

UNIVERSITÉ DE BLIDA 1

Faculté de Technologie

Département de Génie Civil

Laboratoire de Géo matériaux et Génie Civil

MEMOIRE DE MASTER

Spécialité : matériaux en génie civil

**RHEOLOGIE DU MORTIER AUTOPLAÇANT A BASE DE SABLES
RECYCLES : Revue bibliographique**

Par

HIBA TÉGLAOUI

MERIEM LAOUI

Devant le jury composé de :

DEBBIH Amina	M.C.B	U.S.D.B.1	Président
BENTLEMCEN Nadia	M.A.A	U.S.D.B.1	Examineur
MENADI Belkacem	Prof.	U.S.D.B.1	Promoteur
Kouider Djelloul OMAR	M.C.B	U.D.B.K.M	Co- Promoteur

Blida, septembre 2020

Résumé

Les bétons autoplaçant (BAP) sont des matériaux très fluides qui se mettent en place sans vibration. Lorsque les éléments présentent une armature importante ou trop dense, le béton autoplaçant arrive à s'installer convenablement afin de garantir un bétonnage efficace. Malgré les avantages pratiques des BAP leur point faible réside dans leur coût qui relativement plus élevé que les bétons ordinaires.

Le béton restera le matériau le plus utilisé dans le domaine de la construction et les granulats sont considérés comme des éléments essentiels dans sa composition mais devant l'épuisement des ressources naturelles, il est nécessaire d'étudier en profondeur non seulement leurs propriétés mécaniques et de durabilité, mais aussi les techniques actuelles de concassage, qui peuvent influent sur ces granulats composites formés à la fois du granulat naturel d'origine et de gangue de mortier. Leurs propriétés dépendent de la nature des bétons déconstruits, de la qualité du tri et des techniques de traitement utilisées et leur introduction dans la formulation de nouveaux bétons fait apparaître des problématiques particulières comme notamment une demande en eau élevée ou des résistances mécaniques limitées. En effet, notre recherche s'inscrit dans le contexte de formuler des mortiers autoplaçants à base de ses granulats recyclés et de comparer leurs effets rhéologiques à l'état frais et leurs performances mécaniques après durcissement ainsi que leurs paramètres de durabilité.

D'après notre revue bibliographique, les résultats obtenus des différents chercheurs ont montré que l'incorporation des granulats recyclés affecte les propriétés du béton à l'état frais et à l'état durci. En addition, l'incorporation du sable recyclé (SR) génère une baisse de résistance mécanique et les propriétés de durabilité du mortier. Cette baisse est liée à la porosité du SR, aux propriétés de la nouvelle pâte de ciment et aux propriétés mécaniques de la zone d'interface (ITZS).

Mots clés : béton autoplaçant, granulats recyclés, rhéologie, résistance mécanique, durabilité, absorption capillaire.

ملخص

الخرسانة المرصوصة ذاتيا هي مادة عالية السيولة و هي قادرة على الموضع دون الحاجة إلى جهد ميكانيكي و منه ضمان سهولة كبيرة في التموضع. عندما تحتوي العناصر على تعزيز كبير أو كثيف جدًا، الخرسانة المرصوصة ذاتيا يمكنها الاستقرار بشكل صحيح من أجل ضمان صب الخرسانة بكفاءة. على الرغم من المزايا العملية للخرسانة المرصوصة ذاتيا إلا أن نقطة ضعفها تكمن في تكلفتها العالية نسبيا مقارنة بالخرسانة العادية.

تبقى الخرسانة المادة الأكثر استخدامًا في صناعة البناءات ويعتبر الركام أحد العناصر الأساسية في تكوينها. ولكن في مواجهة استنفاد الموارد الطبيعية ، من الضروري إجراء دراسة معمقة ليس فقط لخصائصها الميكانيكية والمتانة ، ولكن أيضًا لتقنيات التكسير الحالية ، والتي يمكن أن تؤثر على هذه الركام المركبة المتكونة من الركام الطبيعي الأصل و شوائب الملاط. تعتمد خصائصها على طبيعة الخرسانة المفككة وجودة الفرز وتقنيات المعالجة المستخدمة حيث يؤدي إدخالها في صياغة خرسانة جديدة إلى مشاكل معينة مثل ارتفاع الطلب على المياه أو المقاومة الميكانيكية المحدودة. في الواقع ، يندرج بحثنا في سياق صياغة ملاط ذو رص ذاتي بناءً على ركامها المعاد تدويره ومقارنة آثارها الريولوجية في الحالة الطازجة وأدائها الميكانيكي بعد التصلب بالإضافة إلى متانتها.

وفقًا للمراجعة الببليوغرافية التي أجريناها ، أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها من العديد من الباحثين أن دمج الركام المعاد استعماله يؤثر على خصائص الخرسانة في الحالة الطازجة وفي الحالة الصلبة. بالإضافة إلى ذلك ، يؤدي دمج الرمل المعاد استعماله إلى انخفاض في القوة الميكانيكية وخصائص المتانة للملاط. يرتبط هذا الانخفاض بمسامية الرمل المعاد استعماله وخصائص عجينة الأسمنت الجديدة والخصائص الميكانيكية لمنطقة الواجهة (ITZ).

الكلمات المفتاحية : الخرسانة المرصوصة ذاتيا، الركام المعاد استعماله، الريولوجيا، المقاومة الميكانيكية ، المتانة ، الامتصاص الشعيري

Abstract

Concrete will continue to be the most used material in the construction field and aggregates are considered essential elements in its composition, but in view of the depletion of natural material resources and the large quantities of demolition waste in nature, it has become necessary to prospect and study any possibility of reusing this waste, in order to preserve natural aggregate resources and at the same time ensure the protection of the environment. Mortars and concretes made from recycled aggregates (RA) have been the subject of numerous studies. However, no general rule has yet been established to quantify the influence of such substitutions on their rheological and mechanical properties. The widening of the use of concretes with recycled aggregates, whose physico-chemical properties are different from those of concretes based on natural aggregates, is inevitably supported by an increased control, on the one hand, of their mechanical properties and, on the other hand, of their implementation.

The main objective of this work is to study in particular the effect of the incorporation of recycled sand from demolition waste, on the rheological, mechanical and durability properties of self-compacting mortars. In the present study, a bibliographical review has been done in order to focus the influence of recycled aggregates on properties of self compacting mortar or concrete.

The main particularity of aggregates resulting from concrete recycling is the existence of a gangue of old cement attached to the primary natural aggregates. It has an important influence on the behavior of concrete made from recycled aggregates, as it largely determines the geometric (shape, surface condition), physical (porosity and water absorption) characteristics. Mechanical (friability, impact and wear resistance) and physico-chemical characteristics of these aggregates.

When the RA are derived from demolition products, another particularity appears: the presence of different types of undesirable impurities. This presence of impurities can lead to a significant heterogeneity of the recovered aggregates and problems related to sampling and representativeness of the results during the characterization process, but also problems related to the durability of the concrete, including these aggregates.

The results of the researchers show that the properties of concrete and MAP (Self-compacting mortar) made with recycled aggregates depend on the cement/additive couple and the substitution dosage of recycled aggregates. This means that there is indeed an influence of the recycled aggregate on the compatibility (physico-chemical equilibrium) of the cement-additive couple. This influence is more noticeable on sand than on gravel. The results also show that for concretes based on recycled aggregates, the higher increase in the percentage of substitution lead to higher increase in the shear threshold and the plastic viscosity. However, a decrease in the compressive strength was noticed with higher substitution content.

The bibliographical research shows that, the recycled aggregates present a particular interest because their valorization makes it possible to solve the lack of natural aggregates, to prolong the operating life of the existing quarries and to reduce the volumes put in landfill. Until now, the recycled aggregates are used mainly in the road sector, with a diversity of valorization nevertheless limited. The use of recycled aggregates in concrete is hampered not only by standards and regulations, but also by the mistrust of users.

Despite the sorting and purification systems used in crushing plants, recycled aggregates remain heterogeneous and less clean than natural aggregates. In addition, recycled aggregates differ from natural aggregates by two important particularities, on the one hand, the mortar that remains attached to the natural aggregates after crushing the source concrete, and on the other hand, the presence of impurities. Indeed, the physical and mechanical characteristics of recycled aggregates are weakened by this old mortar. This drop in performance is even more pronounced in the case of recycled sands.

The use of recycled fines in the formulation of concrete is often limited. This fraction has poor physical-mechanical and chemical properties, such as higher cement paste content, porosity, water absorption and higher soluble sulfate content, which can limit its use in concrete.

According to this research review, it can be concluded that the use of these wastes as recycled aggregates in concrete is limited to road works and less in the construction field, and in order to be able to use them, a study of their properties as well as their influence on the performance of concrete must be made in order to consider them as a new product

REMERCEMENTS

Ce Travail a été effectué au sein du Laboratoire de Géo matériaux et Génie civil de l'Université de Blida 1, dirigé par Monsieur KENAI, Monsieur MENADI et la codirection de Monsieur YAHIAOUI.

Ce mémoire n'aurait pas été possible sans l'intervention, consciente, d'un grand nombre de personnes sans eux on n'aurait pas pu surmonter tous les obstacles. Nous souhaitons ici les en remercier.

Nous tenons à saisir cette occasion et adresser nos profonds remerciements et nos profondes reconnaissances à Monsieur Belkacem MENADI Professeur à l'Université de Blida 1 notre encadrant de mémoire de fin d'étude, nous tenons à lui remercier pour la confiance qu'il nous a accordée, pour son aide et son soutien permanent, pour ses précieux conseils et son orientation ficelée tout au long de notre recherche, malgré ses nombreuses activités et occupations.

Nous souhaitons exprimer nos profonds remerciements à Monsieur Omar KOUIDER DJELLOUL Docteur à l'Université de Blida 1 pour avoir Co-encadrer cette recherche. Il nous a fait bénéficier de ses compétences, de ses conseils et de son encouragement permanent. Nous vous sommes profondément reconnaissantes.

Nous tenons aussi à remercier Monsieur Said KENAI Professeur à l'Université de Blida 1 pour ses conseils avisés, ses qualités humaines et scientifiques sont exceptionnelles.

Nos remerciements vont également aux, Membres du jury pour avoir accepté d'examiner notre travail et de l'enrichir par leurs propositions.

Nous voudrions également exprimer nos remerciements à Madame BENTLEMCEN Maitre-assistant à l'Université de Blida 1, Monsieur Walid YAHIAOUI et Monsieur Mohamed SI AHMED chef du département de génie civil à l'Université de Blida 1 pour leurs aides, remarques et conseils malgré toutes ses occupations professionnelles.

Nous exprimons nos remerciements à l'ensemble du personnel du laboratoire de Géo matériaux et de génie civil pour sa disponibilité et son professionnalisme.

Mes plus sincères remerciements vont à mes chers parents pour tous leur soutien, leur amour, leur tendresse, et leurs prières tout au long de mes études, un immense merci pour les inestimables sacrifices que vous consentez pour moi, vous avez tant souhaité que je parvienne à ce but, je vous serais reconnaissante toute ma vie. Ma réussite c'est leur réussite. Je remercie également mes sœurs et mon frère pour leurs encouragements.

Finalement, Nous tenons évidemment à remercier chaleureusement nos amis pour leur appui et leurs encouragements tout au long de cette aventure.

TABLE DES MATIERS

Résumé	2
ملخص	3
REMERCIEMENTS.....	6
LISTE DES FIGURES	11
LISTE DES TABLEAUX	11
LISTE DES ABREVIATIONS.....	15
INTRODUCTION GENERALE	17
CHAPITRE I : MORTIERS AUTOPLÇANTS A BASE DE SABLE RECYCLE	19
1.1. Introduction.....	19
1.2. Composition et caractéristiques physiques et mécaniques des sables recyclés	19
1.2.1. Granulométrie.....	20
1.2.2. Absorption d'eau	22
1.2.3. Densité/ Masse volumique	24
1.2.4. Porosité	26
1.2.5. Dureté.....	26
1.2.6. Problème des fines du sable recyclé	28
1.3. Propriétés des mortiers autoplaçant à base de sable recyclé à l'état frais.....	29
1.3.1. Teneur en air du béton	29
1.3.2. Densité	31
1.3.3. Ouvrabilité (étalement et temps d'écoulement)	32
1.3.4. Rhéologie (Viscosité et le seuil de cisaillement).....	41
1.4. Propriétés des mortiers autoplaçant à base de sable recyclé à l'état durci	48
1.4.1. Résistance à la compression.....	49
1.4.2. Résistance à la traction.....	51
1.4.3. Retrait.....	53

1.5. Durabilité des mortiers autoplaçants à base de sable recyclé	54
1.5.1. Porosité et absorption d'eau	54
1.5.2. Perméabilité à l'eau et au gaz.....	58
1.5.4. Migration des chlorures	60
1.6. Conclusion	63
CHAPITRE II : MATERIAUX ET ESSAIS	64
2.1. Introduction.....	64
2.2. Caractéristiques des matériaux.....	64
2.2.1. Le ciment.....	64
2.2.2. Le sable naturel.....	65
2.2.3. Le sable recyclé	67
2.2.4. Eau de gâchage.....	67
2.2.5. L'adjuvant	67
2.3. Formulation du mortier autoplaçant	67
2.4. Essais sur MAP à l'état frais	68
2.4.1. Essai d'étalement au Mini-Cône	69
2.4.2. Essai à l'entonnoir en V (V-funnel test).....	69
2.4.3. Essai au cône de Marsh.....	70
2.4.4. Essais au rhéomètre	71
2.5. Confection et conservation des éprouvettes.....	72
2.6. Essais sur MAP à l'état durci	74
2.6.1. Résistance à la traction par flexion.....	74
2.6.2. Résistance à la compression.....	75
2.6.3. Essais de durabilité	76
2.6.3.1. Absorption capillaire.....	76
2.6.3.2. La porosité accessible à l'eau	77
CONCLUSION GENERALE.....	79

Références..... 81

Annexe A..... 87

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Différentes impuretés trouvées dans le sable recyclé [4].	20
Figure 1.2 : Analyse granulométrique des sables recyclés [4].	21
Figure 1.3 : Analyse granulométrique des sables naturels [4].	22
Figure 1.4 : Corrélation de densité et l'absorption d'eau de GR et GN [10].	23
Figure 1.5 : Absorption des sables recyclés et naturels en fonction du temps [12].	24
Figure 1.6 : La densité de sable recycle [14].	25
Figure 1.7 : Des granulats entourés du vieux mortier [6].	27
Figure 1.8 : Relation entre le mortier résiduel et la valeur d'abrasion Los Angeles [17].	28
Figure 1.9 : Teneur en air des différents mortiers [23].	30
Figure 1.10 : Variation de la teneur en air à T0 et T90 pour le sable recyclé [14].	31
Figure 1.11 : La densité des mortiers à base de SR à l'état frais [22].	31
Figure 1.12 : Densité des BAP en fonction du pourcentage de remplacement des GR et laitier [13].	32
Figure 1.13 : Affaissement des différents mortiers [22].	33
Figure 1.14 : Étalement des différents mortiers [23]	33
Figure 1.15 : Évolution de l'étalement dans le temps [23].	34
Figure 1.16 : Affaissement au cône MBE et débits d'écoulement des différents mortiers [27].	35
Figure 1.17 : Les débits de différents mortiers	36
Figure 1.18 : L'étalement en fonction du type des granulats [28].	36
Figure 1.19 : Le temps d'écoulement en fonction du type des granulats [28].	37
Figure 1.20 : Comparaison entre l'étalement des BAP ordinaires et recyclés [8].	38
Figure 1.21 : Effet des granulats fins recyclés sur le diamètre d'étalement d'un BAP de GR	38
Figure 1.22 : Comparaison de la maniabilité des mortiers de sable naturel et sable recyclé [24].	39
Figure 1.23 : Temps d'écoulement au V funnel de BAP sans ajout.	39
Figure 1.24 : L'étalement de mortier à base de sable recyclé [12]	40
Figure 1.25 : Le temps d'écoulement au mini funnel de mortier à base de sable recyclé [12].	41
Figure 1.26: Schéma du glissement des couches [58].	42

Figure 1.27: Schéma de la vitesse de cisaillement [58].....	44
Figure 1.28: Contributions de la phase solide et de la phase liquide à la résistance au cisaillement du béton [65].	45
Figure 1.29: Rhéogramme de la composition des mortiers [32].....	46
Figure 1.30: Variation des paramètres rhéologiques en fonction de la teneur en laitier et taux de substituant des GN par des GR [13].....	47
Figure 1.31: Variation de la viscosité plastique des BAP à base de sable recyclé en fonction du temps [12].	47
Figure 1.32 : Corrélation entre le seuil de cisaillement et l'étalement [13].....	48
Figure 1.33 : L'ancien et nouveau ITZS en béton recyclé [10].....	50
Figure 1.34 : La relation entre la résistance à la compression à l'âge de 28 jours et le taux de substitution de sable recyclé [14].	51
Figure 1.35 : Resistance à la traction des mortiers à base de sable du béton concassé [9].	52
Figure 1.36 : Le retrait total des familles 1 et 2 [29].....	53
Figure 1.37 : Influence d'E/C sur le retrait des mortiers [17].	54
Figure 1.38 : Absorption d'eau pour des BAP avec (50% et 100%) des granulats recyclés [9].	56
Figure 1.39 : L'influence des agrégats recyclés sur l'absorption d'eau par capillarité [48].	57
Figure 1.40 : Cinétique d'absorption d'eau de sable recyclé [49].	57
Figure 1.41 : La porosité accessible à l'eau de BAP [6].	58
Figure 1.42 : La perméabilité à l'eau en fonction de la teneur en laitier et taux de substituant des GN par des GR [13].....	59
Figure 1.43 : Pénétrations des ions Cl ⁻ pour des bétons à base de sable recyclé [29].	61
Figure 1.44 : La Charge totale passée après 28 jours [52]	62
Figure 1.45 : Essai de migration des ions de chlorures [6].....	62
Figure 2. 1: Sable corrigé de Baghlia et Boughezoul.	65
Figure 2. 2: Courbe granulométrique du sable corrigé.....	66
Figure 2. 3: Les séquences de malaxage du mortier [59].	68
Figure 2.4: Essai d'étalement pour mortier [56].	69
Figure 2. 5: Essai à l'entonnoir en V pour mortier [56].	70
Figure 2. 6: Essais au Cône de Marsh [56].....	70
Figure 2.7: Essai au rhéomètre pour mortier [56].	71
Figure 2. 8: Profil de vitesse [58].....	72
Figure 2. 9 : Confection des éprouvettes (4x4x16) cm ³ [56].....	73

Figure 2. 10: Bac d'eau pour la conservation des éprouvettes [56].	73
Figure 2. 11 : Essai de Traction par flexion sur MAP [56].	74
Figure 2. 12 : Essai de compression sur les MAP [56].	75
Figure 2. 13 : Essai d'absorption capillaire [56].	76
Figure 2. 14 : Essai de porosité accessible à l'eau [56].....	77
Figure 2. 15 : Organigramme de la procédure expérimentale.	78

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 : Absorption d'eau et porosité des sables recyclés et naturels [4]	23
Tableau 1.2 : La densité apparente et spécifique des granulats recyclés [6]	25
Tableau 1.3 : Propriétés du béton frais [21]	29
Tableau 1.4 : Coefficient de migration Cl- pour des bétons à base de sable recyclé [50] ..	60
Tableau 2. 1: Caractéristiques chimiques et minéralogiques du ciment [53]	64
Tableau 2. 2: Caractéristiques physico-mécaniques du ciment	65
Tableau 2. 3: Caractéristiques physiques des granulats utilisés	66
Tableau 2.4: Caractéristique de l'adjuvant.....	67

LISTE DES ABREVIATIONS

▪ Ab	Le coefficient d'absorption d'eau
▪ Al ₂ O ₃	Alumine
▪ BAP	Béton autoplaçant
▪ BCHR	Béton conventionnel à haute résistance
▪ C ₂ S	Silicate bicalcique (belite)
▪ C ₃ A	Aluminate tricalcique
▪ C ₃ S	Silicate tricalcique (alite)
▪ C ₄ AF	Aluminate-ferrite tétracalcique
▪ CaO	Oxyde de calcium
▪ CEM	Le Ciment Portland
▪ Cl-	Chlore
▪ E/C	Rapport de l'Eau sur Ciment
▪ E/L	Rapport de l'Eau sur
▪ Fe ₂ O ₃	Oxyde de fer
▪ GGR	Gros granulats recyclés
▪ GN	Granulats naturels
▪ GR	Granulats recyclés
▪ H ₂ SO ₄	Acide sulfurique
▪ HCL	Acide chlorhydrique
▪ ITZS	Zones de transition interfaciale
▪ K ₂ O	Oxyde de potassium
▪ Mair	Masse de l'air
▪ MAP	Mortier autoplaçant
▪ Meau	Masse de l'eau
▪ Mf	Module de finesse
▪ MgO	Oxyde de magnésium
▪ MgSO ₄	Sulfate de magnésium
▪ Na ₂ O	Oxyde de sodium
▪ Na ₂ SO ₄	Sulfate de sodium
▪ Rc	Résistance à la compression
▪ Rt	Résistance à la traction
▪ SiO ₂	Dioxyde de calcium (silice)

▪ SN	Sable naturel
▪ SO ₃	Trioxyde de soufre
▪ SP	Superplastifiant
▪ SR	Sable recyclé
▪ SRB	Sable recyclé broyé
▪ T _{vf}	Temps d'écoulement à l'entonnoir (sec)
▪ ρ_{abs}	Masse volumique absolue, (kg/m ³)
▪ ρ_{app}	Masse volumique apparente, (kg/m ³)

INTRODUCTION GENERALE

Le béton autoplaçant (BAP) est un béton se différenciant des autres par son importante fluidité s'il possède une telle fluidité, c'est grâce aux divers adjuvants superplastifiants qui le composent. Ceci a rendu les constructions plus sûres et a grandement facilité les méthodes de mise en œuvre du béton.

Le BAP a fait son apparition au Japon dans les années 1980, il s'est développé en France à la fin des années 1990. Ce béton est assez fluide pour pouvoir facilement s'installer dans l'ensemble de la surface dans laquelle il est coulé. Elle assure ainsi à la structure à venir une bonne solidité et un caractère compact.

La consommation de ressources naturelles et la production de déchets par l'industrie de la construction ont toutes deux augmenté d'une manière significative ces dernières années. Le processus actuel de "construction-démolition" impose une pression sur les ressources naturelles, en particulier sur les agrégats naturels (GN), et se traduit par des quantités élevées de déchets de construction et de démolition (CD), deux faits qui ont un impact très négatif sur l'environnement. En raison de la crise économique et environnementale actuelle, les exigences d'un développement plus durable dans l'industrie de la construction nécessitent une approche de la technologie du béton.

En Algérie, la totalité de la production du béton dans le bâtiment et les travaux publics est composée seulement de granulats d'origine naturelle c'est pourquoi le recyclage du béton est devenu un des domaines de recherche les plus récents.

L'utilisation d'agrégats recyclés (AR) pour produire du nouveau béton semble être une solution à fort potentiel. Elle permet à la fois de résoudre les problèmes liés au stockage, au transport et à la mise en décharge des déchets de construction et de démolition (CD) et de contribuer à un environnement potentiellement plus durable. La réutilisation de ces déchets de construction comme granulats est considéré comme très important dans la tentative générale pour la promotion des principes de développement durable donc d'un côté, elle permet de récupérer les matériaux résultants de la démolition du vieux bâtis ou due aux catastrophes naturelles. De l'autre côté, elle permet de protégé la nature de l'exploitation excessive de la réserve des granulats naturels.

Cette étude a pour objet de connaître l'effet de l'incorporation de sable recyclé issu du déchet de démolition dans le mortier, sur les propriétés physico-mécaniques et la durabilité des bétons et leurs influences sur les comportements rhéologiques de ces mortiers.

Le mémoire est décomposé en deux chapitres. Le premier chapitre présente une revue bibliographique sur les bétons et mortiers autoplaçants, leurs propriétés à l'état frais et à l'état durci, la durabilité ainsi que leurs performances mécaniques et les différents aspects du comportement rhéologique des bétons et les propriétés des granulats recyclés. Le deuxième chapitre présente notre programme expérimental et décrit les caractéristiques des matériaux utilisés dans la formulation du MAP, ainsi que le principe de base de l'essai en décrivant le mode opératoire.

CHAPITRE I : MORTIERS AUTOPLÇANTS A BASE DE SABLE RECYCLE

1.1. Introduction

Dans ce chapitre, on présente une synthèse bibliographique sur les mortiers autoplçants (MAP) à base de sable recyclé (SR), leurs propriétés physiques, la rhéologie du MAP à base de SR à l'état frais et la caractérisation des propriétés mécaniques et de durabilité à l'état durci.

1.2. Composition et caractéristiques physiques et mécaniques des sables recyclés

Le besoin croissant de matériaux de construction engendre un épuisement des ressources. Par conséquent, l'utilisation d'agrégats recyclés dans la production de matériaux est une voie pour répondre aux besoins tout en préservant l'environnement de manière durable [1].

Le sable est la ressource naturelle la plus utilisé après l'eau bien plus que le pétrole pour son rôle important dans la construction, son utilisation principale est la fabrication du mortier, le mélange avec lequel on colle les parpaings et on recouvre les murs. Mais le sable est une ressource limité pour cela les ingénieurs de la construction ont créé l'éco-mortier pour lequel ils utilisent du sable recyclé procèdent de résidu de démolition et de construction.

