of reclaimed asphalt pavement. *Construction and Building Materials*. 2019;199:508-25.

- [29] Mahmoud E, Ibrahim A, El-Chabib H, Patibandla VC. Self-consolidating concrete incorporating high volume of fly ash, slag, and recycled asphalt pavement. *International Journal of Concrete Structures and Materials*. 2013;7(2):155-63.
- [30] Berry M, Kappes B, Kappes L. Optimization of Concrete Mixtures Containing Reclaimed Asphalt Pavement. *ACI Materials journal*. 2015;112(6).
- [31] Mathias V, Sedran T, de Larrard F. Modelling of mechanical properties of cement concrete incorporating reclaimed asphalt pavement. *Road Materials and Pavement Design*. 2009;10(1):63.
- [32] Singh S, Shintre D, Ransinchung RN G, Kumar P. Performance of fine RAP concrete containing flyash, silica fume, and bagasse ash. *Journal of materials in civil engineering*. 2018;30(10):04018233.
- [33] Abraham SM, Ransinchung GD. Laboratory Research on Reclaimed Asphalt Pavement-Inclusive Cementitious Mixtures. *ACI Materials journal*. 2020;117(2).
- [34] Settari C, Debieb F, Kadri EH, Boukendakdji O. Assessing the effects of recycled asphalt pavement materials on the performance of roller compacted concrete. *Construction and Building Materials*. 2015;101:617-21.
- [35] Fakhri M, Amosoltani E. The effect of reclaimed asphalt pavement and crumb rubber on mechanical properties of roller compacted concrete pavement. *Construction and Building Materials*. 2017;137:470-84.
- [36] Debbarma S, Singh S, RN GR. Laboratory investigation on the fresh, mechanical, and durability properties of roller compacted concrete pavement containing reclaimed asphalt pavement aggregates. *Transportation research record*. 2019;2673(10):652-62.
- [37] Courard L, Michel F, Delhez P. Use of concrete road recycled aggregates for roller compacted concrete. *Construction and Building Materials*. 2010;24(3):390-5.
- [38] Selvam M, Debbarma S, Singh S, Shi X. Utilization of alternative aggregates for roller compacted concrete pavements—A state-of-the-art review. *Construction and Building Materials*. 2022;317:125838.
- [39] Huang B, Shu X, Burdette E. Mechanical properties of concrete containing recycled asphalt pavements. *Magazine of Concrete research*. 2006;58(5):313-20.
- [40] Delwar M, Fahmy M, Taha R. Use of reclaimed asphalt pavement as an aggregate in portland cement concrete. *ACI Materials journal*. 1997;94(3):251-6.
- [41] Shi X, Zollinger DG, Mukhopadhyay AK. Punchout study for continuously reinforced concrete pavement containing reclaimed asphalt pavement using pavement ME models. *International Journal of Pavement Engineering*. 2020;21(10):1199-212.
- [42] Hossiney N, Tia M, Bergin MJ. Concrete containing RAP for use in concrete pavement. *International Journal of Pavement Research and Technology*. 2010;3(5):251.

- [43] Hassan KE, Brooks JJ, Erdman M. The use of reclaimed asphalt pavement (RAP) aggregates in concrete. In: Woolley GR, Goumans JJM, Wainwright PJ, editors. Waste Management Series: Elsevier; 2000. p. 121-8.
- [44] Ibrahim A, Mahmoud E, Khodair Y, Patibandla VC. Fresh, mechanical, and durability characteristics of self-consolidating concrete incorporating recycled asphalt pavements. *Journal of materials in civil engineering*. 2014;26(4):668-75.
- [45] Rout MD, Biswas S, Shubham K, Sinha AK. A systematic review on performance of reclaimed asphalt pavement (RAP) as sustainable material in rigid pavement construction: Current status to future perspective. *Journal of Building Engineering*. 2023;76:107253.
- [46] Abraham SM, Ransinchung G. Durability Performance of Cementitious Mixes with Reclaimed Asphalt Pavement Aggregates. *Transportation in Developing Economies*. 2022;8(1):12.
- [47] Andrew B, Buyondo KA, Kasedde H, Kirabira JB, Olupot PW, Yusuf AA. Investigation on the use of reclaimed asphalt pavement along with steel fibers in concrete. *Case Studies in Construction Materials*. 2022;17:e01356.