Pour obtenir une bonne qualité de béton contenant des granulats recyclés (GR), ces derniers doivent également être de bonne qualité. Les propriétés acceptables des granulats sont l'élément de base d'un mortier recyclé de qualité. Cependant, les proportions appropriées du mélange et la méthode de production sont aussi importantes pour obtenir la qualité souhaitée de béton ou de mortier [2].

La principale particularité des granulats issus du recyclage du béton est l'existence d'une gangue de ciment ancien attachée aux granulats naturels primaires. Elle a une influence importante sur le comportement des bétons à base de granulats recyclés, car elle détermine, en grande partie, les caractéristiques géométriques (forme, état de surface), physiques (porosité et absorption d'eau). Mécaniques (friabilité, résistance aux chocs et à l'usure) et physico-chimiques de ces granulats (ils ne peuvent pas être considérés comme inertes) [3].

Lorsque les GR sont issus de produits de démolition, il apparaît une autre particularité : la présence de différents types d'impuretés indésirables minérales : comme le gypse, le verre, les chlorures, les briques ou bien organiques : comme le papier, le bois, les plastiques, (Figure 1.1). Cette présence d'impuretés peut entraîner une hétérogénéité importante des granulats récupérés et des problèmes liés à l'échantillonnage et à la représentativité des résultats au cours du processus de caractérisation, mais aussi des problèmes liés à la durabilité du béton, y compris ces granulats [3].

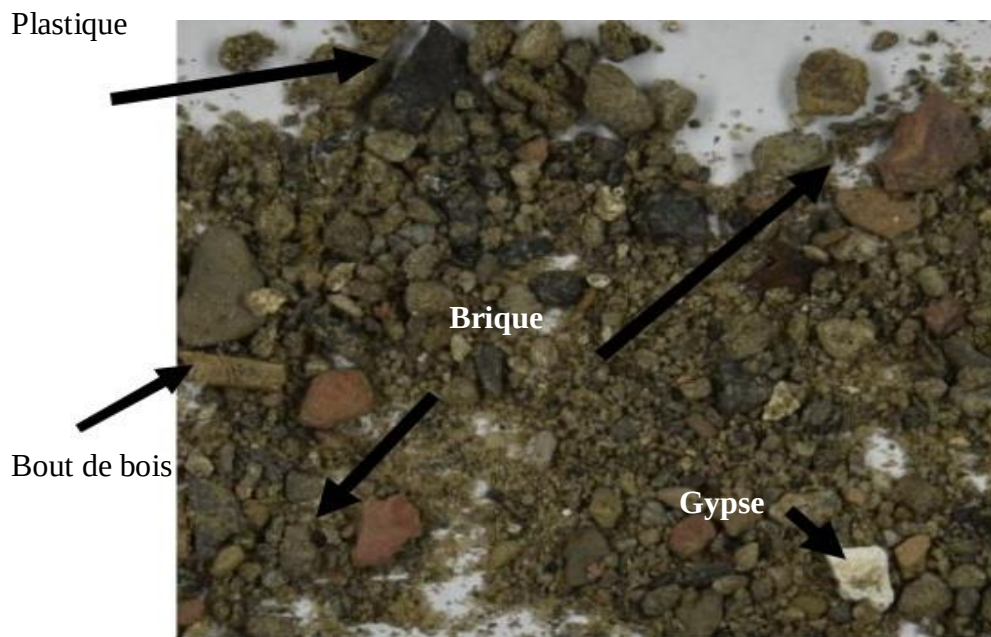


Figure 1.1 : Différentes impuretés trouvées dans le sable recyclé [4].

1.2.1. Granulométrie

La distribution granulométrique est l'un des facteurs qui déterminent les caractéristiques les plus importantes du béton, ainsi que l'ouvrabilité et la résistance mécanique. L'utilisation des GR nécessite une attention particulière sur le type, la forme et à la distribution granulométrique des granulats fins et grossiers car ils affecteront les propriétés mécaniques et la durabilité du béton [5].

Il est possible de réaliser presque toutes les classes granulaires avec des sables recyclés (SR). Cependant, le type de concasseur pourrait affecter la forme et la quantité de fines. Le

concassage peut également laisser des résidus de poussière sur les surfaces des agrégats ; il est donc parfois nécessaire de laver les agrégats avant utilisation [6].

D'après Debieb et al. [7] le sable recyclé est grossier par rapport au sable naturel (SN) et il est constitué en majorité de petit gravillon et une faible proportion de sable moyen ainsi qu'une quantité importante du ciment dans ces fines.

Doura et al. [8] ont trouvé que le module de finesse du sable recyclé (2,69) est inférieur à celui de sable naturel (3,47).

Par contre, Debieb et al. [7] ont constaté que le module de finesse de sable recyclé est supérieur à celui de naturels (3,33 et 2,72) respectivement.

Des résultats similaires ont été reporté par Debbih dont un module de finesse de 3,48 a été trouvé pour le sable recyclé et de 3,32 pour le sable naturel [2].

Les figures ci-dessous présentent la granulométrie mesurée des sables recyclés (Figure 1.2) et des sables naturels (Figure 1.3). Elles sont assez différentes, pour les sables naturels, le passant à 1mm par exemple varie entre 30 et 65%, par contre pour les sables recyclés le passant à 1 mm varié entre 30 et 80%, ils ont remarqué que lors de l'utilisation de SR la granulométrie a été augmenté d'environ 20% [4].

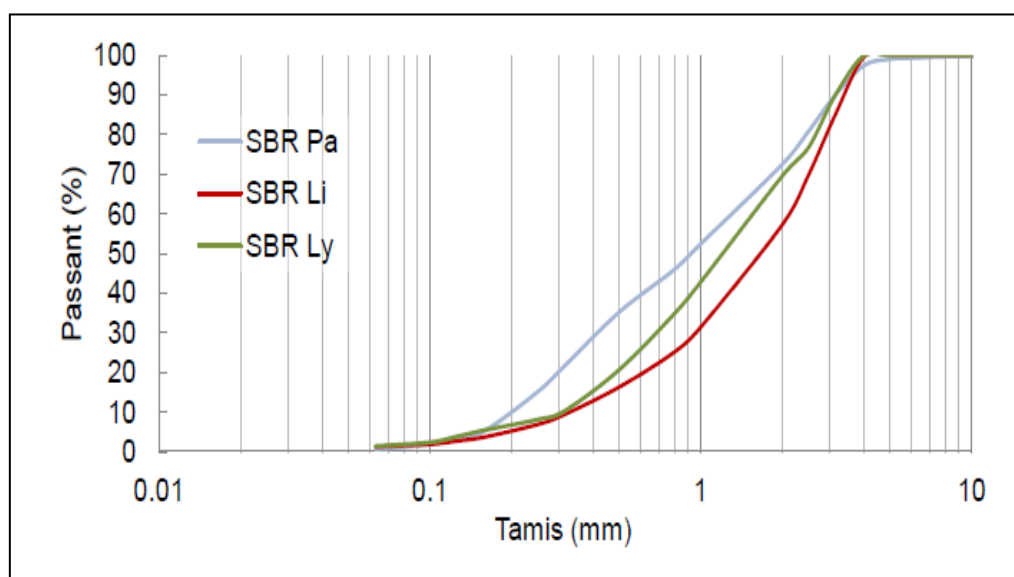


Figure 1.2 : Analyse granulométrique des sables recyclés [4].

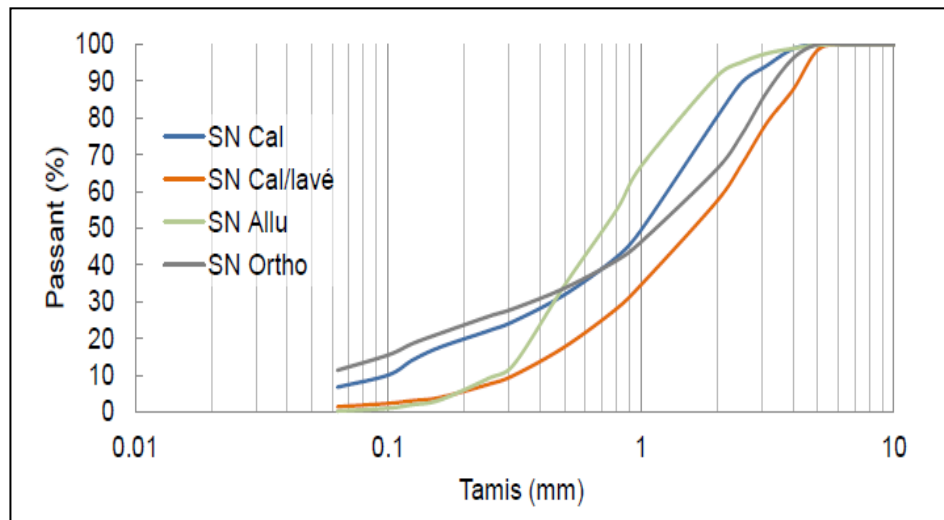


Figure 1.3 : Analyse granulométrique des sables naturels [4].

1.2.2. Absorption d'eau

Le coefficient d'absorption d'eau (A_b) représente la capacité d'absorption d'eau d'un granulat. Plus il est élevée, plus le matériau est absorbant [9].

Selon la littérature il y a une perte de performance d'absorption capillaire de l'eau liée à l'incorporation de GR dans le béton [10].

Les principales caractéristiques de ces granulats recyclés sont leur porosité élevée et leur absorption d'eau, qui sont dû à la présence de la pâte de ciment durci et de mortier, notamment dans les sables [4].

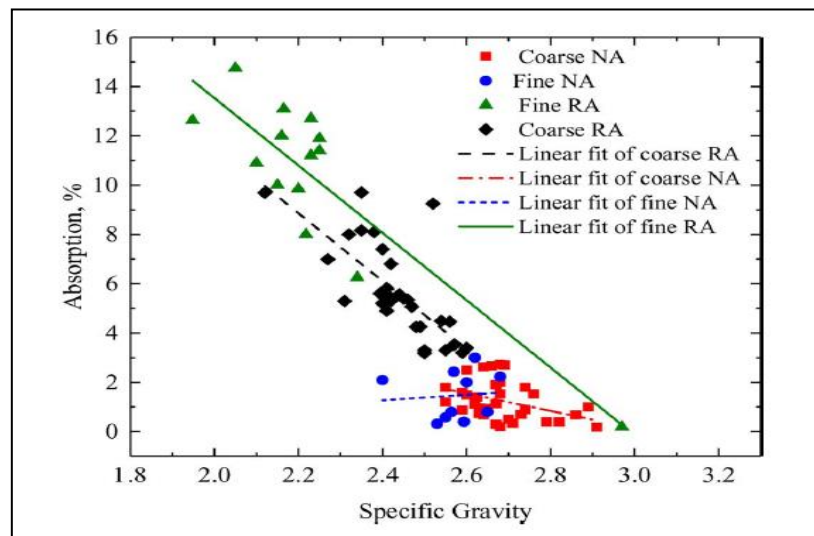
L'absorption d'eau des GR est beaucoup plus élevée que celle de granulats naturels (GN). Il est généralement de 2% à 7% pour les granulats grossiers et de 4% à 13% pour les agrégats fins. Ceci est lié à une forte porosité en raison de la présence du vieux mortier collé aux granulats de démolition et surtout si leur granularité est fine (Tableau 1.1). Cela affecte l'ouvrabilité des bétons ou des mortiers, il est recommandé le pré-mouillage est une bonne solution pour maintenir le niveau de saturation souhaitée. Il est également recommandé de limiter le taux des agrégats fins à 10-20% [6].

Tableau 1.1 : Absorption d'eau et porosité des sables recyclés et naturels [4]

	Sable recyclé (SR)		Sable naturel (SN)	
	Moyenne	Écart type	Moyenne	Écart type
Absorption d'eau (%)	3,95	0,19	1,41	0,33
Porosité accessible à l'eau (%)	9,7	0,13	4	0,03

Pin et al. [10] ont conclu que l'eau capillaire diminue au fur et à mesure que les GN sont remplacés par les GR. Cette diminution était de l'ordre de 12% pour un remplacement à 100%. C'est prouvé par le volume élevé de pâte de ciment du GR. Cette pâte implique le GR et pénètre dans la structure de ses pores.

La figure 1.4 montre la corrélation entre la densité et leur absorption respective de GR (grosier et fin). Ils ont remarqué qu'une absorption plus élevée est en corrélation avec des valeurs de densité plus faibles (la valeur d'absorption moyenne de la GN fine est relativement constante dans la plage de densité observe).

**Figure 1.4 :** Corrélation de densité et l'absorption d'eau de GR et GN [10].

Bianchi [11] a trouvé que le béton à base de SR est plus poreux que le béton témoin (à base de sable naturel) et absorbe plus d'eau. Après 48 heures d'immersion, le taux d'absorption

d'eau du béton témoin est d'environ 4%, tandis que pour le béton contenant 50% de sables recyclés absorbe d'environ 6%.

La capillarité est aussi influencée par le type d'ajout utilisé. Les additions pouzzolaniques comme les fumées de silice ou les cendres volantes diminuent l'absorption capillaire [11].

La figure 1.5 montre l'évolution de l'absorption des granulats recyclés en fonction du temps. [12] a constaté une augmentation de la quantité d'absorption de sable recyclé.

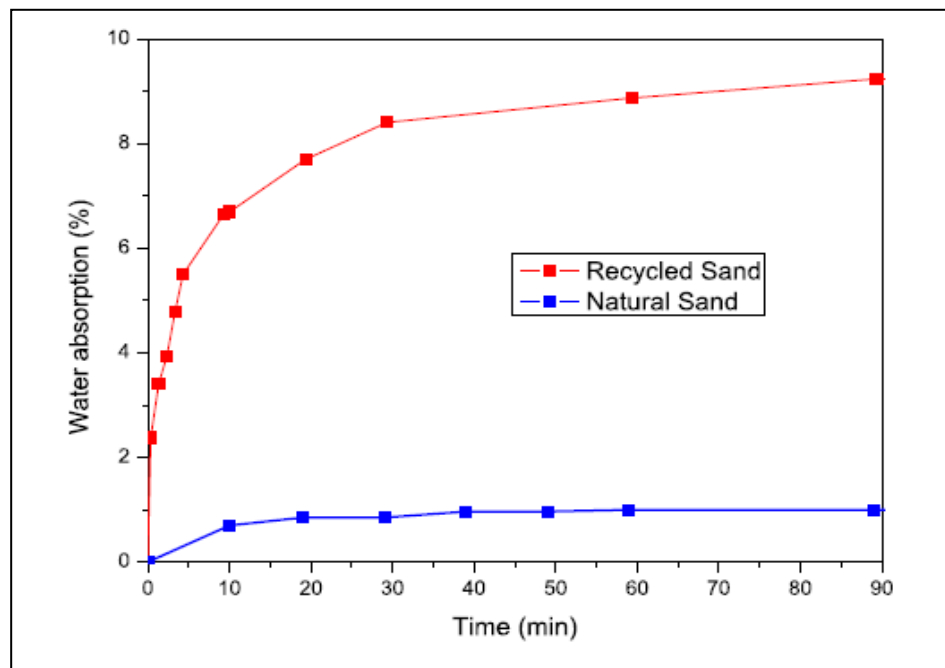


Figure 1.5 : Absorption des sables recyclés et naturels en fonction du temps [12].

1.2.3. Densité/ Masse volumique

La densité est l'une des paramètres fondamentaux des granulats pour la composition des mélanges de béton et influe sur plusieurs propriétés du béton résultant. La densité relative des GR est moins grande que celle des GN [13].

L'effet de SR sur la densité du béton est illustré dans la figure 1.6. Ils ont remarqué que la densité diminue avec l'augmentation du pourcentage de SR. Ceci est dû à la nature légère et plus poreuse du vieux mortier collé aux agrégats recyclés qui se produit autour des

agrégats. De plus, ils ont constaté que, la réduction de la densité du béton avec le SR est de l'ordre de 6%. Par conséquent, pour utiliser les agrégats recyclés de faible densité et en tenant compte de la classe de résistance requise, ils ont limité jusqu'à 30% de SR pour obtenir une densité similaire à celle du béton naturel [14].

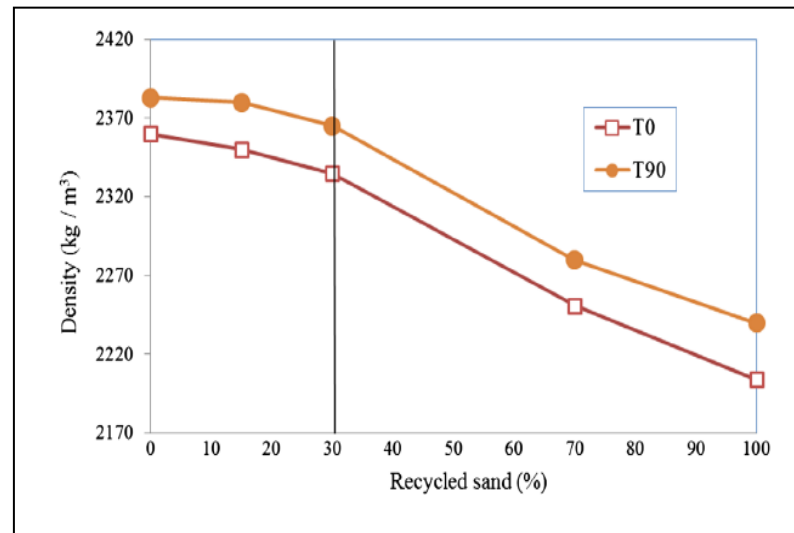


Figure 1.6 : La densité de sable recycle [14].

Les GR ont une densité relative inférieure d'environ 5% à 10% des granulats naturels. En règle générale, les graviers recyclés ont une densité de 2200 à 2500 kg/m³, alors que le sable recyclé a une densité relative d'environ 1800 à 2300 kg/m³. Cela est dû à la faible densité du vieux mortier collé à la surface des agrégats [6].

Le tableau ci-dessous présente les différents granulats recyclés (fins et grossiers) ainsi que leur densité apparente et spécifique.

Tableau 1.2 : La densité apparente et spécifique des granulats recyclés [6]

	Densité apparente	Densité spécifique
Agrégats fins	1,39	2,30
GGR 3/8	1,241	2,31
GGR 8/15	1,28	2,33

***GGR** : gros granulats recyclés.

Haddad [15] a constaté que les granulats naturels et recyclés ont des masses volumiques absolues semblables ; par contre les masses volumiques apparentes des granulats recyclés sont inférieures que celle des granulats naturels, ceci s'explique par la présence des pores dans les granulats recyclés.

D'après Kouider [13], plus le taux de GR et de laitier augmente, plus la densité diminue, surtout c'est la quantité de laitier est plus faible que celle de ciment.

1.2.4. Porosité

La porosité est définie comme étant le volume total des vides contenus dans le béton pour 1m^3 de matériau. Cette porosité augmente avec l'augmentation du rapport E/C et est en général comprise entre 11% et 18% [13].

La porosité augmente avec l'augmentation des taux en granulats recyclés. Elle augmente de 50% en cas d'utilisation de graviers recyclés uniquement et elle peut être deux fois plus si le sable est recyclé également. Ceci est lié à l'augmentation du volume de pâte et à la porosité des RA [6].

Jiang [16] a montré que la porosité totale des mortiers à base de ciments au laitier est plus élevée que celle des mortiers fabriqués avec un ciment sans ajout.

1.2.5. Dureté

La résistance à l'abrasion est déterminée par le coefficient de Los Angeles ou Micro-Deval est réduite. Cela dépend de plusieurs paramètres à savoir : la qualité du béton d'origine, la taille de ses agrégats [6].

Le coefficient de Los Angeles des granulats recyclés est supérieur à celui des granulats naturels et la valeur du coefficient de Los Angeles des granulats du béton concassé (31.62%) est supérieure à celle des granulats naturels (23.50%). Par conséquent les

granulats recyclés sont moins résistant que les granulats naturels, mais acceptable selon la norme qui exige $LA < 40\%$ [2].

Cette tendance a été confirmée par plusieurs auteurs qui ont expliqué que la valeur élevée du coefficient de Los Angeles est due à la quantité de pâte de ciment présente autour des GN concassés ce qui réduit la résistance aux chocs (Figure 1.7) [6].



Figure 1.7 : Des granulats entourés du vieux mortier [6].

La figure ci-dessous montre la relation entre l'ancien mortier collé à la surface des granulats recyclés et l'abrasion de Los Angeles. Plus le taux résiduel de mortier est élevé, plus la résistance à l'abrasion est élevée (Figure 1.8).

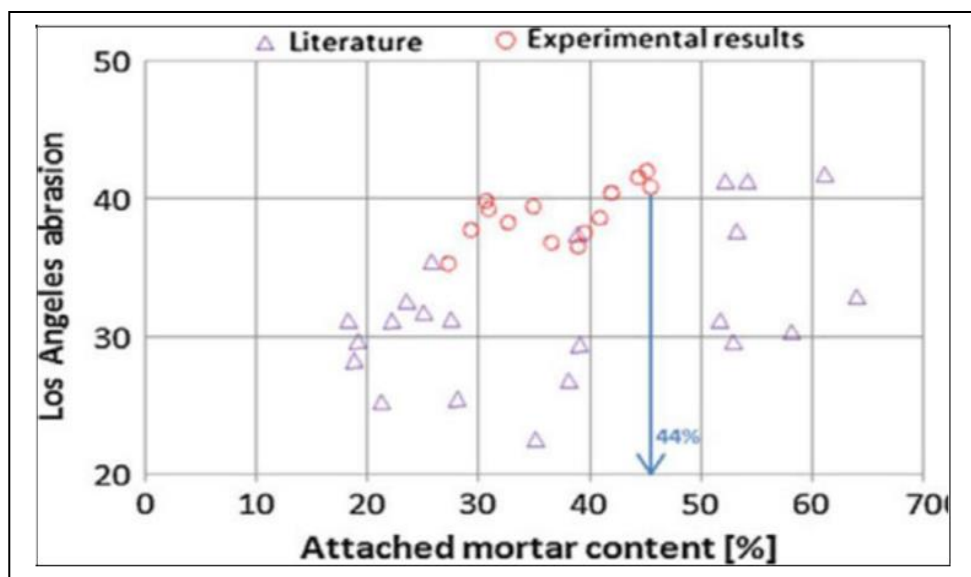


Figure 1.8 : Relation entre le mortier résiduel et la valeur d'abrasion Los Angeles [17].

1.2.6. Problème des fines du sable recyclé

Les fines tout comme les éléments grossiers des GR, sont constituées de GN concassés (ici en l'occurrence des fines provenant du concassage des GN) et de pâte de ciment relativement friable (des fines issues du ciment hydraté). Il serait ainsi intéressant d'identifier la part qui provoque la rigidification importante du béton recyclé, fines de GN concassés ou fines de pâte de ciment. Une forte densité de particules fines peut perturber l'empilement granulaire et ainsi provoquer une diminution de la résistance en compression il n'est pas recommandé d'utiliser du sable recyclé dans la préparation du béton de structure, même dans certaines applications (même préfabriquées), l'utilisation de sable recyclé est strictement interdite [18].

La présence de deux générations de pâte de ciment (celle qui provient de l'ancien béton et celle émanant de l'hydratation du nouveau ciment afin d'élaborer un nouveau béton) peut poser des difficultés

L'utilisation de fines recyclées dans la formulation des bétons est souvent limitée. Cette fraction présente des propriétés physico-mécaniques et chimiques mauvaise, telles que plus grande quantité de pâte de ciment, une porosité, une absorption d'eau et une teneur en sulfate soluble plus élevé, ce qui peut limiter son utilisation dans le béton [19].

Les bétons à base de sable recyclé sont très utilisés malgré leurs inconvénients, par exemple :

- La grande teneur en grains fins donne une grande surface spécifique, cela conduit à la difficulté d'assurer une bonne enveloppe de pâte de ciment pour les grains de sable, donc le dosage en ciment augmente.
- Les grains très fins du sable peuvent abaisser l'activité du ciment ; donc la résistance mécanique du béton va diminuer.
- Augmentation de l'absorption capillaire à cause de la grande surface spécifique du ciment ; par conséquent l'imperméabilité du béton durci va diminuer et le retrait va augmenter [20].

1.3. Propriétés des mortiers autoplaçant à base de sable recyclé à l'état frais

1.3.1. Teneur en air du béton

Les valeurs de la teneur en air vont de 1,3% à 1,7% avec la limite inférieure pour le BCHR (Béton Conventionnel à Haute Résistance) (Tableau 1.3). Elles augmentent avec l'utilisation des granulats recyclés. Une explication possible de l'augmentation de la teneur en air serait la présence des pores dans l'agrégat, ainsi que leurs formes [21].

Tableau 1.3 : Propriétés du béton frais [21]

	BCHR	GR 20	GR 50	GR 80
Teneur en air (%)	1,3	1,7	1,6	1,6
Densité de béton frais (kg/m³)	2356	2408,7	2389,9	2259,5
Ouvrabilité(mm)	53,5	54,5	55	53,5

***BCHR** : béton conventionnel à haute résistance.

Debieb [7] a montré que la teneur en air des bétons recyclés est plus ou moins comparable à celle du béton naturel.

D'après Zhao et al. [22] la teneur en air occlus des mortiers à l'état frais était de 1,4%, 1,8%, 1,8%, 2,4%, 3,0%, 7,0% respectivement pour MR0, MR10, MR20, MR30, MR50, MR100. La teneur en air occlus du mortier à l'état frais augmente quand le taux de substitution du sable recyclé augmente.

Bouarroudj et al. [23] ont étudié le comportement des bétons autoplaçants réalisés à base de sable recyclé et de sable recyclé broyé. Ils ont trouvé que la teneur en air augmente avec

l'augmentation de la teneur en SRB (sable recyclé broyé), ce qui atteste que le SRB absorbe une quantité d'eau (Figure 1.9).

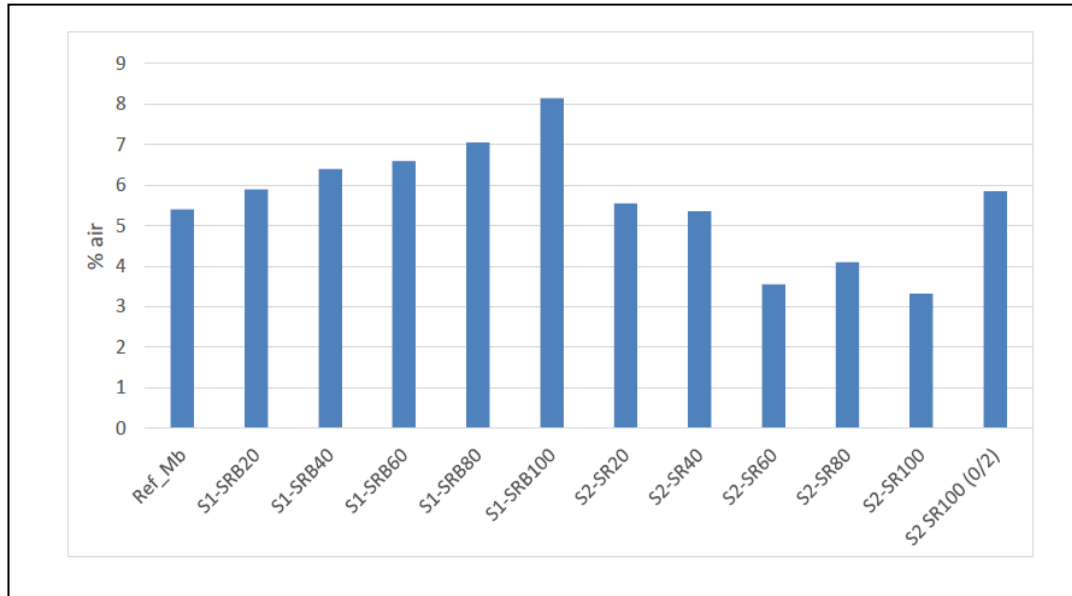


Figure 1.9 : Teneur en air des différents mortiers [23].

La même observation a été faite par Tahar et al. [14] où la teneur en air augmente rapidement avec l'augmentation de la teneur en SR, et qui est trois fois plus grande que la teneur en air du béton de référence comme l'indique la figure 1.10. En effet le SR a une plus grande porosité que le SN, et la forme et la rugosité du SR empêchent les bulles d'air d'extraire le béton pendant les vibrations.

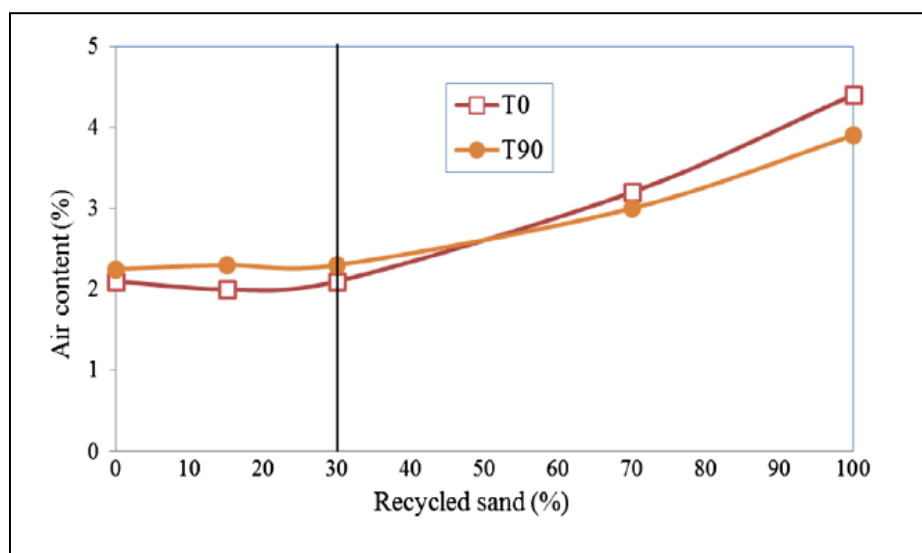


Figure 1.10 : Variation de la teneur en air à T0 et T90 pour le sable recyclé [14].

1.3.2. Densité

La densité et la capacité d'absorption d'eau sont considérées comme étant les deux paramètres les plus importants pour contrôler la qualité des sables recyclés. Concernant la densité, elle est généralement plus faible qu'un sable naturel. Les valeurs varient de 2,0 à 2,5 [24].

D'après Zhao et al. [22] la densité du mortier à l'état frais diminue quand le taux de substitution du sable recyclé augmente, ce qui est dû à la plus faible masse volumique du SR par rapport au GN (Figure 1.11)

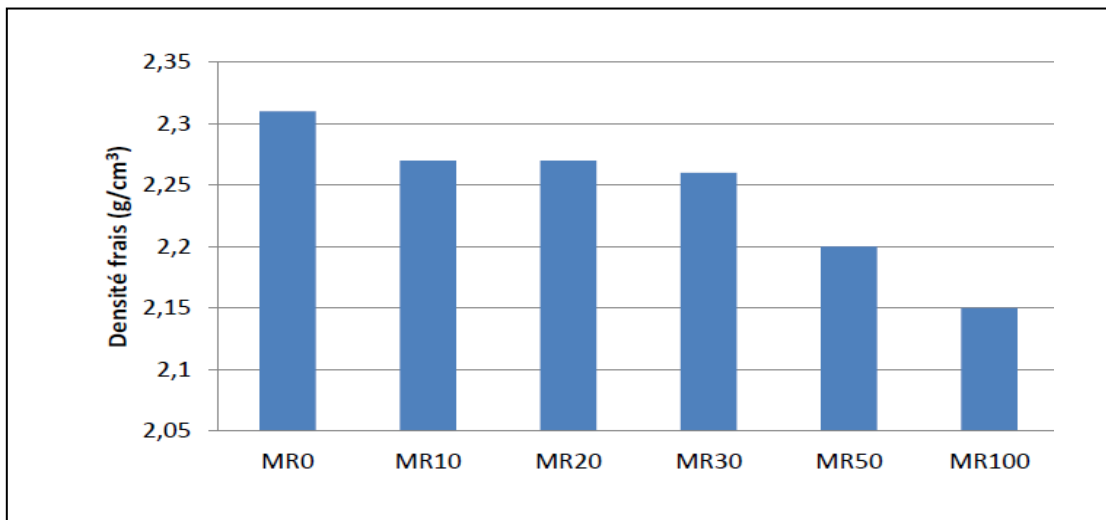


Figure 1.11 : La densité des mortiers à base de SR à l'état frais [22].

Selon l'étude menée par Kouider [13] la densité du BAP diminue graduellement avec l'augmentation de la quantité de GR et de laitier (Figure 1.12). Cette diminution est due relativement à l'ancien mortier attachée aux particules d'agréats recyclées et également par la présence des pores dans les GR.

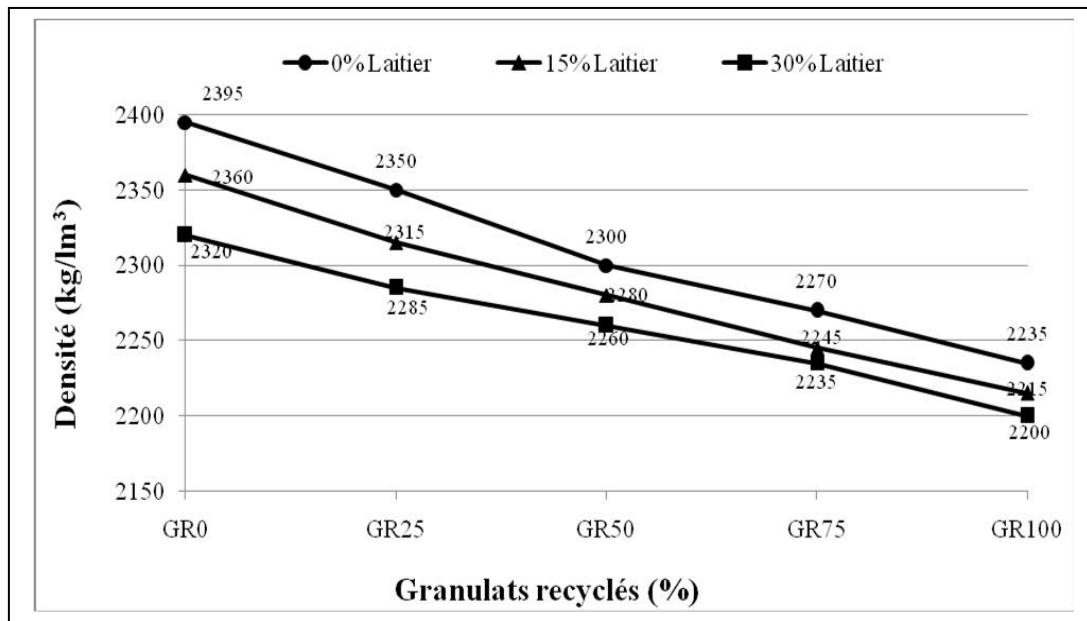


Figure 1.12 : Densité des BAP en fonction du pourcentage de remplacement des GR et laitier [13].

Plusieurs études [21-22] ont montré que les granulats recyclés ayant une faible densité et pourcentage d'absorption élevé en comparaison aux granulats naturels, ceci est dû à la présence de pâte de ciment collée aux granulats et la faible densité de ciment résiduel de mortier adhérent par les agrégats recyclés est un des facteurs qui affectent la densité de béton recyclé.

1.3.3. Ouvrabilité (étalement et temps d'écoulement)

Le critère d'ouvrabilité pour un BAP représenté le paramètre le plus important pour caractériser un BAP.

Selon les résultats représentés en figure 1.13 obtenus par Zhao et al. [22] ont montré que l'affaissement diminue quand le taux de substitution du sable recyclé augmente, ce qui pourrait être attribué à l'angularité et à la rugosité supérieure des particules de sable recyclé par rapport au sable naturel. Comme on peut le voir dans la figure 1.13, la masse volumique du mortier à l'état frais diminue quand le taux de substitution du sable recyclé augmente, ce qui est dû à la plus faible masse volumique du sable recyclé par rapport au granulat naturel.

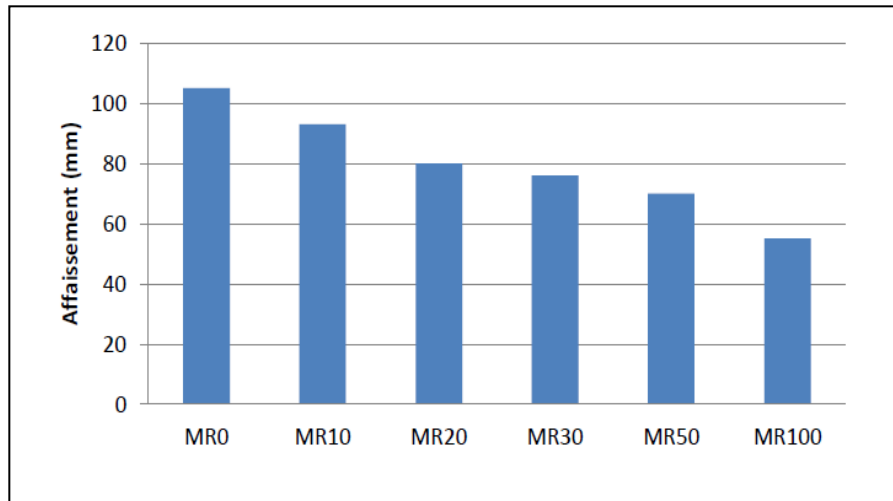


Figure 1.13 : Affaissement des différents mortiers [22].

Au contraire l'étude de Bouarroudj et al. [23] s'intéresse d'une part aux impacts de la substitution du filler calcaire par du sable recyclé broyé (série 1) et d'autre part aux impacts de la substitution du sable naturel par du sable recyclé (série 2). Ils ont remarqué pour la première série une diminution progressive de l'étalement avec l'augmentation de la substitution du filler calcaire par du SRB. Par contre, dans la deuxième série, ils ont remarqué une amélioration de la maniabilité avec la substitution du SN par le SR. (Figure 1.14)

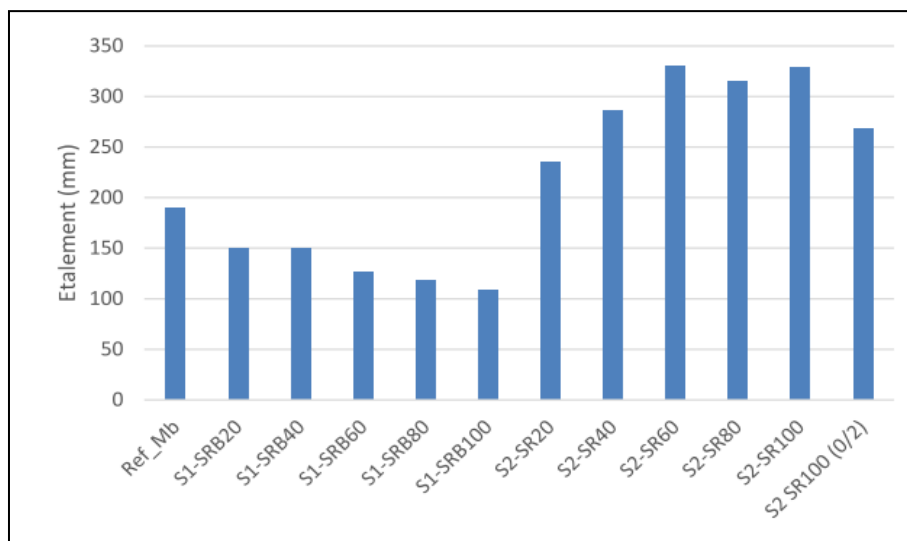


Figure 1.14 : Étalement des différents mortiers [23] .

La figure 1.15 montre que l'étalement reste constant pour le sable recyclé après une heure [23].

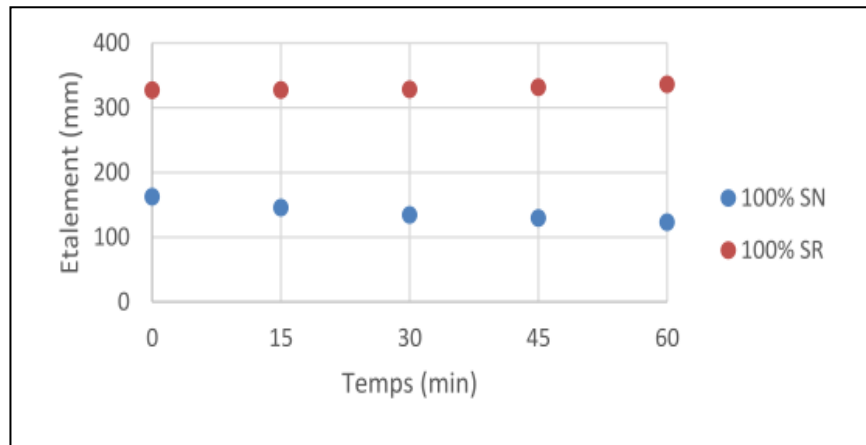


Figure 1.15 : Évolution de l'étalement dans le temps [23].

L'étude de Layachi et al. [27] est une contribution expérimentale à l'étude de l'incorporation du sable recyclé dans les mortiers de ciment et leurs influences sur les comportements rhéologiques et mécaniques de ces mortiers avec et sans adjuvants. Ils ont montré que l'affaissement au cône MBE augmente avec l'accroissement du taux de SR dans les mortiers grossiers (Figure 1.16). L'affaissement à $t=0$ s reste toutefois similaire pour tous les mortiers sans adjuvant. Pour les mortiers adjuvés, les variations d'affaissement sont plus importantes, ce qui peut être lié à un surdosage en SP. À travers le graphe du débit d'écoulement, on constate que la fluidité des mortiers sans adjuvants augmente avec l'augmentation de l'E/C sauf pour le M75 et M100 dont on a eu un colmatage au niveau de la trappe de sortie du plasticmètre. À l'inverse, la plasticité des mortiers adjuvés diminue avec l'augmentation du taux du SR.

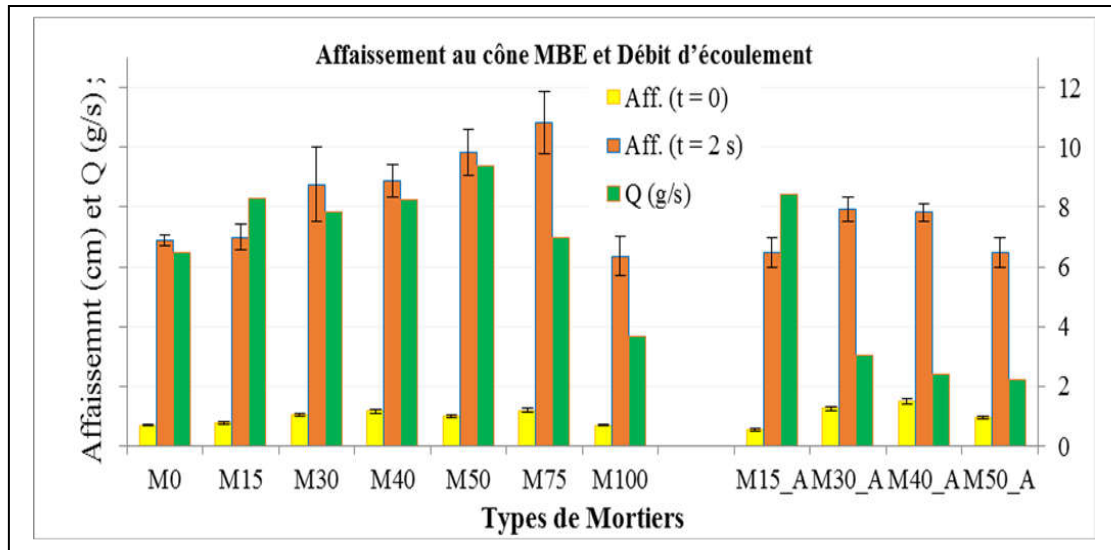


Figure 1.16 : Affaissement au cône MBE et débits d'écoulement des différents mortiers [27].

Grdic et al. [9] ont constaté que l'affaissement diminué avec l'augmentation de taux de substitution de GBR, car les ratios plus élevés signifie que plus d'eau est absorbée par les agrégats. En termes de temps d'écoulement, ils ont constaté qu'il augmente avec le taux d'incorporation de GBR (à l'exception du résultat apparemment anormal pour une incorporation de 50%). Cela est dû au fait que le GBR est plus angulaire et a une surface plus rugueuse que le GBN.

Layachi et al. [27] ont trouvé que la fluidité de tous les mortiers sans adjuvant était liée à la quantité d'eau de mélange (E/C). Elle augmente avec l'augmentation du taux de SR jusqu'à 50%. La diminution de la plasticité des mortiers M75, M100, M75-F et M100-F était due au colmatage au niveau de la trappe de sortie du plasticimètre (Figure 1.17). Au contraire, la plasticité des mortiers avec SP diminue avec l'augmentation du dosage de ces derniers (Figure 1.18). Cette diminution était plus importante pour mortiers contenant du SR dont la dose de SP est plus élevée.

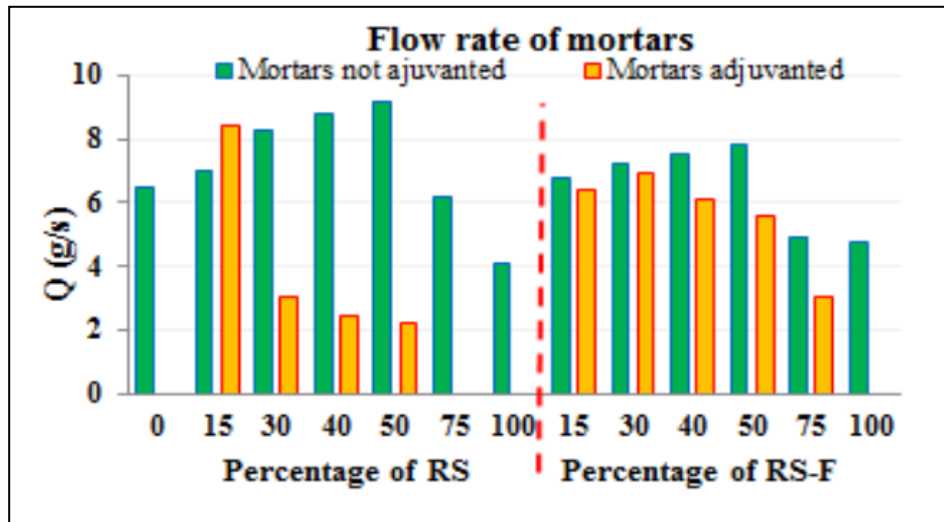


Figure 1.17 : Les débits de différents mortiers

Benhoua et al. [28] ont fait une étude sur la formulation d'un béton autoplaçant à base de granulats recyclés et de le comparer avec celle fabriquer en granulats naturels. Les résultats obtenus de cette étude montrent que pour le BAP avec 100% de GN présente un étalement supérieur à celui du béton avec 100% GR, 50 % GR- 50% GN et 75 % GN- 25% GR pour un rapport G/S = 0,95 ; et un rapport E/C = 0,65 (Figure 1.18).

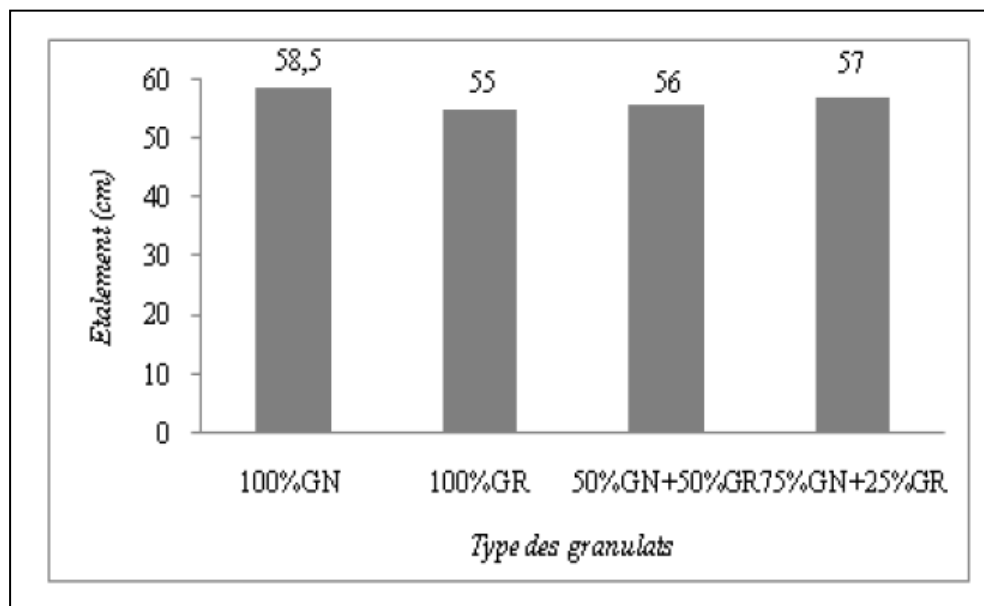


Figure 1.18 : L'étalement en fonction du type des granulats [28].

Concernent les résultats du temps d'écoulements en fonction du type de granulats, montrent que le temps d'écoulements T_{20} , T_{40} et T_{60} , on observe une augmentation pour le BAP à base de 100% granulats recyclés (Figure 1.19), cette augmentation est dû probablement au coefficient d'absorption élevé des granulats recyclés [28].

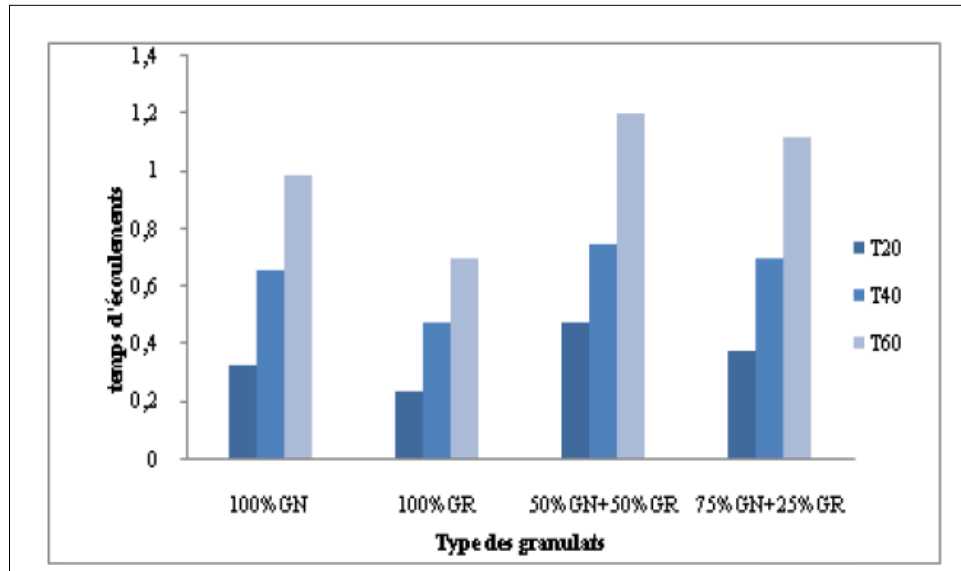


Figure 1.19 : Le temps d'écoulement en fonction du type des granulats [28].