- [48] Brand AS, Roesler JR. Expansive and concrete properties of SFS-FRAP aggregates. *Journal of materials in civil engineering*. 2016;28(2):04015126.
- [49] Debbarma S, Ransinchung G, Singh S. Improving the properties of RAP-RCCP mixes by incorporating supplementary cementitious materials as part addition of Portland cement. *Journal of materials in civil engineering*. 2020;32(8):04020229.
- [50] Dubey P, Paswan S, Sukhija M, Saboo N. Assessing the effect of reclaimed asphalt pavement on mechanical properties of dry-lean concrete. *Journal of materials in civil engineering*. 2020;32(11):04020348.
- [51] Erdem S, Blankson MA. Environmental performance and mechanical analysis of concrete containing recycled asphalt pavement (RAP) and waste precast concrete as aggregate. *Journal of hazardous materials*. 2014;264:403-10.
- [52] Hossiney N, Sepuri HK, Mohan MK, Arjun H, Govindaraju S, Chyne J. Alkali-activated concrete paver blocks made with recycled asphalt pavement (RAP) aggregates. *Case Studies in Construction Materials*. 2020;12:e00322.
- [53] Duan G, Wang F, Zhang J, Feng Y. Investigation on Mechanical Behaviors of Self-Compacting Concrete Containing Reclaimed Asphalt Pavement.
- [54] Nandi S, RN GR. Performance Characteristics of Concrete Paver Blocks Incorporating Individual and Combined Fractions of Reclaimed Asphalt Pavement Aggregates under Different Curing Regimes. *Journal of materials in civil engineering*. 2023;35(4):04023017.
- [55] Paluri Y, Mogili S, Mudavath H, Noolu V. Effect of fibres on the strength and toughness characteristics of recycled aggregate concrete. *Materials Today: Proceedings*. 2021;38:2537-40.

- [56] Sahdeo SK, Ransinchung G, Rahul K, Debbarma S. Reclaimed asphalt pavement as a substitution to natural coarse aggregate for the production of sustainable pervious concrete pavement mixes. *Journal of materials in civil engineering*. 2021;33(2):04020469.
- [57] Singh S, Ransinchung G, Debbarma S, Kumar P. Utilization of reclaimed asphalt pavement aggregates containing waste from Sugarcane Mill for production of concrete mixes. *Journal of Cleaner Production*. 2018;174:42-52.
- [58] Singh S, Ransinchung GD, Kumar P. Feasibility study of RAP aggregates in cement concrete pavements. *Road Materials and Pavement Design*. 2019;20(1):151-70.
- [59] Tantri A, Nayak G, Kamath M, Shenoy A, Shetty KK. Utilization of cashew nut-shell ash as a cementitious material for the development of reclaimed asphalt pavement incorporated self compacting concrete. *Construction and Building Materials*. 2021;301:124197.
- [60] Singh S, Ransinchung G, Kumar P. An economical processing technique to improve RAP inclusive concrete properties. *Construction and Building Materials*. 2017;148:734-47.
- [61] Shi X, Mukhopadhyay A, Zollinger D, Huang K. Performance evaluation of jointed plain concrete pavement made with portland cement concrete containing reclaimed asphalt pavement. *Road Materials and Pavement Design*. 2021;22(1):59-81.
- [62] Aurangzeb Q, Al-Qadi IL, Ozer H, Yang R. Hybrid life cycle assessment for asphalt mixtures with high RAP content. *Resources, conservation and recycling*. 2014;83:77-86.
- [63] Visintine B. An Investigation of Various Percentages of Reclaimed Asphalt Pavement on the Performance of Asphalt Pavements [Doctoral thesis]: North Carolina University; 2011.
- [64] Li J, Xiao F, Zhang L, Amirkhanian SN. Life cycle assessment and life cycle cost analysis of recycled solid waste materials in highway pavement: A review. *Journal of Cleaner Production*. 2019;233:1182-206.
- [65] Hanson CS, Noland RB, Cavale KR. Life-cycle greenhouse gas emissions of materials used in road construction. *Transportation research record*. 2012;2287(1):174-81.
- [66] Yang K-H, Jung Y-B, Cho M-S, Tae S-H. Effect of supplementary cementitious materials on reduction of CO<sub>2</sub> emissions from concrete. *Journal of Cleaner Production*. 2015;103:774-83.
- [67] Lee N, Chou C-P, Chen K-Y. Benefits in energy savings and CO<sub>2</sub> reduction by using reclaimed asphalt pavement. Washington DC, United States 2012.
- [68] NF EN 13108-8. Mélanges bitumineux - Spécifications pour le matériau - Partie 8 : agrégats d'enrobés. AFNOR; 2016.
- [69] Debbarma S, Selvam M, Singh S. Can flexible pavements' waste (RAP) be utilized in cement concrete pavements?—A critical review. *Construction and Building Materials*. 2020;259:120417.

- [70] Saride S, Deepti A, Rao TS, Sarath Chandra Prasad J, Dayakar Babu R. Evaluation of fly-ash-treated reclaimed asphalt pavement for the design of sustainable pavement bases: An Indian perspective. *Geo-Congress 2014: Geo-characterization and Modeling for Sustainability* 2014. p. 3676-85.
- [71] Saunders KJ. *Organic polymer chemistry: an introduction to the organic chemistry of adhesives, fibres, paints, plastics and rubbers*: Springer Science & Business Media; 2012.
- [72] Recycling A, Association R, Dunn L. *Basic asphalt recycling manual: Asphalt Recycling and Reclaiming Association* 2001.
- [73] Boussetta I, El Euch Khay S, Neji J. Experimental testing and modelling of roller compacted concrete incorporating RAP waste as aggregates. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. 2020;24(11):1729-43.
- [74] Abedalqader A, Shatarat N, Ashteyat A, Katkhuda H. Influence of temperature on mechanical properties of recycled asphalt pavement aggregate and recycled coarse aggregate concrete. *Construction and Building Materials*. 2021;269:121285.
- [75] Ashteyat A, Obaidat A, Kirgiz M, AlTawallbeh B. Production of Roller Compacted Concrete Made of Recycled Asphalt Pavement Aggregate and Recycled Concrete Aggregate and Silica Fume. *International Journal of Pavement Research and Technology*. 2022;15(4):987-1002.
- [76] Ghazy MF, Abd Elaty MAA, Abo-Elenain MT. Characteristics and optimization of cement concrete mixes with recycled asphalt pavement aggregates. *Innovative Infrastructure Solutions*. 2021;7(1):53.
- [77] Khodair Y, Raza M. Sustainable self-consolidating concrete using recycled asphalt pavement and high volume of supplementary cementitious materials. *Construction and Building Materials*. 2017;131:245-53.
- [78] Kumari M, Ransinchung GDRN, Singh S. A laboratory investigation on Dense Bituminous Macadam containing different fractions of coarse and fine RAP. *Construction and Building Materials*. 2018;191:655-66.
- [79] Soltanabadi R, Behfarnia K. Shear strength of reinforced concrete deep beams containing recycled concrete aggregate and recycled asphalt pavement. *Construction and Building Materials*. 2022;314:125597.
- [80] Yao C, Guo Y, Shen A, Cui W, He Z. Recycling of fine-asphalt-pavement solid waste for low-shrinkage rapid hardening Portland cement concrete pavement. *Construction and Building Materials*. 2021;289:123132.
- [81] El-Nimri R, Abdel-Jaber MS, Hunaiti YM, Abdel-Jaber M. Behavior of light-gauge steel beams filled with recycled concrete. *Magazine of Civil Engineering*. 2021((101) 1):10102.

- [82] Shadmani A, Tahmouresi B, Saradar A, Mohseni E. Durability and microstructure properties of SBR-modified concrete containing recycled asphalt pavement. *Construction and Building Materials*. 2018;185:380-90.
- [83] Paluri Y, Heeralal M, Kumar PR. A study on the use of reclaimed asphalt pavement aggregates in pavement quality concrete. *Cement-Wapno-Beton= Cement Lime Concrete*. 2019;24(6):421-31.
- [84] Wongkvanklom A, Posi P, Kaewngao T, Chindaprasirt P. Beneficial utilization of recycled asphaltic concrete aggregate in high calcium fly ash geopolymer concrete. *Case Studies in Construction Materials*. 2021;15:e00615.
- [85] Shatarat N, Alhaq AA, Katkhuda H, Jaber MtA. Investigation of axial compressive behavior of reinforced concrete columns using Recycled Coarse Aggregate and Recycled Asphalt Pavement aggregate. *Construction and Building Materials*. 2019;217:384-93.
- [86] Brand AS, Roesler JR. Ternary Concrete with Fractionated Reclaimed Asphalt Pavement. *ACI Materials journal*. 2015;112(1):155-64.