Benhouana et al. [8] ont constaté que pour un rapport E/L égal à 0,46 et 0,47 l'étalement du BAP avec 50% de GN et 50% de GR est supérieur à celui du béton avec 100% de GN et 100% de GR (Figure 1.20).

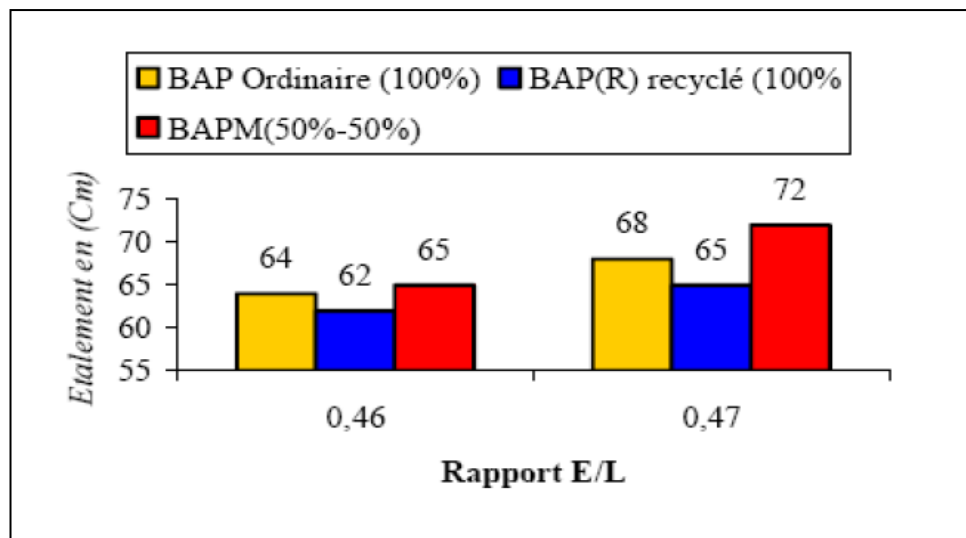


Figure 1.20 : Comparaison entre l'étalement des BAP ordinaires et recyclés [8].

D'autre part, Kou et Poon [29] ont constaté que l'étalement d'un BAP des GR augmente avec l'augmentation de la quantité des granulats fins recyclés, l'étalement minimal est de 760 mm et le rapport de blocage varie entre 0,85 et 0,94. L'addition des cendres volantes améliore l'étalement du BAP (Figure 1.21).

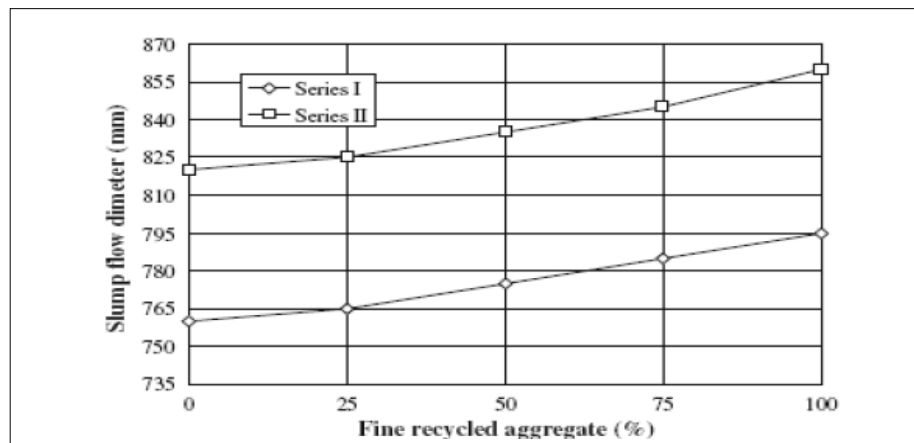


Figure 1.21 : Effet des granulats fins recyclés sur le diamètre d'étalement d'un BAP de GR [29].

Benaichi [11] a conclu que la présence des ajouts minéraux améliore la maniabilité des bétons recyclés notamment la fumée de silice et la pouzzolane.

D'autre part pour le mortier une comparaison a été faite par Thang [24] entre l'étalement d'un mortier à base de GN et un mortier à base de GR. Ils ont observé une diminution de l'étalement en fonction du temps. De plus, pour un type de sable et un rapport E/C données, la perte de maniabilité du mortier contenant du SR est plus importante que celle du mortier à base du SN, comme le montre sur la figure 1.22. Cette perte de plus rapide de maniabilité pourrait être due à l'absorption d'eau au cours du temps du SR.

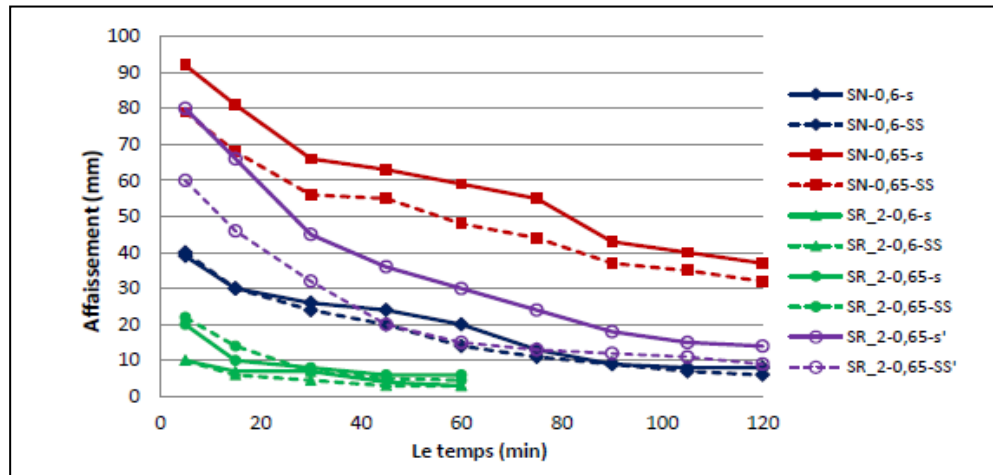


Figure 1.22 : Comparaison de la maniabilité des mortiers de sable naturel et sable recyclé [24].

Debbih [2] a montré que la substitution de 100% et de 50% de granulats naturels par des granulats recyclés donne un BAP avec une ouvrabilité très comparable à celle du BAP de référence (Figure 1.23).

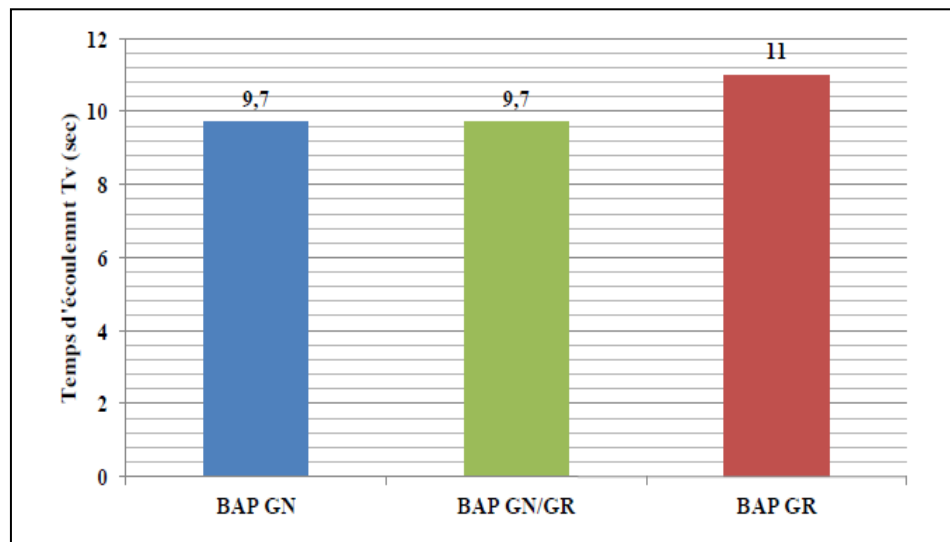


Figure 1.23 : Temps d'écoulement au V funnel de BAP sans ajout [2].

Dans l'étude de López et al. [12] des essais de mini cône et mini entonnoir ont été réalisés sur le mortier dont le sable naturel est remplacé par différents taux de sable recycle (0, 20, 50 et 100%) en fonction de temps (à 15, 45 et 90 min). Les mélanges avec 100% de SR perdent complètement leurs caractéristiques des mortiers à 90 min. Ceci est dû probablement en raison des caractéristiques spécifiques du superplastifiant utilisé qui a un effet retardé (Figure 1.24 et 1.25).

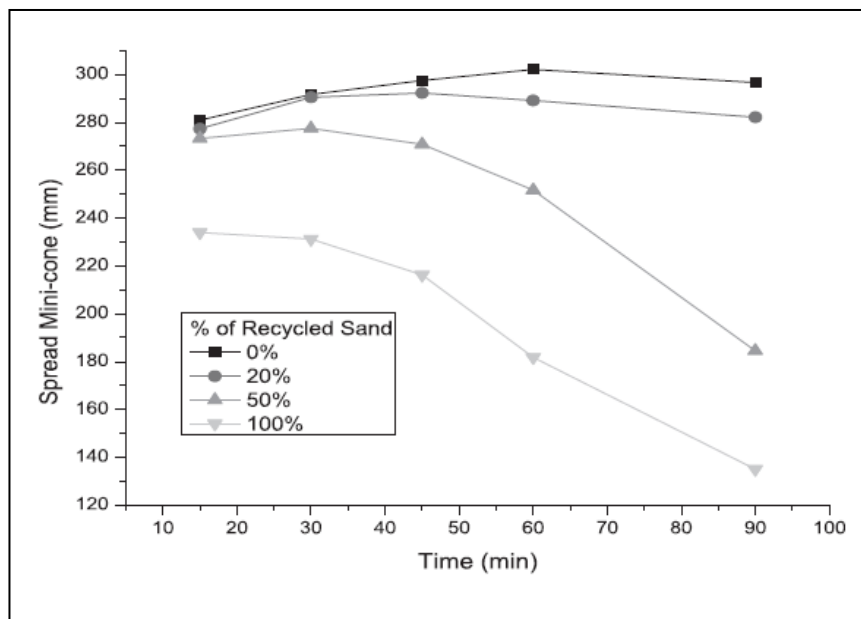


Figure 1.24 : L'étalement de mortier à base de sable recyclé [12] .

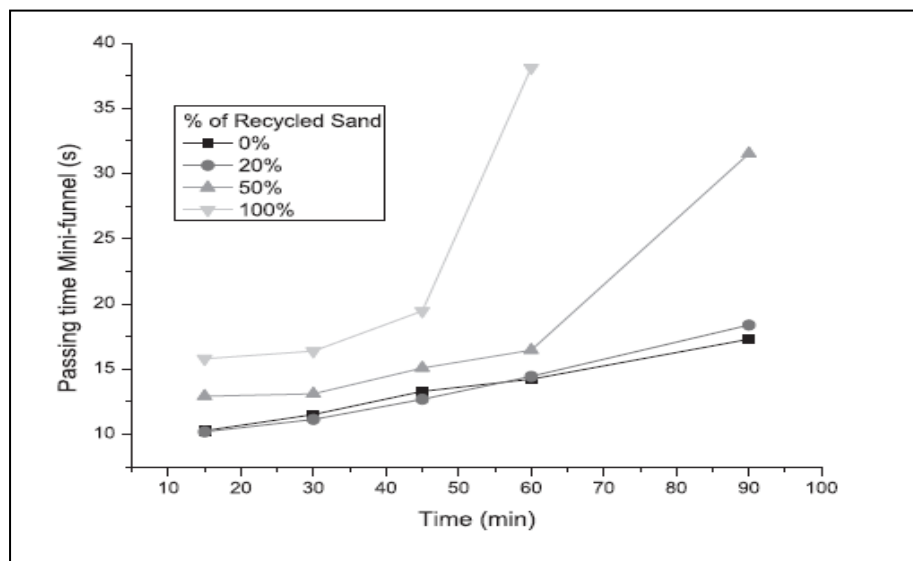


Figure 1.25 : Le temps d'écoulement au mini funnel de mortier à base de sable recyclé [12].

Debbih [2] a trouvé que le laitier donne une meilleure ouvrabilité pour les BAP et que la substitution de 15% du ciment par le laitier dans le BAP à base de granulats naturels engendre une amélioration très remarquable de l'ouvrabilité (capacité de passage et de remplissage), cette amélioration est peut être due à la réaction d'hydratation retardée du laitier.

D'autre part Wang et Lin [30] l'addition du laitier comme substituant de ciment améliore les propriétés à l'état frais. Les résultats montrent que l'étalement varie en fonction du taux de substitution de ciment portland par le laitier de haut fourneau. Le dosage optimal est de 15% de laitier.

D'après Uysal et Yilmaz [31] les bétons qui contiennent des ajouts minéraux ont montré une meilleure maniabilité que les bétons sans ajout.

1.3.4. Rhéologie (Viscosité et le seuil de cisaillement)

La rhéologie est un mot qui vient du grec « rhéo » et « logos » qui veulent dire respectivement couler et étude. Le mot 'Rhéology' a été créé par Eugène Cook Bingham en 1928, emprunté de l'expression grecque 'Ta Panta Rei' en français 'tout s'écoule' [61]. La rhéologie est définie comme étant la science de l'écoulement ou la déformation des corps sous l'effet des contraintes appliquées, variables au cours du temps [58].

- **La viscosité**

Au repos, un liquide peut être considéré comme un ensemble de couches moléculaires parallèles et soumis à une contrainte tangentielle, une des couches du liquide se déplace par rapport à celle qui lui est sous-jacente. En raison du frottement permanent sur les molécules de la seconde couche, le mouvement est transmis partiellement. Ainsi, chaque molécule de fluide ne s'écoule pas à la même vitesse. Cet effet de retard, provoqué par la

friction interne des molécules de la couche sous-jacente sur celle de la couche supérieure, est appelé la viscosité.

La viscosité est la résistance à l'écoulement d'un système soumis à une contrainte tangentielle. Le coefficient de viscosité est une grandeur physique qui joue un rôle essentiel dans la rhéologie des fluides. Sa connaissance suffit parfois à caractériser de façon précise le comportement rhéologie du matériau [57].

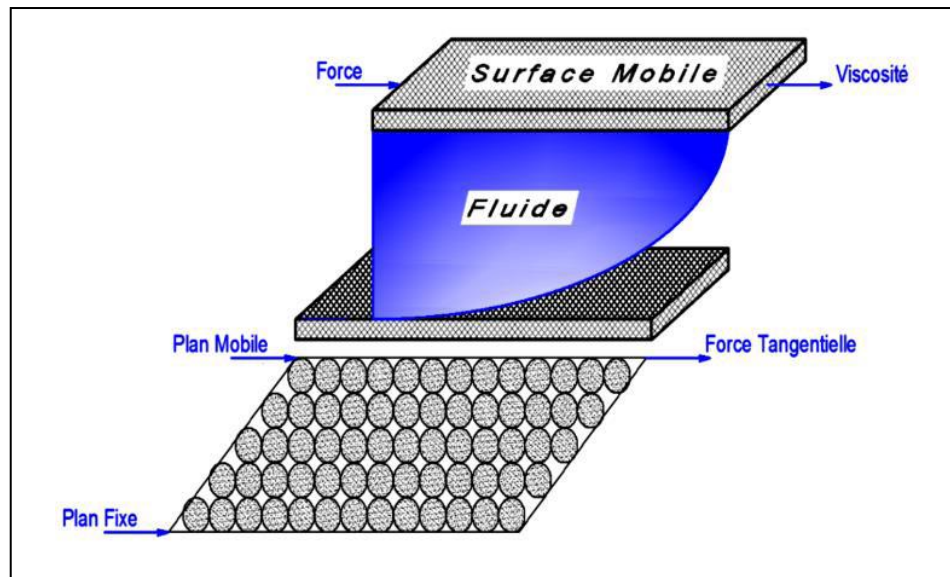


Figure 1.26: Schéma du glissement des couches [58].

Il existe quatre types de viscosité :

- Viscosité dynamique η

C'est la résistance au mouvement due aux frottements moléculaires internes, autrement dit c'est la résistance que les molécules du fluide opposent aux forces de dissociation et mouvement. [64]

$$\tau = \eta \gamma \text{ (Pa.s) 1.1}$$

- Viscosité cinétique ν

C'est le rapport de la viscosité dynamique à la masse volumique du fluide. [65]

$$\nu = \eta / \rho \text{ (m}^2/\text{s) 1.2}$$

- Viscosité relative η_R

C'est le rapport de la viscosité dynamique de la solution sur la viscosité dynamique du solvant. [64]

$$\eta_R = \eta / \eta_S \dots\dots\dots 1.3$$

- Viscosité spécifique η_{SP}

Correspond à la viscosité d'une dispersion colloïdale diluée de particules sphériques.

$$\eta_{SP} = \eta_R - 1 \dots\dots\dots 1.4$$

▪ **Contrainte de cisaillement**

Au cours d'un mouvement laminaire de cisaillement, les couches sont animées d'un mouvement relatif les unes par rapport aux autres. Il en résulte l'apparition de contraintes τ [Pa], qui s'exerce tangentiellement à la surface de la couche [62].

Ainsi, la contrainte de cisaillement est la force exercée par unité de surface du fluide.

$$\tau = dF/dS \dots\dots\dots 1.5$$

- dS : surface élémentaire d'une couche cisillée.
- dF : projection de la force de frottement tangentielle.

▪ **Vitesse de cisaillement**

Considérons un matériau comme un ensemble de couches moléculaires parallèles, emprisonné entre deux plans parallèles de surface S (séparés d'une distance dz). Un des plans est fixe, et le second est mobile, déplacé d'une distance dx à une vitesse constante de V_0 .

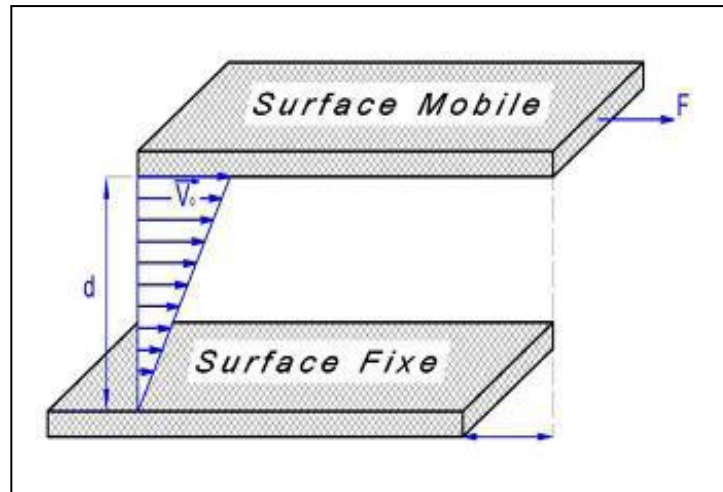


Figure 1.27: Schéma de la vitesse de cisaillement [58].

Sous l'effet de la force tangentielle, la première couche moléculaire se déplace à la même vitesse que le plan mobile. Les couches inférieures vont se mouvoir dans la même direction mais avec des vitesses de plus en plus petites. Il se crée un gradient de vitesse entre les deux plans [51].

Le déplacement entre les deux plans est défini comme la déformation, symbole γ suivant la relation :

$$\gamma = dX/dZ \dots\dots\dots 1.6$$

La norme du gradient de vitesse constant dans tout l'échantillon est définie comme la vitesse de cisaillement, appelée également vitesse de déformation ou taux de cisaillement. Il s'agit de la vitesse de déformation entre deux couches successives voisines du fluide cisailé. Elle est souvent présentée comme étant la dérivée par rapport au temps de la déformation de cisaillement. [57]

$$\dot{\gamma} = d\gamma/dt = d/dt (dX/dZ) = d/dZ (dX/dt) = dv/dZ \dots\dots\dots 1.7$$

- **Seuil de cisaillement**

Le seuil de cisaillement τ_0 est défini comme étant la contrainte de cisaillement minimale à atteindre pour qu'un fluide soumis à une déformation de cisaillement s'écoule. En dessous de cette valeur, cette mixture se comporte comme un pseudo-solide (pas de déformations permanentes). De Larrard et al [63] ont considéré que le seuil de cisaillement τ_0 [Pa] est la manifestation macroscopique du frottement entre les grains composant le squelette granulaire du béton y compris les grains de ciment et les particules ultrafines.

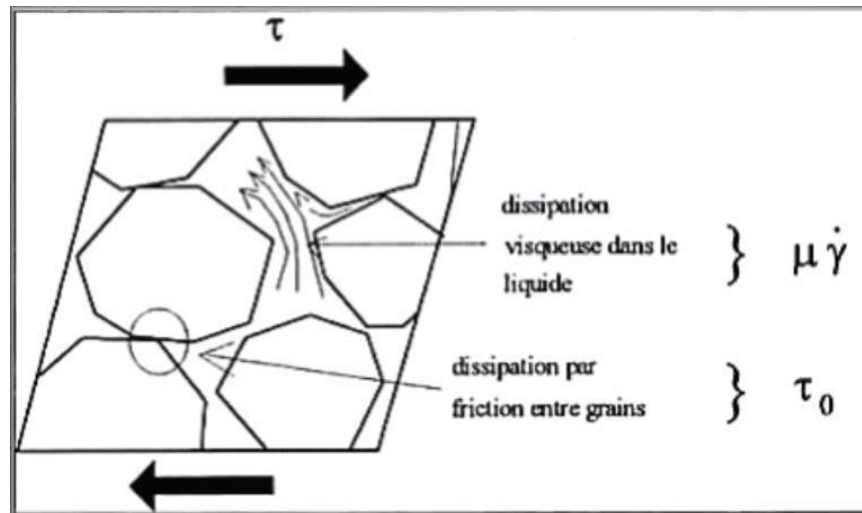


Figure 1.28: Contributions de la phase solide et de la phase liquide à la résistance au cisaillement du béton [65].

La maîtrise du comportement rhéologique du béton à l'état frais est essentielle pour caractériser l'écoulement du béton et faciliter sa mise en œuvre. La caractérisation du béton à l'état frais peut se faire grâce à l'étude des propriétés rhéologiques fondamentales telles que le seuil de cisaillement et la viscosité plastique.

La rhéologie du béton recyclé des est peu abordée dans la littérature. En effet, les facteurs tout comme la nature du granulat (sable, sables+gravillons, gravillon), le taux de remplacement (0 à 100%) ou encore l'état hydrique du granulat (sec, partiellement saturé, et saturé en eau) sont souvent relativement différents d'une étude à l'autre.

D'après Sandrine et al. [32] le comportement rhéologique à l'état frais des mortiers de fines recyclées a ensuite été caractérisé, et l'influence des adjuvants sur ces comportements

a été mise en évidence. Ils ont observé un seuil élevé sans adjuvant et diminution de la contrainte de cisaillement lors de l'ajout de superplastifiant comme indique la figure 1.26.

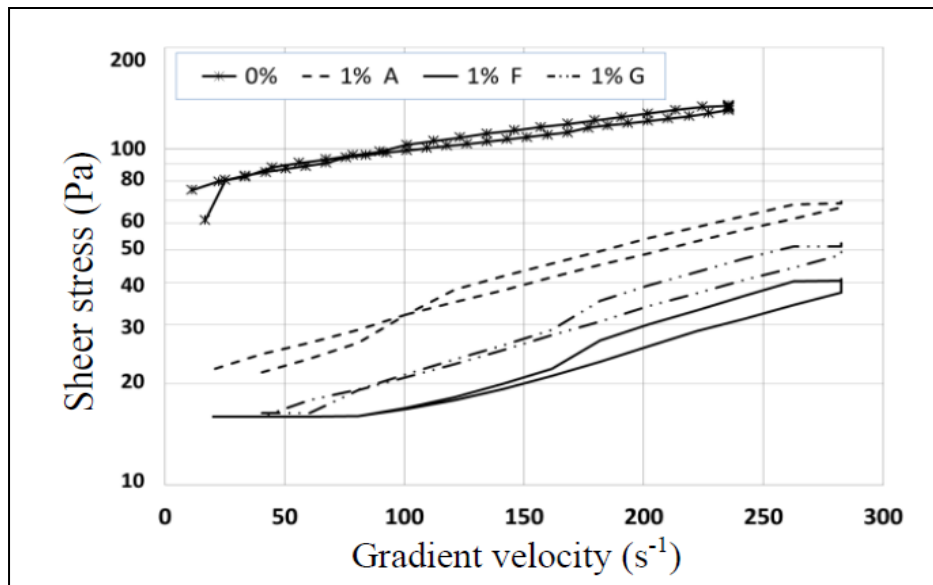


Figure 1.29: Rhéogramme de la composition des mortiers [32].

Kouider [13] a remarqué que quel que soit le taux de substitution des GN par des GR, la viscosité plastique et seuil de cisaillement diminue avec l'augmentation de quantité de laitier. En effet, pour le BAP de référence cette diminution de la viscosité plastique et seuil de cisaillement de équivaut à 25% ; 39,20% et 19,10% ; 33,60% respectivement pour les mélanges avec 15%, 30% du laitier de respectivement (Figure 1.27).