- [87] Zhu J, Ma T, Fan J, Fang Z, Chen T, Zhou Y. Experimental study of high modulus asphalt mixture containing reclaimed asphalt pavement. *Journal of Cleaner Production*. 2020;263:121447.
- [88] Modarres A, Hosseini Z. Mechanical properties of roller compacted concrete containing rice husk ash with original and recycled asphalt pavement material. *Materials & Design*. 2014;64:227-36.
- [89] Abraham SM, Ransinchung GDRN. Strength and permeation characteristics of cement mortar with Reclaimed Asphalt Pavement Aggregates. *Construction and Building Materials*. 2018;167:700-6.
- [90] Debbarma S, Ransinchung R.N GD, Singh S. Feasibility of roller compacted concrete pavement containing different fractions of reclaimed asphalt pavement. *Construction and Building Materials*. 2019;199:508-25.
- [91] Debbarma S, Ransinchung GD. Morphological characteristics of roller-compacted concrete mixes containing reclaimed asphalt pavement aggregates. *Indian Concrete Journal*. 2020.
- [92] Arabiyat S, Abdel Jaber Mt, Katkhuda H, Shatarat N. Influence of using two types of recycled aggregates on shear behavior of concrete beams. *Construction and Building Materials*. 2021;279:122475.
- [93] Xiao F, Amir Khanian SN, Shen J, Putman B. Influences of crumb rubber size and type on reclaimed asphalt pavement (RAP) mixtures. *Construction and Building Materials*. 2009;23(2):1028-34.
- [94] Gao J, Yang J, Yu D, Jiang Y, Ruan K, Tao W, et al. Reducing the variability of multi-source reclaimed asphalt pavement materials: A practice in China. *Construction and Building Materials*. 2021;278:122389.

- [95] Gao J, Yao Y, Song L, Xu J, Yang J. Determining the maximum permissible content of recycled asphalt pavement stockpile in plant hot-mix recycled asphalt mixtures considering homogeneity: A case study in China. *Case Studies in Construction Materials*. 2022;16:e00961.
- [96] Arimilli S, Jain PK, Nagabhushana M. Optimization of recycled asphalt pavement in cold emulsified mixtures by mechanistic characterization. *Journal of materials in civil engineering*. 2016;28(2):04015132.
- [97] Al-Oraimi S, Hassan HF, Hago A. Recycling of reclaimed asphalt pavement in Portland cement concrete. *The Journal of Engineering Research [TJER]*. 2009;6(1):37-45.
- [98] Okafor FO. Performance of recycled asphalt pavement as coarse aggregate in concrete. *Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies*. 2010;17(9):47-58.
- [99] Singh S, Ransinchung R.N GD, Debbarma S, Kumar P. Utilization of reclaimed asphalt pavement aggregates containing waste from Sugarcane Mill for production of concrete mixes. *Journal of Cleaner Production*. 2018;174:42-52.
- [100] Brand AS, Roesler JR. Concrete with steel furnace slag and fractionated reclaimed asphalt pavement. *Illinois Center for Transportation*; 2014.
- [101] Papakonstantinou CG. Resonant column testing on Portland cement concrete containing recycled asphalt pavement (RAP) aggregates. *Construction and Building Materials*. 2018;173:419-28.
- [102] Fakhri M. The effect of waste rubber particles and silica fume on the mechanical properties of roller compacted concrete pavement. *Journal of Cleaner Production*. 2016;129:521-30.
- [103] Brand AS, Roesler JR, Al-Qadi IL, Shangguan P. Fractionated reclaimed asphalt pavement (FRAP) as a coarse aggregate replacement in a ternary blended concrete pavement. *ICT-12-008*. 2012.
- [104] Liu H, Duan G, Wang F, Zhang J, Zhou Y, Feng Y, et al. Investigation on mechanical behaviors of Self-compacting concrete containing reclaimed asphalt pavement. *Construction and Building Materials*. 2022;346:128421.
- [105] Brand AS, Amirghanian AN, Roesler JR. Flexural capacity of full-depth and two-lift concrete slabs with recycled aggregates. *Transportation research record*. 2014;2456(1):64-72.
- [106] El Euch Ben Said S, El Euch Khay S, Loulizi A. Experimental investigation of PCC incorporating RAP. *International Journal of Concrete Structures and Materials*. 2018;12:1-11.
- [107] Brand AS, Roesler JR. Bonding in cementitious materials with asphalt-coated particles: Part II—Cement-asphalt chemical interactions. *Construction and Building Materials*. 2017;130:182-92.

- [108] Moaveni M, Cetin S, Brand AS, Dahal S, Roesler JR, Tutumluer E. Machine vision based characterization of particle shape and asphalt coating in Reclaimed Asphalt Pavement. *Transportation Geotechnics*. 2016;6:26-37.
- [109] Euch Khay SE, Euch Ben Said SE, Loulizi A, Neji J. Laboratory investigation of cement-treated reclaimed asphalt pavement material. *Journal of materials in civil engineering*. 2015;27(6):04014192.
- [110] Brand AS, Roesler JR. Bonding in cementitious materials with asphalt-coated particles: Part I—The interfacial transition zone. *Construction and Building Materials*. 2017;130:171-81.
- [111] Su Y-M, Hossiney N, Tia M, Bergin M. Mechanical properties assessment of concrete containing reclaimed asphalt pavement using the superpave indirect tensile strength test. *Journal of Testing and Evaluation*. 2014;42(4):912-20.
- [112] Thomas R, Fellows AJ, Sorensen AD. Durability analysis of recycled asphalt pavement as partial coarse aggregate replacement in a high-strength concrete mixture. *Journal of materials in civil engineering*. 2018;30(5):04018061.
- [113] Abraham SM, Ransinchung GD. Strength and permeation characteristics of cement mortar with Reclaimed Asphalt Pavement Aggregates. *Construction and Building Materials*. 2018;167:700-6.
- [114] Hilal AA. Microstructure of concrete. *High performance concrete technology and applications*. 2016:3-24.
- [115] Bentur A, Odler I. Development and nature of interfacial. *Interfacial transition zone in concrete*: CRC Press London; 1996. p. 20-44.
- [116] Maso J. The bond between aggregates and hydrated cement pastes. *7th Int Cong on the Chem of Cement, Paris, France*. 1980;3:VII-1/3 a VII-1/15.
- [117] Abraham SM, Ransinchung GD. Influence of RAP aggregates on strength, durability and porosity of cement mortar. *Construction and Building Materials*. 2018;189:1105-12.
- [118] Topcu IB, Isikdag B. Effects of crushed RAP on free and restrained shrinkage of mortars. *International Journal of Concrete Structures and Materials*. 2009;3(2):91-5.
- [119] Sadati S, Khayat KH. Field performance of concrete pavement incorporating recycled concrete aggregate. *Construction and Building Materials*. 2016;126:691-700.
- [120] Diptikanta Rout M, Biswas S, Sinha AK. Evaluation of Mechanical Properties of Rigid Pavement with High RAP Content. *Recent Advances in Transportation Systems Engineering and Management: Select Proceedings of CTSEM 2021*: Springer; 2022. p. 285-98.
- [121] Nandi S, Ransinchung G. Performance evaluation and sustainability assessment of precast concrete paver blocks containing coarse and fine RAP fractions: A comprehensive comparative study. *Construction and Building Materials*. 2021;300:124042.

- [122] Yang C, Xie J, Wu S, Amirkhanian S, Wang Z, Song J, et al. Enhancement mechanism of induction heating on blending efficiency of RAP-virgin asphalt in steel slag recycled asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*. 2021;269:121318.
- [123] Aghaeipour A, Madhkhan M. Effect of ground granulated blast furnace slag (GGBFS) on RCCP durability. *Construction and Building Materials*. 2017;141:533-41.
- [124] Zhang D, Shao Y. Effect of early carbonation curing on chloride penetration and weathering carbonation in concrete. *Construction and Building Materials*. 2016;123:516-26.
- [125] Maes M, De Belie N. Resistance of concrete and mortar against combined attack of chloride and sodium sulphate. *Cement and Concrete Composites*. 2014;53:59-72.
- [126] Debbarma S, Ransinchung RN G, Singh S. Suitability of various supplementary cementitious admixtures for RAP inclusive RCCP mixes. *International Journal of Pavement Engineering*. 2021;22(12):1568-81.
- [127] Tia M, Hossiney N, Su Y-M, Chen Y, Do TA. Use of reclaimed asphalt pavement in concrete pavement slabs. Florida. Dept. of Transportation; 2012.
- [128] Brand AS. Interfacial transition zone composition and bonding in cementitious materials with asphalt-coated particles: University of Illinois at Urbana-Champaign; 2015.