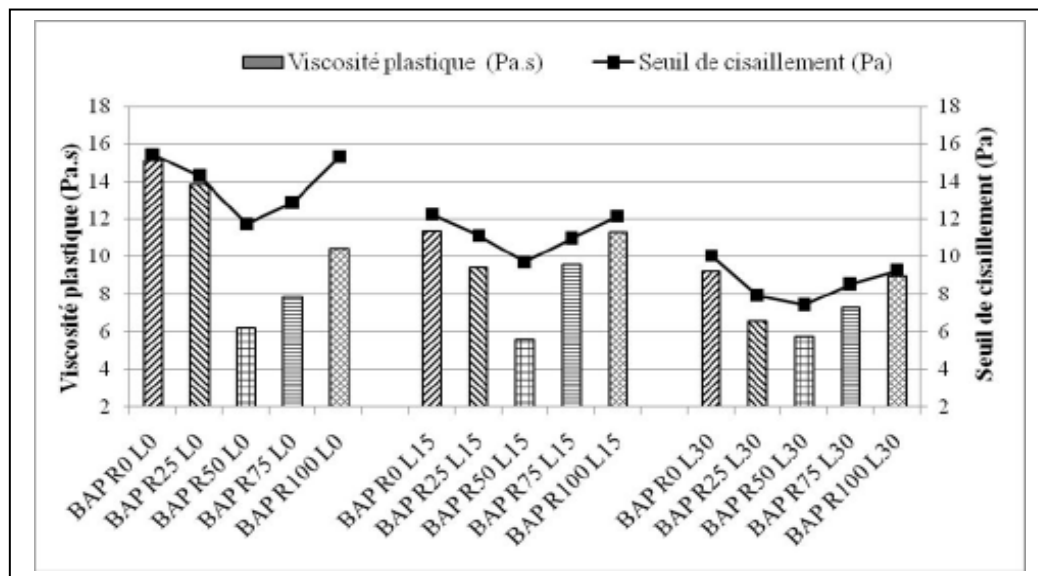


Figure 1.30: Variation des paramètres rhéologiques en fonction de la teneur en laitier et taux de substituant des GN par des GR [13].

Par contre Lopez et al. [12] ont étudié l'effet de l'incorporation des granulats fins recyclés sur la rhéologie du BAP en fonction du temps (à 15, 45 et 90 min). Les granulats naturels a été remplacée à 0%, 20%, 50% et 100% par du sable recyclé. Ils ont trouvé que la viscosité plastique augmente avec l'augmentation de la quantité des sables recyclés dans le mélange en fonction du temps (Figure 1.28). Au contraire, le mélange avec un taux de remplacement de 20% maintient une capacité de passage et de remplissage convenable. Cela est attribuer à l'incorporation de sable recyclé qui provoque une augmentation plus importante de la viscosité plastique et le seuil de cisaillement.

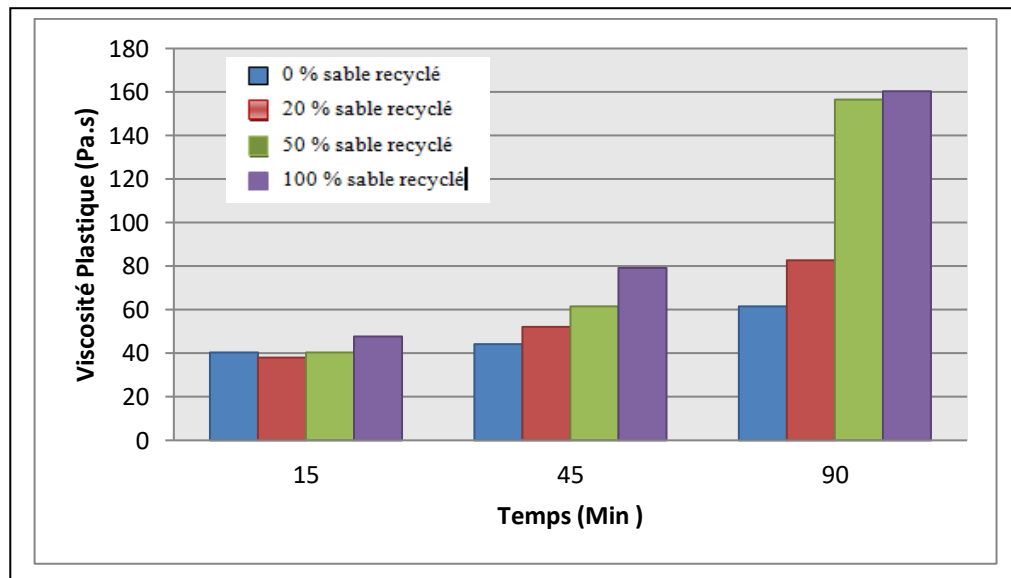


Figure 1.31: Variation de la viscosité plastique des BAP à base de sable recyclé en fonction du temps [12].

Iris et al. [33] ont trouvé que, plus le taux de remplacement des GR sont plus élevé, plus les valeurs rhéologiques augmente. Ils ont vu également que des rapports E/C élevés (0,473) n'impliquent pas de changement significatif sur le seuil de cisaillement, alors qu'à un rapport E/C faible (0,447), peuvent conduire à de grands changements des paramètres rhéologiques.

La figure 1.29 représente les valeurs expérimentales du seuil de cisaillement en fonction de l'étalement des BAP au laitier et GR [13]. Une bonne corrélation linéaire est proposée entre les deux paramètres avec un coefficient de corrélation, R de 0,826 ; montrant une diminution du seuil de cisaillement avec l'augmentation de l'étalement. D'autres chercheurs ont également établi une bonne corrélation entre l'étalement et le seuil de cisaillement [34].

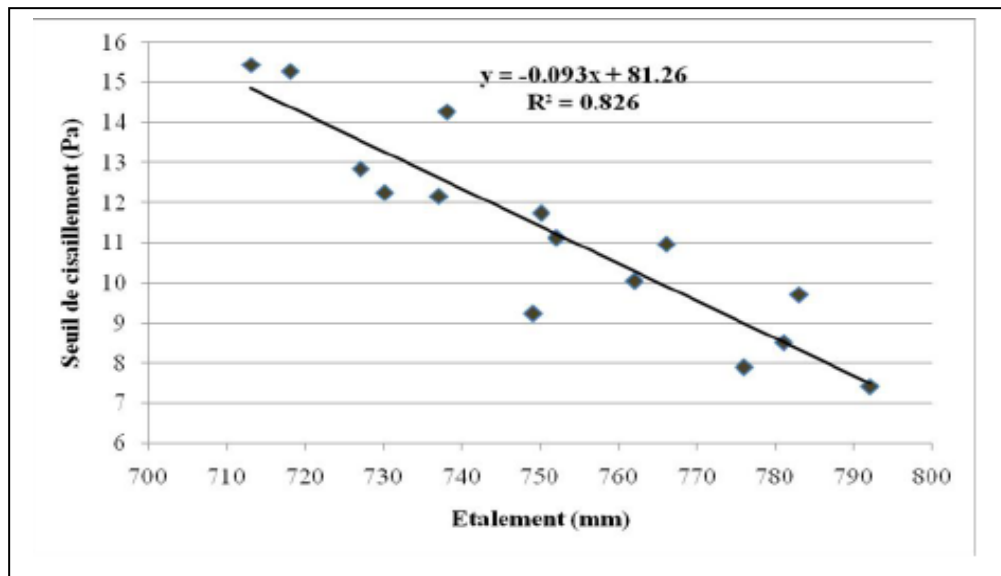


Figure 1.32 : Corrélation entre le seuil de cisaillement et l'étalement [13].

D'après Safiddine [35] le mortier à base de sable concassé présente des valeurs de viscosité et de limite d'élasticité élevée par rapport au mortier à base de sable roulé. Par conséquent, il est vraiment utile de corriger le sable concassé par le sable roulé pour améliorer la maniabilité et les propriétés rhéologiques du mortier.

1.4. Propriétés des mortiers autoplaçant à base de sable recyclé à l'état durci

L'exigence essentielle pour un béton ou un mortier est de pouvoir résister aux contraintes mécaniques de la construction. C'est pourquoi la détermination des résistances mécaniques [17].

1.4.1. Résistance à la compression

L'un des paramètres les plus importants est la résistance à la compression. Cette résistance est largement étudiée, en tenant compte de facteurs pouvant affecter sa résistance, tels que le taux de substitutions, la qualité du béton d'origine, la procédure de malaxage et l'état hydrique des gravillons recyclés [36].

Lorsque les autres facteurs sont maintenus, la résistance à la compression diminue avec l'augmentation du taux de substitution. Cependant, dans le cas où le rapport massique est réduit de 30%, l'effet de cette diminution de résistance est faible. La qualité du béton d'origine joue aussi un rôle important mais sur ce point les conclusions semblent encore contradictoires dans la mesure où la classe de résistance plus élevée du béton d'origine dont provient le matériau recyclé peut rendre le nouveau béton plus résistant et aussi plus faible [36].

La résistance à la compression des mélanges contenant des granulats recyclés diminué en taux de substitution. Cette diminution de résistance est principalement due à la forte absorption d'eau des granulats recyclés et à leur résistance plus faible, ainsi que la diminution de la quantité d'interface pâte-granulat (ITZS) [6].

La diminution de la résistance à la compression du béton fabriqué avec GR est attribuée à la présence de deux types de zones de transition interfaciale (ITZS) dans la matrice. L'ITZS représente la liaison entre l'agrégat et la pâte et est normalement plus faible que l'agrégat ou la pâte de ciment hydratée. Dans le béton fabriqué avec des GN, L'ITZS se situe entre le granulat et le mortier, tandis que dans le béton contenant des GR, L'ITZS se situe entre le granulat d'origine et l'ancien mortier et le nouveau mortier (Figure 1.30). En outre, la résistance à la compression plus faible est également due au fait qu'une plus grande quantité d'eau et dans de nombreux cas, utilisée dans le mélange de béton des GR afin d'obtenir la maniabilité souhaitable. La présence de vieux mortier sur les surfaces des bétons de GR est également due au fait que le mélange de béton des GR contient souvent une quantité d'eau plus importante afin d'obtenir la maniabilité souhaitée [10].

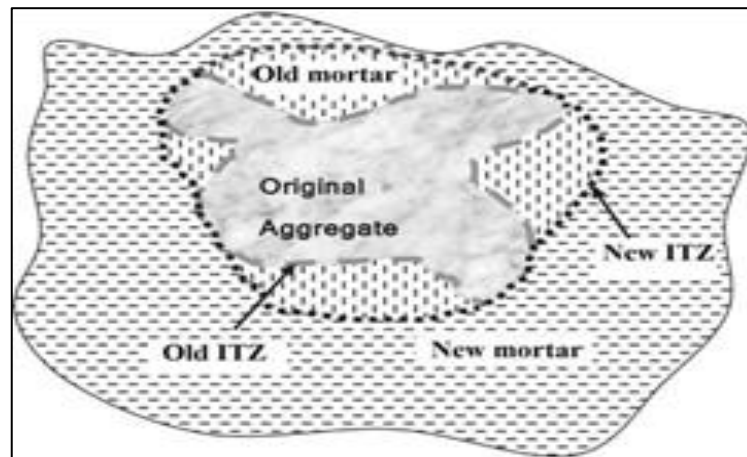


Figure 1.33 : L'ancien et nouveau ITZS en béton recyclé [10].

Plusieurs chercheurs ont trouvé une diminution de 10% à 25% de la résistance à 28 jours [32-33]. Cependant, d'autres études ont également présenté des résultats divergents [39]. Ces différents résultats peuvent s'expliquer par le fait que le taux de remplacement des granulats naturels par des granulats recyclés n'est qu'un des nombreux facteurs qui affectent la résistance à la compression du béton ou du mortier d'agrégats recyclés.

El hadj [11] a constaté que les mortiers à base des sables recyclés présentent des résistances à la compression plus faible par rapport aux mortiers naturels qui nécessitent une augmentation du dosage et présentent un inconvénient du point de vue économique

L'ajout de (10 et 20%) de laitier améliore la résistance à la compression à court et à long terme de (31%) et cela dû à la finesse élevée de ces ajouts. En revanche dans le cas des cendres volcaniques nous avons remarqué une légère augmentation (11%) à court et à long terme en raison de la vitesse lente de réactions pouzzolaniques. L'évolution de la résistance dans le temps s'explique par les propriétés hydrauliques latentes de l'hydratation des additions minérales (laitier et pouzzolane) [11].

La présence de la fumée de silice dans les bétons à base des sables recyclés influence de façon significative les propriétés mécaniques de ces derniers, une augmentation importante d'environ 97% pour le sable de démolition de béton concassé (SDB) qui dépasse le béton témoin. Cette action particulière est due au fait que les grains de la fumée de silice ont un

diamètre environ 100 fois plus petit que celui des plus petits grains de ciment, et que cette finesse des grains diminue le ressuage [11].

La figure 1.31 montre que, lorsque le taux de substitution du sable est supérieur à 30 %, la résistance au jeune âge et à 28 jours augmente remarquablement. En deçà de cette quantité, la résistance reste sensiblement constante. C'est tout à fait logique en maintenant l'augmentation de la teneur en air et de la densité du béton lorsque le pourcentage de SR augmente. La présence du mortier de ciment en SR a affaibli la structure du mélange, et d'autre part la présence de pores qui facilitent la rupture. De plus, avec l'âge, la résistance à la compression augmente pour tous les bétons fabriqués avec de la SR ou des agrégats recyclés [14].

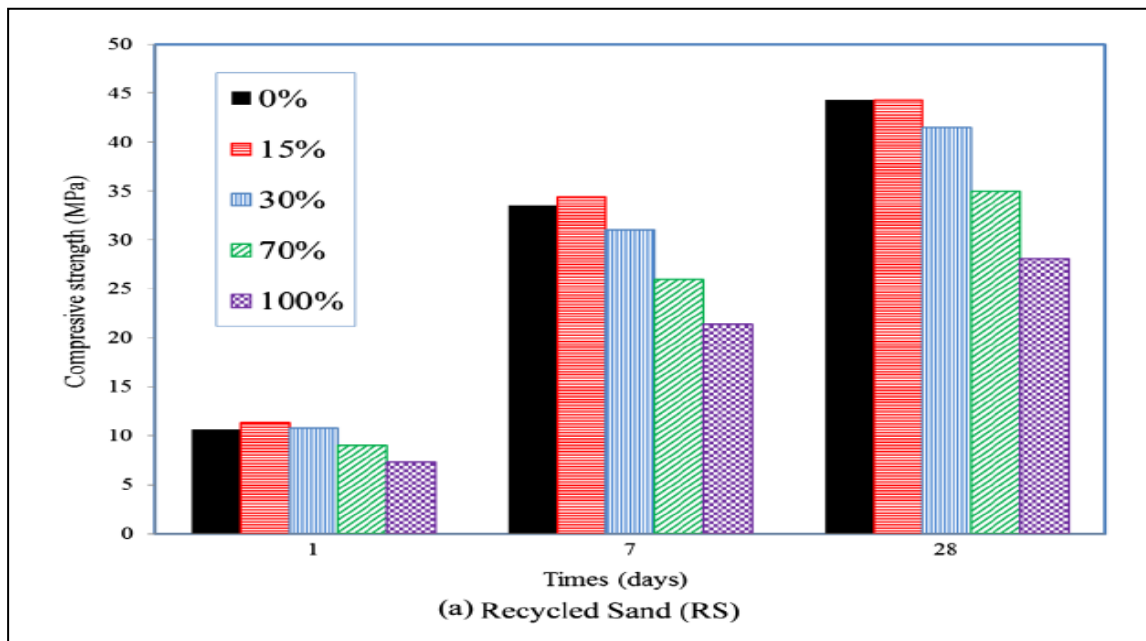


Figure 1.34 : La relation entre la résistance à la compression à l'âge de 28 jours et le taux de substitution de sable recyclé [14].

1.4.2. Résistance à la traction

La résistance à la traction du béton à base de sable recyclé, semble être moins effectuée que la résistance à la compression. La surface plus rugueuse des GR ainsi que leur granularité semblent affecter positivement la liaison entre les granulats et le mortier [6].

La résistance à la traction diminue au fur et à mesure le taux de remplacement augmente (figure 1.32). Ceci est dû à la liaison entre l'ancien mortier contenu dans le (GR) et le mortier d'origine (GN) auquel le mortier est collé. Ils ont constaté que le développement de la résistance à la traction n'était pas prononcé avec le temps (50 % et 100% de GR étaient respectivement de 2,49% et 13,95%). En général, la résistance à la traction diminue à mesure que le taux d'incorporation de GR augmente [9].

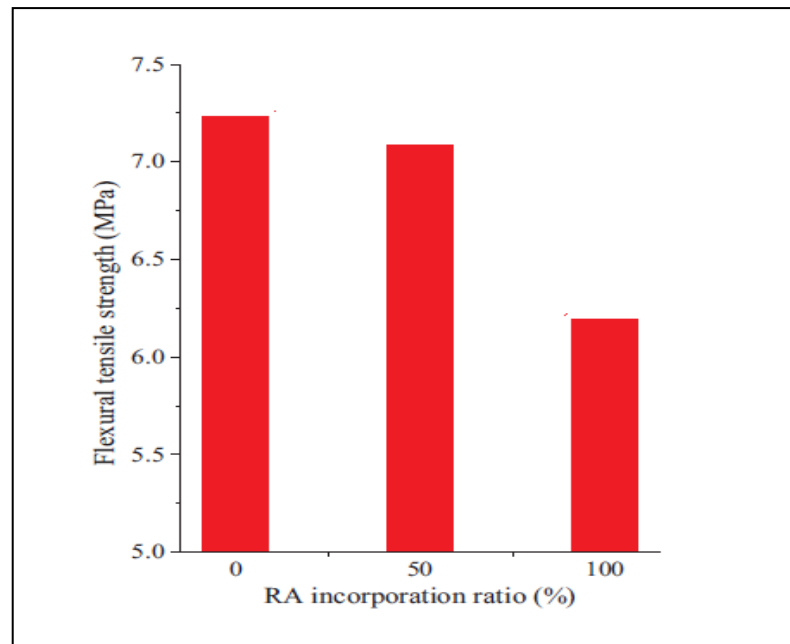


Figure 1.35 : Résistance à la traction des mortiers à base de sable du béton concassé [9].

Il semble généralement que la résistance associée au remplacement des granulats naturels par des granulats recyclés dans le béton est réduite de 10% [38].

Comme de nombreuses autres propriétés du béton lorsque le taux des granulats naturels remplacés par des granulats recyclés augmente, la résistance à la traction du béton diminue [40].

Parra et al. [41] ont montré que dans un BAP contenant les fillers de calcaire la résistance à la traction à 7 jours est inférieure à celle du béton vibré, la différence entre les deux bétons est négligeable, mais à 28 et 90 jours, la différence augmente et atteint 15% environ.

1.4.3. Retrait

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

L'incorporation de GR dans le béton entraîne une augmentation totale avec le temps, comme le montre la comparaison des figures 1.33. Cela s'explique par la plus grande porosité et donc la plus faible densité des GR en raison du mortier durci contenu dans les GN, qui réduisent leur rigidité et leur capacité à limiter la déformation [29].

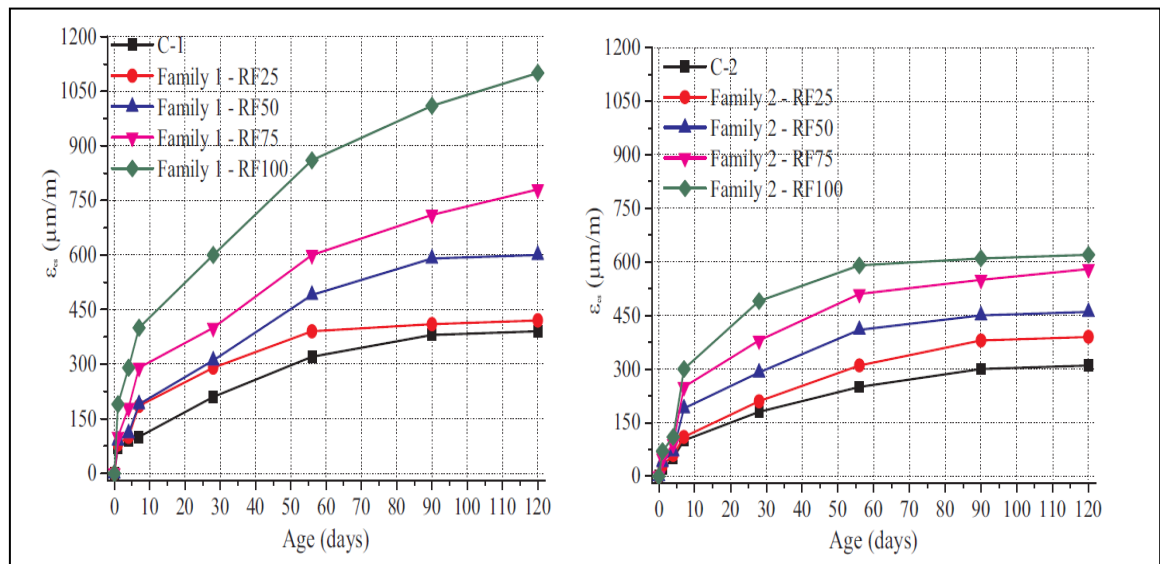


Figure 1.36 : Le retrait total des familles 1 et 2 [29].

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

Selon Van et Montgomery, le filler calcaire peut limiter le retrait de séchage des BAP, avec une utilisation adéquate de la finesse et de la proportion. Cependant, la prépondérance de cet effet n'est pas toujours affirmée [42].

L'incorporation des quantités croissantes des cendres volantes dans la composition des BAP, réduit le retrait de séchage. Il a été observé que le taux de retrait diminue

linéairement avec l'augmentation de la teneur en cendres volantes. La substitution du ciment par 80% de cendres volantes peut réduire le retrait par deux tiers [43].

Cependant, l'augmentation du volume de la pâte de la susceptibilité des fissuration de retrait (Figure 1.34) [44].

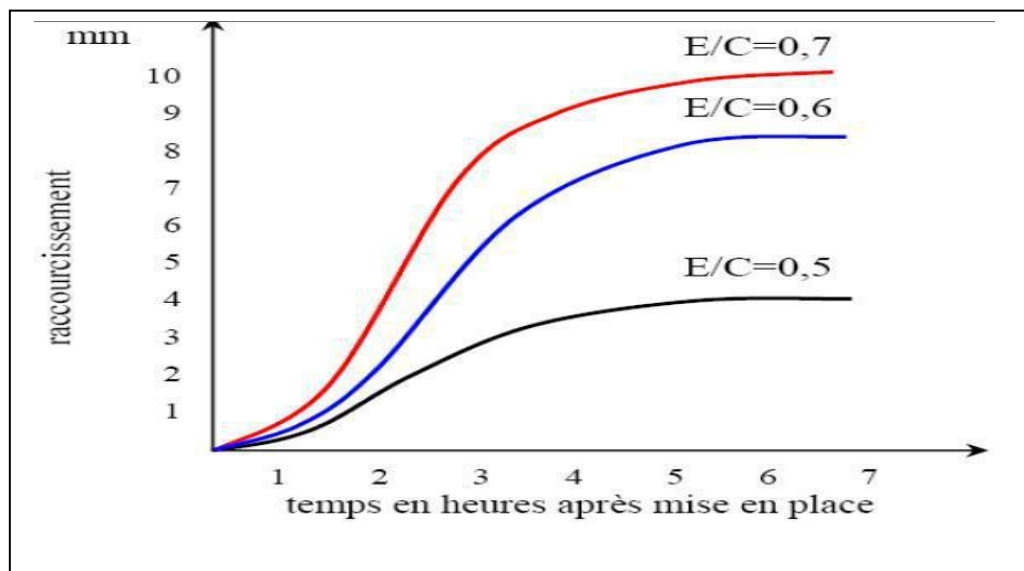


Figure 1.37 : Influence d'E/C sur le retrait des mortiers [17].

1.5. Durabilité des mortiers autoplaçants à base de sable recyclé

1.5.1. Porosité et absorption d'eau

L'absorption d'eau est définie par le transfert de liquides dans un matériau poreux grâce à des tensions de surface dans les capillaires. Ce phénomène n'est pas attaché uniquement à la porosité du matériau mais aussi à son humidité. En général, l'absorption d'eau à l'intérieur d'un béton sec dépend de deux grandeurs, la porosité effective du matériau et la vitesse d'absorption par remontée capillaire (absorptivité) [45].

D'après les résultats obtenus par Debieb [7] le béton recyclé est fort poreux (environ le double) par rapport au béton naturel. Cette porosité est causée en gros par la forte porosité des GR utilisés et surtout leurs pourcentages de substitution élevés. Il a constaté aussi que

la forte absorption d'eau des GR est due à la présence d'ancien mortier attaches aux primaires (naturels).

L'étude [24] montre que, l'absorption d'eau des granulats de béton recyclés est plus élevée par rapport à celle des GN en raison de la présence de la pâte de ciment adhérente. Cette dernière possède une porosité plus importante que celle des GN. De plus l'état de saturation initiale des granulats influence également la quantité d'eau d'absorbée lors du malaxage. L'utilisation de granulats sous satures (sec ou non sature) entraine une absorption d'eau dans le malaxeur, donc il y a une diminution du rapport E/C nominale. À l'inverse, quand les granulats sont utilisés à l'état sursaturé, eau en excès va entrainer une augmentation du rapport E/C.

Généralement, la perméabilité de béton recyclé est liée à la source des agrégats des déchets de construction et de démolition [46]. L'absorption d'eau des granulats de béton recyclé est supérieure à celle de granulats naturels. Au cours de la phase du durcissement du béton, la vaporisation de l'eau provoque sa porosité [46] prouvent que le séchage de béton à longue durée diminue le diamètre des pores et par conséquent la perméabilité de béton recyclé est réduite de 50% par rapport à celle de béton naturel.

L'absorption capillaire des mortiers à base des SR est élevée que les mortiers à base des granulats de SN. La raison des taux d'absorption d'eau capillaires plus élevés est dûe à la plus grand nombre de pores capillaires causés par le rapport E/C plus élevé des mortiers d'agrégats recyclés et de leur capacité d'absorption d'eau accrue [23].