- [129] Reynouard JM, Pijaudier-Cabot G. Comportement mécanique du béton: Hermès - Lavoisier, ; 2005.
- [130] Ulm F, Acker P. Le point sur le fluage et la recouvrance des bétons. *Bulletin de liaison des Ponts et Chaussées spécial XX*. 1998:73-82.
- [131] Benboudjema F. Modélisation des déformations différées du béton sous sollicitations biaxiales. Application aux enceintes de confinement de bâtiments réacteurs des centrales nucléaires: Université de Marne la Vallée; 2002.
- [132] NF EN 1428. Bitumes et liants bitumineux - Détermination de la teneur en eau dans les émulsions de bitume - Méthode de distillation azéotropique. AFNOR; 2012.
- [133] NF P 18-404. Bétons–Essais d’étude de convenance et de contrôle–Confection et conservation des éprouvettes. AFNOR; 1981.
- [134] NF EN 12350-6. Essai pour béton frais. Partie 6: Masse volumique.: AFNOR; 1999.
- [135] NF EN 12350-2. Essais pour béton frais-Partie 2: essai d’affaissement. AFNOR; 2019.
- [136] NF EN 12390-3. Essais pour béton durci–Partie 3: résistance à la compression des éprouvettes. AFNOR; 2012.
- [137] NF EN 12390-5. Essais pour béton durci–Partie 5: résistance à la flexion sur éprouvettes. AFNOR; 2012.
- [138] ASTM C469. Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson’s Ratio of Concrete in Compression. ASTM International, West Conshohocken, PA; 2014.

- [139] NF EN 12504-4. Essais pour béton dans les structures – Partie 4 : détermination de la vitesse de propagation du son. AFNOR; 2005.
- [140] ASTM C1723. Standard Guide for Examination of Hardened Concrete Using Scanning Electron Microscopy ASTM Standards, West Conshohocken, PA; 2016.
- [141] ASTM C1585. Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes. ASTM Standards, West Conshohocken, PA; 2013.
- [142] NF EN 206-1. Béton - Partie 1 : spécification, performances, production et conformité. AFNOR; 2004.
- [143] NF EN 12390-8. Essais pour béton durci - Partie 8 : profondeur de pénétration d'eau sous pression. AFNOR; 2012.
- [144] DIN 1048. Testing method for concrete – determination of the depth of penetration of water under pressure. German Institute for Standardisation; 2000.
- [145] ASTM C1202. Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration electrical conductance.: ASTM Standards, West Conshohocken, PA; 2012.
- [146] Bouziadi F, Boulekbache B, Hamrat M. The effects of fibres on the shrinkage of high-strength concrete under various curing temperatures. *Construction and Building Materials*. 2016;114:40-8.
- [147] Itim A, Ezziane K, Kadri E-H. Compressive strength and shrinkage of mortar containing various amounts of mineral additions. *Construction and Building Materials*. 2011;25(8):3603-9.
- [148] Al Chami G, Thériault M, Neale K. Creep behaviour of CFRP-strengthened reinforced concrete beams. *Construction and Building Materials*. 2009;23(4):1640-52.
- [149] Le T. Influence de l'humidité des granulats de béton recyclé sur le comportement à l'état frais et durcissant des mortiers. Université Lille 1, France 2015.
- [150] Mushtaq SM, Siddique R, Goyal S, Kaur K. Experimental studies and drying shrinkage prediction model for concrete containing waste foundry sand. *Cleaner Engineering and Technology*. 2021;2:100071.
- [151] Salman MM, Al-Amawee AH. The ratio between static and dynamic modulus of elasticity in normal and high strength concrete. *Journal of Engineering and Sustainable Development*. 2006;10(2):163-74.
- [152] Corinaldesi V, Moriconi G. Influence of mineral additions on the performance of 100% recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*. 2009;23(8):2869-76.
- [153] Fan C-C, Huang R, Hwang H, Chao S-J. Properties of concrete incorporating fine recycled aggregates from crushed concrete wastes. *Construction and Building Materials*. 2016;112:708-15.
- [154] Andreu G, Miren E. Experimental analysis of properties of high performance recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*. 2014;52:227-35.

- [155] Kwan WH, Ramli M, Kam KJ, Sulieman MZ. Influence of the amount of recycled coarse aggregate in concrete design and durability properties. *Construction and Building Materials*. 2012;26(1):565-73.