Dans une autre étude similaire, montre que l'absorption d'eau augment avec l'augmentation des granulats recyclés. L'utilisation de 50 % à 100% du gravier recyclé augmente l'absorption d'eau de 0,15 à 0,37% (Figure 1.35) [9].

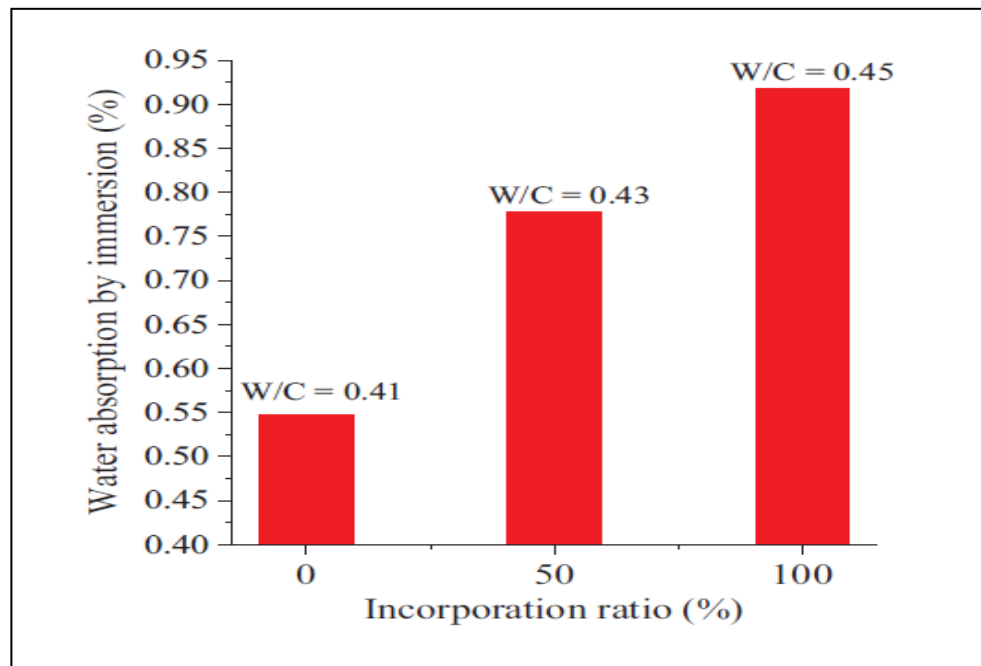


Figure 1.38 : Absorption d'eau pour des BAP avec (50% et 100%) des granulats recyclés [9].

D'autre part Mariana et al. [47] présentent une étude de d'évaluation des performances des mortiers à base de ciment incorporant des granulats de béton recyclé. Le coefficient d'absorption d'eau capillaire a diminué lorsque le taux de substitution augmente. C'est-à-dire Lorsqu'une partie du sable est remplacée par de fines particules, celles-ci remplissent certains des vides, laissant principalement de très petits pores de mortier durci qui entravent la circulation de l'eau et, par conséquent, le débit d'eau capillaire est plus petit.

Pereira-de-Oliveira et al. [48] ont constaté que l'incorporation de GBR n'affectait pas significativement sur l'absorption d'eau, compte tenu de la proximité des courbes obtenues (Figure 1.36). Ils ont conclu que l'eau capillaire diminue que GBR est remplacée par GBN. Cette diminution était de l'ordre de 12% pour un remplacement à 100%. Cela est justifié par le volume élevé de pâte de ciment du BAP.

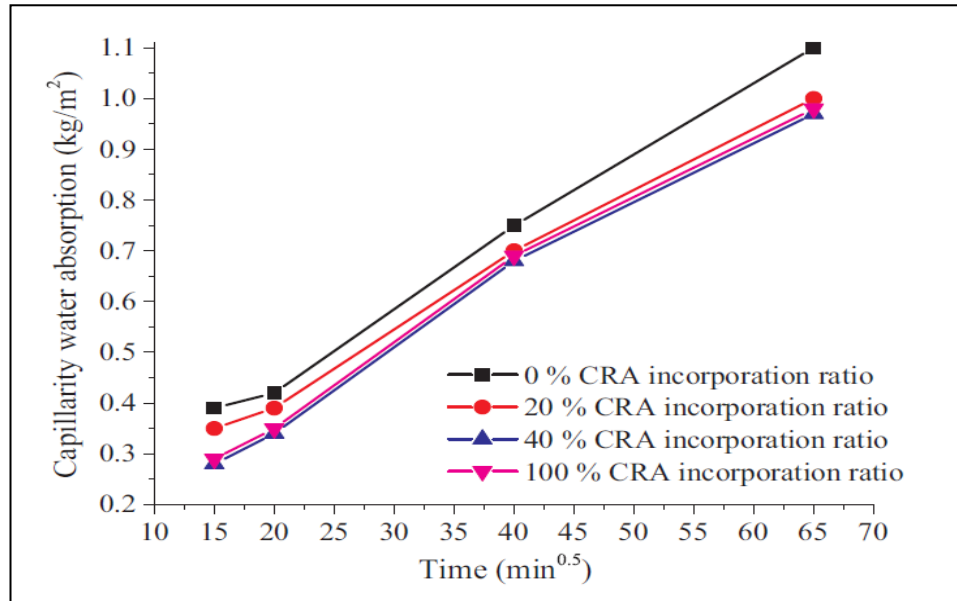


Figure 1.39 : L'influence des agrégats recyclés sur l'absorption d'eau par capillarité [48].

Selon l'étude d'Evangelista et al. [49] la cinétique d'absorption d'eau est très rapide car la saturation de l'échantillon de SR intervient après seulement 30 minutes d'imbibition (Figure 1.37).

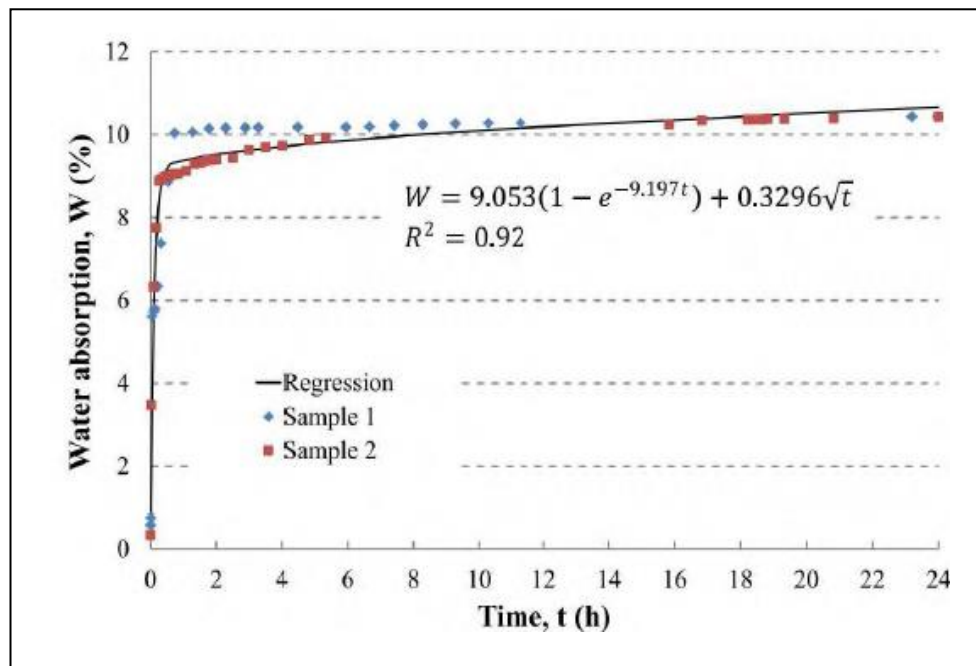


Figure 1.40 : Cinétique d'absorption d'eau de sable recyclé [49].

Benyamina et al. [6] ont conclu que la porosité accessible à l'eau des différents mélanges des BAP à base des fines issues du sable de concassage montre l'effet positif des fillers calcaires sur la diminution de la porosité. Un taux de 20% de fines dans le sable peut diminuer la porosité de 1.81% (Figure 1.38).

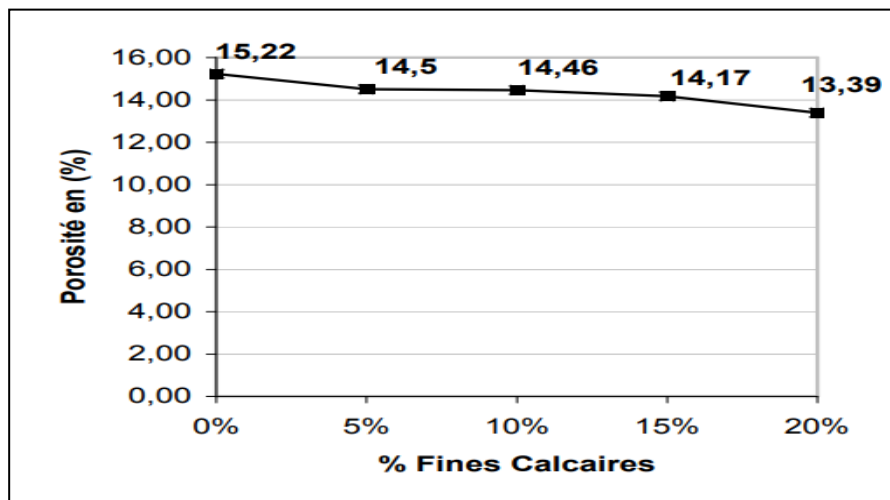


Figure 1.41 : La porosité accessible à l'eau de BAP [6].

1.5.2. Perméabilité à l'eau et au gaz

La perméabilité est un critère d'évaluation de la durabilité, elle représente une grandeur physique qui caractérise la structure poreuse du béton et par conséquent, son aptitude à résister à l'intrusion des agents agressifs.

Les résultats de Zaharieva et al. [46] ont montré que pour un béton à base de 100% de GR, la perméabilité augmente environ deux à cinq fois par rapport à celle du béton à base de GN. Alors en général la perméabilité des bétons recyclés est supérieure à celle du béton ordinaire.

Layachi et al. [1] ont constaté que la perméabilité apparente au gaz du béton à base des GR 100% est très importante par rapport au gaz du béton à base des 100% SD et GN, 100% SR et GN, 100% SD et GR et dernièrement 100% SD 75% GN 25% GR et elle diminue en

fonction du remplacement des GN par les graviers recyclés en premier lieu ensuite les sables.

Les résultats de Kouider [13] ont montré que la profondeur de pénétration d'eau augmente avec l'augmentation de taux de substitution de GN par des GR. Cela est dû principalement à l'augmentation de la porosité du béton résultant de la présence d'ancien mortier attachée aux particules d'agréats recyclés. Cependant, pour le même taux de substitution des granulats recyclés, la présence du laitier a engendré une amélioration remarquable de la résistance à la pénétration de l'eau. En outre, la résistance à la pénétration de l'eau dans les mélanges préparés à base de 15% de laitier sont supérieurs à celle des mélanges à base de 30% laitier (Figure 1.39). Dans le même contexte, Cheng et al. [26] ont noté qu'une réduction de la perméabilité à l'eau du béton avec 50% de laitier.

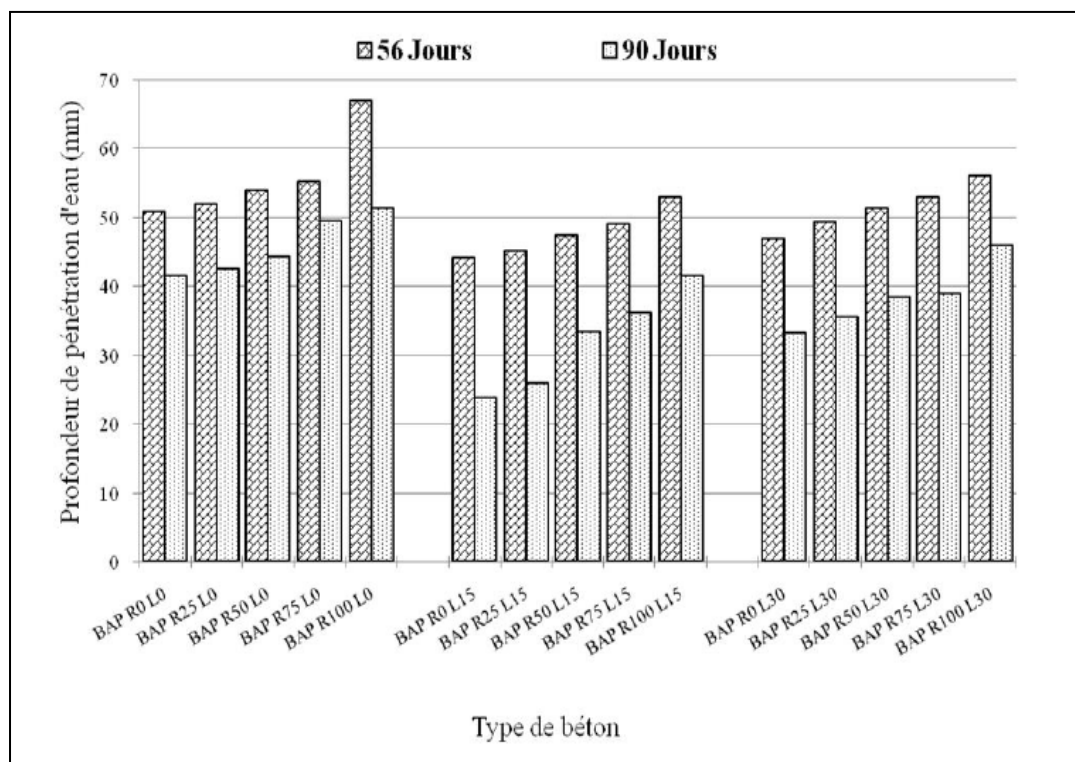


Figure 1.42 : La perméabilité à l'eau en fonction de la teneur en laitier et taux de substituant des GN par des GR [13].

1.5.4. Migration des chlorures

Pénétration des chlorures (Cl-) dans le béton qui est un milieu poreux se fait en présence d'eau. En milieu saturé (béton immergé), les ions chlorures pénètrent par diffusion dans le béton sous l'effet d'un gradient de concentration. Le coefficient de diffusion des ions chlorures est une grandeur essentielle de la durabilité des bétons exposés aux chlorures.

D'après Evangelista et Brito [50] le coefficient de migration des ions chlorure est augmenté avec l'augmentation du taux de remplacement en sable recyclé. En effet, avec sa teneur élevée en mortier attaché, le sable recyclé peut aider au développement d'un réseau poreux supplémentaire au sein du nouveau béton favorisant ainsi la pénétration des ions du milieu extérieur. Pour le béton avec 100% de substitution massive, le coefficient de migration croît de 34% par rapport au béton de référence (Tableau 1.4). Cette observation est aussi confirmée par les recherches de [29].

Tableau 1.4 : Coefficient de migration Cl- pour des bétons à base de sable recyclé [50]

	D_{nssm} (m²/s)			Δ (%)
	Migration des Cl- μ (%)	Coefficient de déviation σ (%)	Écart type Cv	
BR	17,99*10 ⁻¹²	1,14*10 ⁻¹²	0,0638	34%
C30R	20,13*10 ⁻¹²	2,11*10 ⁻¹²	0,01049	11,9
C100R	21,07*10 ⁻¹²	3,21*10 ⁻¹²	0,1337	33,9

Au contraire, les recherches de [29] montrent une pénétration plus difficile des ions Cl- avec un taux croissant de remplacement en SR (Figure 1.40). Ils attribuent ce phénomène à l'effet filler engendré par les grains fins présents dans le SR (< 0,3 mm). Ces particules fines sont plus importantes (passant à 0,15 mm de 8,1% pour SR et 2% pour le sable naturel) dans la coupure du SR comparativement au sable naturel.

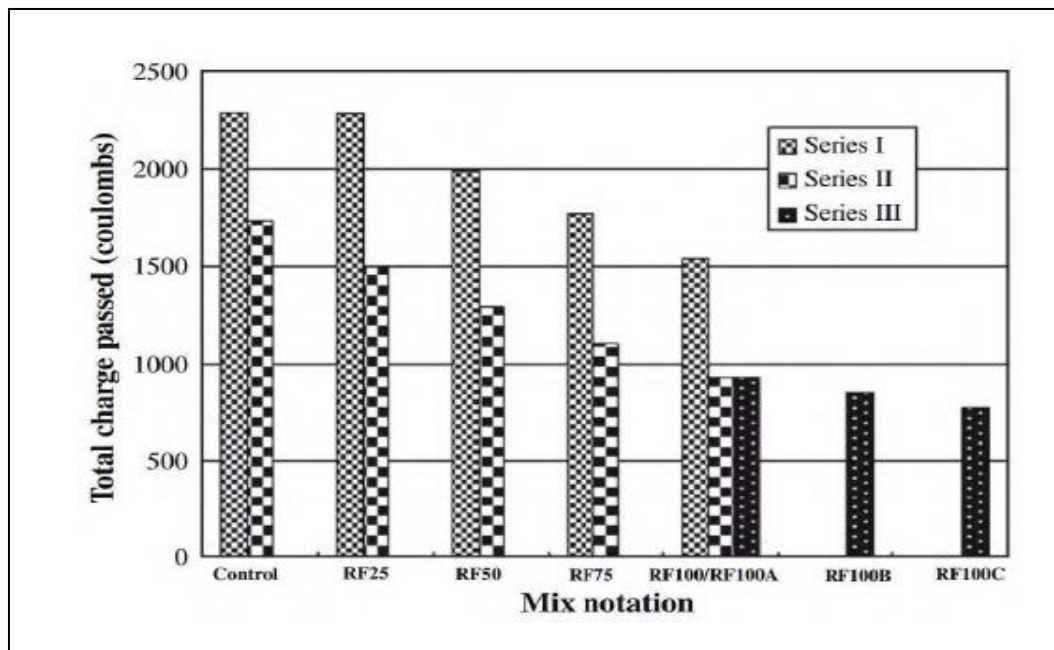


Figure 1.43 : Pénétrations des ions Cl^- pour des bétons à base de sable recyclé [29].

D'après Ajamni [21], les pouzzolanes étaient très efficaces pour résister aux ions chlorures, ce qui réduisait la perméabilité du béton avec GR.

Selon Tan et al. [51] deux phénomènes peuvent entraîner une augmentation du coefficient de diffusion : une augmentation de la porosité ou une baisse de la fixation du chlorure capacité. Ils ont constaté que plus le SN est remplacé, plus la porosité augmente, en raison de la présence d'une plus grande teneur en pâte ancienne. Sur d'autre part, lorsque le SN est remplacé par SR ou SRC, la quantité d'ancienne pâte est augmentée pour fixer le chlorure (avec formation de chloroaluminates).

Tuyan et al. [52] ont également analysé la résistance à la migration des chlorures en déterminant la charge passée dans les échantillons sur 6 h. Les résultats sont présentés sur la figure 1.41. La pénétration des ions chlorure augmente avec l'augmentation de taux d'incorporation de GBR. Cela se justifier par la plus grande porosité de GBR par rapport à GBN. L'augmentation de charge passée a été de 37% ($E/C = 0.43$), 60% ($E/C = 0.48$) et 38% ($E/C = 0.53$) pour 60% de remplacement de sable avec fins granulat recyclé.

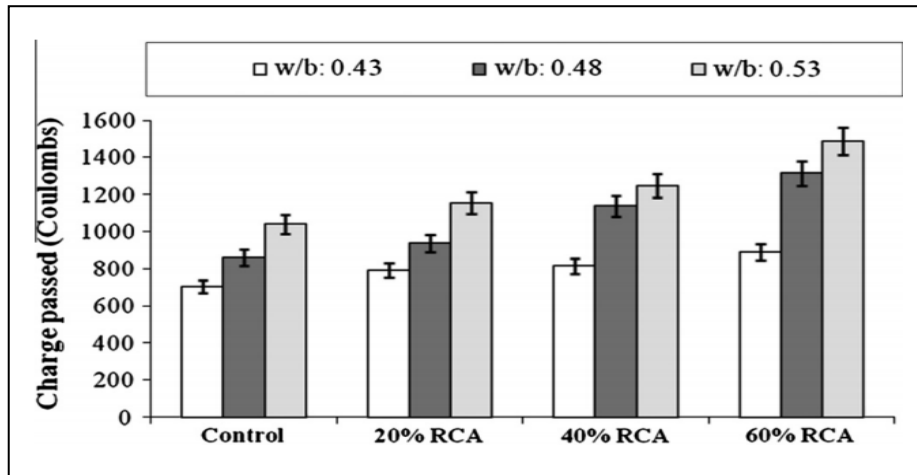


Figure 1.44 : La Charge totale passée après 28 jours [52]

Menadi et al. [6] ont étudié l'évolution de la concentration en chlorures dans les différents mélanges des BAP en fonction du pourcentage des fines calcaires dans le sable concassé. Les résultats montrent l'effet positif des fines calcaires sur la diminution de migration des ions chlorures dans les BAP. Le coefficient de diffusion obtenu pour le BAP de 0% de fines est égal à $6.26 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ alors qu'il est égal à $3.16 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ pour le BAP de 20% de fines (Figure 1.42). Cette diminution est presque linéaire pour tous les mélanges de BAP. Selon cette étude il a remarqué qu'une augmentation du taux de fines de 0 à 20% en masse dans le sable concassé provoque une diminution du coefficient de migration des chlorures de $3.12 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$.

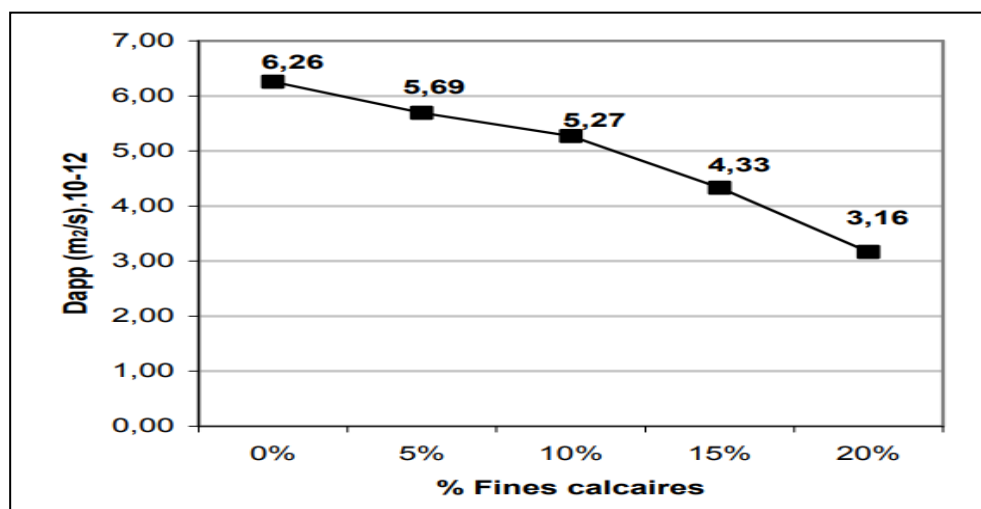


Figure 1.45 : Essai de migration des ions de chlorures [6].

1.6. Conclusion

La présente revue bibliographique, nous a permis de mettre en évidence la possibilité de l'utilisation des sables recyclés dans le mortier autoplaçant. On constate que les propriétés de granulats recyclés dépendent à l'origine de l'agrégat. Ces études ont montré que les granulats recyclés ont une surface rugueuse, une forme anguleuse, une faible densité, une porosité forte, d'absorption d'eau plus important en raison de l'ancien mortier cohérant à la surface et de faible résistance mécanique.

L'objectif principal de ce travail de recherche est d'étudier la rhéologie des mortiers autoplaçants à base de sable recyclé.

CHAPITRE II : MATERIAUX ET ESSAIS

2.1. Introduction

Ce chapitre présente les différentes caractéristiques des matériaux utilisés dans la formulation du mortier autoplaçant, ainsi que les essais expérimentaux réalisés au laboratoire de Géo matériaux et génie civil de l'universitaire de Blida1.

2.2. Caractéristiques des matériaux

Dans le cadre de cette étude, nous avons confectionné les MAP en se basant sur les matériaux locaux suivants :

2.2.1. Le ciment

Le ciment utilisé dans ce travail, est un ciment composé de type CEM II de classe A et de résistance 42,5 ; il provient de la cimenterie de L'AFARGE. Les caractéristiques chimiques et minéralogiques de ce ciment sont présentées dans le tableau 2.1.

Tableau 2. 1: Caractéristiques chimiques et minéralogiques du ciment [53]

Composition chimique (%)									
CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	PAF	Cl-
61,74	20,92	5,33	3,43	1,58	1,83	0,13	0,67	1,65	1,35
Composition minéralogique (%)									
C ₃ S		C ₂ S		C ₃ A		C ₄ AF			
61,50		16		7,25		11			

Les autres propriétés physico-mécaniques du ciment sont présentées dans le tableau 2.2.

Tableau 2. 2: Caractéristiques physico-mécaniques du ciment

Essai	CEM II/A 42.5
Masse volumique apparente (ρ_{app}) (kg/m^3)	1082
Masse volumique absolue (ρ_{abs}) (kg/m^3)	2750
Finesse SSB (cm^2/g)	3200
Temps de début de prise (heure, minute)	2h54
Temps de fin de prise (heure, minute)	4h56
Resistance à la compression (N/mm^2)	
2 jours	15,43
7 jours	33,98
28 jours	45,55

2.2.2. Le sable naturel

Nous avons utilisé un mélange de deux types de sables : le premier sable provenant de Baghlia (S1), est un sable roulé de forme arrondie et de surface lisse, avec un module finesse 3,67. Le deuxième provenant de Boughezoul (S2) de module de finesse 1.54. Le sable obtenu après la correction de 45% de S1 et 55% de S2, à un module de finesse de 2,63.

Les échantillons des différents types de sables représentés dans les figures suivantes :

**Figure 2. 1:** Sable corrigé de Baghlia et Boughezoul.

Les résultats des essais physiques et d'analyse granulométrique du sable corrigé sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau 2. 3: Caractéristiques physiques des granulats utilisés

Caractéristiques physiques des granulats	Sable	
	Naturel	Recyclé
	0/5	0/5
Masse volumique apparente (ρ_{app}) (kg/m ³)	1600	-
Masse volumique absolue (ρ_{abs}) (kg/m ³)	2520	-
Coefficient d'absorption (%)	1,25	-
Humidité (%)	-	-
Module de finesse	2,63	-
Équivalent de sable visuel (%)	93,96	-
Équivalent de sable au piston (%)	93,41	-

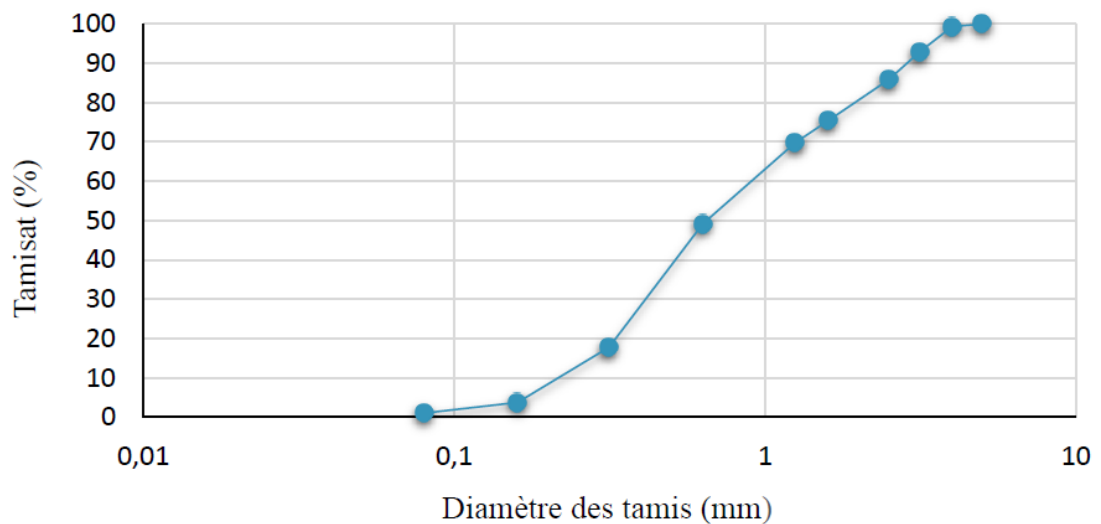


Figure 2. 2: Courbe granulométrique du sable corrigé.

2.2.3. Le sable recyclé

Pour obtenir du sable recyclé, une dalle de béton doit subir un concassage.

2.2.4. Eau de gâchage

L'eau de gâchage utilisée dans notre étude est une eau potable (eau du robinet) fourni au laboratoire de génie-civil à l'université de Blida.

2.2.5. L'adjuvant

L'adjuvant utilisé est un superplastifiant haut réducteur d'eau commercialisé sous le nom de « MEDAFLOW 30 » produit par la société Granitex. Il se caractérise par sa grande durée de rhéologie et de sa résistance à la ségrégation. Ces caractéristiques nous ont permis de réaliser tous les essais préconisés pour les MAP à l'état frais sans utiliser de retardateur de prise ou d'agent de viscosité, sa teneur en ions chlorures inférieure ou égale à 0,1%, et il possède entre 28,0 et 31,0 % d'extraits sec. Les propriétés de ce superplastifiant sont résumées dans le tableau 2.4.

Tableau 2.4: Caractéristique de l'adjuvant

Caractéristiques	
Forme	Liquide
Couleur	jaunâtre
PH	6 à 6,5
Densité	1,07 ± 0,01
Plage d'utilisation (%)	0,5 à 2,0

2.3. Formulation du mortier autoplaçant

Cette formulation été basée sur la méthode japonaise proposée par Okamora et al. [55] dite méthode générale.

Le but de cette formulation du mortier est d'optimiser le dosage en superplastifiant, en gardant les rapports S/M et E/C constants ($S/M = 0,50$ et $E/C = 0,40$) et faire varier le pourcentage du superplastifiant de 1 à 1,4% afin d'avoir un mortier autoplaçant satisfaisant ayant un diamètre d'étalement entre 270 mm et 330 mm et un temps d'écoulement doit être compris entre 2 à 10 sec [5]. Les quantités des constituants du mélange (ciment, sable, eau et superplastifiant) ont été calculées à l'aide du programme Excel donné à l'Annexe A.

La procédure du malaxage du mortier adopte est celle de Domone et Jin [59] qui s'articule sur les étapes suivantes (Figure 2.3) :

- Malaxer à sec le ciment et le sable pendant environ une (1) minute afin d'homogénéiser le mélange (on a utilisé un malaxeur à mortier de 5 litres de capacité).
- Malaxer pendant une minute avec la première quantité d'eau ($Eau1 = 70\% \text{ Eau}$).
- Malaxer pendant une minute avec le restant de l'eau de gâchage ($Eau2 = 30\% \text{ Eau}$) mélangé avec le superplastifiant.
- Malaxer le mélange pendant 3 minutes.

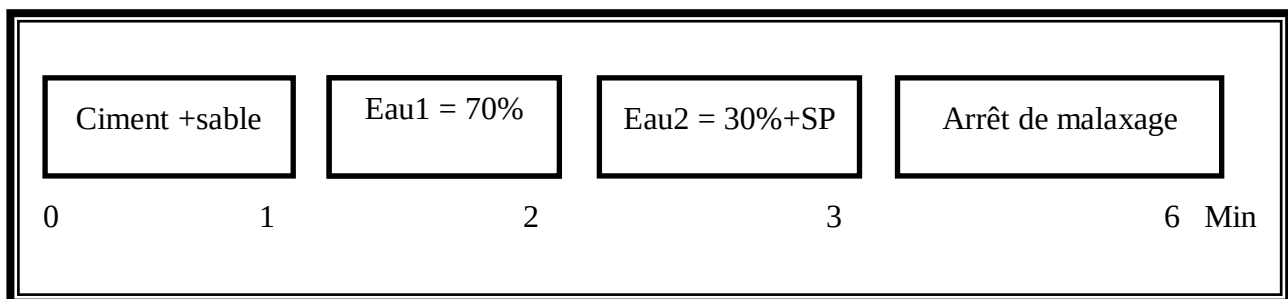


Figure 2. 3: Les séquences de malaxage du mortier [59].

2.4. Essais sur MAP à l'état frais

Les différents essais considérés dans cette étude sont effectués autant sur les MAP sont décrits ci-après.

2.4.1. Essai d'étalement au Mini-Cône

L'appareil se compose d'un moule tronconique creuse de 60 mm, de hauteur 70 mm et du bas 100 mm. L'essai d'étalement consiste à remplir le moule tronconique (mini cône) ; placé au centre d'une plaque horizontale en acier lisse, une fois le cône est soulevé le mortier s'écoule sur la plaque. Le dispositif de l'essai d'étalement est montré dans la figure 2.4. Le diamètre d'étalement du mortier est mesuré suivant deux directions perpendiculaires pour retenir la moyenne (D moyen). Le (D moyen) est calculé comme suit :

$$D = \frac{D1+D2}{2} \quad 2.1$$



Figure 2.4: Essai d'étalement pour mortier [56].

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

Dans cet essai on calcule le temps d'écoulement, ce temps d'écoulement est un critère utilisé pour définir la viscosité du mortier autoplaçant. L'essai de l'entonnoir en V consiste à remplir l'entonnoir de 1.1 litre de mortier, et un temps d'écoulement est calculé entre l'instant de l'ouverture de l'orifice de l'entonnoir et l'instant de l'apparition de la première lumière en regardant verticalement vers le bas de l'entonnoir (Figure 2.5).

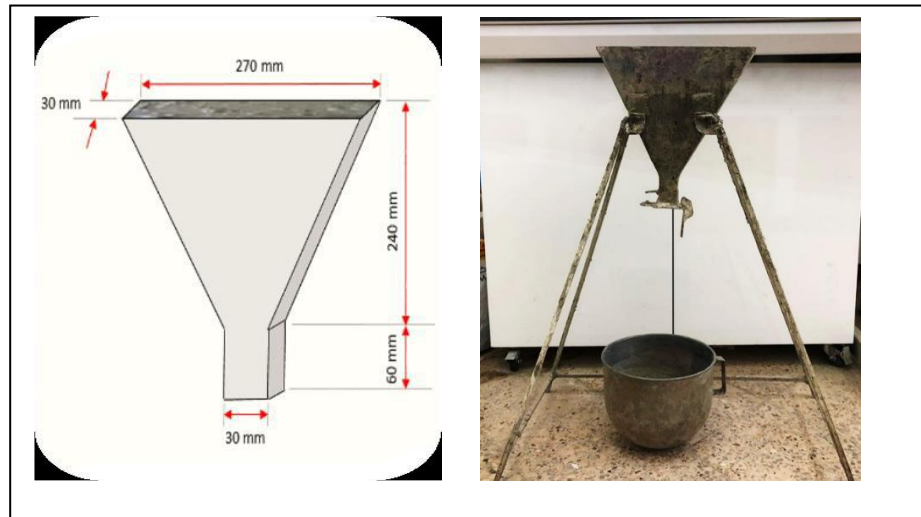


Figure 2. 5: Essai à l'entonnoir en V pour mortier [56].

2.4.3. Essai au cône de Marsh

Cette méthode est utilisée depuis longtemps par l'industrie pétrolière pour mesurer la fluidité des coulis de ciment ou de bentonite. C'est pourquoi cette technique est adoptée pour la mesure de la fluidité. Le principe de l'essai consiste à mesurer le temps qu'il faut pour vider un cône contenant un volume donné de pâte à travers un orifice d'évacuation de 5 mm de diamètre. Le cône de Marsh doit être solidement fixé pour ne pas être déplacé par les vibrations et sa partie supérieure doit être horizontale.



Figure 2. 6: Essais au Cône de Marsh [56].

2.4.4. Essais au rhéomètre

La rhéologie est l'étude du changement de la forme et de l'écoulement d'une mixture. Elle donne une meilleure définition des propriétés d'écoulement des matériaux cimentaires et fournit les grandeurs rhéologiques fondamentales (seuil d'écoulement, viscosité plastique) qui permettent de tracer des courbes d'écoulement caractéristiques des différents types de mélanges [57].

Le rhéomètre utilisé dans notre cas d'étude est un rhéomètre rotatif Heidolph- RZR 2102 Control Z. Ce rhéomètre est composé d'un agitateur avec deux vitesses de rotation, un croisillon composé de deux plaques perpendiculaires de dimensions $5 \times 10 \text{ cm}^2$, et d'un récipient cylindrique de dimension $10 \times 13 \text{ cm}^2$. Le fonctionnement de ce rhéomètre est assisté par un logiciel avec un système d'acquisition des données qui sont exportées vers une feuille de calcul Excel. La figure 2.7 récapitule le fonctionnement de ce rhéomètre avec un système d'acquisition des données sur ordinateur.

Le principe consiste à mettre en rotation à différentes vitesses, un cylindre ou une pale dans un échantillon cylindrique de MAP frais et de mesurer le couple appliqué. L'utilisation d'une pale a été préférée à celle d'un cylindre où son insertion dans l'échantillon crée une perturbation minimale par rapport à l'insertion d'un cylindre [58].

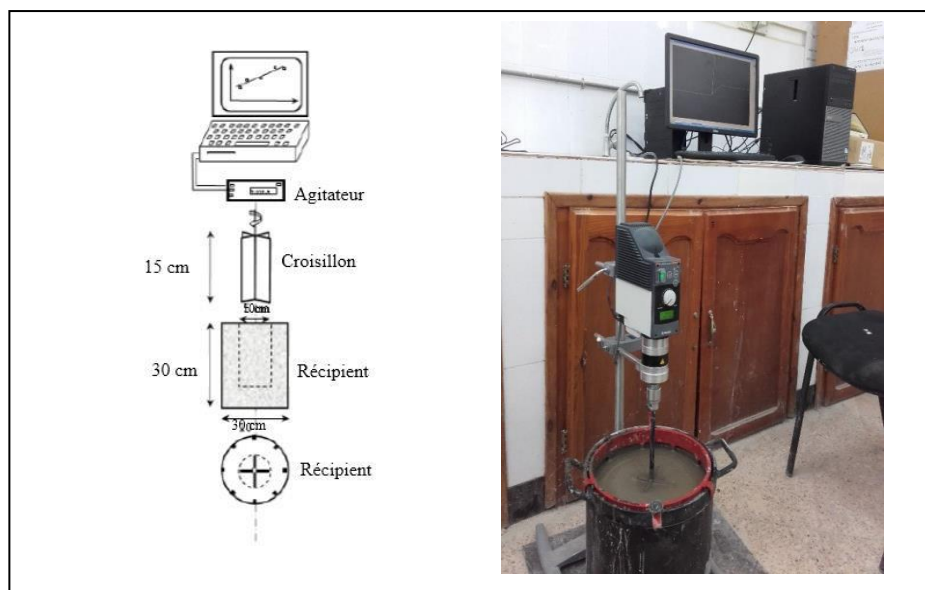


Figure 2.7: Essai au rhéomètre pour mortier [56].

Le profil de vitesse utilisé est choisi sur la base d'une série d'essai qui consiste à trouver le profil de vitesse permettant d'avoir les mesures les plus stables en minimisant le phénomène de ségrégation [58]. Ce dernier doit avoir suffisamment de points pour pouvoir bien caractériser le comportement du mortier. Les paliers de vitesse imposés doivent être espacés pour bien distinguer les différentes paires (Ω , M). La figure 2.8 illustre le profil choisi pour le déroulement des essais.

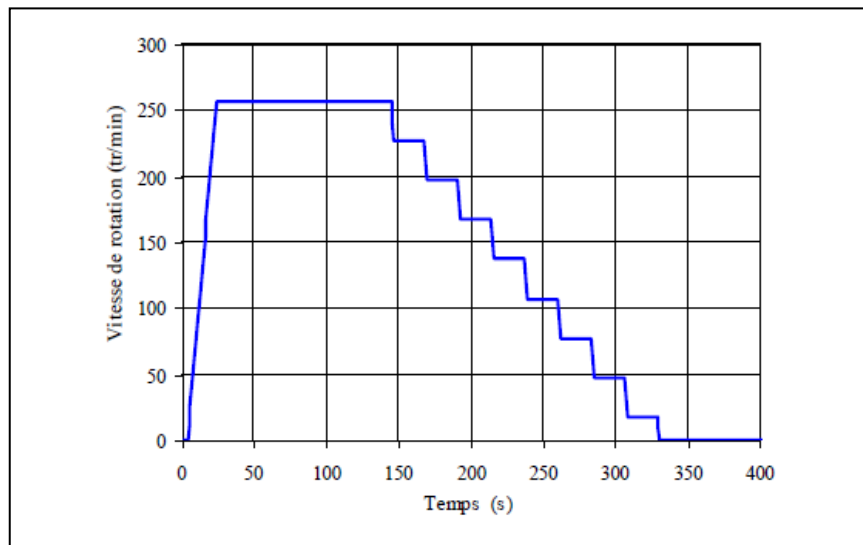


Figure 2. 8: Profil de vitesse [58].

2.5. Confection et conservation des éprouvettes

Le principe de la formulation est de confectionner le MAP sur des éprouvettes prismatiques de (4x4x16 cm³).

Nous avons pesé l'eau, le ciment et le sable, ensuite nous avons mis l'eau et le ciment dans le bol du malaxeur que nous avons mis en route pendant 30 sec à une vitesse lente, après nous avons rajouté le sable et relancé le malaxage pendant 30 sec à la vitesse lente puis pendant 60 sec à la vitesse rapide. Une fois le mélange est terminé, nous avons appliqué une couche de l'huile puis on a introduit la moitié du mortier dans les trois parties du moule, enfin nous avons introduit le reste de mortier dans le moule.

Les éprouvettes ont été couvertes par un film plastique et stockées dans les conditions ambiantes du laboratoire. Après 24 heures, les échantillons ont été démoulés et conditionnés dans des bacs remplis d'eau saturé en chaux à une température de $20\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ pour assurer une cure normalisé jusqu'à la date d'essai [56].



Figure 2. 9 : Confection des éprouvettes (4x4x16) cm³ [56].

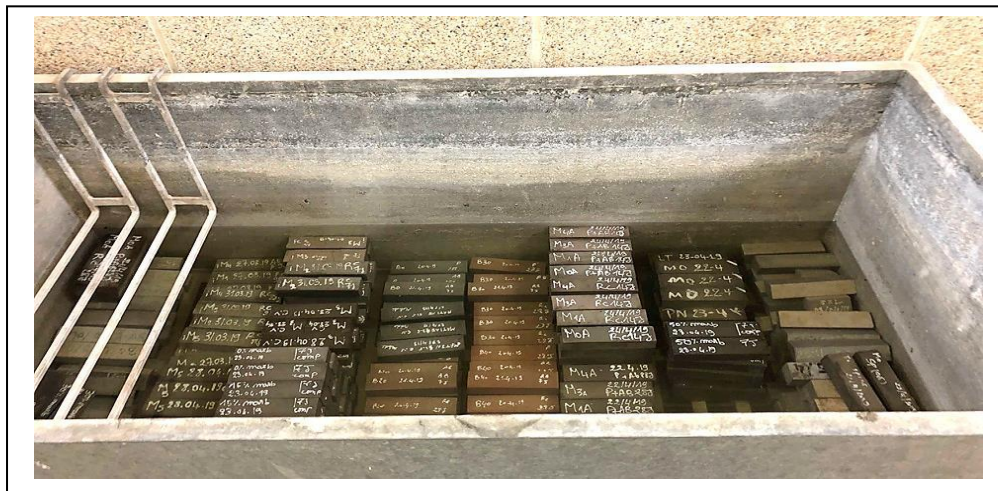


Figure 2. 10: Bac d'eau pour la conservation des éprouvettes [56].

2.6. Essais sur MAP à l'état durci

2.6.1. Résistance à la traction par flexion

L'essai de flexion permet également de mesurer la résistance à la rupture du mortier. Les essais sont effectués selon la norme NF EN 196-1 [59]. Une éprouvette prismatique de dimensions (4x4x16cm) est placée sur deux appuis et l'on applique au centre de l'éprouvette une force croissante jusqu'à rupture. La résistance à la traction par flexion sera déduite par la formule suivante :

$$R_t = \frac{1.5 PL}{a^3} \quad 2.2$$

Avec :

R_t : Résistance à la traction par flexion en MPa.

P : Charge de rupture en MN.

L : distance entre appuis 100 (mm).

a : Côté de l'éprouvette 40(mm³).



Figure 2. 11 : Essai de Traction par flexion sur MAP [56].

2.6.2. Résistance à la compression

La résistance à la compression (R_c) est déterminée selon la norme EN 196-1 [59]. Les demis prismes obtenue à partir de l'essai de traction par flexion de l'éprouvette (4x4x16) est placée entre les deux plateaux de presse. Les faces de l'éprouvette qui sont au contact de la presse doivent être planes et perpendiculaire à l'axe de l'éprouvette.

La résistance à la compression du mortier se calcule par la formule suivante :

$$R_c = \frac{P}{S} \quad 2.3$$

Avec :

R_c : Résistance à la compression en MPa.

P : Charge de rupture en MN.

S : Section de l'éprouvette en m^2 ($S=16.10^{-4}m^2$).

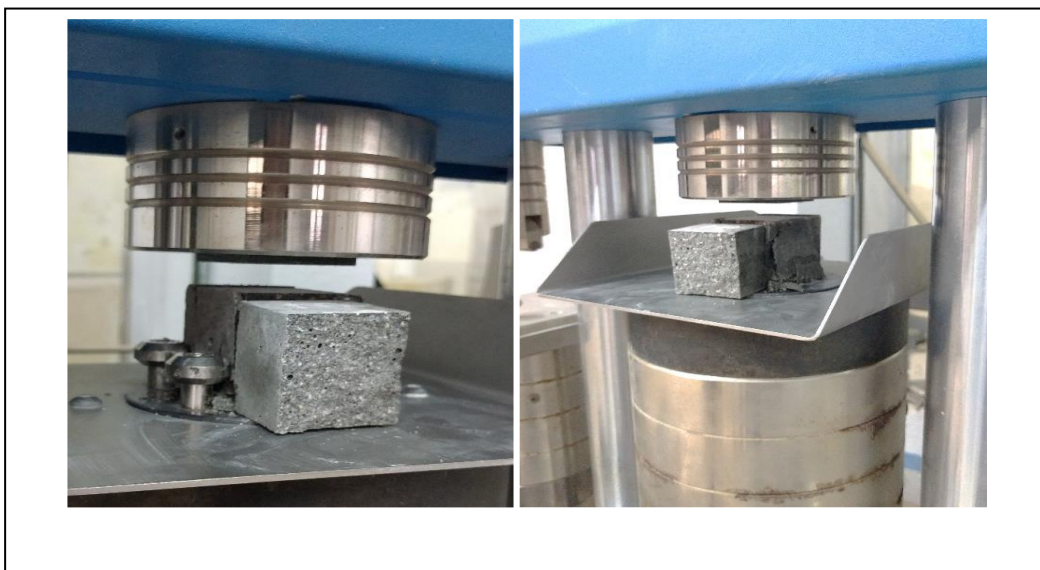


Figure 2. 12 : Essai de compression sur les MAP [56].

2.6.3. Essais de durabilité

2.6.3.1. Absorption capillaire

L'essai de l'absorption capillaire est effectué selon les recommandations de la procédure d'ASTM [60] sur des éprouvettes prismatiques (4x4x16 cm³), conservées dans une étuve à 105°C, jusqu'à ce que la variation de la masse entre deux pesées soit inférieure à 0,1%.

Une hauteur de 1 cm de la surface latérale des éprouvette a été enduite par de la résine, pour permettre une pénétration d'eau unidirectionnelle.

L'échantillon est placé sur deux appuis collés sur le fond d'un bac rempli d'eau jusqu'à une hauteur de 2± mm à partir de la base de l'éprouvette. La variation de la pesée des éprouvettes est effectuée après les avoir essuyées à l'aide d'une peau de chamois humide pour enlever les gouttes d'eau de la surface.

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

$$I = \frac{Q}{A \cdot \gamma \omega} \quad 2.4$$

On a trace la courbe $I = f(\sqrt{t})$ en fonction de la racine carrée du temps, en suite on a calculé S qui est l'angle de la pente du courbe $I = f(\sqrt{t})$

I : coefficient d'absorption (cm),

Q : quantité d'eau absorbé en (g),

A : surface en contact avec l'eau (cm²),

$\gamma \omega$: masse volumique d'eau = 1g/cm³

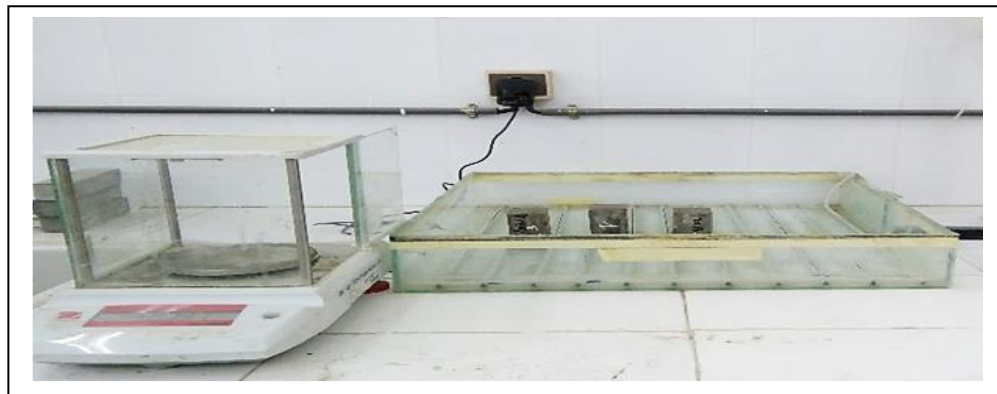


Figure 2. 13 : Essai d'absorption capillaire [56].

2.6.3.2. La porosité accessible à l'eau

La porosité accessible à l'eau est effectuée selon la norme NF P-18-459 [60] . Il s'agit de la détermination par pesées de la masse apparente d'un échantillon du mortier après immersion dans l'eau avec lequel il a été saturé sous vide.

Pour déterminer la masse sèche, les éprouvettes ont été séchées dans une étuve à une température de $105 \pm 0,1^\circ\text{C}$ jusqu'à ce que deux pesées successives, avant et après 24 heures à l'étuve ne dépassent pas 0,1%, puis on mesure la masse M_{sec} de l'éprouvette sur une balance au centième de gramme près. L'échantillon est placé dans une enceinte fermée (dessiccateur), sous une pression contrôlée pendant 24 heures. En introduisant l'eau progressivement jusqu'à remplissage ensuite le corps en mortier soit recouvert d'environ 20mm d'eau. On déconnecte la pompe en fin l'échantillon est maintenu dans la saturation pendant $18 \pm 2\text{h}$, les éprouvettes ont été sorties du récipient et pesées dans l'eau et dans l'air avec une balance hydrostatique pour déterminer respectivement M_{eau} pour M_{air} .