- [156] Naik TR, Malhotra VM, Popovics JS. The ultrasonic pulse velocity method. *Handbook on Nondestructive Testing of Concrete, Second Edition: CRC Press; 2003*. p. 8-1-8-19.
- [157] Zhang W, Zakaria M, Hama Y. Influence of aggregate materials characteristics on the drying shrinkage properties of mortar and concrete. *Construction and Building Materials*. 2013;49:500-10.
- [158] Ge Z, Feng Y, Zhang H, Xiao J, Sun R, Liu X. Use of recycled fine clay brick aggregate as internal curing agent for low water to cement ratio mortar. *Construction and Building Materials*. 2020;264:120280.
- [159] Ruetz W. A hypothesis for the creep of hardened cement paste and the influence of simultaneous shrinkage. *Proceedings of the Structure of Concrete and its Behavior under Load 1968*. p. 365-87.
- [160] Wittmann FH. Creep and shrinkage mechanisms. *Creep and shrinkage in concrete structures*. 1982:129-61.
- [161] Bissonnette B, Pigeon M, Vaysburd AM. Tensile creep of concrete: study of its sensitivity to basic parameters. *ACI Materials journal*. 2007;104(4):360.
- [162] Brooks J, Neville A. A comparison of creep, elasticity and strength of concrete in tension and in compression. *Magazine of Concrete research*. 1977;29(100):131-41.
- [163] Miyazawa S. Effect of constituents and curing condition on autogenous shrinkage of concrete. *Proceedings of the International Workshop (Japanese Concrete Institute, Hiroshima)*. Hiroshima, Japan 1999. p. 269-80.
- [164] Turcry P, Loukili A, Barcelo L, Casabonne JM. Can the maturity concept be used to separate the autogenous shrinkage and thermal deformation of a cement paste at early age? *Cement and concrete research*. 2002;32(9):1443-50.
- [165] Chu I, Kwon SH, Amin MN, Kim J-K. Estimation of temperature effects on autogenous shrinkage of concrete by a new prediction model. *Construction and Building Materials*. 2012;35:171-82.
- [166] Maghfouri M, Shafigh P, Alimohammadi V, Doroudi Y, Aslam M. Appropriate drying shrinkage prediction models for lightweight concrete containing coarse agro-waste aggregate. *Journal of Building Engineering*. 2020;29:101148.
- [167] Lahmar N, Bouziadi F, Boulekbache B, Meziane E-H, Hamrat M, Haddi A, et al. Experimental and finite element analysis of shrinkage of concrete made with recycled coarse aggregates subjected to thermal loading. *Construction and Building Materials*. 2020;247:118564.
- [168] Bouziadi F, Boulekbache B, Haddi A, Djelal C, Hamrat M. Numerical analysis of shrinkage of steel fiber reinforced high-strength concrete subjected to thermal loading. *Construction and Building Materials*. 2018;181:381-93.

- [169] ASTM C1074. Practice for estimating concrete strength by the maturity method. ASTM Standards, West Conshohocken, PA; 2017.
- [170] Carino NJ, Lew HS. The maturity method: from theory to application. Structures 2001: A structural engineering odyssey2001. p. 1-19.
- [171] Schindler AK. Effect of temperature on hydration of cementitious materials. ACI Materials journal. 2004;101(1):72-81.
- [172] Wu S, Huang D, Lin F-B, Zhao H, Wang P. Estimation of cracking risk of concrete at early age based on thermal stress analysis. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2011;105(1):171-86.
- [173] Liu K, Lu L, Wang F, Liang W. Theoretical and experimental study on multi-phase model of thermal conductivity for fiber reinforced concrete. Construction and Building Materials. 2017;148:465-75.
- [174] Zhang W, Min H, Gu X, Xi Y, Xing Y. Mesoscale model for thermal conductivity of concrete. Construction and Building Materials. 2015;98:8-16.
- [175] Kim K-H, Jeon S-E, Kim J-K, Yang S. An experimental study on thermal conductivity of concrete. Cement and concrete research. 2003;33(3):363-71.
- [176] Shen D, Jiang J, Shen J, Yao P, Jiang G. Influence of prewetted lightweight aggregates on the behavior and cracking potential of internally cured concrete at an early age. Construction and Building Materials. 2015;99:260-71.
- [177] Müller HS, Anders I, Breiner R, Vogel M. Concrete: treatment of types and properties in fib Model Code 2010. Structural concrete. 2013;14(4):320-34.