La porosité accessible à l'eau est exprimée en pourcentage en volume, est donnée par l'équation suivante :

$$Q_{\phi} = \frac{M_{\text{air}} - M_{\text{sec}}}{M_{\text{air}} - M_{\text{eau}}} \quad 2.5$$

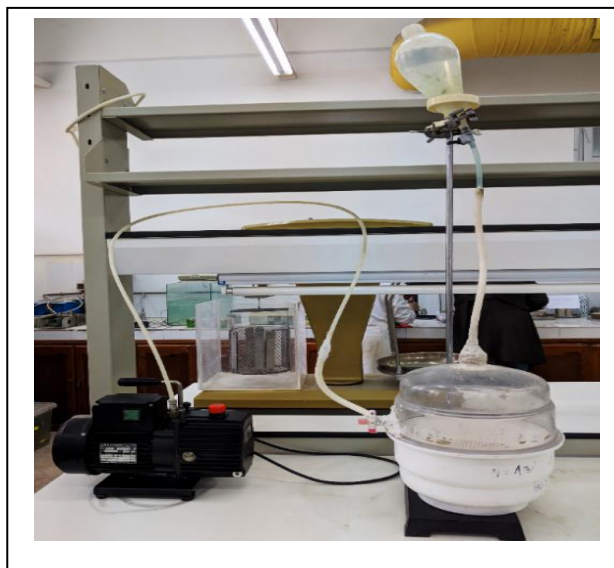


Figure 2. 14 : Essai de porosité accessible à l'eau [56]

PROGRAMME EXPÉRIMENTAL

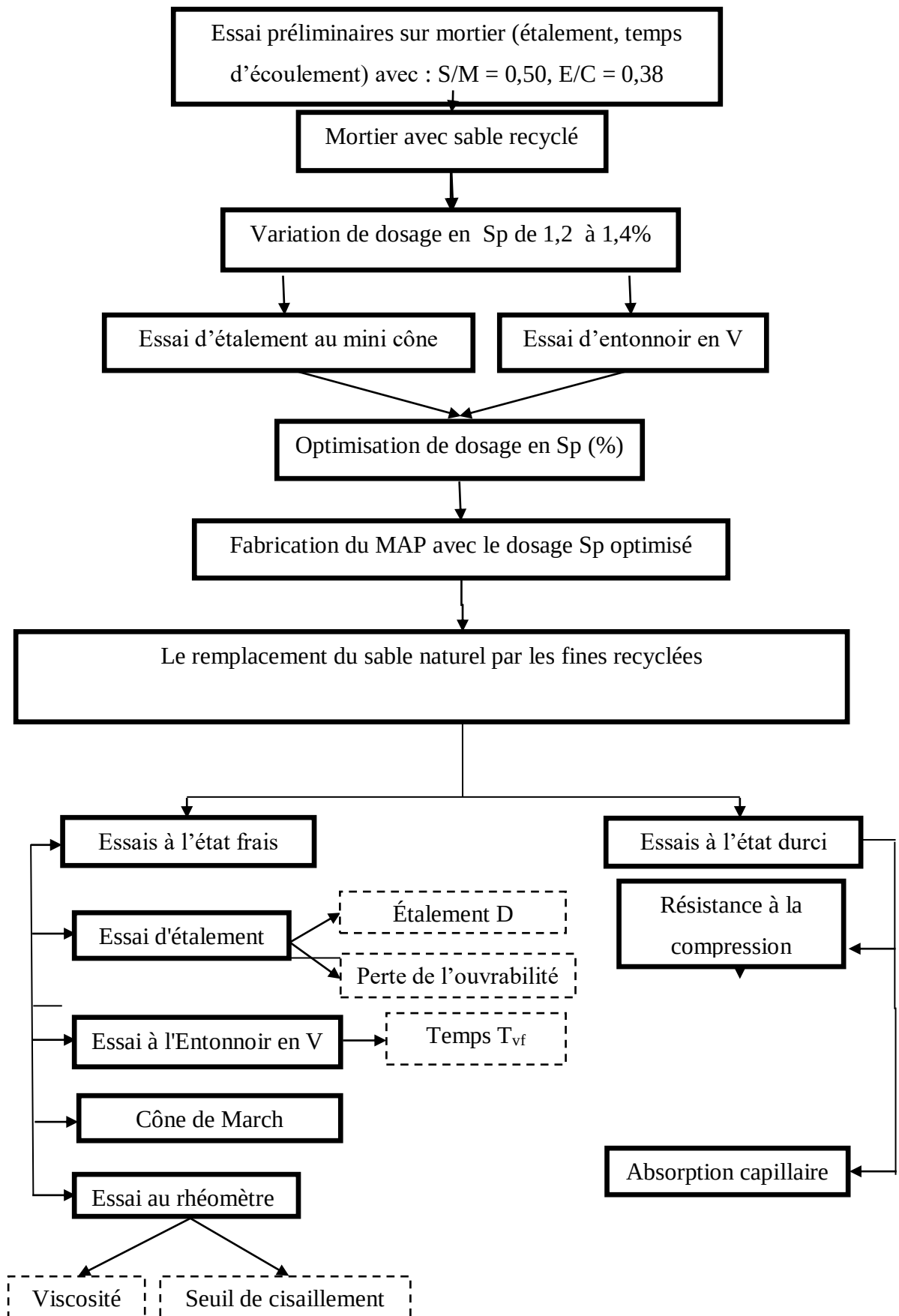


Figure 2. 15 : Organigramme de la procédure

CONCLUSION GENERALE

Les agrégats sont une constituante fondamentale dans l'industrie de la construction résidentielle et des travaux publics. La consommation d'agrégats est particulièrement importante dans les grands travaux publics, les infrastructures et les réseaux de toute sorte. Parce qu'ils sont à ce point indispensable à l'économie nationale. Par conséquent, il est nécessaire de connaître les propriétés de ces agrégats avant l'utilisation.

L'objectif de ce travail était d'analyser l'effet de granulats recyclés sur les caractéristiques rhéologique, les performances mécaniques et la durabilité du MAP. Afin de pouvoir l'établir, le sable recyclé a été remplacé par le sable naturels.

Les principales conclusions que nous avons pu tirer de la recherche bibliographique peuvent être résumées comme suit :

- Les granulats recyclés ayant une faible densité et pourcentage d'absorption élevé en comparaison aux granulats naturels, ceci est dû à la présence de pâte de ciment collée aux granulats.
- Les propriétés de granulats recyclés dépendent à l'origine de l'agrégat.
- Le coefficient d'absorption et la porosité des granulats recyclés sont supérieurs à ceux des granulats naturels.
- La présence des ajouts minéraux dans le mortier autoplaçant à base de sables recyclés avec le superplastifiant influe de façon significative les propriétés physiques et mécaniques de ces derniers.
- L'incorporation de gravillons recyclés, quel qu'en soit le taux a relativement peu d'influence sur la maniabilité et le comportement rhéologique contrairement au sable naturels.

- À l'état frais quand le taux de substitution du sable recyclé augmente la densité du mortier diminue et la teneur en air augmente.
- Par rapport au béton naturel le béton à base de SR présente un retrait plus élevée.
- Le mortier à base de sable concassé présente des valeurs de viscosité et de limite d'élasticité élevée par rapport au mortier à base de sable naturel.
- L'absorption capillaire des mortiers à base des SR est élevée que les mortiers à base des granulats de SN.
- Un taux de 20% de fines dans le sable peut diminuer la porosité de BAP de 1.81%.
- Plus le SN est remplacé, plus la porosité augmente, en raison de la présence d'une plus grande teneur en pâte ancienne.
- Une diminution de la résistance mécanique est observée lors de l'emploi de sable recycle a cause de ses mauvaises caractéristiques intrinsèques ; cette diminution augmente avec le taux de substitution.
- La pénétration des agents agressifs pourrait être facilitée par un volume ouvert important et une grande inter-connectivité du réseau poreux du matériau incorporant du sable recycle.
- Une diminution de la résistance mécanique est observée lors de l'emploi de sable recycle a cause de ses mauvaises caractéristiques intrinsèques.

Références

- [1] B. Layachi, A. Nourredine, and M. Laurent, “Contribution à l’ étude des indicateurs de durabilité des bétons à base des granulats recyclés,” pp. 1–8, 2015.
- [2] A.Debbih, “performances de béton autoplaçant à base de granulats recyclés,” no. Mémoire de magister de l’université de Blida1, p. 167, 2012.
- [3] R.Hadjieva Zaharieva, “Durabilité des bétons à base de granulats recyclés,” no. thèse de doctorat, p. 165, 1998.
- [4] R. Trauchessec, A. Lecomte, B. A. Z, and I. J. L. Nancy, “Thème 6 Méthode de dosage du sable de béton recyclé dans un mélange avec du sable naturel Auteur (s) :,” pp. 1–37, 2017.
- [5] S. Santos, P. R. Silva, and J. De Brito, “Self-compacting concrete with recycled aggregates – A literature review,” *J. Build. Eng.*, vol. 22, no. August 2018, pp. 349–371, 2019, doi: 10.1016/j.job.2019.01.001.
- [6] B. Smain, S. Kamali-Bernard, K. Said, and M. Belkacem, “Etude de la résistance, la porosité, et migration des ions chlorures des BAP à base de sable de concassage,” *MATEC Web Conf.*, vol. 149, 2018, doi: 10.1051/mateconf/201714901093.
- [7] F. Debieb and S. Kenai, “Performances et durabilité du béton à base de granulats recyclés contaminés par les chlorures et les sulfates,” 2007.
- [8] T.H.Douara, M.Benhouna, and B.Nezergui, “Caractéristiques physiques et chimiques des granulats recyclés et des granulats naturels,” no. SBEIDCO – 1st International Conférence of SustainableBuiltEnvironment Infrastructure in Developing Countries ENSET Oran (Algeria), pp. 289–294, 2009.
- [9] Z. J. Grdic, G. A. Toplicic-curcic, I. M. Despotovic, and N. S. Ristic, “Properties of self-compacting concrete prepared with coarse recycled concrete aggregate,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 24, no. 7, pp. 1129–1133, 2010, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2009.12.029.
- [10] K. Pin, W. Ashraf, and Y. Cao, “Resources , Conservation & Recycling Properties of recycled concrete aggregate and their in fl uence in new concrete production,” *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 133, no. February, pp. 30–49, 2018, doi: 10.1016/j.resconrec.2018.02.005.
- [11] B.El hadj, “Durabilité des bétons à base du sable de démolition et ajouts minéraux actifs,” no. Thèse de doctorat de l’univesité de Biskra, p. 183, 2019.
- [12] D. Carro-López, B. González-Fontebo, J. De Brito, F. Martínez-Abella, I.

- González-Taboada, and P. Silva, "Study of the rheology of self-compacting concrete with fine recycled concrete aggregates," *Constr. Build. Mater.*, vol. 96, pp. 491–501, 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.08.091.
- [13] O.Kouider Djeloul, "Performance structurale d'un béton autoplaçant à base de granulats recycles et laitier," no. Thèse de doctorat de l'université de Blida1, p. 200, 2018.
- [14] Z. E. A. Tahar, E. H. Kadri, T. T. Ngo, A. Bouvet, and A. Kaci, "Influence of recycled sand and gravel on the rheological and mechanical characteristic of concrete," *J. Adhes. Sci. Technol.*, vol. 30, no. 4, pp. 392–411, 2016, doi: 10.1080/01694243.2015.1101185.
- [15] K.Haddad, "Les BAP à base de granulats de béton de démolition Résistances et approche de la durabilité," no. Mémoire de master de l'université de Tizi-Ouzou, p. 110, 2012.
- [16] S.P.Jiang and J.Grandet, "Evolution comparée des porosités des mortiers de ciment au laitier et des mortiers de ciment portland," vol. 19, 1989, pp. 487–495.
- [17] N.Belmokhtar and A.Zeraig, "Effet du mode d'introduction de la nano-silice sur les propriétés rhéologiques et physicomécaniques des pâtes cimentaires et mortiers de ciment," no. Mémoire de master de l'université de Boumerdes, p. 78, 2017.
- [18] A. K. Padmini, K. Ramamurthy, and M. S. Mathews, "Influence of parent concrete on the properties of recycled aggregate concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 23, no. 2, pp. 829–836, 2009, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2008.03.006.
- [19] F. Rodrigues, M. T. Carvalho, L. Evangelista, and J. De Brito, "Physical-chemical and mineralogical characterization of fine aggregates from construction and demolition waste recycling plants," *J. Clean. Prod.*, vol. 52, pp. 438–445, 2013, doi: 10.1016/j.jclepro.2013.02.023.
- [20] N.Bourmatte, "Granulats recyclés de substitution pour béton hydraulique," no. Thèse de doctorat de l'université de Constantine, p. 176, 2017.
- [21] H. Al Ajmani, F. Suleiman, I. Abuzayed, and A. Tamimi, "Evaluation of concrete strength made with recycled aggregate," *Buildings*, vol. 9, no. 3, pp. 1–14, 2019, doi: 10.3390/buildings9030056.
- [22] Z. Zhao, S. Rémond, D. Damidot, and L. Courard, "Une nouvelle méthode de caractérisation des granulats recuclés industriels : application aux mortiers.," vol. d, no. November, pp. 1–12, 2015.
- [23] M. E. K. Bouarroudj *et al.*, "Utilisation du béton recyclé dans la formulation des

- bétons auto- compactants,” *18e édition des Journées Sci. du Regroupement Francoph. pour la Rech. la Form. sur le Bét.*, no. July, pp. 1–10, 2017.
- [24] T. LE, “Influence de l’humidité des granulats de béton recyclé sur le comportement à l’état frais et durcissant des mortiers,” vol. 072, no. Lille I, p. 176, 2015.
- [25] T.H.Douara, M.Benhouna, and B.Nezergui, “Caractéristiques physiques et chimiques des granulats recyclés et des granulats naturels,” no. SBEIDCO – 1st International Conference of SustainableBuiltEnvironment Infrastructure in Developing Countries ENSET, pp. 289–294, 2009.
- [26] A. Cheng, R. Huang, J. K. Wu, and C. H. Chen, “Influence of GGBS on durability and corrosion behavior of reinforced concrete,” *Mater. Chem. Phys.*, vol. 93, no. 2–3, pp. 404–411, 2005, doi: 10.1016/j.matchemphys.2005.03.043.
- [27] J. B. L Berredjem, Nourredine Arabi, L. Molez, “Influence of recycled sand containing fillers on the rheological and mechanical properties of masonry mortars,” *J. Mater. Environ. Sci.*, vol. 9, no. 4, pp. 1255–1265, 2018, doi: 10.26872/jmes.2017.9.4.137.
- [28] M.Benhouna;A. Lasledj; B.Nezergui., “Valorisation des granulats de demolition dans un beton autoplaçant,” vol. 17, no. July, pp. 12–24, 2016.
- [29] S.C.kou ;C.S. Poon., “Properties of self-compacting concrete prepared with coarse and fine recycled concrete aggregates,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 31, no. 9, pp. 622–627, 2009, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2009.06.005.
- [30] H. Y. Wang and C. C. Lin, “A study of fresh and engineering properties of self-compacting high slag concrete (SCHSC),” *Constr. Build. Mater.*, vol. 42, pp. 132–136, 2013, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.11.020.
- [31] M. Uysal and K. Yilmaz, “Effect of mineral admixtures on properties of self-compacting concrete,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 33, no. 7, pp. 771–776, 2011, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2011.04.005.
- [32] Sandrine Braymand, Pierre François, Françoise Feugeas, and Christophe Fond, “Rheological Properties of Recycled Aggregate Concrete Using Superplasticizers,” *J. Civ. Eng. Archit.*, vol. 9, no. 5, 2015, doi: 10.17265/1934-7359/2015.05.011.
- [33] I. González-Taboada, B. González-Fonteboa, F. Martínez-Abella, and S. Seara-Paz, “Analysis of rheological behaviour of self-compacting concrete made with recycled aggregates,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 157, pp. 18–25, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.09.076.
- [34] B. Aïssoun, K. Khayat, and J. L. Gallias, “Variations of sorptivity with rheological

- properties of concrete cover in self-consolidating concrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 113, pp. 113–120, 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.03.006.
- [35] S. Safiddine, F. Debieb, E. H. Kadri, B. Menadi, and H. Soualhi, “Effect of Crushed Sand and Limestone Crushed Sand Dust on the Rheology of Cement Mortar,” *Appl. Rheol.*, vol. 27, no. February 2018, pp. 1–9, 2017, doi: 10.3933/ApplRheol-27-14490.
- [36] N. NGUYEN Vu, “valorisation de fines et granulats issus de bétons recyclés comme matériaux cimentaires,” no. Thèse de doctorat de l’université de Toulouse, p. 252, 2016.
- [37] K. R. Ñ, “Mechanical properties of concrete with recycled coarse aggregate,” vol. 42, pp. 407–415, 2007, doi: 10.1016/j.buildenv.2005.07.033.
- [38] S. C. Kou, C. S. Poon, and M. Etxeberria, “Influence of recycled aggregates on long term mechanical properties and pore size distribution of concrete,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 33, no. 2, pp. 286–291, 2011, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2010.10.003.
- [39] B. Vincent, “Valorisation des matériaux granulaires recyclés dans le béton de ciment pour usage résidentiel,” no. Mémoire de maîtrise de l’université de Sherbrooke (Québec) Canada, p. 133, 2014.
- [40] A. Rao, K. N. Jha, and S. Misra, “Use of aggregates from recycled construction and demolition waste in concrete,” vol. 50, pp. 71–81, 2007, doi: 10.1016/j.resconrec.2006.05.010.
- [41] C. Parra, M. Valcuende, and F. Gómez, “Splitting tensile strength and modulus of elasticity of self-compacting concrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 25, no. 1, pp. 201–207, 2011, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2010.06.037.
- [42] B.K. Van and D. Montgomery, “Dryingshrinkage of self compacting concrete containing milled limes tone,” no. ”, Proceedings of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 7), Stockholm, sweden, pp. 227–238, 1999.
- [43] J.M. Khatib, “Performance of self compacting concrete containing flyash,” vol. 22, no. Construction and Building Materials, 2008.
- [44] E. Rozière, S. Granger, P. Turcry, and A. Loukili, “Influence of past volume on shrinkage cracking and fracture properties of self compacting concrete,” vol. 29, no. Cement and Concrete Composite, pp. 626–636, 2007.
- [45] W. Laifa, “Contribution à l’étude des effets du laitier cristallisé et diss sur les

- propriétés des bétons autoplaçant,” no. thèse de doctorat, University de Badji mokhtar annaba, pp. 1–163, 2015.
- [46] R. Zaharieva, F. Buyle-Bodin, F. Skoczylas, and E. Wirquin, “Assessment of the surface permeation properties of recycled aggregate concrete,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 25, no. 2, pp. 223–232, 2003, doi: 10.1016/S0958-9465(02)00010-0.
 - [47] M. Braga, J. De Brito, and R. Veiga, “Incorporation of fine concrete aggregates in mortars,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 36, pp. 960–968, 2012, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.06.031.
 - [48] L. A. Pereira-De-Oliveira, M. C. S. Nepomuceno, J. P. Castro-Gomes, and M. F. C. Vila, “Permeability properties of self-Compacting concrete with coarse recycled aggregates,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 51, pp. 113–120, 2014, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.10.061.
 - [49] L. Evangelista, M. Guedes, J. De Brito, A. C. Ferro, and M. F. Pereira, “Physical , chemical and mineralogical properties of fine recycled aggregates made from concrete waste,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 86, pp. 178–188, 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.03.112.
 - [50] L. Evangelista and J. de Brito, “Durability performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 32, no. 1, pp. 9–14, 2010, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2009.09.005.
 - [51] M. T. Le, C. Tribout, and G. Escadeillas, “Durability of mortars with leftover recycled sand,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 215, pp. 391–400, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.04.179.
 - [52] M. Tuyan, A. Mardani-Aghabaglou, and K. Ramyar, “Freeze-thaw resistance, mechanical and transport properties of self-consolidating concrete incorporating coarse recycled concrete aggregate,” *Mater. Des.*, vol. 53, pp. 983–991, 2014, doi: 10.1016/j.matdes.2013.07.100.
 - [53] D. O. Kouider, “Performance structurale d’un béton autoplaçant à base de granulats recycles et laitier,” no. these de doctorat, universite blida 1, pp. 1–200, 2018.
 - [54] A. Debbih, “performances de béton autoplaçant à base de granulats recyclés,” no. Memoire de master, Universite de Blida1, 2012.
 - [55] H. Okamura and M. Ouchi, “Self-Compacting Concrete,” vol. 1, no. 1, pp. 5–15, 2003.
 - [56] Bouteldja Ines., “Rhéologie et performances des mortiers autoplaçants a base des ciments binaires et ternaires,” no. Mémoire de master de l’université de Blida 1,

2019.

- [57] G. Couarraze, “Initiation à la rhéologie Bases théoriques et applications expérimentales,” *Tec& Doc*, pp. 1–20, 2000.
- [58] H. Soualhi, E. H. Kadri, T. T. Ngo, A. Bouvet, F. Cussigh, and S. Kenai, “A vane rheometer for fresh mortar: Development and validation,” *Appl. Rheol.*, vol. 24, no. 2, pp. 1–7, 2014, doi: 10.3933/ApplRheol-24-22594.
- [59] AFNOR, “NF EN 196-1 : Méthodes d’essais des ciments,” no. P 15-471, pp. 1–27, 1995.
- [60] R. E. C. O. M. M. A. N. D. A. T. I. O. N. D. E. L. A. Rilem, “CPC 11.3. Absorption d’eau par immersion sous vide,” *Matériaux Constr.*, vol. 17, no. 5, pp. 391–394, 1984, doi: 10.1007/BF02478713.
- [61] [Encyclopédie Universalis]
- [62] Poitou A., Racineux G., A squeezing experiment showing binder migration in concentrated suspension, *J. Rheol.*, 2001.
- [63] De larrard F., Belloc A., L’influence du granulat sur la résistance à la compression des bétons", *Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées* – 219 – REF, janvier –février 1999.
- [64] Adjoudj M., Effet des additions minérales et organiques sur le comportement rhéologique du béton, Thèse en cotutelle, université de Cergy-Pontoise (France) et université Hassiba Ben Bouali De Chlef (Algérie), 2015.
- [65] Riali A., effet de la nature du ciment sur la rhéologie des mortiers auto-plaçants, mémoire de master de l’université de Blida 1, juillet 2018.

Annexe A

Exemple de calcul de la composition du mortier

A.1 Les Données

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

Les masses volumiques absolues des constituants :

- Ciment : $\rho_C = 2750$ kg/m³
- Sable : $\rho_S = 2520$ kg/m³
- Superplastifiant : $\rho_{Sp} = 1070$ kg/m³
- Eau : $\rho_E = 1000$ kg/m³

Coefficient d'absorption du sable $Ab = 1,25\%$

On fixe le rapport Sable/Mortier $S/M = 0,50$ (par volume)

On fixe le rapport (par poids) $E/C = 0,4$ ou (par volume 1,22)

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

A.2 Calcul d'humidité du sable

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

$$\mu S = \frac{M1 - M2}{M2} \times 100$$

$$\mu S = \frac{300 - 295}{295} \times 100$$

$$\mu S = 1,69$$

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

$$\text{Correction} = \mu S - Ab$$

$$\text{Correction} = 1,69 - 1,25$$

$$\text{Correction} = 0,44$$

A.3 Calcul des quantités de chaque constituant

A.3.1 Le ciment

Le pourcentage en volume du ciment C%:

$$\%Cvol = \frac{(1-S/M)}{(1+E/Cparvolume)} \times 100$$

$$\%Cvol = \frac{(1-0,5)}{(1+1,22)} \times 100$$

$$\%Cvol = 40,98$$

La quantité de ciment C en kg:

$$C(kg) = \frac{V \times E/Cparvolume}{100} \times \rho c$$

$$C(kg) = \frac{1,31 \times 1,22}{100} \times 2750$$

$$C(kg) = 44,29 \text{ kg}$$

A.3.2 Le Sable

La quantité du sable en kg est S :

$$S(kg) = \left(1 + \frac{\text{correction}}{100}\right) \times \left(\frac{V \times \frac{S}{M} \times \rho s}{100}\right)$$

$$S(kg) = \left(1 + \frac{0,44}{100}\right) \times \left(\frac{1,31 \times 0,5 \times 2520}{100}\right)$$

$$S(kg) = 16,58 \text{ kg}$$

A.3.3 Le superplastifiant

La quantité du superplastifiant est Sp :

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

B.3.4. L'eau

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

Le pourcentage d'eau en volume : %Evol

$$\%Evol = \frac{\left(1 - \frac{S}{M}\right) \times 100 \times E / C_{parvolume}}{\left(1 + \frac{E}{C_{parvolume}}\right)}$$

$$\%Evol = \frac{(1 - 0,5) \times 100 \times 1,22}{(1 + 1,22)}$$

$$\%Evol = 27,48$$

La quantité d'eau globale E en litre :

$$E = \left(\frac{V \times \%Evol}{100} \times \frac{\rho E}{1000}\right) - \left(\frac{Sp \times 70}{100}\right) - \left(\frac{V \times S / M \times \rho s}{100} \times \frac{correction}{100}\right)$$

$$E = \left(\frac{1,31 \times 27,48}{100} \times \frac{1000}{1000}\right) - \left(\frac{Sp \times 70}{100}\right) - \left(\frac{1,31 \times 0,5 \times 2550}{100} \times \frac{0,44}{100}\right)$$

- **Eau1**

- $E_1 = E \times 0,70$

- **Eau2**

- $E_2 = E \times 0,3$